

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

CLAUDIA REGINA UNISESKY

PROPOSTA DE FORMULAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO BBD<sub>r</sub> E  
BBTM

Joinville

2018

CLAUDIA REGINA UNISESKY

PROPOSTA DE FORMULAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO BBDr E  
BBTM

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

Orientador: Prof. Dr. Breno Salgado Barra.

Joinville

2018

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

Unisesky, Claudia Regina  
Proposta de formulação de misturas asfálticas do tipo  
BBDr e BBTM / Claudia Regina Unisesky ; orientador, Breno  
Salgado Barra, 2018.  
76 p.

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

Inclui referências.

1. Engenharia de Infraestrutura. 2. Misturas  
Asfálticas. 3. Pavimentos Drenantes. 4. Granulometria. 5.  
BBDr e BBTM. I. Barra, Breno Salgado . II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de  
Infraestrutura. III. Título.

PROPOSTA DE FORMULAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DO TIPO BBDr E  
BBTM

CLAUDIA REGINA UNISESKY

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.

Joinville, 06 de Julho de 2018.

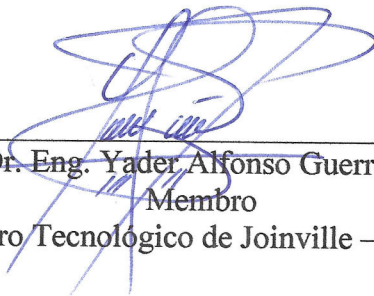


Prof.<sup>a</sup>. Me. Eng. Valéria Bennack  
Centro Tecnológico de Joinville - UFSC  
Coordenadora do Curso de Engenharia de Infraestrutura

**Comissão Examinadora**



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



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



Prof. Dr. Eng. Leto Momm  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me permitido chegar até aqui, me dando forças para passar por momentos difíceis que encontramos nesses anos de faculdade, e concluir mais essa importante etapa de minha vida.

Aos meus pais, Sebastião Raul e Zilda, que nunca negaram esforços para me ajudar, me apoiando e sendo sempre minha fortaleza, para onde sabia que podia correr e me abrigar em momentos conturbados. Vocês são minha eterna inspiração, obrigada.

Ao meu amor, Saulo, que sempre se fez presente nessa caminhada, me confortando quando necessário e comemorando comigo quando mais uma etapa era concluída. Obrigada por não medir esforços e passar longos finais de semana no laboratório, sua ajuda foi de imensa importância para que esse trabalho fosse bem sucedido.

Ao meu orientador professor Breno. Desde quando me interessei pela área de pavimentação você não mediu esforços para que eu seguisse nesse caminho, esse estímulo foi de grande importância para eu chegar até aqui. Obrigada por todos os seus ensinamentos e paciência ao transmiti-los, e por toda sua ajuda nos ensaios laboratoriais, foram longos finais de semana para todos.

Aos colegas de laboratório, Bruna e Marco. A equipe que nos tornamos, sempre ajudando uns aos outros, fez com que conseguíssemos terminar nossos trabalhos com sucesso. Mesmo com todos os imprevistos, foram meses de trabalho que serão sempre lembrados. Obrigada.

A minha amiga, irmã de coração, Mariana. Você é o presente que a vida me deu na infância e permitiu que compartilhássemos do mesmo curso na universidade. A sua companhia em todas as etapas dessa caminhada foi de muita importância para mim, tanto nos dias alegres como nos dias tristes que tivemos até aqui. Muito obrigada.

Agradeço também aos amigos que o curso de engenharia de infraestrutura me deu, Daiana, Eduarda, Jorge, Mayara, Nicole e Thayara. Obrigada por compartilharem comigo tantos momentos nessa caminhada, vocês sempre me motivaram, trabalharam firme comigo e me ensinaram que o final da caminhada é importante, mas com certeza as pessoas que encontramos ao longo dela é que fazem a diferença. Vocês são os jovens mais legais que eu conheço.

Agradeço as empresas Rudnick Minérios e CBB Asfaltos por disponibilizarem os materiais necessários à pesquisa, e ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq), pelo apoio financeiro através da bolsa de pesquisa.

## RESUMO

Este trabalho objetiva a verificação da viabilidade técnica das formulações propostas e suas respectivas condições de comportamento funcional de duas misturas asfálticas diferentes (BBDr e BBTM), a fim de garantir maior conforto e segurança em rodovias, principalmente em condições de chuva. A formulação dos granulares segue as recomendações do método francês (teórico), considerando-se a racionalidade em que é definida a curva granulométrica por esse método. Como referência para essa formulação, utilizou-se curvas aplicadas em obras públicas na França e na Bélgica, porém adaptando-as de acordo com as peneiras disponíveis no Brasil. O elevado teor de vazios presente nas misturas BBDr permite a captação, percolação e evacuação da água superficial do pavimento, por esse motivo chamado de pavimento drenante. O BBTM possui considerável teor de vazios presentes em sua formulação, sendo aplicado em camadas delgadas e com significativa rugosidade superficial, resultando em uma mistura que apresenta boa drenabilidade, ainda que em menor grau se comparada às misturas BBDr, em razão de apresentarem maior percentual de granulares finos em sua composição. A drenabilidade das duas misturas é expressa por meio de uma descontinuidade da formulação (gap) devido à fração de granulares ausentes. O uso de ligante asfáltico POLIFLEX 60/85 (ligante modificado por polímero SBS) tem função de aumentar a resistência das misturas asfálticas em relação às deformações permanentes causadas pela solitação dinâmica do tráfego. Para aferição das propriedades dos materiais utilizados e análises das formulações propostas, foram realizados estudos sobre a caracterização dos granulares e ligante asfáltico, e ensaios laboratoriais para a moldagem dos corpos de prova a partir da metodologia Marshall, que foram submetidos a ensaios como permeabilidade, mancha de areia e cántabro.

**Palavras-chave:** BBDr. BBTM. Pavimentos Drenantes. Granulometria.

## ABSTRACT

This work aims to verify the technical feasibility of the proposed formulations and their respective performance conditions of two different asphalt mixtures (BBDr and BBTM), in order to guarantee greater comfort and safety on highways, especially in rainy conditions. The formulation of granules follows the recommendations of the French (theoretical) method, considering the rationality in which the granulometric curve is defined by this method. As a reference for this formulation, curves applied in public works in France and Belgium were used, but adapted according to the sieves available in Brazil. The high voids present in the BBDr mixtures allows the capture, percolation and evacuation of surface water from the paving, which is why it is called a drainage paving. BBTM has a considerable content of voids present in its formulation, being applied in thin layers and with significant surface roughness, resulting in a mixture that shows good drainage, although minor when compared to the BBDr mixtures, because they present a higher percentage of fine granular in its composition. The drainage of the two mixtures is expressed through a gap discontinuation due to the fraction of absent granular ones. The use of asphalt binder POLIFLEX 60/85 (polymer modified binder SBS) has the function of increasing the resistance of the asphalt mixtures in relation to the permanent deformations caused by the dynamic load from the traffic. In order to evaluate the properties of proposed materials and formulations, several tests were carried out on the characterization of used granular and asphalt binders, beyond laboratory tests for the specimens molding according the Marshall methodology, which were submitted to tests such as permeability, stain of sand and cántabro.

**Keywords:** BBDr. BBTM. Draining paving. Granulometry

## LISTA DE ABREVIACÕES

BBDr	- Béton Bitumineux Drainante
BBTM	- Béton Bitumineux Très Mince
CAP	- Cimento asfáltico de petróleo
CTJ	- Centro Tecnológico de Joinville
d	- Abertura de uma dada peneira
D	- Diâmetro máximo, abertura da peneira que passa 100%.
DapV	- Densidade aparente volumétrica
DC	- Desgaste superficial do corpo de prova pelo ensaio cántabro
Dm	- Diâmetro médio
Dmáx	- Diâmetro máximo
DMN	- Diâmetro máximo nominal
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
FAA	- Federal Aviation Administration
FHWA	- Federal Highway Administration
Hm	- Altura média do corpo de prova
Hred	- Altura reduzida
HS	- Altura média da macrotextura da camada de revestimento
IDOT	- Departamento de Transporte de Illinois
IP	- Índice de Pfeiffer e Van Doormaal
LCPC	- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LDTPav	- Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação
MVR	- Massa específica volumétrica real da mistura
n	- Expoente da Equação 3
PCG	- Prensa de compactação por cisalhamento giratória
PCP	- Peneira de controle primário
Ph2o	- Peso da água absorvida
PS	- Peso seco do corpo de prova
r	- Raio
RBV	- Relação betume/vazios
RTFOT	- Rolling Thin Film Oven Test



- SBS - Styrene-butadiene-styrene
- UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
- USACE - United States Army Corps of Engineers
- VAM - Vazios do agregado mineral
- Vcom% - Vazios comunicantes
- V% - Teor de vazios
- %p - Porcentagem em peso que passa na peneira de abertura d
- %pi - Porcentagem em peso que passa na peneira de menor diâmetro
- %V - Porcentagem de vazios

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Organização dos processos para alcançar os objetivos.
- Figura 2 - Exemplificação de uma mistura BBDr
- Figura 3 - Superfície de um revestimento de concreto asfáltico convencional e drenante.
- Figura 4 - Trecho com camada porosa de atrito entre os km 10 e 11 da BR-101 em Santa Catarina
- Figura 5 - Exemplificação de uma mistura BBTM
- Figura 6 - Faixa C do DNIT
- Figura 7 - Método gráfico de Rothfuchs
- Figura 8 - Amostra de uma mistura BBDr
- Figura 9 - Rudnick Minérios LTDA
- Figura 10 - Curva de variação da viscosidade versus temperatura
- Figura 11 - Curva da distribuição granulométrica BBDr
- Figura 12 - Comparação entre as curvas granulométricas para mistura BBDr
- Figura 13 - Curva da distribuição granulométrica BBTM
- Figura 14 - Comparação entre as curvas granulométricas para mistura BBTM
- Figura 15 - Comparação entre as curvas granulométricas BBDr e BBTM estudadas
- Figura 16 - Separação dos granulares
- Figura 17 - Realização das misturas asfálticas para os corpos de prova Marshall: (a) ligante asfáltico adicionado aos granulares graúdos, (b) envolvimento total da mistura, (c) adição da parte fina a ser misturada e (d) realização da mistura completa
- Figura 18 - Molde utilizado para os corpos de prova Marshall
- Figura 19 - Soquete Marshall automático
- Figura 20 - Corpos de prova Marshall
- Figura 21 - Diferenças entre os corpos de prova BBTM e BBDr
- Figura 22 - Parâmetros necessários: (a) medição da altura com paquímetro e (b) pesagem do corpo de prova.
- Figura 23 - Mistura na máquina de vácuo
- Figura 24 - Impermeabilização dos corpos de prova para ensaio de vazios comunicantes
- Figura 25 - Adaptação para ensaio de permeabilidade
- Figura 26 - Ensaio de permeabilidade

- Figura 27 - Etapas do ensaio mancha de areia: (a) soquete especial de base de borracha e medidor de areia, (b) aplicação da areia sobre o corpo de prova e (c) aferição do diâmetro de areia resultante.
- Figura 28 - Comparação dos corpos de prova BBDr antes e depois do ensaio cántabro
- Figura 29 - Teor de vazios BBDr
- Figura 30 - Vazios comunicantes do BBDr
- Figura 31 - Permeabilidade do BBDr
- Figura 32 - Perda por desgaste superficial pelo ensaio cántabro
- Figura 33 - Teor de vazios BBTM
- Figura 34 - Altura da mancha de areia nos corpos de prova BBTM

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Faixas granulométricas do DNIT.
- Tabela 2 - Formulação BBDr (Lille).
- Tabela 3 - Formulação BBTM (Hainaut).
- Tabela 4 - Caracterização dos agregados
- Tabela 5 - Ensaio e resultados da caracterização do ligante
- Tabela 6 - Ensaio e resultados da caracterização após envelhecimento do ligante
- Tabela 7 - Formulação BBDr estudada.
- Tabela 8 - Formulação BBTM estudada.
- Tabela 9 - Quantidade de ligante e granulares utilizados nas misturas BBDr.
- Tabela 10 - Quantidade de ligante e granulares utilizados nas misturas BBTM
- Tabela 11 - Quantidade de ligante e granulares utilizados nos novos corpos de prova BBDr.
- Tabela 12 - Quantidade de ligante e granulares utilizados nos novos corpos de prova BBTM.
- Tabela 13 - Limites normativos dos ensaios realizados.
- Tabela 14 - Resultado do ensaio MVR para o BBDr.
- Tabela 15 - Resultado do ensaio MVR para o BBTM.
- Tabela 16 - Classes de textura superficial em função da altura da mancha de areia.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1. OBJETIVOS DA PESQUISA .....	15
1.1.1. Objetivo Geral .....	15
1.1.2. Objetivos Específicos .....	15
1.2. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO .....	16
1.3. DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA .....	17
1.4. RELEVÂNCIA DO TEMA .....	18
1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	19
<b>2. MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES (BBDR) E MUITO DELGADAS (BBTM)</b> .....	<b>20</b>
2.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS BBDR .....	20
2.2. CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS BBTM .....	24
<b>3. MÉTODOS PARA FORMULAÇÃO DE CURVAS GRANULOMÉTRICAS</b> .....	<b>27</b>
3.1. MÉTODO POR TENTATIVA .....	27
3.2. MÉTODO GRÁFICO DE ROTHFUCHS .....	29
3.3. MÉTODO BAILEY .....	30
3.4. MÉTODO TEÓRICO.....	31
3.5. FORMULAÇÃO GRANULOMÉTRICA ESTUDADA.....	32
<b>4. MATERIAIS E CURVAS GRANULOMÉTRICAS UTILIZADAS</b> .....	<b>35</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS GRANULARES.....	35
4.2. CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE BETUMINOSO .....	36
4.3. CURVAS GRANULOMÉTRICAS .....	38
<b>5. ENSAIOS LABORATORIAIS</b> .....	<b>43</b>
5.1. METODOLOGIA MARSHALL .....	43
5.1.1. Densidade Aparente Volumétrica .....	51
5.1.2. Densidade Volumétrica Real.....	52
5.1.3. Teor de Vazios .....	53
5.2. VAZIOS COMUNICANTES.....	54
5.3. PERMEABILIDADE .....	55
5.4. MANCHA DE AREIA.....	57
5.5. CÁNTABRO .....	59
<b>6. RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....	<b>61</b>
6.1. RESULTADOS E ANÁLISES DA MISTURA BBDR.....	62

6.2. RESULTADOS E ANÁLISES DA MISTURA BBTM .....	66
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	70
REFERÊNCIAS .....	72

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil vem apresentando cada vez mais estudos voltados à área de pavimentação, com ênfase nas características funcionais da estrutura dos mesmos. A funcionalidade dos pavimentos asfálticos drenantes e muito delgados está no objetivo da eliminação da lâmina d'água formada em dias de chuva sobre os pavimentos, visando à melhoria do conforto e segurança do usuário, que juntamente com economia são as principais propriedades de um bom pavimento.

Sob o ponto de vista funcional, as falhas na superfície dos revestimentos asfálticos são resultados das imperfeições de projeto, da execução ou devido à ação combinada do tráfego e do clima, como alto índice pluviométrico (NUNES, 2006).

A segurança do usuário é conferida pelo pavimento que garante aderência na interface pneu-pavimento, de modo a manter o usuário no controle de seu veículo, alterando a trajetória quando necessário, tanto com o pavimento seco ou molhado (MOMM, 1998).

A existência da lâmina d'água na superfície do pavimento após a chuva compromete a segurança do usuário, podendo resultar em derrapagens causadas pelos fenômenos de hidroplanagem e viscoplanagem, assim como diminuir a visibilidade por meio do efeito spray que o veículo da frente, em movimento, promove, e ainda faz com que a reflexão luminosa dificulte a visualização da sinalização horizontal durante a noite (GUIMARÃES, 2012).

O escoamento da água pluvial da superfície de um pavimento impermeável depende da sua capacidade em drenar a água superficial por entre as rugosidades (horizontalmente) (MOMM, 1998).

Para que a mistura asfáltica seja dita como drenante e/ou permeável, a granulometria deverá ser descontínua, isto é, ter uma brecha na distribuição granulométrica (MEURER FILHO, 2001). Essa brecha proporciona que os vazios presentes se unam, formando assim um caminho para a água percolar verticalmente e transversalmente através da mistura, chamados de vazios comunicantes.

Os vazios presentes deverão ser suficientes para permitir a percolação da água da chuva através dos mesmos, evitando acumulação de água sobre a pista de rolamento (AFNOR, 1991 apud MEURER FILHO, 2001).

O conforto de rolamento está diretamente relacionado com a granulometria adotada, a mesma sendo descontínua, possibilitará boa drenabilidade superficial, e conseqüentemente a diminuição dos ruídos. A granulometria adotada também garante a capacidade de suporte dos carregamentos do tráfego, para que não apresentem deformações significativas como as ondulações na pista de rolamento.

Muitos danos em uma mistura asfáltica são consequência do deslocamento da película de ligante na interface com o granular, processo esse que é acelerado pela ação da água. A capacidade do ligante em aderir à superfície do granular, ou seja, sua adesividade pode ser melhorada com a utilização de aditivos (DUMKE, 2005).

Além das propriedades funcionais de drenabilidade e permeabilidade, as misturas asfálticas estudadas terão suas propriedades melhoradas por meio de um ligante modificado com utilização de um polímero elastomérico (styrene-butadiene-styrene - SBS), permitindo a recuperação parcial de deformações.

