

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

DOUGLAS STASIAK

ANÁLISE COMPARATIVA DE MISTURAS DO TIPO BBD<sub>r</sub> COM O USO DE LIGANTE  
DE ALTO MÓDULO HiMA

Joinville

2021

DOUGLAS STASIAK

ANÁLISE COMPARATIVA DE MISTURAS DO TIPO BBD<sub>r</sub> COM O USO DE LIGANTE  
DE ALTO MÓDULO HiMA

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel no Curso de  
Graduação em Engenharia Civil de  
Infraestrutura do Centro Tecnológico de  
Joinville da Universidade Federal de Santa  
Catarina.

Orientador: Dr. Breno Salgado Barra

Joinville

2021

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

Stasiak, Douglas

Análise comparativa de misturas do tipo BBDr com o uso de ligante de alto módulo HiMA. / Douglas Stasiak ; orientador, Breno Salgado Barra, 2021.

68 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Graduação em Engenharia de Infraestrutura, Joinville, 2021.

Inclui referências.

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

DOUGLAS STASIAK

ANÁLISE COMPARATIVA DE MISTURAS DO TIPO BBD<sub>r</sub> COM O USO DE LIGANTE  
DE ALTO MÓDULO HiMA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil de Infraestrutura, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 01 de abril de 2021.

**Banca 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. Físico. Alexandre Mikowski  
Membro  
Centro Tecnológico de Joinville - UFSC

## AGRADECIMENTOS

Agradeço os grandes motivadores desta caminhada, a base de tudo, ao melhor suporte que alguém pode ter; a tudo que conquistei e vou conquistar, agradeço aos meus pais Carmen Lúcia Sarzi Stasiak e Genir José Stasiak, que nunca mediram esforços para tornar possível meu crescimento pessoal, além da grande inspiração de vida que ambos são, por toda a compreensão nos momentos difíceis que passei e nos meus erros, por serem os engenheiros da obra da minha vida e que apesar dos maus tempos e dos desafios, terem os melhores projetos para mim.

Aos meus irmãos Daniel Stasiak e Diogo Stasiak pelo exemplo de dedicação e profissionalismo de ambos, assim como aos conselhos e lições de vida e carreira que me deram, provando que todo esforço e trabalho trazem frutos, além de todo apoio e parceria que grandes irmãos proporcionam.

A minha namorada Helen Rayssa da Luz Soares pelo companheirismo em todos momentos passados, na força para enfrentar os desafios e nas comemorações quando estes são vencidos, principalmente sempre estando pronta para todo e qualquer momento.

Agradeço o orientador Dr. Breno Salgado Barra por ser um professor tão dedicado à área em que atua, assim como aos seus alunos, por oferecer todo suporte técnico para execução deste trabalho, e por ser responsável pelo LDTPav que com sua ótima estrutura possibilita a formação de excelentes profissionais.

Aos meus colegas de laboratório Leonardo Turco por ter auxiliado no início dos meus aprendizados no laboratório de pavimentação, ter dado suporte e ensinamentos que foram cruciais para a execução das minhas tarefas, e ao Ruan Marcos Xavier por seu grande esforço e dedicação ao ter ajudado na execução dos ensaios desta pesquisa assim como nas tarefas do laboratório, indiferentemente do dia e horário, sempre estando a postos.

Agradeço aos meus grandes amigos e colegas do grupo de competição Infratec, que foram divisores de água na minha vida, incentivando e fornecendo todo apoio possível nas atividades do curso, sendo grandes exemplos, principalmente ao meu setor de atuação de Geotecnia, me proporcionando momentos inesquecíveis, como duas vezes campeões do desafio de Taludes, fato inédito em toda UFSC. Além de boas conversas e inúmeros cafés tomados em excelente companhia.

Ao inesquecível grupo de amigos do Triplo X, o qual tornou a vivência em uma cidade desconhecida e tão afastada da minha terra natal e da minha família muito mais alegre. Onde desde o início da minha jornada acadêmica até o sempre, os levarei na minha vida.