## 1.1.OBJETIVOS DA PESQUISA

### 1.1.1. Objetivo Geral

Realizar o estudo de misturas asfálticas drenantes, Béton Bitumineux Drainante (BBDr) e, muito delgadas, Béton Bitumineux Très Mince (BBTM), para a verificação da viabilidade técnica das formulações propostas e suas respectivas condições de comportamento funcional.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar a formulação granulométrica de misturas asfálticas drenantes (BBDr) e muito delgadas (BBTM) com base nos princípios conceituais da metodologia francesa;
- Analisar os indicadores funcionais de avaliação das formulações, como teor de vazios, vazios comunicantes, permeabilidade, e desgaste por abrasão para o BBDr, bem como teor de vazios e rugosidade superficial para o BBTM, a partir de corpos de prova produzidos tomando os princípios da metodologia Marshall;
- Indicar quais dosagens possuem potenciais para aplicação no campo, ponderando os contextos limitadores de produção da metodologia Marshall;



## 1.2.PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

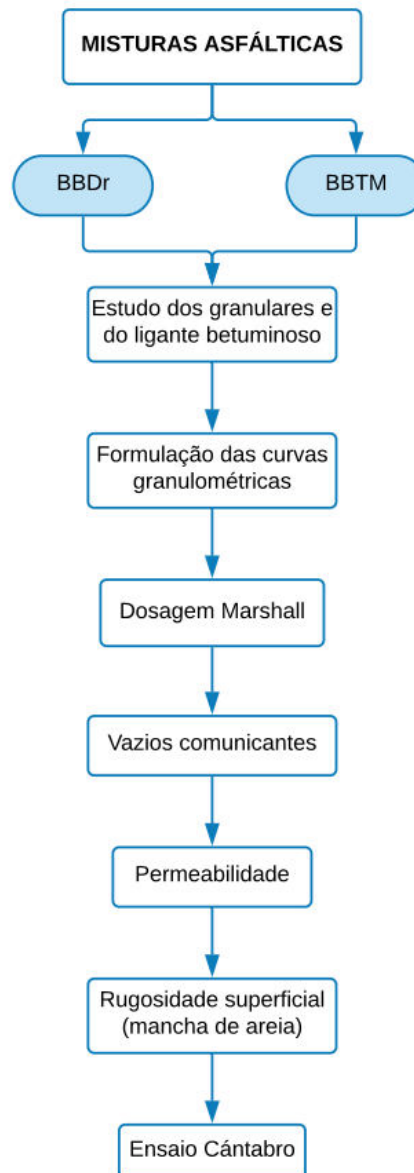
A concepção das misturas asfálticas foi feita a partir da metodologia francesa de formulação (LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES - LCPC, 2007). A França é considerada pioneira no estudo de misturas BBDr e BBTM no mundo, e por esta razão, a metodologia adotada neste país foi escolhida.

Foram utilizadas como referência duas formulações granulométricas aplicadas em condições práticas, sendo a mistura BBDr na cidade de Lille, no norte da França, enquanto que a mistura BBTM na cidade de Hainaut, no oeste da Bélgica. Porém, ambas as formulações foram adaptadas de acordo com a distribuição de peneiras disponíveis, aliada às características dos materiais da região metropolitana de Joinville, Santa Catarina.

Os materiais foram fornecidos por empresas parceiras do Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), localizado no Campus Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), sendo os granulares fornecidos pela empresa Rudnick Minérios LTDA., de Joinville-SC, enquanto o ligante betuminoso pela CBB Asfaltos, localizada na cidade de Curitiba-PR.

Para os granulares, foram considerados os estudos já realizados para essa mesma fonte de materiais. O cimento asfáltico de petróleo (CAP) usado é o POLIFLEX 60/85, ligante esse que possui adição de 4% do polímero SBS, com o intuito de aperfeiçoar a parcela elástica do ligante betuminoso, tornando as misturas asfálticas capazes de resistir melhor à deformação permanente. A Figura 1 ilustra a matriz de ensaios que foi desenvolvida durante a execução da pesquisa.

Figura 1 – Organização dos processos para alcançar os objetivos.



Fonte: Autora (2018).

### 1.3.DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA

A presente pesquisa foi realizada estritamente em âmbito laboratorial. Ainda que tenham sido utilizadas como referência curvas granulométricas aplicadas na prática, não é prevista a realização de estudos e análises de campo ou computacionais.

Todos os ensaios necessários foram realizados no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), o qual possui todos os recursos necessários para a realização dos objetivos da pesquisa.

#### 1.4. RELEVÂNCIA DO TEMA

Sendo o modal rodoviário o mais utilizado atualmente no Brasil, tanto para transporte de cargas como de passageiros, tem-se que apresenta proporcionalmente o maior número de acidentes no país. Segundo o Observatório Nacional de Segurança Viária (ONSV, 2017), no ano de 2015, cerca de trinta e oito mil pessoas foram vítimas fatais decorrentes de acidentes de trânsito, dentre estas, mil e seiscentas no estado de Santa Catarina.

De acordo com Paula (1994), a chance de um acidente de trânsito ocorrer em um dia de chuva é duas vezes maior do que em dias secos. No entanto, mesmo em condições em que o pavimento encontra-se molhado, a aderência pneu-pavimento deve garantir segurança ao usuário para que possa acelerar, frear e realizar curvas durante todo o percurso que o veículo permanecer em deslocamento (GUIMARÃES, 2012).

Em pavimentos molhados, os fenômenos de hidroplanagem e de viscoplanagem ocorrem na interface pneu/pavimento, tais fenômenos estão diretamente ligados à capacidade de drenagem superficial.

A hidroplanagem pode ocorrer quando o acúmulo de água entre o pneu e o pavimento excede a capacidade de escoamento entre as ranhuras do pneu e as rugosidades da superfície do pavimento, fazendo com que o usuário perca o controle do veículo. Com pneus ruins e pavimentos polidos (pelo desgaste do uso), a chance de ocorrer o fenômeno aumenta (MOMM, 1998).

O fenômeno da viscoplanagem acontece quando um filme de água muito fino encontra-se entre o pneu e o pavimento, ocasionando um deslocamento relativo entre as duas superfícies, no domínio da viscosidade d'água. A macrotextura rugosa do pavimento é capaz de romper esse filme de água, entretanto, o polimento progressivo dos granulares reduz essa capacidade, induzindo a viscoplanagem mesmo a velocidades baixas (MOMM, 1998).

A capacidade de escoar água da superfície rapidamente é o que garante segurança em pavimentos asfálticos drenantes (mistura BBD<sub>r</sub>), evitando fenômenos de hidroplanagem e viscoplanagem, que causam a perda de aderência entre pneu e pavimento, e efeito *spray*, que diminui a visibilidade.

A segurança em pista molhada também é garantida pela mistura BBTM, caracterizado como um pavimento semipermeável por ter sua distribuição granulométrica descontínua. Apresenta superfície rugosa, conciliando a melhor aderência pneu-pavimento e permitindo fácil escoamento superficial da água (BROSSEAUD, 1999).

Ainda que os custos desses tipos de revestimentos sejam mais elevados do que as misturas densas tradicionais, a possibilidade de um trânsito mais seguro e confortável, com a redução dos riscos de acidentes, redução dos níveis de desconforto sonoro e o aumento da visibilidade e da aderência sob chuva, deve ser levada em conta, pois a qualidade de vida dos usuários também devem influenciar na viabilidade desse tipo de revestimento (DUMKE, 2005).

Como as rodovias brasileiras são predominantemente revestidas por misturas de concreto asfáltico, é de grande importância realizar estudos que visem melhorar a qualidade da superfície de rolamento dos pavimentos por meio de suas características funcionais, considerando-se que o país ainda não possui um banco de dados significativo sobre o tema.

## 1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A organização do presente trabalho apresenta a seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução do tema da pesquisa, apresentando justificativa, objetivos e procedimentos para a conclusão do trabalho.

Capítulo 2: Características, composição, utilização e diferenças entre as misturas BBDr e BBTM.

Capítulo 3: Revisão bibliográfica de algumas metodologias existentes para a formulação do esqueleto mineral utilizado em misturas asfálticas e a metodologia utilizada na pesquisa.

Capítulo 4: Caracterização do ligante betuminoso e dos materiais granulares utilizados, assim como a apresentação das curvas granulométricas adaptadas para cada formulação.

Capítulo 5: Metodologias e procedimentos utilizados nos ensaios laboratoriais realizados.

Capítulo 6: Apresentação e análises dos resultados obtidos nos ensaios, assim como a viabilidade das formulações propostas para cada mistura.

Capítulo 7: Apresentação das conclusões referentes ao estudo realizado, bem como recomendações para trabalhos futuros.

## **2. MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES (BBD<sub>r</sub>) E MUITO DELGADAS (BBT<sub>M</sub>)**

O objetivo geral deste trabalho é a realização do estudo para viabilização das formulações propostas das misturas asfálticas drenantes (BBD<sub>r</sub>) e muito delgadas (BBT<sub>M</sub>), verificando as condições do comportamento funcional estudado para ambas, sendo considerado como principal comportamento funcional o de drenagem da lâmina de água superficial.

### **2.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS BBD<sub>r</sub>**

Em meados do ano 1930, nos Estados Unidos, começou a serem testadas misturas abertas com a finalidade de melhorar a aderência nas pistas molhadas devido à macrotextura que apresentavam, sem pensar na função drenante propriamente dita. Em 1970, tanto a FHWA (Federal Highway Administration) como a FAA (Federal Aviation Administration) já apresentavam prescrições técnicas para a sua utilização em rodovias e aeroportos (MEURER FILHO, 2001).

Segundo o Observatoire des Techniques de Chaussées (1997), os revestimentos com função drenante foram desenvolvidos na França em 1984. A partir de 1991, foram padronizados pela norma francesa NF P 98-134, onde foram denominados de Bétons Bitumineux Drainants – BBD<sub>r</sub>.

A tendência americana para esse tipo de mistura é de camadas com espessuras geralmente de 20 mm e com maior atenção às propriedades de aderência e menor às de permeabilidade e acústicas (PORTO, 1999).

Enquanto a europeia é utilizar camadas de maior espessura, geralmente em torno de 40 mm, e o teor de vazios é igual ou superior a 20%, com finalidade de drenar por permeabilidade a água da chuva (OBSERVATOIRE DES TECHNIQUES DE CHAUSSÉES, 1997).

Esse tipo de mistura foi especialmente desenvolvida para permitir a passagem da água pluvial através do seu interior, provocando a mudança do conceito tradicional de impermeabilização da superfície externa de um pavimento e transferindo essa função para

uma camada inferior à da superfície. Além da propriedade de drenagem da lâmina de água superficial, as misturas drenantes oferecem redução dos ruídos oriundos do tráfego de veículos (DUMKE, 2005).

Os vazios presentes nas misturas asfálticas drenantes, como exemplificado na Figura 2, são capazes de permitir a captação, percolação e evacuação da água superficial do pavimento.

Figura 2 – Exemplificação de uma mistura BBDr.



Fonte: Autora (2018).

Essas características melhoram as condições de segurança do trânsito em dias de chuva, eliminando a hidroplanagem, a viscoplanagem e a névoa formada pelas passagens de veículos (efeito spray) (GUIMARÃES, 2012).

A utilização de ligantes puros não tende a piorar o comportamento do BBDr quando comparado com a utilização de ligantes modificados. Se a utilização de ligantes modificados for necessária, recomenda-se o uso em rodovias de tráfego elevado. Para as rodovias que não estão sobre concessão na França, criou-se em 1994 um guia dando as indicações para a escolha dos granulares, dos ligantes, dos ensaios laboratoriais, da fabricação, da implementação e do controle para as misturas BBDr (OBSERVATOIRE DES TECHNIQUES DE CHAUSSÉES, 1997).

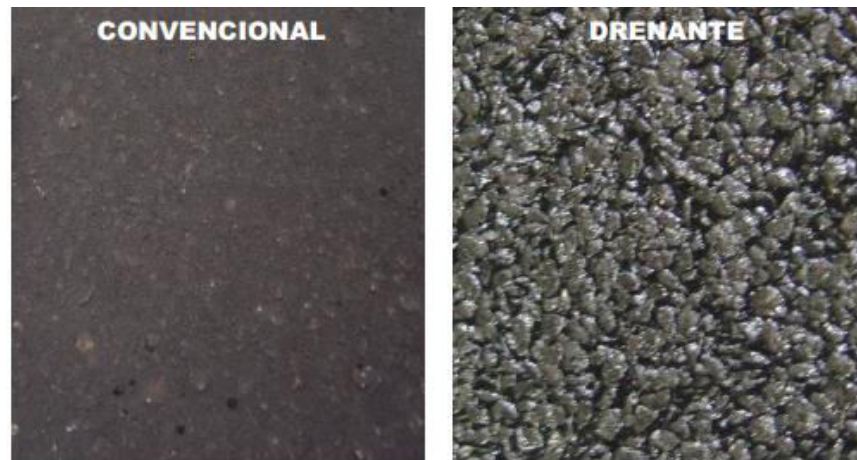
Os pavimentos que contêm a mistura asfáltica drenante são geralmente constituídos por duas camadas, a inferior composta por mistura asfáltica densa convencional e a superior pela mistura BBDr propriamente dita (DUMKE, 2005).

Em revestimentos asfálticos convencionais, impermeáveis, grande parte do escoamento das águas pluviais é garantida pela declividade superficial do pavimento (abaulamento). Já as misturas drenantes são constituídas de uma camada permeável assentada em uma camada impermeável.

Devido aos vazios comunicantes na mistura drenante, a água infiltra verticalmente, acumulando-se no fundo da camada drenante, sobre a camada impermeável, onde escoar transversalmente por meio da declividade do pavimento (MEURER FILHO, 2001).

A diferença visual de uma superfície de revestimento de concreto asfáltico convencional e um revestimento de concreto asfáltico drenante é notada facilmente, conforme ilustra em detalhe a Figura 3.

Figura 3 - Superfície de um revestimento de concreto asfáltico convencional e drenante.



Fonte: Dumke (2005).

A experiência brasileira com misturas BBDr ainda é pequena. Em 1992, foi executado um trecho experimental em pavimento drenante na Rodovia dos Bandeirantes no estado de São Paulo. O experimento deu-se entre o quilômetro 76 e o quilômetro 76+250m, na faixa de tráfego lento, e foi realizado como parte das operações de recapeamento que ocorriam na época (MEURER FILHO, 2001).

Em Santa Catarina, foi executado em agosto de 2000 um trecho experimental de camada porosa de atrito (que possui comportamento próximo ao BBDr) na Rodovia BR-101 entre os km 10 e 11, sentido Joinville – Garuva, com 600 metros de extensão e 3,0 cm de

espessura (Figura 4). A finalidade principal foi de melhorar a segurança do trânsito e proporcionar maior aderência pneu-pavimento (MEURER FILHO, 2001).

Figura 4 – Trecho com camada porosa de atrito entre os km 10 e 11 da BR-101/SC.



Fonte: Meurer Filho (2001).

Os concretos asfálticos drenantes podem ser classificados segundo alguns aspectos, tais como o tipo e número de camadas, o volume de vazios e a existência ou não de uma lacuna (brecha) bem definida na composição granulométrica (MOMM, 2002).

O projeto de uma mistura BBDr busca obter misturas com boa permeabilidade através do máximo teor de vazios possível, não comprometendo a resistência à desagregação e às deformações permanentes causadas pelo tráfego, mediante o uso de granulares e ligantes asfálticos de qualidade, granulometria especial e dosagem adequada em laboratório (ROJAS et al., 1999 apud MEURER FILHO, 2001).

Quanto à fabricação, o espalhamento e a compactação das misturas asfálticas drenantes são semelhantes aos das misturas densas convencionais, porém são necessários cuidados especiais desde a preparação da camada de suporte até a liberação ao tráfego (MEURER FILHO, 2001).

Apesar de todas as vantagens já citadas para os pavimentos asfálticos drenantes, um dos principais problemas encontrados é a colmatação dos vazios ao longo da vida útil, o que reduz gradativamente as funções de drenagem e acústicas do pavimento (DUMKE, 2005).

Para que seja garantida a permeabilidade no maior tempo de vida útil, a porcentagem de vazios inicial deve ser de 20%, sendo necessário também o conhecimento sobre o tráfego da rodovia (OBSERVATOIRE DES TECHNIQUES DE CHAUSSÉES, 1997).



Como alternativa de manutenção das propriedades drenantes e acústicas, tem-se a utilização de máquinas autopropulsadas para o trabalho de limpeza através do jateamento e aspiração da água a alta potência, sendo filtrada e reutilizada pelo equipamento para a continuação do processo (MEURER FILHO, 2001).

Note-se que antes da colmatação dos vazios, o BBDr possui maior drenabilidade superficial comparado ao do BBTM, e limita as projeções de água (efeito spray) (OBSERVATOIRE DES TECHNIQUES DE CHAUSSÉES, 1997).

## 2.2. CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS BBTM

O concreto betuminoso muito delgado (do francês Béton Bitumineux Très Mince – BBTM) é uma mistura asfáltica usinada a quente com distribuição granulométrica descontínua. Sua aplicação é feita em camadas delgadas e pode ser aplicado tanto para pavimentos novos quanto para restaurações (FERREIRA, 2006).

Na produção do BBTM, utiliza-se uma tecnologia que obtém um revestimento que concilia excelentes propriedades mecânicas e de aderência, elevando a segurança em pistas molhadas e o conforto ao usuário (BROSSEAUD, 1999).

O primeiro país a usar a tecnologia do BBTM em suas rodovias foi a França, em 1986. Atualmente, essa técnica é a mais utilizada para a manutenção das rodovias francesas, devido aos ganhos econômicos e ao bom desempenho em termos de conforto e segurança. Ao longo dos anos, a França destacou-se na utilização deste tipo de mistura asfáltica, conseguindo controlar rigorosamente todas as etapas de formulação da mistura até a execução da camada final (FERREIRA, 2006).

Desde 1992, o BBTM vem sendo utilizado em vários países da Europa, como a Grã-Bretanha, Itália, Espanha e República Tcheca. Nos primeiros cinco anos de aplicação desta técnica, já havia mais de cinco milhões de metros quadrados de BBTM aplicados nas rodovias europeias (BROSSEAUD et al., 1997a).

No Brasil, o BBTM é uma mistura cuja utilização no campo não é significativa, existindo apenas um registro de aplicação iniciado em julho de 2005, na Rodovia Castelo Branco, uma das rodovias mais movimentadas do estado de São Paulo. O BBTM neste trecho foi utilizado como alternativa de recapeamento da rodovia (FERREIRA, 2006).

De acordo com a norma francesa XP P 98 137 (2001), o BBTM é uma mistura asfáltica caracterizada por uma grande porcentagem de granulares graúdos (70 a 80%) em

uma composição adaptada (descontínua). Na Figura 5 é possível perceber como essa descontinuidade dos granulares forma uma rugosidade superficial na mistura.

Figura 5 – Exemplificação de uma mistura BBTM.



Fonte: Autora (2018).

A produção do BBTM pode ser feita da forma convencional, sendo necessário tomar alguns cuidados devido ao fato da mistura possuir granulometria descontínua e ligante modificado. Cuidados esses com a temperatura de aquecimento dos granulares para evitar superaquecimento e garantir a adição dos granulares nas frações corretas para obter a descontinuidade desejada (BROSSEAUD et al., 1997a).

O uso de ligantes modificados por polímeros surgiu de um conjunto de técnicas para manutenção dos pavimentos, que consiste no uso de revestimentos em camadas delgadas, apresentando melhor desempenho.

A mistura BBTM admite a eventual utilização de aditivos, como fibras ou ligantes modificados, sendo recomendados para rodovias de tráfego pesado, sujeitas a esforços de frenagem (XP P 98 137, 2001). É devido ao uso de ligantes modificados que as misturas BBTM podem ser cada vez mais descontínuas.

O diferencial dos granulares utilizados neste tipo de mistura está na graduação, pois apresentam frações intermediárias e com classificação feita de acordo com o material retido ou passante nas peneiras determinadas, tornando os limites mais próximos e específicos.

Tais revestimentos de granulometria descontínua (tanto BBTM como BBDr) exigem ligantes capazes de envolver os granulares com um filme mais espesso, para garantir a durabilidade requerida (AIPCR, 1999 apud FERREIRA, 2006). Garantindo também maior resistência ao esforço de arrancamento e conseqüentemente evitar a desagregação das misturas (stripping).

Em vista disso, a presente pesquisa utilizará tanto para as misturas BBTM quanto para as BBDr, o ligante asfáltico POLIFLEX 60/85, que se trata de um ligante modificado por polímero SBS, que tem a finalidade de aumentar a resistência das misturas asfálticas em relação às deformações permanentes causadas pela fadiga do pavimento, assim como aumentar a resistência ao arrancamento dos granulares da mistura.

Essas propriedades serão aferidas por meio de ensaios laboratoriais, juntamente com a caracterização dos materiais utilizados, nos capítulos que segue.

### 3. MÉTODOS PARA FORMULAÇÃO DE CURVAS GRANULOMÉTRICAS

Os granulares em um concreto asfáltico podem ser chamados de esqueleto mineral, pois é a estrutura responsável pela maior parte da resistência às cargas do tráfego (CUNHA, 2004).

Para a caracterização dessa estrutura existe um grande número de métodos para calcular as porcentagens da formulação que podem ser aplicados (SENÇO, 2008). Dentre esses, o método por tentativas (brasileiro), método gráfico de Rothfuchs, método Bailey (americano) e o método teórico (francês), que serão apresentados nos próximos itens.

#### 3.1.MÉTODO POR TENTATIVA

O órgão brasileiro que estabelece as normas utilizadas no país é o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT), antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), que faz uso do método por tentativas, estabelecendo faixas granulométricas para o ajustamento das curvas. As faixas descritas pelo DNIT variam conforme a aplicação da mistura, mostradas na Tabela 1.

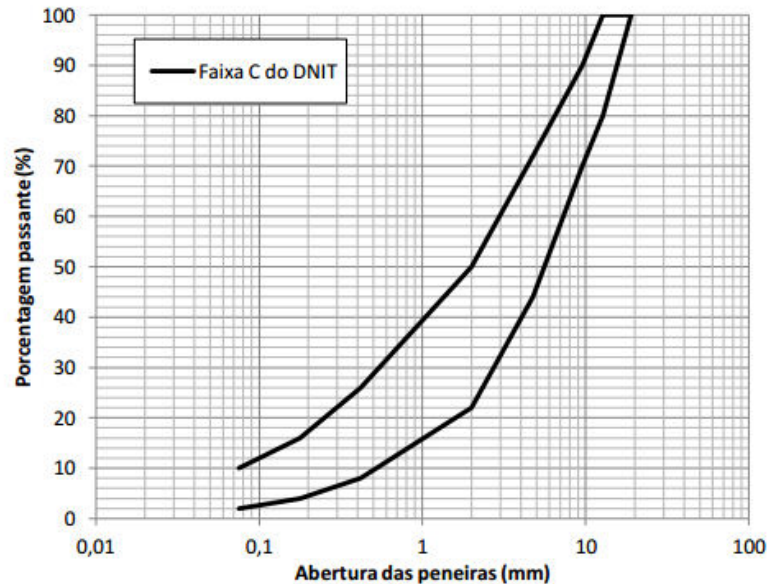
Tabela 1 – Faixas granulométricas do DNIT.

Peneira de malha quadrada		% em massa passante			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,80	100	-	-	-
1 1/2"	38,10	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,40	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
3/4"	19,10	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
1/2"	12,70	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,50	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,80	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2,00	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 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 (Blinder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Fonte: Adaptado de DNIT ES 031 (2006).

Como exemplificação gráfica da Tabela 1, a Figura 6 ilustra a faixa C do DNIT, com os limites de aberturas de peneiras, sendo esta a mais utilizada para revestimentos asfálticos submetidos a alto volume de tráfego.

Figura 6 – Faixa C do DNIT.



Fonte: DNIT ES 031 (2006).

Tal método é dito como empírico por basear-se na tentativa e erro, estimando as porcentagens de cada fração de granular a ser utilizada (BÚRIGO, 2015). A soma das parcelas de cada fração passante em cada peneira deve convergir, para enquadrar a curva granulométrica na faixa desejada.

Se eventualmente a curva não se enquadra na faixa determinada, podem-se ajustar as porcentagens das frações até que a granulometria esteja entre os limites normativos.

Segundo Senço (2008), uma curva que toca os limites inferiores ou superiores, é considerada como uma curva de granulares mal distribuídos, entretanto, estará dentro da norma.

Este pode ser dito como um dos pontos para se contestar este método, pois com uma variação excessiva na curva granulométrica, a mistura poderá apresentar comportamento mecânico indesejável perante o órgão responsável pelo dimensionamento do pavimento, sendo este o mesmo que aprova o método (DA LUZ, 2016).

### 3.2.MÉTODO GRÁFICO DE ROTHFUCHS

De acordo com Senço (2008), o método de Rothfuchs é um dos mais populares, aplicado após conhecida a faixa granulométrica especificada, calculando a faixa média da mistura.

O objetivo principal é obter os percentuais de partida das frações heterogêneas, por meio de um método gráfico. Quando definidos esses percentuais, no Brasil, utiliza-os como uma prévia para o método de tentativas do DNIT.

Na elaboração do gráfico utilizado no método, o eixo vertical indica as porcentagens passantes e no eixo horizontal as peneiras utilizadas. Traça-se, então, uma diagonal unindo as extremidades dos eixos, que irá representar a granulometria desejada para a mistura.

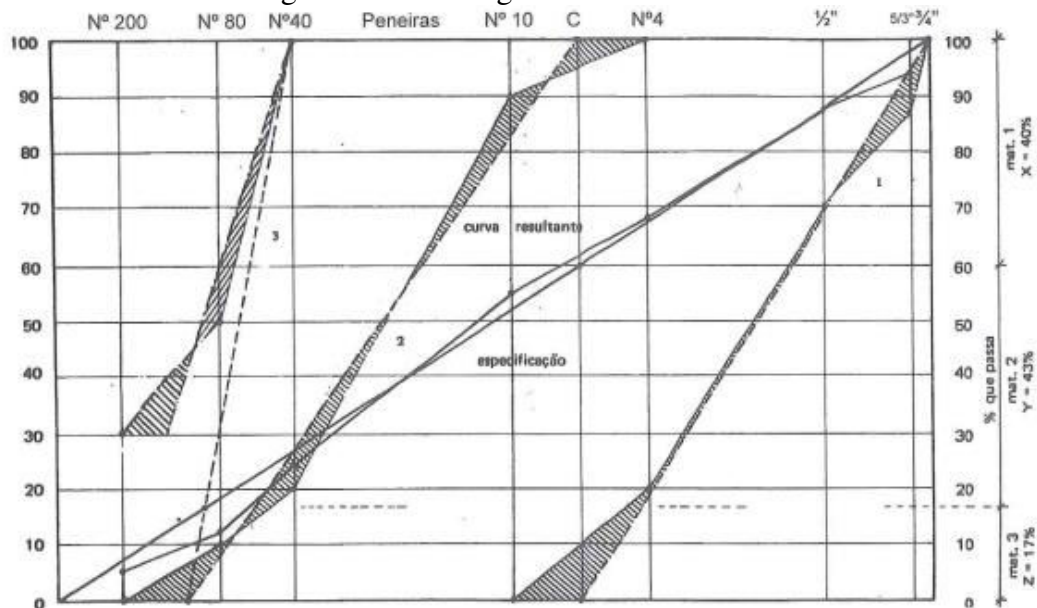
No gráfico obtido, traçam-se as curvas granulométricas dos materiais que serão utilizados, desenhando retas que interceptam a diagonal. Os pontos interceptados por cada curva fornecem as proporções com que os materiais componentes devem constar na mistura.

Finalmente, para cada peneira verifica-se a composição granulométrica da mistura pela Equação 1.

$$\% \text{ passante na peneira} = aX + bY + cZ \quad (1)$$

Onde a, b e c são as porcentagens dos materiais que passam na peneira (podendo haver mais ou menos que 3 materiais) e X, Y e Z são as porcentagens determinadas pelo gráfico de Rothfuchs. A Figura 7 exemplifica o método através do gráfico apresentado.

Figura 7 - Método gráfico de Rothfuchs.



Fonte: Senço (2008).

### 3.3.MÉTODO BAILEY

Desenvolvido inicialmente pelo engenheiro Robert Bailey, do Departamento de Transporte de Illinois (IDOT), em 1980, o método Bailey baseia-se na seleção de granulares para o uso em pavimentos asfálticos.

O método Bailey de seleção granulométrica tenta unir os benefícios das misturas densas com os das misturas descontínuas. Esse método faz a seleção da distribuição assegurando a resistência à deformação permanente pelo intertravamento dos granulares graúdos e a resistência ao desgaste pelo maior teor de ligante, devido ao adequado volume de vazios (VAVRIK et al., 2002).

O objetivo desse método é garantir o intertravamento dos granulares combinando-os da melhor maneira possível. Segundo Cunha et al. (2004), as misturas asfálticas resultantes de um processo de seleção granulométrica tendem a ser mais estáveis e possuem bom volume de vazios.

O arranjo e a definição de granulares graúdos e finos (miúdos) são os dois princípios básicos adotados pelo método, diferenciando-o das definições utilizadas normalmente (MENDES, 2011).

No método Bailey, a definição de granular graúdo e fino é mais específica, de modo a determinar a compactação e o intertravamento por meio da combinação de granulares de diversos tamanhos. São consideradas graúdas as partículas que acondicionadas em certo volume criam vazios que podem ser preenchidos por granulares de menor tamanho, sendo assim, todas as partículas que preenchem os vazios deixados pelos granulares graúdos são consideradas finas (CUNHA, 2004).

A peneira que define a divisão entre granulares graúdos e finos é chamada peneira de controle primário (PCP), sendo baseada no diâmetro máximo nominal (DMN) da mistura. Essa peneira é definida a partir da Equação 2.

$$PCP = DMN * 0,22 \quad (2)$$

De acordo com Cunha (2004), as misturas feitas pelo método Bailey apresentam valores maiores de vazios e de relação betume/vazios do que os valores encontrados em misturas convencionais.

### 3.4.MÉTODO TEÓRICO

No método teórico, as peneiras utilizadas para compor a curva granulométrica são definidas com o objetivo de que as partículas dos granulares menores preencham os vazios deixados pelas partículas maiores, tornando a compactação melhor devido à diminuição dos vazios existentes, por esse motivo o método também é chamado de racional (DA LUZ, 2016).

A fim de satisfazer a quantidade adequada de cada partícula, fixam-se dois diâmetros, o máximo e o mínimo passantes, de acordo com o conjunto de peneiras determinada. O percentual de cada fração correspondente a 100% das partículas passantes é calculado pela Equação 3 de Fuller-Talbot (DNIT, 2006).

$$\%p = 100 * \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (3)$$

Onde:

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

d = abertura de uma dada peneira (mm);

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

n = expoente.

O expoente “n” é obtido através da Equação 4.

$$n = \frac{\log(\%pi) - \log(100)}{\log\left(\frac{d}{D}\right)} \quad (4)$$

Onde:

n = expoente;

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

d = abertura de uma dada peneira (mm);

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

As frações calculadas pelas Equações 3 e 4, tendem a resultar em uma curva granulométrica contínua, com melhor relação de proporção entre os grãos, onde o termo exponencial “n”, de acordo com DNIT (2006), indica se a curva é aberta, densa, ou tipo macadame, como descrito a seguir:

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



As graduações mais densas geram maior estabilidade devido ao contato entre os granulares e baixo teor de vazios (BERNUCCI et al., 2010). Porém, a existência de vazios é necessária para garantir a incorporação do ligante na mistura, pois sem isto, pode ocorrer o fenômeno de exsudação, que é quando o ligante betuminoso migra para superfície da mistura asfáltica, resultando na redução da estabilidade (ARALDI, 2017).

Devido ao maior diâmetro dos granulares nas graduações abertas, seu volume de vazios é mais alto o que implica em menor contato entre os grãos, sendo o oposto das graduações densas. Em razão disso, é necessário verificar se a granulometria utilizada em graduações abertas gera uma mistura adequada para os resultados esperados.

### 3.5.FORMULAÇÃO GRANULOMÉTRICA ESTUDADA

Sendo a França considerada pioneira no estudo de misturas asfálticas BBDr e BBTM, a metodologia de formulação granulométrica adotada neste país (aqui apresentado como método teórico) será a utilizada na presente pesquisa.

A principal característica do método é a racionalidade com que é definida a curva granulométrica, conseguindo preencher melhor os vazios deixados pelos granulares e apresentando melhor controle das frações que se está trabalhando, diferenciando-se dos métodos por tentativa e de Rothfuchs, que tem fundamentação empírica.

As formulações de referência desta metodologia para o presente trabalho foram aplicadas em duas cidades diferentes. A mistura BBDr na cidade de Lille, norte da França, e a mistura BBTM na cidade de Hainaut, no oeste da Bélgica. Nas Tabelas 2 e 3 estão apresentadas essas formulações.

Dentro das normas francesas, a maioria das exigências para revestimentos asfálticos baseia-se no desempenho exigido sobre o produto acabado e não sobre o método de composição (LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES - LCPC, 2007). Portanto, não se encontram faixas granulométricas em normas francesas, diferenciando-as das normas brasileiras e americanas, por exemplo.

As especificações dos granulares são sobre as dimensões, as características mecânicas e as propriedades dos finos, sendo estes escolhidos em função da camada em que serão utilizados (FERREIRA, 2006).

Tabela 2 – Formulação BBDr (Lille).

<b>Peneira (mm)</b>	<b>Porcentagem Passante (%)</b>
12,5	100,0
10,0	87,4
8,0	56,0
6,3	24,3
5,0	17,0
4,0	15,8
2,0	14,5
1,0	10,0
0,5	7,5
0,315	5,7
0,2	4,6
0,075	3,0

Fonte: Adaptado de EUROVIA (2006).

Tabela 3 – Formulação BBTM (Hainaut).

<b>Peneira (mm)</b>	<b>Porcentagem Passante (%)</b>
12,5	100,0
10,0	95,0
8,0	65,7
6,3	43,6
5,0	36,0
4,0	34,2
3,2	33,4
2,0	30,8
1,0	22,6
0,5	16,3
0,3	13,5
0,2	11,5
0,1	9,6
0,075	8,8

Fonte: Adaptado de SAVREUX (2003).

A Figura 8 exemplifica como a granulometria descontínua tem influência significativa nas misturas asfálticas drenantes, obtendo o teor de vazios necessários para a funcionalidade do pavimento.

Figura 8 – Amostra de uma mistura BBDr.



Fonte: Siroma (2017).

Para garantir a qualidade das formulações, deve-se utilizar na produção do BBDr e do BBTM no Brasil um sistema de peneiramento que faça o fracionamento unitário, tendo em vista que o sucesso da mistura depende da granulometria e do rigor do peneiramento.

As quantidades que foram utilizadas em cada mistura, nos diferentes corpos de prova, e os ensaios realizados neste trabalho, serão apresentadas no capítulo que segue.

## 4. MATERIAIS E CURVAS GRANULOMÉTRICAS UTILIZADAS

É necessário o conhecimento das propriedades e características dos materiais utilizados para melhor compreensão dos resultados da pesquisa. A seguir, essas propriedades dos materiais que foram utilizados, bem como as características das curvas granulométricas estudadas.