Agradeço a Empreiteira de Mão de Obra Adrimar que me recebeu em uma fase tão complicada do mundo, me dando oportunidade para efetuar meu estágio e me proporcionando a maior experiência profissional da minha vida, além de todo suporte para conciliar o trabalho com os compromissos acadêmicos.

Sou grato a Rudnick Minérios e a CBB Asfaltos por terem fornecido todos materiais necessários para a pesquisa.

Agradeço principalmente a Deus por ter colocado em meu caminho tantas pessoas maravilhosas que tornam os desafios da vida muito menores, e por ter me dado saúde e sapiência para aproveitar as bênçãos colocadas em meu caminho e aprendido com os erros.

## RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica e o impacto nos parâmetros físicos e funcionais de uma formulação de mistura asfáltica drenante do tipo *Béton Bitumineux Drainante* (BBDr), com inserção de ligante betuminoso do tipo HiMA. A composição granulométrica foi elaborada a partir do método teórico, utilizando a equação de Fuller-Talbot, tomando como referência uma curva granulométrica aplicada em obra pública na cidade de Lille, norte da França, porém adaptando-a de acordo com as peneiras disponíveis no Brasil. Para tanto, definiu-se uma descontinuidade no intervalo de diâmetros 2/6mm, com aporte de 2% de cal hidratada CH-1 nas frações passantes na peneira de 0,075mm, com o intuito de gerar melhor adesividade entre os compostos betuminosos e granulares, resistindo assim melhor ao efeito deletério da água e ao fenômeno da desagregação. O elevado teor de vazios gerado nas misturas BBDr permite a captação, percolação e escoamento da água superficial do pavimento, no encontro da sua interface inferior com a camada asfáltica densa subjacente em campo, evitando a ocorrência de fenômenos como a hidroplanagem e o efeito spray, aumentando com isso a aderência pneu-pavimento e a segurança do usuário, sobretudo em dias de chuva. O uso de ligante asfáltico do tipo HiMA (modificado com elevado percentual de polímero SBS, em torno de 7,5%) foi comparado aos resultados prévios de pesquisa realizada com ligante POLIFLEX 60/85 E (ligante modificado com 4,0% de polímero SBS), a fim de verificar o impacto da utilização desta tecnologia nos parâmetros físicos e funcionais das misturas asfálticas, a saber: viscosidade dinâmica dos ligantes asfálticos, massa específica aparente, vazios comunicantes, permeabilidade e perda de massa por abrasão no ensaio Cántabro. Os resultados obtidos indicam que as formulações dosadas com ligante HiMA, em razão da forte concentração da matriz polimérica, apresentaram maior viscosidade dinâmica, recuperação elástica e aumento da consistência do material, quando comparado ao ligante POLIFLEX 60/85 E, acarretando no aumento da massa específica das misturas asfálticas e, conseqüentemente, diminuição do teor de vazios, vazios comunicantes e permeabilidade, porém, com menor perda de massa por abrasão, isto é, maior resistência à desagregação. Entretanto, as alterações dos parâmetros físicos observadas em relação à mistura de referência não foram significativas, indicando o elevado potencial de aplicação do ligante HiMA, sobretudo para vias submetidas a tráfego intenso e de grande volumetria, devido à melhor resistência ao fenômeno da desagregação em serviço, fator de extrema relevância na vida útil de misturas asfálticas de característica drenante.

**Palavras-chave:** BBDr. Parâmetros físicos e funcionais. Granulometria. HiMA.

## ABSTRACT

The main aim of this research is to evaluate the technical feasibility and the impact on physical and functional parameters of a porous asphalt mix formulation so-called *Béton Bitumineux Drainante* (BBDr), with insertion of Highly Modified Asphalt (HiMA). The aggregate gradation was conceived by using the theoretical method, based on Füller-Talbot's equation, taking as reference a gradation curve applied in public works carried out in Lille, northern region of France, however, comprising adaptations to be in accordance to the sieve openings commercially available in Brazil. It was considered a granulometric gap in the interval 2/6mm, besides 2% of hydrated lime with regards to the fractions passing through the sieve opening of 0.075mm, aiming to provide better adhesion between the bituminous matrix and the granular particles, improving the resistance to action of water and to the stripping phenomenon. The high air void content of BBDr allows the caption, seepage and run-off of surface water from the pavement structure, more specifically in the interface established with the dense asphalt underlying layer in the field, avoiding the occurrence of hydroplaning and spray phenomena, which increase the adhesion pneumatic-pavement and the users' safety, principally in rainy days. The use of asphalt binder HiMA (modified with high percent of polymer Styrene-Butadiene-Styrene, SBS, around 7,5%) was compared to the results of a former research carried out with asphalt binder POLIFLEX 60/85 E (modified with 4,0% of SBS), in order to verify the impact of this technology on physical and functional parameters of the mixes, such as: dynamic viscosity, density, maximum theoretical specific gravity, communicant air voids, seepage and loss of mass by Cántabro abrasion. The results obtained indicate that formulations dosed with HiMA, due to its concentrated polymeric matrix, present higher dynamic viscosity, elastic recovering and less thermal susceptibility, when compared to those from POLIFLEX 60/85 E, providing an increase of asphalt mix density, as well as the decrease of communicant air void content and seepage, however, with less loss of mass by Cántabro abrasion, i.e., better resistance to stripping. It was also possible to be concluded that these physical and functional alterations were not significant, indicating the high potential for application of HiMA technology, principally in pavement structures subjected to intense and bulky traffic, due to its better stripping resistance, being an extremely relevant characteristic to provide long term with regards to service life of porous asphalt mixes.

**Key-words:** BBDr. Physical and functional parameters. Aggregate gradation. HiMA.



## LISTA DE ABREVIACÕES

A	- Área da face
$A_{\text{orificio}}$	- Área do orifício
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	- Association Française de Normalisation
BBDr	- Béton Bitumineux Drainante
CAP	- Cimento Asfáltico de Petróleo
CH	- Cal Hidratada
CP	- Corpo de Prova
CTJ	- Centro Tecnológico de Joinville
D	- Diâmetro máximo, abertura da peneira que passa 100% (mm)
d	- Abertura de uma dada peneira
DC%	- Desgaste superficial do corpo de prova pelo ensaio Cántabro (%)
DNER	- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
$D_{\text{máx}}$	- Diâmetro máximo
FHWA	- Federal Highway Administration
HiMA	- Highly Modified Asphalt
$H_{\text{H}_2\text{O}}$	- Altura da coluna d'água
Hm	- Altura média dos corpos de prova
$H_{\text{red}}$	- Altura reduzida
LDTPav	- Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação
MEA	- Massa Específica Aparente
MTPA	- Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil
MVA	- Massa Volumétrica Aparente
MVR	- Massa Específica volumétrica Real
n	- Expoente indicador da graduação da curva
NBR	- Norma técnica Brasileira
NF	- Norme Française
PCG	- Prensa de compactação por cisalhamento giratória
$P_{\text{H}_2\text{O}}$	- Peso da água absorvida
PR	- Paraná

PS	-	Peso Seco do corpo de prova
Q	-	Vazão
r	-	Raio
REPAR	-	Refinaria Presidente Getúlio Vargas
Rpm	-	Rotações Por Minuto
SBS	-	Styrene-butadiene-styrene
SC	-	Santa Catarina
t	-	tempo
UFSC	-	Universidade Federal de Santa Catarina
USACE	-	United States Army Corps of Engineers
V	-	Velocidade
Vcom%	-	Vazios Comunicantes
%p	-	Porcentagem em peso que passa na peneira de menor diâmetro da curva
%V	-	Teor de Vazios