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO DOS GRANULARES

Os granulares utilizados na presente pesquisa foram disponibilizados pela empresa Rudnick Minérios LTDA., onde os materiais são de origem Gnaisse. A Figura 9 ilustra o local da britagem destes granulares na empresa.

Figura 9 - Rudnick Minérios LTDA.



Fonte: Autora (2018).

A distribuição granulométrica utilizada segue o método teórico de formulação, e o peneiramento feito em laboratório foi necessário para separar as frações de tamanhos diferentes referentes às aberturas das peneiras definidas para este trabalho. Por meio desse procedimento, foram separadas as frações necessárias para compor as amostras dos ensaios, utilizadas nas misturas asfálticas estudadas.

A variedade dos granulares aptos para utilização em revestimentos asfálticos é muito grande, entretanto, cada utilização em particular requer granulares com características específicas, fazendo uso de alguns tipos e inviabilizando outros (BERNUCCI et al., 2010).

Para a caracterização dos granulares, o DNER apresenta uma série de ensaios visando ter o conhecimento aprofundado de suas propriedades. Pelas diferentes características que podem ser encontradas nos materiais, a importância dos ensaios se dá na identificação de um material que não atende as exigências necessárias para aplicação na pavimentação, normatizadas pelo órgão responsável (DA LUZ, 2016).

É apresentada na Tabela 4 a caracterização dos agregados, resultado dos ensaios de desgaste por abrasão Los Angeles, durabilidade ao sulfato de sódio, índice de forma, adesividade ao agregado graúdo, equivalente de areia e teor de material pulverulento. Ensaios realizados pela equipe de LDTPav no ano de 2018.

Tabela 4 – Caracterização dos agregados.

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

\*Necessita da incorporação no ligante de aditivo melhorador de adesividade (dope) ou de adição que confira esta condição.

Fonte: Autora (2018).

#### 4.2. CARACTERIZAÇÃO DO LIGANTE BETUMINOSO

O ligante betuminoso utilizado na pesquisa foi fornecido pela CBB Asfaltos, localizada na cidade de Curitiba-PR. O cimento asfáltico de petróleo (CAP) usado foi o POLIFLEX 60/85, ligante esse que possui adição de 4% do polímero SBS.

Tendo em vista o alto valor de vazios em misturas asfálticas drenantes, característica que a torna suscetível a deformações, o acréscimo de um polímero ao ligante tem por objetivo melhorar a parcela elástica do mesmo, tornando as misturas asfálticas capazes de resistir melhor à deformação permanente.

Para a caracterização dos ligantes, são necessários alguns ensaios normatizados, como penetração, ponto de amolecimento, viscosidade e massa específica. Alguns desses ensaios foram feitos pela empresa fornecedora do ligante e seus resultados apresentados em um laudo, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Ensaios e resultados da caracterização do ligante POLIFLEX 60/85.

CARACTERÍSTICAS		UNIDADE	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADOS	LIMITES	
					MÍNIMO	MÁXIMO
1	Ponto de Amolecimento	°C	NBR 6560	<b>65,4</b>	60	-
2	Penetração, 100g, 5s, 25°C, 0,1mm	0,1 mm	NBR 6576	<b>40</b>	40	70
3	Recuperação Elástica, 20cm, 25°C	%	NBR 15086	<b>90</b>	85	-
4	Viscosidade Brookfield	135°C - spindle 21, 20 rpm	NBR 15184	<b>1605</b>	-	3000
		150°C - spindle 21, 50 rpm		<b>873</b>	-	2000
		177°C - spindle 21, 100 rpm		<b>312</b>	-	1000
5	Ponto de Fulgor	°C	NBR 11341	<b>268</b>	235	-
6	Ensaio de Separação de Fase	Δ P.A. (°C)	NBR 15166	<b>1,2</b>	-	5
7	Solubilidade em Tricloroetileno	% (em massa)	NBR 14855	<b>99,9</b>	-	-
8	Massa específica a 25°C	g/cm <sup>3</sup>	NBR 6296	<b>1,014</b>	-	-

Fonte: Adaptado de CBB Asfaltos (2018).

Além os ensaios de caracterização apresentado na Tabela 5, também foram realizados ensaios após o envelhecimento do ligante no Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), e seus resultados são apresentados na Tabela 6.

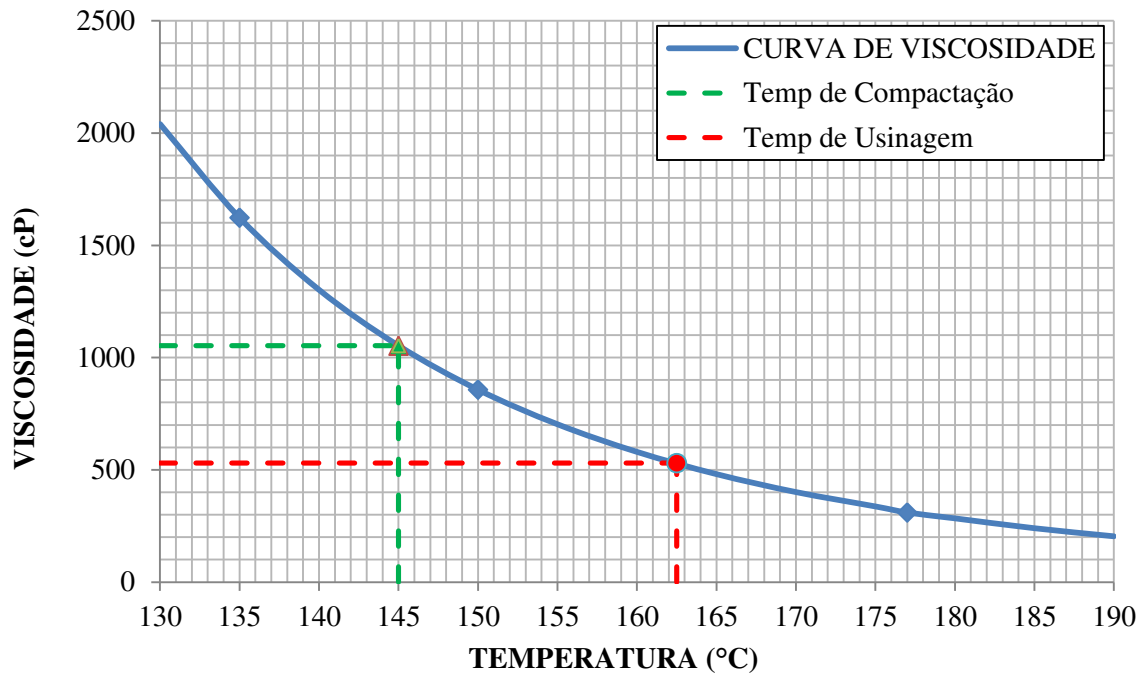
Tabela 6 – Ensaios e resultados da caracterização após envelhecimento do ligante.

CARACTERÍSTICAS		UNIDADE	MÉTODO DE ENSAIO	RESULTADOS	LIMITES	
					MÍNIMO	MÁXIMO
9	Variação de massa	%	NBR 15235	<b>-0,144</b>	-1,0	1,0
10	Variação do Ponto de Amolecimento	°C	NBR 6560	<b>2,3</b>	-5,0	7,0
11	Porcentagem de Recuperação Elástica Original, 20cm, 25°C.	%	NBR 15086	<b>98,2</b>	80	-
12	Porcentagem de Penetração Original, 25°C.	%	NBR 6576	<b>79,6</b>	60	-

Fonte: Adaptado de CBB Asfaltos (2018).

O laudo fornecido juntamente com o ligante pela CBB Asfaltos apresentou o ensaio de viscosidade realizado por meio do método de Brookfield. Dos resultados desse ensaio, foi gerado um gráfico (Figura 10) que relaciona viscosidade e temperatura do ligante, determinando-se as temperaturas de usinagem e compactação das misturas.

Figura 10 – Curva de variação da viscosidade versus temperatura.



Fonte: Adaptado de CBB Asfaltos (2018).

Como se pode observar na Figura 10, as temperaturas trabalhadas com esse tipo de ligante (modificado) são bastante elevadas. Portanto, as temperaturas recomendadas pelo laudo e utilizadas na pesquisa foram de 165°C para usinagem do ligante asfáltico e 145°C para compactação.

#### 4.3. CURVAS GRANULOMÉTRICAS

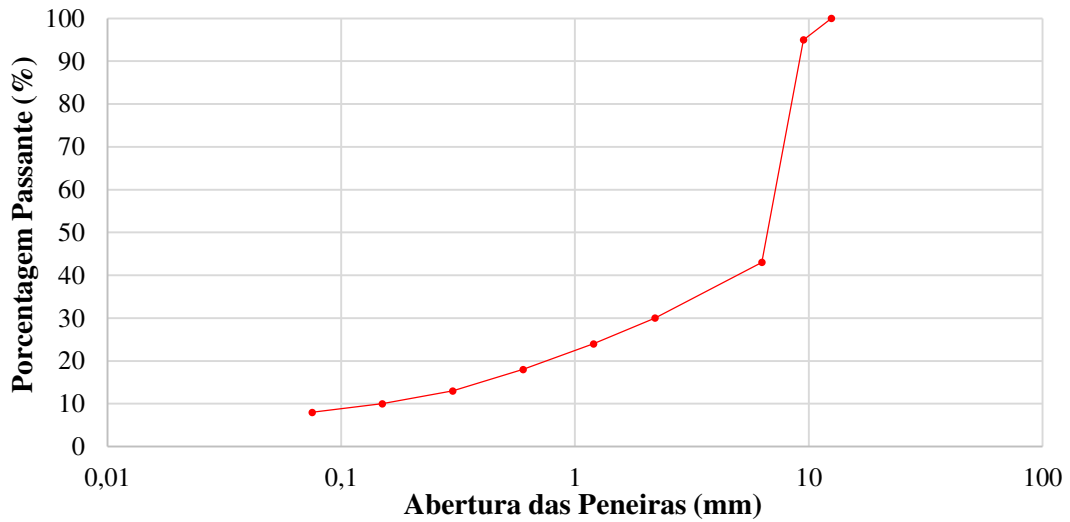
As formulações granulométricas utilizadas foram adaptadas das formulações de referência (Tabela 2 e 3), onde as peneiras usadas foram adequadas de acordo com a disponibilidade das peneiras no LDTPav. As formulações resultantes para a mistura BBDr e BBTM da pesquisa são apresentadas nas Tabelas 7 e 8, respectivamente, assim como suas curvas de distribuição granulométrica (Figuras 11 e 13). Nas Figuras 12 e 14 podem-se observar as diferenças entre as granulometrias de referência e as granulometrias adotadas.

Tabela 7 – Formulação BBDr estudada.

Peneira (mm)	Porcentagem Passante (%)	Porcentagem Retida (%)
12,5	100,0	-
9,5	85,0	15,0
6,3	24,0	61,0
2,2	13,0	11,0
1,2	10,0	3,0
0,6	8,0	2,0
0,3	6,0	2,0
0,15	5,0	1,0
0,075	4,0	1,0
Fundo	-	4,0

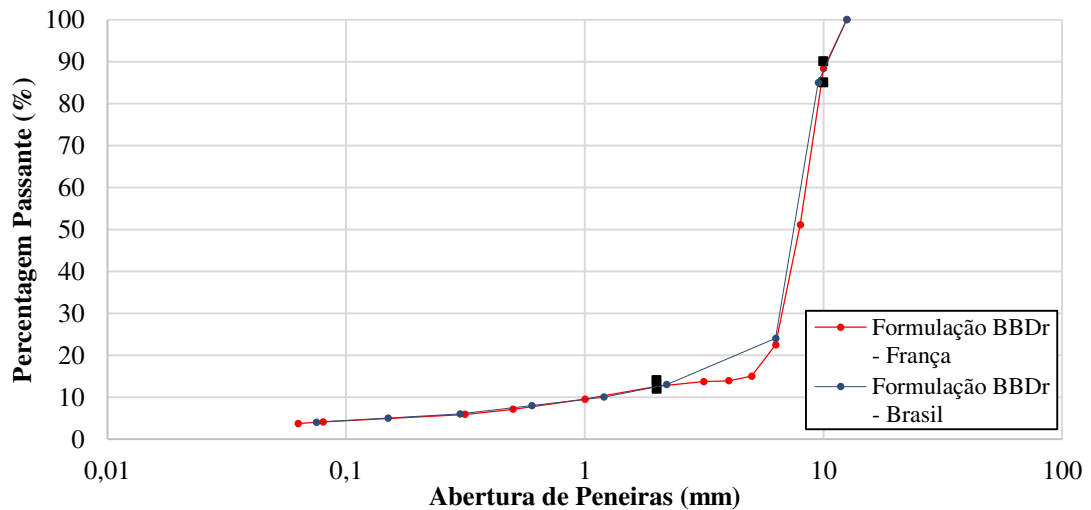
Fonte: Autora (2018).

Figura 11 – Curva da distribuição granulométrica BBDr.



Fonte: Autora (2018).

Figura 12 – Comparação entre as curvas granulométricas para mistura BBDr.



Fonte: Autora (2018).

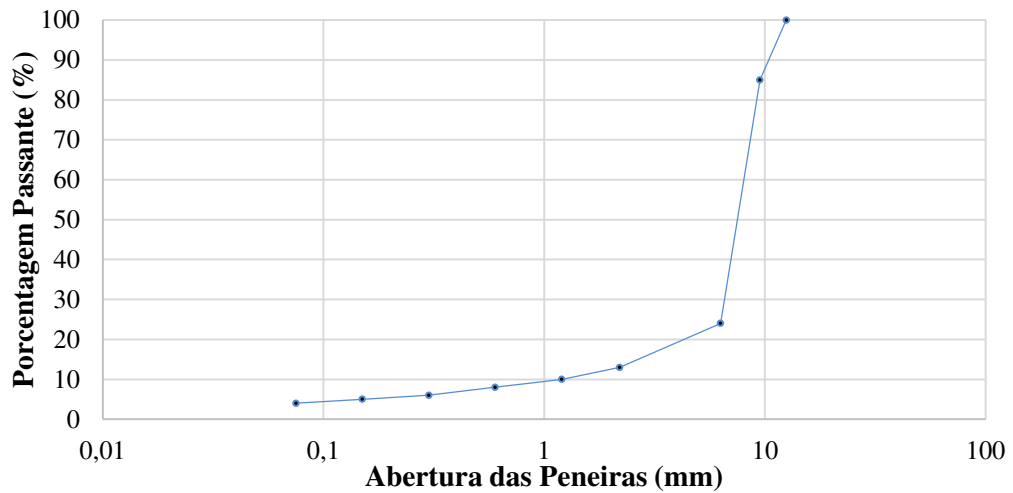


Tabela 8 – Formulação BBTM estudada.

Peneira (mm)	Porcentagem Passante (%)	Porcentagem Retida (%)
12,5	100,0	-
9,5	95,0	5,0
6,3	43,0	52,0
2,2	30,0	13,0
1,2	24,0	6,0
0,6	18,0	6,0
0,3	13,0	5,0
0,15	10,0	3,0
0,075	8,0	2,0
Fundo	-	8,0

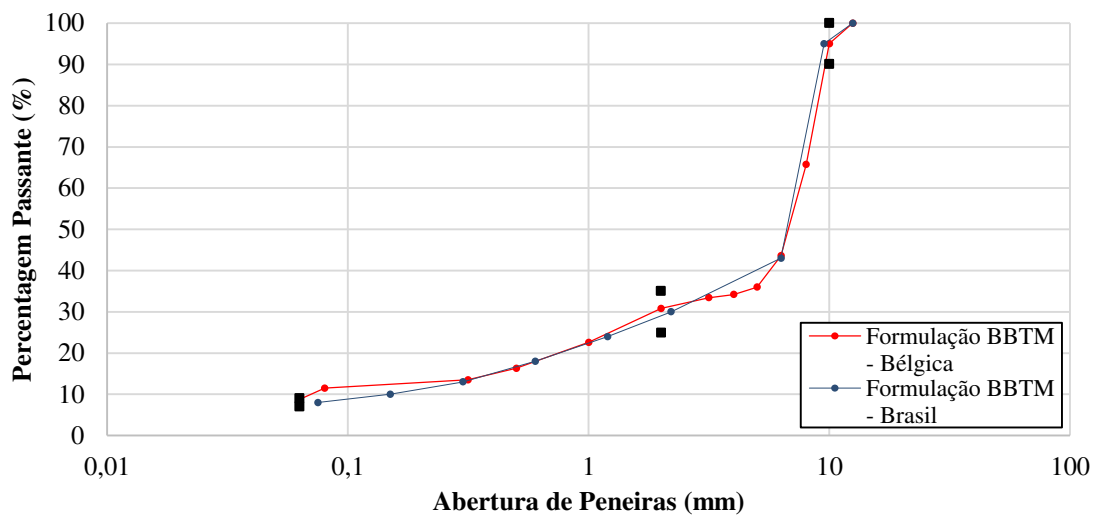
Fonte: Autora (2018).

Figura 13 – Curva da distribuição granulométrica BBTM.



Fonte: Autora (2018).

Figura 14 – Comparação entre as curvas granulométricas para mistura BBTM.