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Fluxograma da pesquisa.	07
Figura 2.1	- Esquema de funcionamento do asfalto drenante.	13
Figura 2.2	- Diferença entre pavimento drenante e convencional.	14
Figura 2.3	- Corpo de prova de uma mistura drenante BBDr com ligante HiMA.	15
Figura 3.1	- Efeito do aumento do teor de polímero SBS no ponto de amolecimento.	17
Figura 3.2	- Fases da incorporação do polímero SBS no ligante asfáltico.	18
Figura 3.3	- Desempenho na fadiga de vigas para diferentes teores de SBS no ligante.	19
Figura 4.1	- Jazida Rudnick Minérios Ltda.	20
Figura 4.2	- Curva Temperatura x Viscosidade do ligante HiMA comparado ao POLIFLEX 60/85 E.	23
Figura 4.3	- Comparação entre as curvas granulométricas para mistura BBDr.	25
Figura 4.4	- Separação das frações finas e graúdas.	27
Figura 4.5	- Mistura de agregados graúdos com ligante HiMA: (a) Ligante HiMA sendo adicionado ao agregado graúdo; (b) Agregado graúdo sendo misturado ao ligante asfáltico; (c) Fração fina sendo adicionada junto ao agregado graúdo com ligante.	28
Figura 4.6	- Soquete Marshall automático com o CP posicionado para compactação.	29
Figura 4.7	- Desmoldagem dos corpos de prova Marshall.	29
Figura 4.8	- Corpos de prova Marshall e MVR feitos para a pesquisa.	30
Figura 4.9	- Sequência executiva do ensaio de MVR: (a) Amostra dentro da máquina de vácuo; (b) Aferição do peso do picnômetro com água até o menisco; (c) Aferição do peso seco da amostra desgrumada; (d) Amostra desgrumada com água no picnômetro para aferição do peso; (e) Nível d'água sendo completada até o menisco.	31
Figura 4.10	- Demonstração dos diferentes tipos de vazios existentes em uma mistura asfáltica drenante.	33
Figura 4.11	- Impermeabilização dos corpos de prova com fita.	34

Figura 4.12	- Execução do ensaio de Vazios Comunicantes.	34
Figura 4.13	- Sistema de escoamento para cálculo de vazão.	36
Figura 4.14	- Corpo de prova após a realização do ensaio Cántabro.	37
Figura 5.1	- Comparativo do teor de vazios das formulações BBDr com as matrizes betuminosas HiMA e POLIFLEX 60/85 E.	40
Figura 5.2	- Comparativo do teor de vazios comunicantes das formulações BBDr com as matrizes betuminosas HiMA e POLIFLEX 60/85 E.	43
Figura 5.3	- Comparativo da permeabilidade das formulações BBDr com as matrizes betuminosas HiMA e POLIFLEX 60/85 E.	44
Figura 5.4	- Comparativo de perda de massa Cántabro das formulações BBDr com as matrizes betuminosas HiMA e POLIFLEX 60/85 E.	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	- Caracterização das frações granulares.	21
Tabela 4.2	- Caracterização do ligante betuminoso HiMA.	22
Tabela 4.3	- Caracterização do ligante betuminoso POLIFLEX 60/85 E.	22
Tabela 4.4	- Formulação BBDr de referência.	24
Tabela 4.5	- Formulação estudada.	25
Tabela 4.6	- Traço das misturas asfálticas.	27
Tabela 5.1	- Limites normativos.	39
Tabela 5.2	- Valores médios de MVA e MVR.	40
Tabela 5.3	- Valores médios do teor de vazios comunicantes das formulações BBDr com as matrizes betuminosas HiMA e POLIFLEX 60/85 E.	42
Tabela 5.4	- Valores médios de permeabilidade das formulações BBDr com as matrizes betuminosas HiMA e POLIFLEX 60/85 E.	44
Tabela 5.5	- Valores médios de perda de massa Cántabro das formulações BBDr com as matrizes betuminosas HiMA e POLIFLEX 60/85 E.	46
Tabela 5.6	- Comparativo dos resultados de teor de vazios e permeabilidade vertical das formulações BBDr com a matriz betuminosa POLIFLEX 60/85 E obtidos por Unisesky (2018) e Fagundes (2020).	48