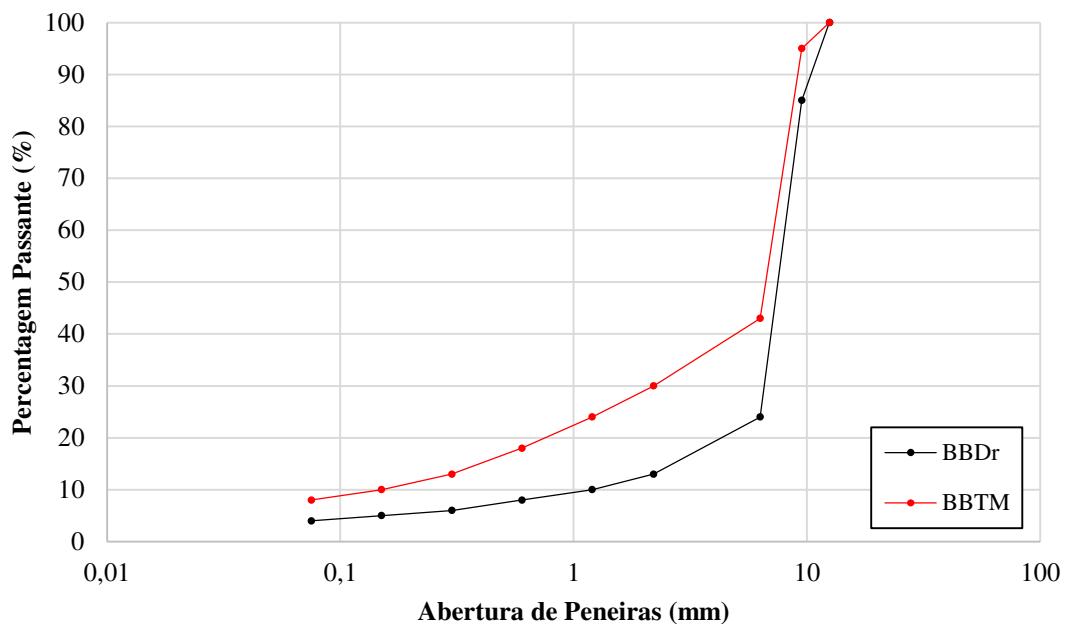


Fonte: Autora (2018).

Os valores das porcentagens retidas são aproximados, e variaram de acordo com o percentual de ligante utilizado, como será apresentado no capítulo 5.

Como apresentado nas Tabelas 7 e 8, e visto nas Figuras 11 e 12, a mistura BBTM apresentam maior percentual de frações finas que a mistura BBDr, diferenciando os dois tipos de formulações (Figura 15). Essa característica torna o BBDr mais drenante e permeável, e o BBTM com características de uma mistura densa.

Figura 15 – Comparação entre as curvas granulométricas BBDr e BBTM estudadas.



Fonte: Autora (2018).

A parte dos materiais miúdos da mistura (finos), como o material de fundo, é usualmente utilizada como material de enchimento dos vazios entre os granulares graúdos, sendo assim o oposto da permeabilidade, que é o do objetivo da funcionalidade das misturas estudadas. Portanto, para obter melhores resultados e melhor trabalhabilidade da mistura, foi necessário diminuir a quantidade utilizada dessa fração, adicionando a cal como substituição de parte do percentual de fundo.

Os concretos drenantes são designados geralmente por notação dada pelas características da sua granulometria (números que expressam o intervalo em milímetros onde se desenvolve a curva granulométrica, por exemplo, 0/10, 0/14 são granulometrias com granulares com tamanhos de 0 mm a 10 mm ou de 0 mm a 14 mm, respectivamente), e pelas características de descontinuidade designadas pelo intervalo (gap) devido à fração de granulares ausentes na formulação granulométrica, por exemplo, 3/6 mm que são os tamanhos

dos granulares excluídos da curva granulométrica (MOMM, 2000). Estas denominações aplicam-se também para as misturas BBTM.

De acordo com as adaptações feitas na sequência das peneiras utilizadas, necessárias devido à disponibilidade em laboratório, as formulações estudadas (BBDr e BBTM) podem ser classificadas com graduação 0/12 e descontinuidade 2/6, pela não utilização da peneira 4,8 que está entre as peneiras 6,3 e 2,2. Com isso, a função de drenabilidade e permeabilidade das misturas são garantidas.

Em breve comparação entre as misturas estudadas, tanto o BBDr quanto o BBTM possuem descontinuidades na formulação, permitindo a formação de vazios e maior rugosidade superficial, possibilitando a drenagem da água da chuva, evitando a hidroplanagem e garantindo boa aderência pneu-pavimento. A mistura BBDr tende a ter maior teor de vazios, garantindo maior permeabilidade, porém a torna mais suscetível à desagregação (arrancamento) dos granulares na superfície.

Ensaio como o de permeabilidade das misturas e o cántabro, para verificação do desgaste superficial, foram feitos por meio dos corpos de prova fabricados pela metodologia Marshall e apresentados nos capítulos que seguem.

## 5. ENSAIOS LABORATORIAIS

Com o objetivo de apontar prováveis teores ótimos com potencial de aplicação no campo, ensaios laboratoriais foram propostos para obter os resultados necessários. Este capítulo trata de tais ensaios realizados. Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram feitos a partir das curvas granulométricas teóricas, e por meio da metodologia Marshall, estabelecida pelo DNER-ME 043/95.

Foram ainda realizados ensaios para verificação dos vazios comunicantes da mistura BBDr (AFNOR NF EN 13108-7), de permeabilidade dos corpos de prova de ambas as misturas (AFNOR NF EN 13108-7), assim como a verificação da rugosidade superficial, pelo ensaio da mancha de areia (LCPC RG-2/71), e a resistência ao desgaste superficial por meio do ensaio cántabro (NBR 15140/2014).

A execução de todos os ensaios apresentados realizou-se no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da UFSC.

### 5.1.METODOLOGIA MARSHALL

O método de dosagem Marshall foi criado por Bruce Marshall do Mississippi State Highway Department e foi adotado pelo United States Army Corps of Engineers (USACE), com o objetivo de controle de campo de projetos e construção de aeroportos militares e determinação do teor ótimo de betume das misturas (SENÇO, 2001). Esse método é oficialmente adotado no Brasil para dosagem de misturas asfálticas e normatizado pelo DNER-ME 043/95, 1995.

Tendo como objetivo a determinação do teor ótimo (dosagem de ligante), são realizadas análises dos parâmetros físicos e mecânicos referentes ao comportamento das misturas asfálticas, a partir da compactação de corpos de prova cilíndricos (BÚRIGO, 2015).

Os principais parâmetros a serem determinados são: estabilidade (resistência máxima à compressão radial), fluência (deformação total apresentada pelo corpo de prova), densidade

volumétrica aparente e real, teor de vazios (%V), vazio cheio de betume (VCB), vazios do agregado mineral (VAM) e relação betume/vazios (RBV) dos corpos de prova.

Para a presente pesquisa, levando em conta que se trata de uma análise funcional e não estrutural do pavimento asfáltico, considerou-se os seguintes parâmetros a ser determinado por meio da aplicação da metodologia Marshall para os corpos de prova: densidade volumétrica aparente e real, teor de vazios (%V), vazios comunicantes, permeabilidade, mancha de areia e cántabro.

Os corpos de prova Marshall devem ter 1200 gramas cada, sendo a quantidade para cada fração determinada pelas curvas granulométricas apresentadas na seção 4.3 (Figuras 11 e 13), as mesmas tendo como referência as curvas apresentadas na seção 3.5 (BBDr aplicada em Lille e BBTM em Hainaut).

Com base nas formulações de referência, fixaram-se previamente cinco teores de ligantes para cada tipo de mistura. Para BBDr, as porcentagens foram 4,22%, 4,54%, 4,70%, 4,86% e 5,18%. E para a mistura BBTM, utilizou-se 4,86%, 5,18%, 5,50%, 5,82% e 6,14%. Para obter a quantidade de material de cada fração, multiplica-se o percentual dado na composição da matriz granular pela massa total da amostra (1200g).

Com essas informações determinaram-se então as quantidades, em gramas, de cada mistura equivalente ao teor utilizado, como apresentados nas Tabelas 8 e 9, para a mistura BBDr e BBTM respectivamente.

Tabela 9 - Quantidade de ligante e granulares utilizados nas misturas BBDr.

Teor de ligante (%)	4,22	4,54	4,7	4,86	5,18
<b>Ligante em peso (g)</b>	<b>50,64</b>	<b>54,48</b>	<b>56,4</b>	<b>58,32</b>	<b>62,16</b>
Peneiras (mm)	Quantidade por fração (g)				
9,5	172,40	171,83	171,54	171,25	170,68
6,3	701,11	698,77	697,60	696,42	694,08
2,2	126,43	126,01	125,80	125,58	125,16
1,2	34,48	34,37	34,31	34,25	34,14
0,6	22,99	22,91	22,87	22,83	22,76
0,3	22,99	22,91	22,87	22,83	22,76
0,15	11,49	11,46	11,44	11,42	11,38
0,075	11,49	11,46	11,44	11,42	11,38
FUNDO	22,99	22,91	22,87	22,83	22,76
CAL	22,99	22,91	22,87	22,83	22,76
<b>Total (g)</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>

Fonte: Autora (2018).

Tabela 10 - Quantidade de ligante e granulares utilizados nas misturas BBTM.

Teor de ligante (%)	4,86	5,18	5,5	5,82	6,14
<b>Ligante em peso (g)</b>	<b>58,32</b>	<b>62,16</b>	<b>66</b>	<b>69,84</b>	<b>73,68</b>
Peneiras (mm)	Quantidade por fração (g)				
9,5	57,08	56,89	56,70	56,51	56,32
6,3	593,67	591,68	589,68	587,68	585,69
2,2	148,42	147,92	147,42	146,92	146,42
1,2	68,50	68,27	68,04	67,81	67,58
0,6	68,50	68,27	68,04	67,81	67,58
0,3	57,08	56,89	56,70	56,51	56,32
0,15	34,25	34,14	34,02	33,90	33,79
0,075	22,83	22,76	22,68	22,60	22,53
FUNDO	68,50	68,27	68,04	67,81	67,58
CAL	22,83	22,76	22,68	22,60	22,53
<b>Total (g)</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>

Fonte: Autora (2018).

A quantidade total de material granular necessário para a preparação dos corpos de prova de cada teor foi separada entre grãos (peneiras 9,5 a 2,2 mm) e finos (peneiras 1,2 a 0,075, juntamente com fundo e cal). Os materiais granulares devem ser separados em recipientes possíveis de serem elevados a altas temperaturas, com isso, foram utilizadas marmitas de alumínio, como mostra a Figura 16.

Figura 16 – Separação dos granulares.



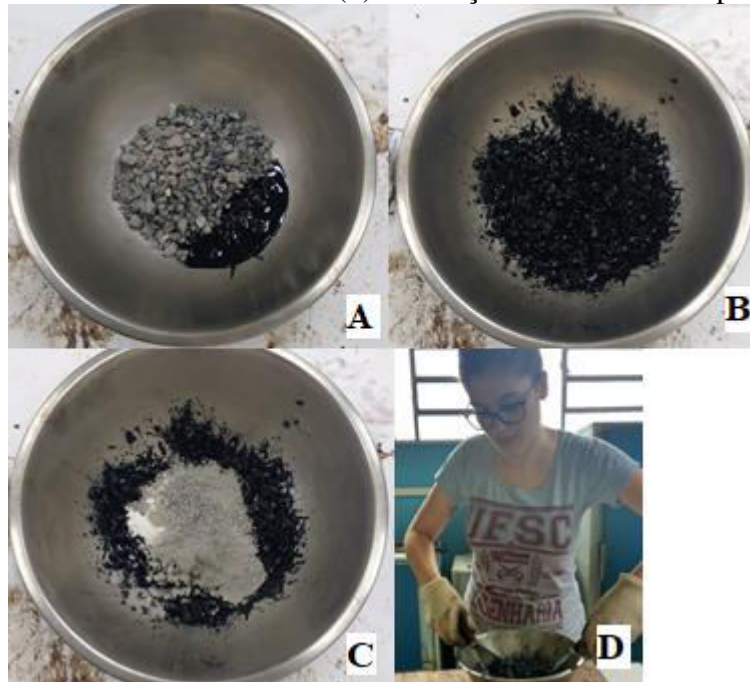
Fonte: Autora (2018).

Com as amostras dos granulares separadas, os mesmos devem ir à estufa para atingir a temperatura de usinagem da mistura. Tal temperatura foi estabelecida para o ligante, pelo resultado do ensaio de viscosidade realizado por meio do método de Brookfield, fornecido pela empresa CBB Asfaltos (Figura 10).

Portanto, para que seja realizada a mistura entre o ligante e os granulares, o ligante deve estar previamente aquecido a 165°C (temperatura de usinagem) e os granulares a 178°C (13°C acima da temperatura de usinagem do ligante). Esse aumento de temperatura para os granulares se deve ao fato de que os mesmos perdem calor mais rapidamente quando comparados ao ligante.

Inicialmente misturaram-se os granulares graúdos com a quantidade total de ligante previsto naquele teor. Após os granulares e o ligante se apresentarem bem envolvidos, foi adicionado a parte fina à mistura, como mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Realização das misturas asfálticas para os corpos de prova Marshall: (a) ligante asfáltico adicionado aos granulares graúdos, (b) envolvimento total da mistura, (c) adição da parte fina a ser misturada e (d) realização da mistura completa.



Fonte: Autora (2018).

Devido à alta área superficial dos granulares finos, acabam absorvendo maior quantidade de ligante, podendo ser precária a película de betume sobre os granulares graúdos se misturados juntos. Por esse motivo, foi realizada a adição separada do esqueleto mineral durante a mistura, para que se obtivesse um melhor envolvimento da película de ligante em todos os granulares.

Após a mistura pronta, a mesma foi levada para a estufa na temperatura de compactação de 145 °C (Figura 10) por duas horas, juntamente com os moldes cilíndricos que também devem estar aquecidos para evitar perda de temperatura no processo de compactação (Figura 18).

Figura 18 – Molde utilizado para os corpos de prova Marshall.



Fonte: Autora (2018).

Os moldes utilizados na compactação devem ser de aço, compostos de anel superior e inferior e de uma placa base. A placa base e o anel superior devem encaixar-se perfeitamente nas extremidades do anel inferior (DNER-ME 383/99).

Foi adicionado papel-filtro no fundo do molde para evitar a perda do material em contato com a placa base. A amostra a ser compactada foi retirada da estufa e transferida para o molde, onde foi feita a pré-compactação e nivelamento do corpo de prova por meio de 25 espatuladas (15 nas bordas e 10 no centro). Uma vez nivelado, foi inserido outro papel-filtro com o mesmo propósito do adicionado no fundo.

A compactação dos corpos de prova foi dada por meio do impacto do soquete, aplicando 75 golpes em cada uma de suas faces, resultando em 150 golpes por corpo de prova. O equipamento utilizado foi o soquete Marshall automático, que tem baixa variação da energia aplicada, compactando os corpos de prova de maneira uniforme (Figura 19).



Figura 19 – Soquete Marshall automático.



Fonte: Autora (2018).

Após a compactação, aguardou-se tempo suficiente para o resfriamento do corpo de prova, a ponto que fosse possível tocá-lo sem a proteção de luvas. Para extraí-lo do molde cilíndrico utilizou-se um suporte e o próprio soquete Marshall. A extração é feita a partir de golpes manuais com o soquete.

Para maior confiabilidade e segurança dos resultados dos ensaios a serem realizados, foram fabricados 5 corpos de prova para cada teor de ligante proposto. Portanto, ao total, foram feitos 50 corpos de prova, sendo 25 para a mistura BBDr e 25 para a mistura BBTM, apresentados na Figura 20.

Figura 20 – Corpos de prova Marshall.



Fonte: Autora (2018).

Depois de feitos os ensaios propostos (e que terão seus resultados apresentados no capítulo 6), notou-se a necessidade de serem feitos mais corpos de prova com teores diferentes, a fim de chegar aos resultados esperados. Portanto, para a mistura BBDr, acrescentaram-se os teores 3,58% e 3,90%, e para a mistura BBTM acrescentou-se o teor 4,22%.

Os novos corpos de prova, 5 para cada teor, foram feitos seguindo as quantidades apresentadas nas Tabelas 11 e 12, para BBDr e BBTM respectivamente.

Tabela 11 - Quantidade de ligante e granulares utilizados nos novos corpos de prova BBDr.

Teor de ligante (%)	3,58	3,9
<b>Ligante em peso (g)</b>	<b>43,0</b>	<b>46,8</b>
Peneiras (mm)	Quantidade por fração (g)	
9,5	173,6	173,0
6,3	705,8	703,5
2,2	127,3	126,9
1,2	34,7	34,6
0,6	23,1	23,1
0,3	23,1	23,1
0,15	11,6	11,5
0,075	11,6	11,5
FUNDO	23,1	23,1
CAL	23,1	23,1
<b>Total (g)</b>	<b>1200,0</b>	<b>1200,0</b>

Fonte: Autora (2018).

Tabela 12 - Quantidade de ligante e granulares utilizados nos novos corpos de prova BBTM.

Teor de ligante (%)	4,22
<b>Ligante em peso (g)</b>	<b>50,6</b>
Peneiras (mm)	Quantidade por fração (g)
9,5	57,8
6,3	595,9
2,2	148,7
1,2	68,5
0,6	68,5
0,3	59,2
0,15	35,1
0,075	23,6
FUNDO	68,5
CAL	23,6
<b>Total (g)</b>	<b>1200,0</b>

Fonte: Autora (2018).

Devido às diferenças existentes nas formulações das duas misturas estudadas, a mistura BBTM apresenta maior percentual de frações finas que a mistura BBDr, tornando-a mais drenante e permeável. Essa diferença é visível quando comparados os corpos de prova (Figura 21).

Figura 21 – Diferenças entre os corpos de prova BBTM e BBDr.



Fonte: Autora (2018).

Pode-se notar que os corpos de prova BBDr ficaram mais altos que em relação aos corpos de prova BBTM, isso devido ao maior teor de vazios presentes nessa mistura, aumentando também sua rugosidade superficial.

Para obter os parâmetros necessários para determinar os teores ótimos para as misturas asfálticas analisadas, foram realizadas pesagens dos corpos de prova, determinação da altura média a partir da medição, com paquímetro, em 3 pontos distintos em cada corpo de prova (Figura 22).

Figura 22 – Parâmetros necessários: (a) medição da altura com paquímetro e (b) pesagem do corpo de prova.



Fonte: Autora (2018).

Conhecidos os valores obtidos por meio das pesagens e das alturas, além das propriedades já apresentadas com relação ao ligante no capítulo 4.2, determinou-se os valores de densidade aparente volumétrica ( $D_{apV}$ ), densidade volumétrica real (MVR), teor de vazios ( $V\%$ ), vazio cheio de betume (VCB), vazio do agregado mineral (VAM) e relação betume/vazio (RBV).

### 5.1.1. Densidade Aparente Volumétrica

A densidade aparente volumétrica ( $D_{apV}$ ), medida na presente pesquisa, corresponde à relação entre a massa de determinado corpo de prova e o volume ocupado pelo mesmo, nas condições de compactação e adensamento.

A densidade aparente é dada pela Equação 5, onde se utilizou os valores das massas aferidas para cada corpo de prova assim como a sua altura média.

$$D_{apV} = \frac{PS}{(\pi * r^2 * H_m)} \quad (5)$$

Onde:

$D_{apV}$  = Densidade aparente volumétrica ( $g/cm^3$ )

PS = peso seco do corpo de prova (g);

r = raio do corpo de prova (cm);

$H_m$  = altura média do corpo de prova (cm).

### 5.1.2. Densidade Volumétrica Real

A massa específica volumétrica real (MVR) ou densidade volumétrica real segue o procedimento inicial semelhante ao do Marshall, porém a massa de cada amostra é de 635g e as misturas não são compactadas. Foram feitas duas misturas para cada teor de ligante proposto e calculada a média aritmética destes para a obtenção do valor final da densidade real para cada uma das misturas. Depois de feita a mistura, esta ficou 24 horas à temperatura ambiente.

Para o início do ensaio, esfarelou-se a mistura em um recipiente de modo que fosse possível desgrumar a maioria dos granulares e então pesa-los, aferindo seu peso seco.

Utilizou-se um conjunto (picnômetro mais rolha) calibrado e com peso e volume conhecidos para o andamento do ensaio. O picnômetro foi preenchido com cerca de 800 mL de água e aferiu-se o peso do conjunto, depois disso, colocou-se toda mistura dentro do picnômetro com a água, pesando novamente todo o conjunto.

Ao fim dessas pesagens, completou-se o picnômetro com água e retirou-se o excesso de bolhas de ar formadas com o auxílio de uma haste. Após, o picnômetro é levado para a máquina de vácuo (Figura 23), onde permaneceu por 30 min. Ao retirá-lo do vácuo, com uma haste novamente, agitou-se água para retirada das bolhas remanescentes. Para última aferição de peso, preencheu-se o picnômetro com água até o menisco da rolha.

Figura 23 – Mistura na máquina de vácuo.



Fonte: Autora (2018).

Com os pesos de todas as etapas citadas, aplica-se a Equação 6 para determinação da massa volumétrica real das misturas.

$$\text{MVR} = \frac{(c-a)}{[(b-a)-(d-c)]} \quad (6)$$

Onde:

MVR = Massa específica volumétrica real da mistura (g/cm<sup>3</sup>);

a = Massa do picnômetro vazio (tara) (g);

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

c = Massa do picnômetro contendo a amostra (g);

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

Com os valores de massa aparente volumétrica e massa volumétrica real, é possível calcular o teor de vazios que cada teor apresenta.

### 5.1.3. Teor de Vazios

O teor de vazios (V%) é obtido por meio da Equação 7, que relaciona o volume de vazios e o volume total da mistura asfáltica, em função das densidades aparente e real já calculada.

$$V\% = \frac{\text{MVR} - \text{DapV}}{\text{MVR}} * 100 \quad (7)$$

Onde:

V% = teor de vazios (%);

MVR = massa específica volumétrica real (g/cm<sup>3</sup>);

DapV = densidade aparente volumétrica (g/cm<sup>3</sup>).

Esse parâmetro é bastante relevante para a mistura do tipo BBDr, pois, para a finalidade de drenar por permeabilidade a água da chuva, é esperado que o teor de vazios seja igual ou superior a 20% (OBSERVATOIRE DES TECHNIQUES DE CHAUSSÉES, 1997). Já pelas recomendações do DNIT, espera-se entre 18% e 25% a partir do ensaio Marshall.

## 5.2.VAZIOS COMUNICANTES

O ensaio de vazios comunicantes consiste em medir a quantidade de água que penetra no interior do corpo de prova pela face superior, mantendo uma película de água constante durante 10 minutos, enquanto as faces laterais e a inferior estão impermeabilizadas (AFNOR NF EN 13108-7).

A impermeabilização das laterais e face inferior do corpo de prova foi possível com o uso de fita impermeável e parafina (Figura 24).

Figura 24 – Impermeabilização dos corpos de prova para ensaio de vazios comunicantes.



Fonte: Autora (2018).

A percentagem de vazios comunicantes ( $V_{com}\%$ ) foi obtida por meio da Equação 8.

$$V_{com}\% = \frac{Ph_{2o}}{A \cdot H_{red}} * 100 \quad (8)$$

Onde:

$V_{com}\%$  = Vazios comunicantes (%);

$Ph_{2o}$  = Peso da água absorvida (g);

$A$  = Área da face ( $cm^2$ );

$H_{red}$  = Altura reduzida (cm), expressa pela Equação 9.

$$H_{red} = H_m - \frac{D_{m\acute{a}x}}{20} \quad (9)$$

Onde:

$H_m$  = Altura média dos corpos de prova (cm);

$D_{m\acute{a}x}$  = diâmetro máximo (cm).

Segundo a norma francesa NF EN 13108-7, os limites de vazios comunicantes para as misturas asfálticas drenantes são de 16 a 20%. Nenhuma normatização brasileira prevê esse tipo de especificação.

Esse ensaio foi realizado apenas nos corpos de prova BBDr, pois pela formulação do BBTM estudada, essa mistura não tem como proposta ser do tipo permeável.

A importância desse ensaio para as misturas estudadas é que o mesmo simula o quanto a mistura conseguirá reter água durante um período de chuva intensa, dessa maneira a água entra pelos vazios evitando acúmulo na pista, diminuindo os efeitos da hidroplanagem, viscoplanagem e o efeito spray.

### 5.3.PERMEABILIDADE

Foi necessário adaptar o aparelho de drenabilidade para conseguir medir a permeabilidade dos corpos de prova (Figura 25).

Como suporte utilizou-se um anel metálico onde foi encaixada a face inferior do corpo de prova, na face superior colocou-se o tubo cilíndrico que contém um anel de vedação. Foi necessário adicionar ainda um anel metálico de massa significativa, para garantir a vedação, impossibilitando a água de sair pelas laterais e apenas percolar verticalmente por dentro do corpo de prova.

Adicionou-se água no cilindro e com o auxílio de uma rolha foi possível liberar a saída da água através do orifício, no fundo do cilindro, para percolar no corpo de prova. Foi tomado o tempo que levou para a água escoar da marcação superior até a inferior, tornando a altura da coluna d'água igual a todos os corpos de prova.



Figura 25 – Adaptação para ensaio de permeabilidade.



Fonte: Autora (2018).

Com os dados preestabelecidos de altura da coluna d'água (24,00 cm), diâmetro do tubo (9,30 cm), volume de água (1671,06 cm<sup>3</sup>) e diâmetro do orifício (3,00 cm), e com o tempo tomado em cada ensaio, foi possível estabelecer a velocidade (permeabilidade) e a vazão de percolação (Equações 10 e 11, respectivamente).

A norma francesa NF EN 13108-7, diz que valores para permeabilidade a partir de 0,6cm/s é considerada aceitável. Não há nenhuma especificação desse tipo em normas brasileiras.

$$V = \frac{Hh_2o}{t} \quad (10)$$

$$Q = \frac{Aorifício}{V} \quad (11)$$

Onde:

V = Velocidade (cm/s);

Hh<sub>2o</sub> = Altura da coluna d'água;

t = Tempo (s);

Q = Vazão (cm<sup>3</sup>/s);

Aorifício = Área do orifício (cm).

Na Figura 26 é possível observar um corpo de prova BBDr submetido ao ensaio, com a água percolando por entre seus vazios verticalmente e escoando na face inferior.

Figura 26 – Ensaio de permeabilidade.



Fonte: Autora (2018).

Esse ensaio foi realizado somente nos corpos de prova das misturas BBDr, pois a formulação proposta para a mistura BBTM não tem viés permeável.

#### 5.4.MANCHA DE AREIA

Entre os principais métodos para avaliação da macrotextura de uma mistura asfáltica, um dos mais utilizados é o método da mancha de areia, onde uma quantidade determinada de areia fina é colocada sobre a superfície do pavimento e espalhada de forma circular com um soquete especial de base de borracha. O diâmetro da circunferência assim formado é a medida para a definição da textura (MEURER FILHO, 2001).

Em pavimentos que tenham maior rugosidade superficial, o diâmetro de areia espalhada será menor; menor rugosidade superficial, diâmetros maiores.

Os procedimentos do ensaio seguiram as recomendações da norma francesa LCPC RG-2/71 (1971). Foi necessário ajustar a quantidade de areia utilizada, já que o ensaio foi

feito sobre o próprio corpo de prova Marshall, com dimensões reduzidas, quando comparado às placas normalmente utilizadas. Depois de calculada a proporção, determinou-se 2,11 cm<sup>3</sup> de areia para execução do ensaio.

A Equação 12 determina a altura média da areia das misturas ensaiadas.

$$HS = \frac{4*V}{\pi*(Dm^2)} \quad (12)$$

Onde:

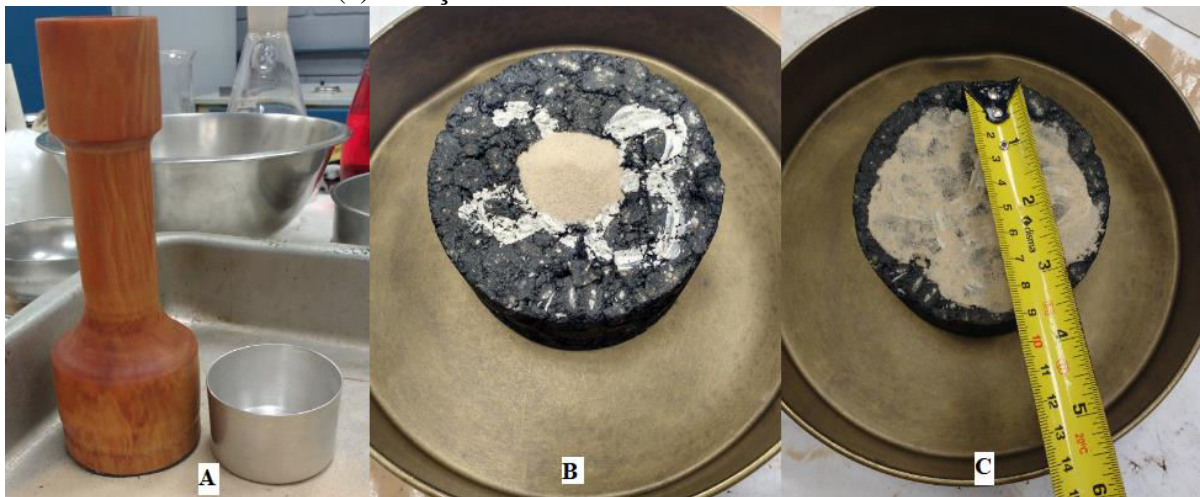
HS = Altura média da macrotextura (cm);

V = Volume de areia a ser espalhado (cm<sup>3</sup>);

Dm = Diâmetro média formado pelo espalhamento da areia (cm).

Para o Dm foi medido o diâmetro resultante do espalhamento da areia em três direções diferentes e calculada a média aritmética. Na Figura 27 apresentam-se as etapas realizadas no ensaio para a presente pesquisa.

Figura 27 – Etapas do ensaio mancha de areia para corpos de prova BBTM: (a) soquete especial de base de borracha e medidor de areia, (b) aplicação da areia sobre o corpo de prova e (c) aferição do diâmetro de areia resultante.



Fonte: Autora (2018).

O ensaio de mancha de areia foi realizado apenas sobre os corpos de prova BBTM. Para a mistura do tipo BBDr (com alto teor de vazios comparado ao BBTM) não se considerou o ensaio, pois os grãos de areia penetram nos poros da mistura, tornando o resultado falso. Medidas de rugosidade para misturas asfálticas drenantes devem ser feitas diretamente no campo, com aparelhos específicos.

## 5.5.CÁNTABRO

Esse ensaio foi feito segundo a normatização ABNT NBR 15140/2014, que recomenda o uso da máquina Los Angeles sem a carga abrasiva (esferas de aço) para realização do ensaio, juntamente com os corpos de prova Marshall já feitos.

O ensaio cántabro permite determinar o teor mínimo de ligante, pois reproduz as tendências observadas no desprendimento de agregados das misturas drenantes quando colocadas em pistas (MEURER FILHO, 2001).

Na presente pesquisa foi determinado o procedimento B descrito na norma (ABNT NBR 15140/2014), onde é medido o desgaste dos corpos de prova em condição úmida, em função de ser a condição mais severa de avaliação da resistência à desagregação.

Com a aferição prévia do peso seco de cada corpo de prova, os mesmos ficaram submersos em água a 60°C por 24 horas, e quando retirados, ficaram drenando por 2h a 25°C.

Após o tempo previsto, os corpos de prova foram colocados no tambor de abrasão Los Angeles, individualmente, e submetidos a 300 revoluções. Após esse tempo, o corpo de prova foi retirado e novamente pesado, para que assim fosse realizada a comparação dos pesos e determinar a perda por desgaste superficial da mistura (Equação 13).

O desgaste máximo estabelecido pela norma é de 25% (NBR 15140, 2014). Não há parâmetros de comparação com normas francesas.

$$DC\% = \frac{(P1-Pc2)}{P1} * 100 \quad (13)$$

Onde:

DC = desgaste superficial do corpo de prova pelo ensaio cántabro (%);

P1 = Peso seco, antes do ensaio (g);

P2 = Peso após o ensaio cántabro (g).

Os desgastes superficiais apresentados pelos corpos de prova podem ser observados pela Figura 28, onde é comparado um corpo de prova BBDr retirado do tambor de abrasão Los Angeles com outro antes do ensaio.

Figura 28 – Comparação dos corpos de prova BBDr antes e depois do ensaio cántabro.



Fonte: Autora (2018).

Esse ensaio foi feito apenas nos corpos de prova BBDr devido ao seu alto teor de vazios, tornando assim essa mistura mais susceptível ao desgaste superficial. Para a mistura BBTM o ensaio foi desconsiderado por tratar-se de uma mistura com menor teor de vazios, com comportamento de uma mistura densa. Portanto, esse ensaio não traria resultados expressivos.

## 6. RESULTADOS E ANÁLISES

Tendo como parâmetros as limitações das normas apresentadas na Tabela 13, para a formulação BBD<sub>r</sub>, a análise dos resultados obtidos por meio dos ensaios propostos é apresentada nesse capítulo. Como a mistura BBTM não é regulamentada no Brasil, levou-se em conta apenas as recomendações francesas.

Tabela 13 – Limites normativos dos ensaios realizados para misturas drenantes.

ENSAIOS	BRASIL		FRANÇA	
	LIMITES	NORMA	LIMITES	NORMA
Teor de Vazios	18% a 25%	DNER-ES 386	≥ 20% (40 giros PCG) ou ≥ 14% (200 giros PCG)	NF EN 13108-7
Vazios Comunicantes	-	-	16% a 20%	NF EN 13108-7
Permeabilidade	-	-	≥ 0,6 cm/s	-
Cántabro	≤ 25%	DNER-ES 386	-	-
Resistência à tração	≥ 5,5 kgf/cm <sup>2</sup>	DNER-ES 386	-	-

Fonte: Adaptado de DNER-ES 386 (1999).

É necessária a explicação da não realização do ensaio de tração indireta, previsto na Tabela 13 adaptada da norma DNER-ES 386/99 (pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito). O ensaio de resistência à tração indireta é previsto pelo DNIT e especificado pela NBR 15087/2012.

Tendo em vista que as misturas asfálticas estudadas na presente pesquisa têm caráter funcional e que sua proposta de formulação segue a metodologia francesa, não há a necessidade de submeter as misturas (tanto BBD<sub>r</sub> quanto BBTM) a um ensaio que determina sua resistência mecânica, pois essas não têm funções estruturais quando aplicadas no campo.

Com base nos corpos de prova feitos pela metodologia Marshall, a partir da formulação proposta com base na metodologia francesa, foi feitos os ensaios para definir densidade aparente volumétrica e real, teor de vazios, vazios comunicantes, permeabilidade e cántabro para as misturas BBD<sub>r</sub> e para determinar densidade aparente volumétrica e real, teor de vazios e mancha de areia para BBTM.

## 6.1.RESULTADOS E ANÁLISES DA MISTURA BBDr

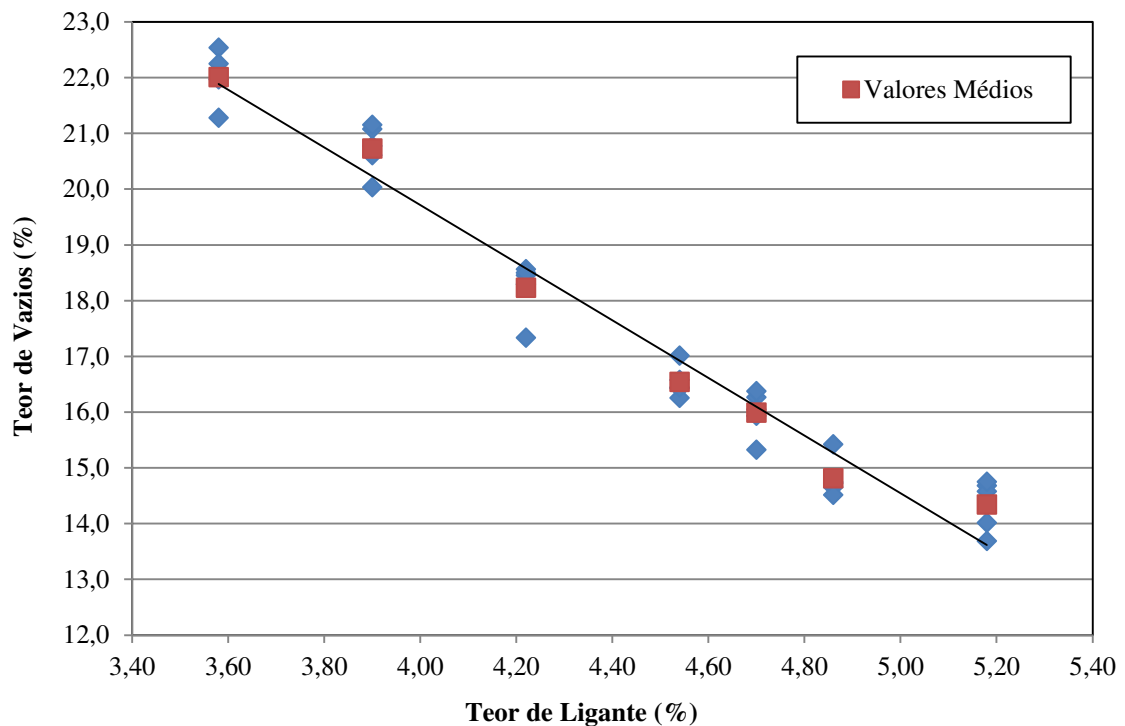
Depois de seguidas as etapas da metodologia Marshall para fabricação dos corpos de prova e feita a mistura para o ensaio de massa específica volumétrica real (apresentados no capítulo 5.1). Os valores resultantes do ensaio de densidade volumétrica real (MVR) estão apresentados na Tabela 14. Os valores resultantes para o teor de vazios (%V), que é mostrado na Figura 29.

Tabela 14 – Resultado do ensaio MVR para o BBDr.

Teor de Ligante	MVR (g/cm <sup>3</sup> )
3,58	2,645
3,9	2,627
4,22	2,562
4,54	2,553
4,70	2,551
4,86	2,548
5,18	2,545

Fonte: Autora (2018).

Figura 29 – Teor de vazios BBDr.



Fonte: Autora (2018).

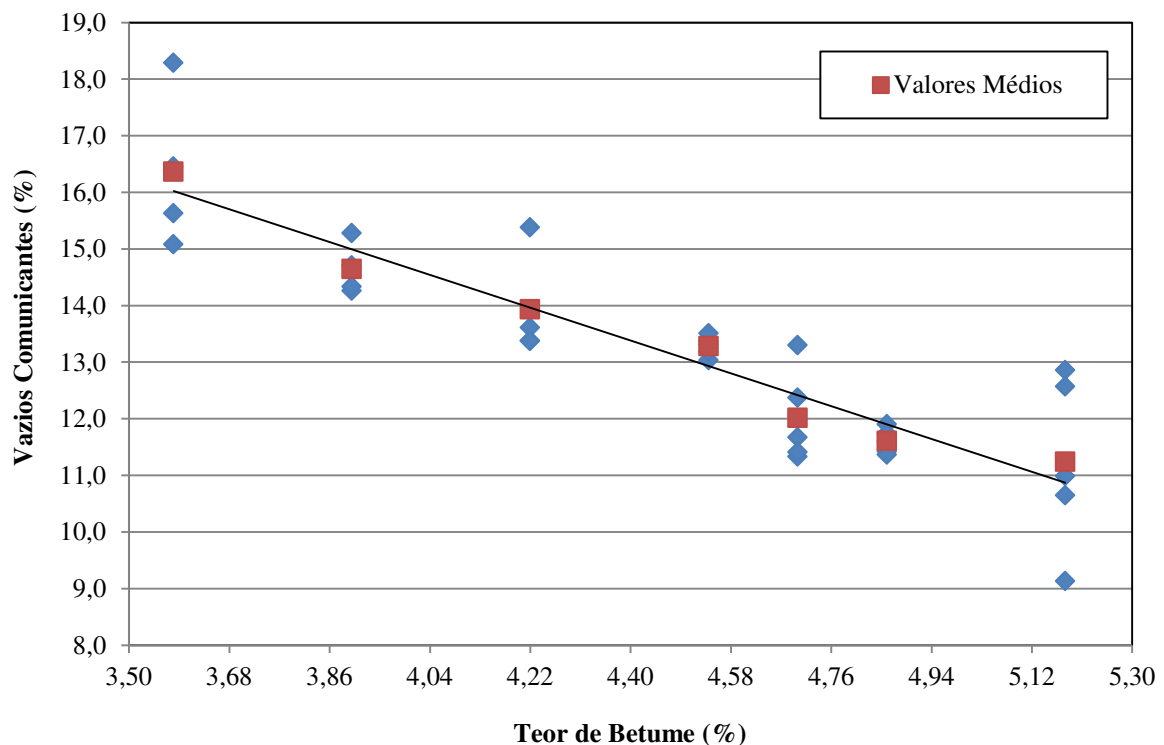
Tendo como parâmetro a Tabela 13 (limites normativos dos ensaios realizados para misturas drenantes), podemos concluir que os teores 3,58%, 3,90%, 4,22% atingiram os limites impostos pela norma brasileira para teor de vazios que diz o deve ser entre 18% e 25%, com resultados de 22%, 20,72% e 18,23%, respectivamente aos teores citados.

Para a norma francesa, não há como relacionar diretamente os resultados obtidos com os limites estipulados, pois os corpos de prova foram feitos pela metodologia Marshall, onde a compactação é feita com 150 golpes ao total sobre o corpo de prova, sendo assim muito mais severa quando comparada com a prensa de compactação por cisalhamento giratória (PCG), que é o parâmetro francês.

Entretanto, mesmo nas condições apresentadas, os teores 3,58% e 3,90% ultrapassaram os 20% previstos para 40 giros, e todos os teores atingiram os 14% para 200 giros. Com isso, se essas formulações forem reproduzidas de acordo com a metodologia francesa, por meio da PCG, há um forte indicativo de que os teores poderão ser aprovados em razão da menor severidade de compactação, em relação ao ensaio Marshall.

A partir dos resultados do teor de vazios, analisaram-se então os vazios comunicantes da mistura BBDr, que são mostrados na Figura 30.

Figura 30 – Vazios comunicantes do BBDr.



Fonte: Autora (2018).



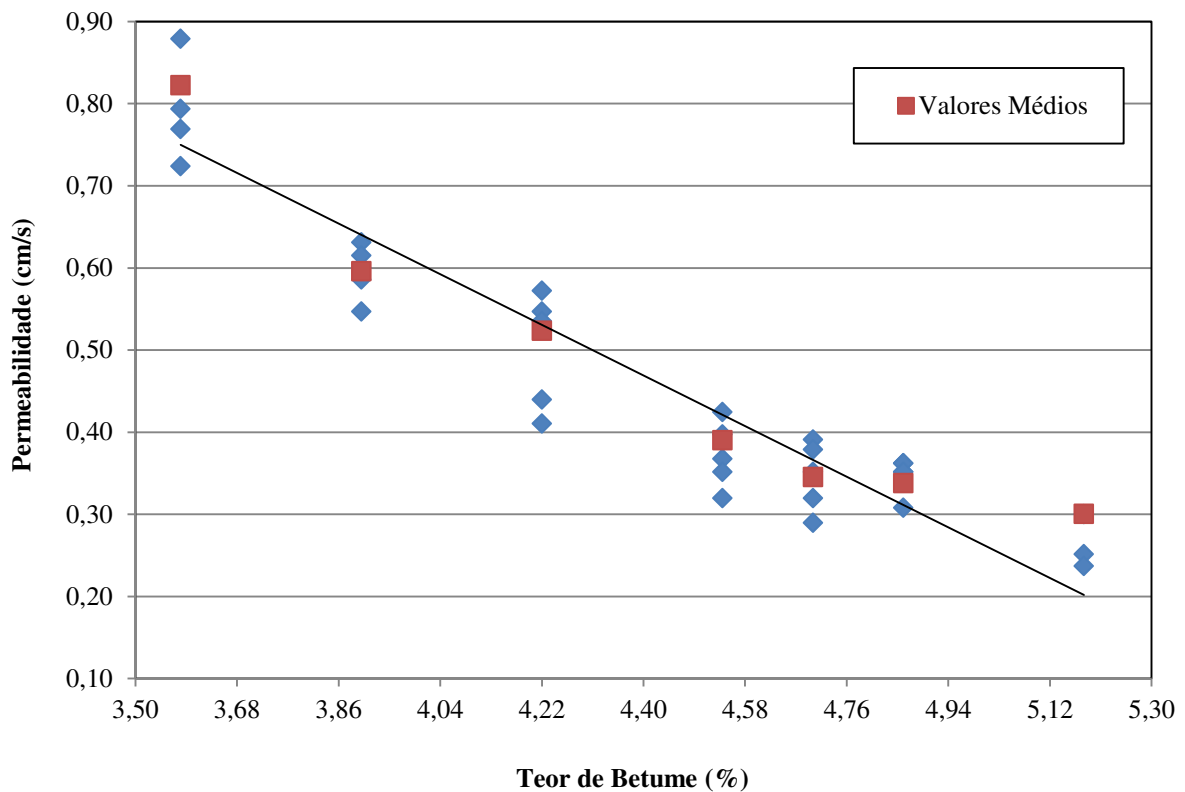
Não há parâmetros brasileiros para avaliação desse ensaio, sendo assim, analisou-se de acordo com a normativa francesa que estabelece o parâmetro de 16% a 20%. Dessa maneira, observa-se que apenas o teor 3,58% atinge os parâmetros estabelecidos com 16,4% de vazios comunicantes.

Mas como já mencionado, a compactação por meio do Marshall é muito severa, e não representa a realidade aplicada em campo. Portanto, os teores 3,90%, 4,22% e 4,54% que apresentaram resultados de 14,6%, 13,9% e 13,3%, respectivamente, não são desconsiderados por esse ensaio, pois têm resultados significativos e potenciais para também se encaixarem nos limites da norma se compactados de melhor forma.

É por meio dos vazios comunicantes que a mistura torna-se permeável, eliminando o acúmulo de água da sua superfície. A análise da permeabilidade da mistura BBDr foi realizada como descrito no capítulo 5.3 e seus resultados mostrados na Figura 31.

O ensaio de permeabilidade também não está prescrito em normas brasileiras, sendo considerado, para a presente pesquisa, apenas o parâmetro francês.

Figura 31 – Permeabilidade do BBDr.



Fonte: Autora (2018).

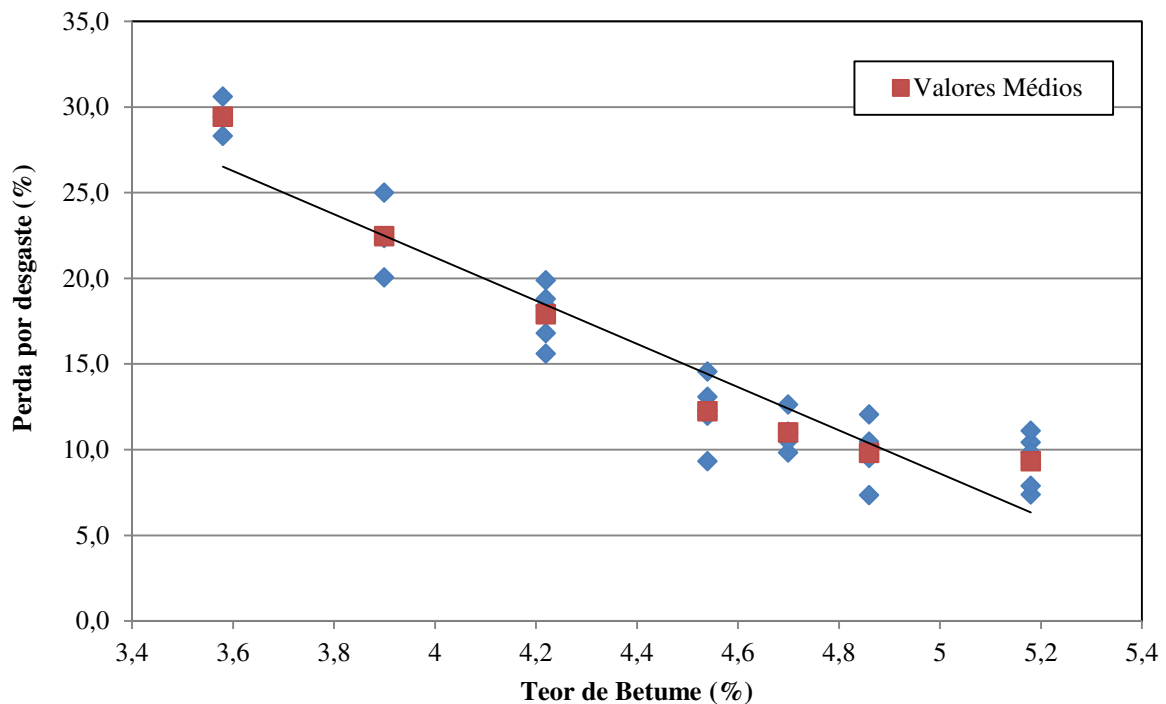
Para os teores 3,58% e 3,90% obtiveram-se resultados maior ou igual a 0,6 cm/s (0,82 cm/s e 0,60 cm/s, respectivamente), sendo aprovados pela norma francesa.

Como o resultado da permeabilidade está ligado diretamente com os vazios comunicantes, se essa mistura for compactada de maneira diferente da compactação por impacto, com o uso da PCG ou compactação de placas de misturas asfálticas, por exemplo, os teores 4,22% e 4,54%, que tiverem sua permeabilidade em 0,52 cm/s e 0,39 cm/s, respectivamente, também estão propensos a atingir a norma.

Para o ensaio de cántabro, que determina a perda por desgaste superficial da mistura em relação ao teor de ligante utilizado, foi considerada a pior situação (procedimento B descrito na norma ABNT NBR 15140/2014). Com isso, considera-se que os corpos de prova foram submetidos às condições mais severas do ensaio. Os resultados estão apresentados na Figura 32.

O ensaio cántabro só é previsto pela norma brasileira, estabelecendo como limite que os resultados sejam menores que 25%. Há apenas normas europeias que utilizam o cántabro como parâmetro, porém nenhuma francesa, que é a metodologia estudada.

Figura 32 – Perda por desgaste superficial pelo ensaio cántabro.



Fonte: Autora (2018).

Com exceção do teor 3,58%, o restante das misturas está dentro do limite da norma considerada, ficando abaixo de 25%. Porém, esse ensaio não excluiu completamente o teor 3,58% das análises, pois considerando as condições mais severas em que o ensaio foi realizado, ele atingiu 29,44% de desgaste. Se esse ensaio reproduzido em condição seca

(procedimento A descrito na norma ABNT NBR 15140/2014), possivelmente esse teor ficaria dentro do limite.

Outro ponto a ser analisado para o cántabro, é que ele foi feito para que fosse possível avaliar todas as condições para os corpos de prova, no entanto ele não representa verdadeiramente como é o desgaste no campo. Sendo assim, o ensaio cántabro não exclui o teor 3,58% das propostas de boa formulação para o BBDr.

## 6.2.RESULTADOS E ANÁLISES DA MISTURA BBTM

Sendo o BBTM uma mistura que ainda não é regulamentada pelas normas brasileiras, consideraram-se apenas as recomendações francesas, tendo em vista que essa é a metodologia proposta para as misturas estudadas.

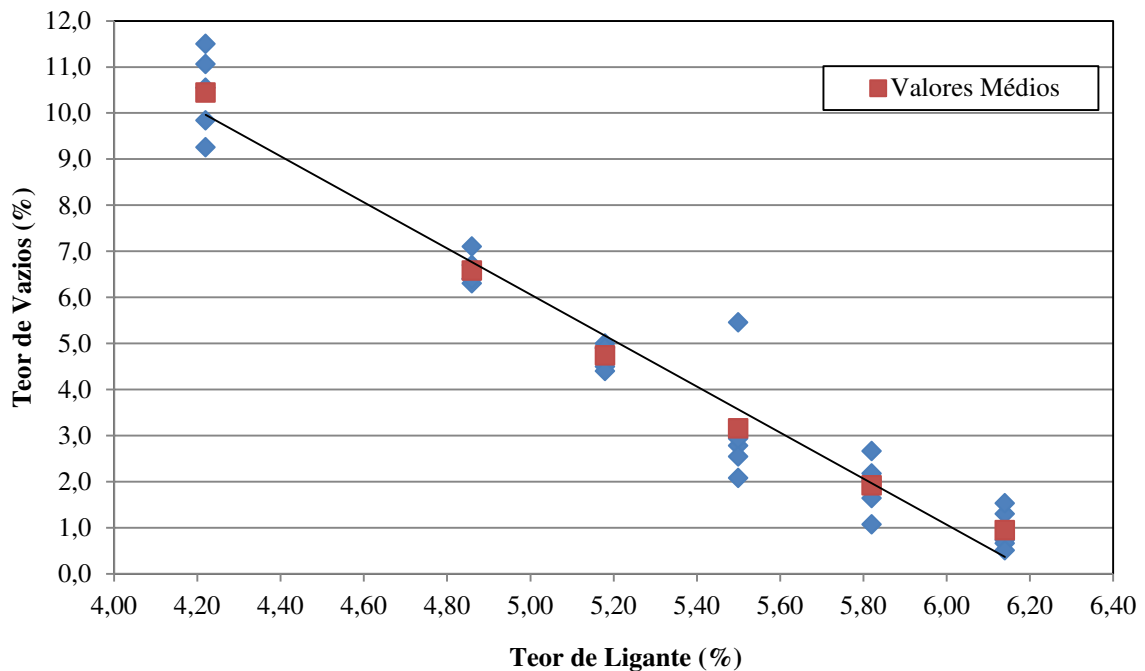
Para fabricação dos corpos de prova foram seguidas as etapas da metodologia Marshall e feita a mistura para o ensaio de massa específica volumétrica real (apresentados no capítulo 5.1). Os valores resultantes do ensaio de densidade volumétrica real (MVR) estão apresentados na Tabela 15. Os valores resultantes para o teor de vazios (%V), que é mostrado na Figura 33.

Tabela 15– Resultado do ensaio MVR para o BBTM.

<b>Teor de Ligante (%)</b>	<b>MVR (g/cm<sup>3</sup>)</b>
4,22	2,594
4,86	2,561
5,18	2,54
5,50	2,529
5,82	2,515
6,14	2,496

Fonte: Autora (2018).

Figura 33 – Teor de vazios BBTM.



Fonte: Autora (2018).

A recomendação francesa diz que para misturas do tipo BBTM, o teor de vazios deve ser de 10% em 200 giros da PCG. Nesse caso cabe o que já foi dito ao BBDr, não há como relacionar diretamente os resultados obtidos com a recomendação, pois a maneira como foram compactados os corpos de prova para a presente pesquisa é diferente, e mais severa, que a recomendada.

Mesmo assim, o teor 4,22% obteve 10,44% de teor de vazios. Com isso mostra-se que a formulação proposta é promissora, e que se forem reproduzidas por meio da PCG ou da compactação de placas, mais de um teor tem potencial de ficar de acordo com a limitação.

O outro ensaio proposto ao BBTM foi a mancha de areia. Para esse, utilizou-se como parâmetro de análise dos resultados, a classificação apresentada por Pasquet (1968) que determina a textura superficial em função da altura da mancha de areia (Tabela 16).

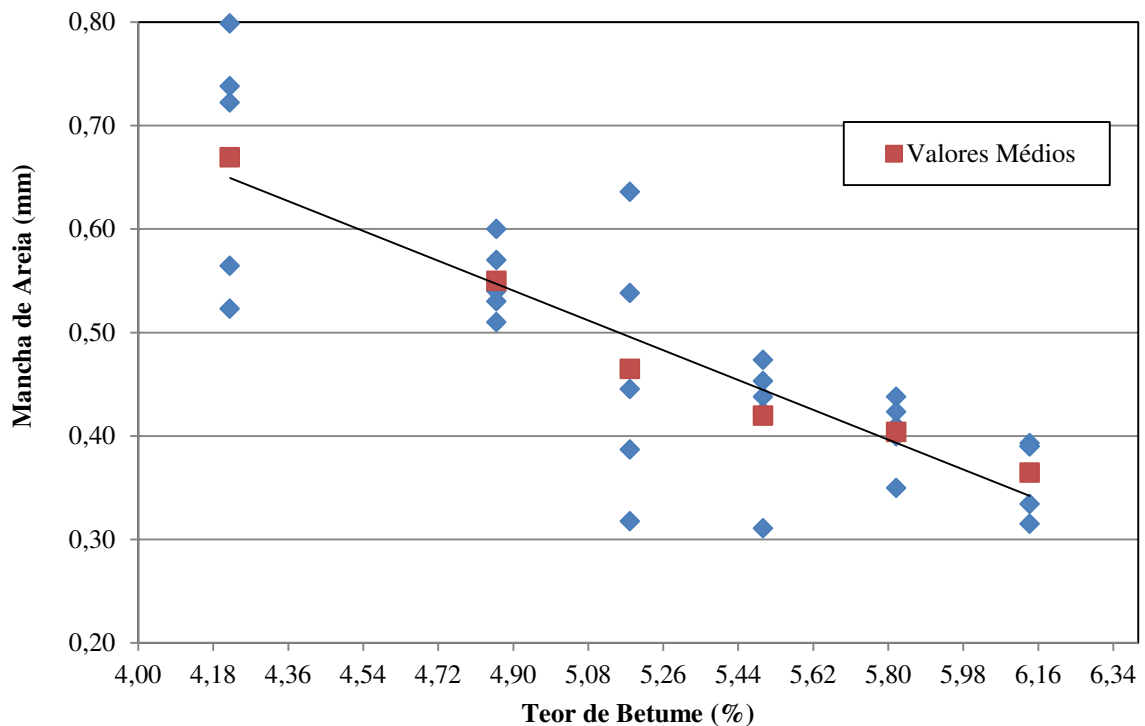
Devem-se ressaltar também alguns pontos da metodologia Marshall que influenciam os resultados desse ensaio. A compactação por impactos, como foi feito, torna a superfície do corpo de prova mais lisa, menos rugosa. O tamanho dos corpos de prova também influencia, sendo necessário ajustar proporcionalmente a quantidade de areia utilizada. Os resultados encontrados são apresentados na Figura 34.

Tabela 16 - Classes de textura superficial em função da altura da mancha de areia.

Classes	Características Superficiais	Altura da mancha de areia (mm)	Observações
A	Texturas muito finas	$H < 0,2$	Superfícies não desejáveis
B	Texturas finas	$0,2 \leq H < 0,4$	Superfícies a serem usadas preferencialmente em áreas urbanas
C	Texturas médias	$0,4 \leq H < 0,8$	Estendido a superfícies com tráfego de 80 km/h a 120 km/h
D	Texturas rugosas	$0,8 \leq H < 1,2$	Estendido a superfícies com tráfego acima de 120 km/h
E	Texturas muito rugosas	$H \geq 1,2$	Superfícies a serem utilizadas apenas em condições especiais (zonas de clima muito frio e presença de gelo)

Fonte: Adaptado de Pasquet (1968).

Figura 34 – Altura da mancha de areia nos corpos de prova BBTM.



Fonte: Autora (2018).

Mesmo nas condições limitadas do ensaio, os resultados encontrados variam entre 0,36 mm a 0,67 mm. Com base na Tabela 16, parâmetro que foi adotado para as análises, conclui-se que os teores 4,22%, 4,86%, 5,18%, 5,50% e 5,82% estudados classificam-se como classe C, excluindo o teor 6,14%.

A classe C descreve os pavimentos que tiveram sua altura de mancha de areia entre 0,4 a 0,8 mm como superfícies de texturas médias, indicado para tráfego de 80 km/h a 120 km/h.

Para que o pavimento seja indicado a essas velocidades de tráfego, sua rugosidade superficial tem valor expressivo. É essa rugosidade que determina a drenabilidade superficial do pavimento. Portanto, conclui-se que a formulação BBTM proposta apresenta boa drenabilidade superficial.

É necessário ressaltar que devido às limitações encontrados em relação aos corpos de prova, se essas formulações forem reproduzidas em placas asfálticas, certamente suas rugosidades superficiais aumentarão, melhorando também sua drenabilidade.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Foi verificado por meio dos indicadores citados anteriormente (resultados dos ensaios), que os teores 3,58%, 3,90%, 4,22% e 4,54% da mistura BBDr, e os teores 4,22% e 4,86% da mistura BBTM, têm potencial de serem aplicados no campo.

A formulação BBDr apresentou boa porcentagem de vazios comunicantes e boa permeabilidade, mesmo nas condições limitantes em que foram executados os corpos de prova, tornando-se uma formulação promissora de ser aplicada na prática.

Dentro dos teores de BBTM mencionados como promissores, recomenda-se que se faça um estudo com teores intermediários a 4,22% e 4,86%, tendo em vista a diferença no teor de vazios entre eles (aproximadamente 4%).

Com teores intermediários a esses, torna-se maior as chances de mais misturas atingirem o limite imposto (teor de vazios de 10% em 200 giros da PCG), pois serão compactados de maneira menos severa.

Cabe ressaltar que a mistura BBTM não possui especificação brasileira compatível. Por esta razão, os parâmetros da dosagem Marshall não foram utilizados completamente para fins de definição de prováveis teores ótimos, limitando-se a análise às condições de teores de vazios e rugosidade superficial, as quais apresentaram resultados passíveis de aplicabilidade no campo para os teores de 4,22% e 4,86%, conforme citado anteriormente.

Sugere-se para estudos futuros que sejam trabalhados esses teores (3,58%, 3,90%, 4,22% e 4,54% da mistura BBDr e 4,22% e 4,86% da mistura BBTM), com a mesma formulação proposta, dentro da metodologia francesa a partir de ensaios como o Duriez, PCG e deformação permanente, pois esses ensaios estão mais próximos da realidade encontrada no campo.

A presente pesquisa teve como objetivo propor formulações que fossem possíveis de serem aplicadas no campo, entretanto, devido às limitações dos equipamentos disponíveis, foram analisadas a partir da metodologia Marshall, a qual não apresenta relação campo/laboratório, sobretudo em razão do método severo de compactação utilizado, por impacto, reduzir significativamente o teor de vazios das misturas asfálticas.

Por isso, sugere-se aos estudos futuros sobre o tema, que as formulações sejam reproduzidas de maneira a seguir os ensaios propostos na metodologia francesa, para que se obtenham resultados mais compatíveis com a realidade do campo.

Conclui-se, portanto, que esta pesquisa não esgota o tema abordado, porém, atinge o objetivo traçado de propor formulações BBDr e BBTM com potencial de aplicação no campo, motivando a execução de estudos mais aprofundados, acurados e conclusivos sobre a real viabilidade de suas utilizações.



## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. **Resolução N° 19**. Rio de Janeiro, 2005, 6 p. Disponível em: < <http://www.abeda.org.br/wp-content/uploads/2017/03/RESOLU%C3%87%C3%83O-ANP-N%C2%BA-19-DE-11.7.2005-DOU-12.7.2005-REPUBLICADA-DOU-13.7.2005-RETIFICADA-DOU-25.7.2005-RETIFICADA-DOU-17.3.2006.pdf> >. Acesso em: 08 nov. 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E965**. Standard Test Method for Measuring Pavement Macrottexture Depth Using a Volumetric Technique. West Conshohocken, 2015, 4 p. Disponível em: <<https://www.astm.org/Standards/E965>>. Acesso em: 30 abr. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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=48BF4C9A7BCC9C6515EF2E4EC97212A9EFC3ED977242E4E&Req=>>>. Acesso em: 10 nov. 2017.
- \_\_\_\_\_. **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=7940616E4929F5588D406D0EF29159DA89626156AECA0BE&Req=>>>. Acesso em: 08 nov. 2017.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15140/2014**. Misturas asfálticas - Determinação da perda de massa por abrasão cântabro. Rio de Janeiro, 2014, 4p. Disponível em: <<http://abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=310532>>. Acesso em: 10 jun. 2018.
- ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **NF EN 13108-7**. Mélanges bitumineux: spécification des matériaux — Partie 7: Bétons bitumineux drainants. France, 2006, 31p.
- \_\_\_\_\_. **NF P- 98-134**. Couches de Roulement - Béton Bitumineux Drainant. France, 1991.
- \_\_\_\_\_. **NF P 98-137**. Enrobés hydrocarbonés – couche de roulement: béton bitumineux très mince. France, 2001, 12 p.
- \_\_\_\_\_. **NF P 98 254-2**. Mesure de propriétés liées à la perméabilité des matériaux des mélanges hydrocarbonés. France, 1993, 6 p.
- ARALDI, Gustavo Bressiani. **Impacto da formulação de diferentes matrizes granulométricas na dosagem de misturas asfálticas densas**. 2017. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2017.
- BARRA, Breno Salgado. **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, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

\_\_\_\_\_. **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas.** 2009. 363 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

BERNUCCI, Liedi Bariani et al. **Pavimentação asfáltica:** formação básica para engenheiros. 3. ed. Rio de Janeiro: PETROBRÁS: ABEDA. 2010.

BÚRIGO, Alice Serafim. **Influência da formulação de esqueletos minerais no comportamento mecânico de misturas de concreto asfáltico.** 2015. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2015.

BROSSEAUD, Yves et al. Couche de roulement très mince em matériaux bitumineux à chaud – bilan d’emploi et de comportement. **Bulletin des Laboratoires Central des Ponts et Chaussées**, France, n. 207, p 55-71, jan./fév. 1997a.

\_\_\_\_\_ et al. **Note d’information** – 94. França: SETRA/LCPC, 1997b.

\_\_\_\_\_. **Very thin and ultra-thin wearing courses using hot-mixed bituminous material:** a review of use and performance. In: ANNUAL MEETING TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, 72, 13 p. 1999. Washington, DC. Washington, DC: Transportation Research Board, 1999.

CUNHA, Marcos Bottene. **Avaliação do Método de Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas.** 2004. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2004.

CUNHA, Marcos Bottene et al. Influência dos agregados sobre propriedades mecânicas e volumétricas de misturas asfálticas: análise do Método Bailey. In: XVII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES. **Anais...** Florianópolis: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2004.

DA LUZ, Ruan Carlo. **Estudo comparativo da formulação de esqueletos minerais na dosagem de misturas de concreto asfáltico densas.** 2016. 95 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA E RODAGEM. **ME 043/1995.** Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro, 1995, 11 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normasmanuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me04395.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2017.

\_\_\_\_\_. **ME 383/1999.** Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero – ensaio Cantabro. Rio de Janeiro, 1999, 2 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me383-99.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

\_\_\_\_\_. **ES 386/1999.** Pavimentação – pré-misturado a quente com asfalto polímero – camada porosa de atrito. Rio de Janeiro, 1999, 15 p. Disponível em: <<http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dner-es386-99.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **ES 031/2006**. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviços. Rio de Janeiro, 2006, 14 p. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit031\\_2006\\_es.pdf/view](http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit031_2006_es.pdf/view)>. Acesso em: 06 out. 2017.

DUMKE, Marilan Pedro. **Concreto asfáltico drenante com fibras de celulose, ligante modificado por polímero e asfalto-borracha**. 2005. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

EUROVIA. **Projet d'un enrobé BBDr 0/10 porphyne lessines**. Lille, France, 2006.

FERREIRA, Patrícia Nunes. **Estudo da utilização de revestimentos asfálticos delgados a quente para pavimentos tipo BBTM no Brasil**. 2006. 237 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

GUIMARÃES, José Marcos Faccin. **Concreto asfáltico drenante em asfaltos modificados por polímero sbs e borracha moída de pneus**. 2012. 176 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSÉES. **Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés**. Paris: Lpc, 2007. 199 p.

\_\_\_\_\_. **LCPC RG-2/71**. Rugosité géométrique des revêtements routieres - mesure de la profondeur au sable. France, 1971.

MENDES, Larissa de Oliveira. **Utilização do método Bailey para a seleção de agregados em dosagem de misturas asfálticas**. 2011. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído, Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2011.

MEURER FILHO, Edelino. **Estudo de granulometria para concretos asfálticos drenantes**. 2001. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

MOMM, Leto. **Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico**. 1998. 289 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

\_\_\_\_\_. Pavimento drenante em concreto asfáltico. In: 2º SEMINÁRIO NACIONAL MODERNAS TÉCNICAS RODOVIÁRIAS. **Anais...** Florianópolis, 2000.

\_\_\_\_\_. Pavimento drenante em concreto asfáltico. In: 7º ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA. **Anais...** p. 27. Vitória, 2002.

OBSERVATÓRIO NACIONAL DE SEGURANÇA VIÁRIA. **Estatísticas**. Disponível em: <<http://iris.onsv.org.br/iris-beta/#/stats/maps>>. Acesso em: 13 set. 2017.

OBSERVATOIRE DES TECHNIQUES DE CHAUSSÉES. **Enrobes drainants**. Note d'information. 10 p. France: SETRA, jun. 1997.

PASQUET, A. Champagne nationale de glissance 1967 in France. In: COLOOQUE INTERNATIONAL SUR LA GLISSANCE ET LA CIRCULATION SUR ROUTES MOUILÉES. **Proceedings...** Berlin, Alemanha, 1968.

PAULA, Max Ernani Borges de; DUARTE, Augusta Maria. **Influência da chuva na ocorrência dos acidentes de trânsito**. Notas Técnicas. NT 195/96. São Paulo: Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo. Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/media/20743/nt195.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2017.

PETROBRAS. **Refinaria Presidente Getúlio Vargas**. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/refinarias/refinaria-presidente-getulio-vargas-repar.htm>>. Acesso em: 13 set. 2017.

PORTO, Henriqueta Giolito. **Pavimentos Drenantes**. D&Z Computação Gráfica e Editora. São Pulo. 1999.

SAVREUX. **Projet d'un enrobé BBTM 0/10 porphyne ermitage**. Hainaut. Belgique, 2003.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. São Paulo: PINI, 2001. v. 2.

\_\_\_\_\_. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. São Paulo: PINI, 2008. v. 1.

SIROMA, Rodrigo Shigueiro. **Estudo da utilização de areia descartada de fundição (adf) na formulação e no desempenho mecânico de misturas de concreto asfáltico**. 2016. 135 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina. Joinville, 2016.

\_\_\_\_\_. **Amostra de uma mistura BBDr**. Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et de réseaux. Arquivo pessoal. 2017.

VAVRIK, William Robert et al. **Bailey Method for gradation selection in HMA mixture design**. Washington, D. C., EUA: Transportation Research Board: Transportation Research Circular Number E-C044, out. 2002. Disponível em: <<http://trrjournalonline.trb.org/doi/abs/10.3141/1789-16>>. Acesso em: 14 out. 2017.