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>04</b>
1.1.	OBJETIVOS DA PESQUISA	05
1.1.1.	Objetivo Geral	05
1.1.2.	Objetivo Específico	05
1.2.	PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO	05
1.3.	DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA	07
1.4.	RELEVÂNCIA DO TEMA	08
1.5.	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	09
<b>2.</b>	<b>MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES (BBD<sub>r</sub>)</b>	<b>11</b>
2.1.	HISTÓRICO DAS MISTURAS DRENANTES BBD <sub>r</sub>	11
2.2.	CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS BBD <sub>r</sub>	12
<b>3.</b>	<b>LIGANTE ALTAMENTE MODIFICADO POR POLÍMERO – HIMA</b>	<b>17</b>
<b>4.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>20</b>
4.1.	MATERIAIS GRANULARES	20
4.2.	LIGANTE BETUMINOSO	21
4.3.	CURVAS GRANULOMÉTRICAS	24
4.4.	ENSAIOS LABORATORIAIS	26
4.4.1.	METODOOGIA MARSHALL	26
4.4.1.1.	MASSA VOLUMÉTRICA APARENTE	30
4.4.1.2.	MASSA ESPECÍFICA VOLUMÉTRICA REAL	31
4.4.1.3.	TEOR DE VAZIOS	32
4.5.	VAZIOS COMUNICANTES	33
4.6.	PERMEABILIDADE	35
4.7.	ENSAIO CÁNTABRO	37

<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>39</b>
5.1.	MASSAS ESPECÍFICAS E TEOR DE VAZIOS	39
5.2	VAZIOS COMUNICANTES	42
5.3	PERMEABILIDADE	44
5.4	CÁNTABRO	46
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>50</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>52</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O modal rodoviário detém o protagonismo no meio de locomoção e transporte no nosso país (MTPA, 2018). Atrelado a este fato, a pavimentação asfáltica vem demandando soluções para problemas do cotidiano devido a sua cada vez mais crescente solicitação, exigindo características funcionais adequadas dos pavimentos, em consonância à trilogia economia, segurança e conforto para o usuário.

Um dos fatores que contribuem para a segurança das vias é a aderência na interface pneu-pavimento e características adequadas de superfície podem reduzir a distância de frenagem, mantendo a trajetória desejada em todo tempo de percurso, principalmente em pavimentos molhados (APS, 2006).

Uma solução que reduz, podendo até mesmo eliminar a lâmina d'água na superfície da pista é a execução de camada de revestimento drenante, viabilizando o escoamento por percolação da água, em razão da presença de vazios comunicantes existentes na estrutura interna da mistura asfáltica que está em contato direto com as variações intempéricas. A declividade do pavimento na interface da camada impermeável subjacente à de revestimento conduz horizontalmente a água percolada verticalmente e acumulada na referida interface até o bordo do pavimento para os sistemas de drenagem, tornando essa região saturada (FAGUNDES, 2020).

É de grande importância nas misturas asfálticas drenantes a contribuição do tipo de ligante betuminoso nos parâmetros físicos e funcionais do material, especialmente levando em conta que o teor elevado de vazios formado pela interação das frações granulares favorece o preenchimento destes espaços internos pelo ligante, contribuindo para menor suscetibilidade à desagregação pela ação do tráfego, porém, podendo diminuir a capacidade de percolação da água. Logo, o objetivo maior é a busca por um teor de ligante betuminoso que garanta a resistência à desagregação da mistura, mantendo simultaneamente níveis adequados de permeabilidade (MEURER FILHO, 2001).

Ligantes betuminosos modificados de alto desempenho vêm contribuindo para a propiciação de boa resistência aos principais defeitos dos pavimentos de mistura asfáltica, como a deformação permanente e à fadiga. Entre estes produtos está o ligante altamente modificado por polímero, denominado Highly Modified Asphalt (HiMA) (KLUTZ et al., 2016; BŁAŻEJOWSKI et al., 2015).

Neste contexto, esta pesquisa busca na matriz HiMA, modificada com elevado percentual (7,5%) de polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), a interação ótima entre



teor de ligante betuminoso e a propiciação dos parâmetros físicos e funcionais fundamentais para a boa aplicabilidade do uso de misturas asfálticas drenantes do tipo *Béton Bitumineux Drainant* (BBDr) em estruturas de pavimento de misturas asfálticas no campo.

Para tanto, adotou-se como referência comparativa o trabalho de UNISESKY (2018), que estudou misturas asfálticas do tipo BBDr dosados com a matriz POLIFLEX 60/85 E, modificada com 4,0% de polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), correntemente utilizada no mercado da pavimentação para a composição de misturas drenantes. Foi utilizada a mesma curva granulométrica baseada na aplicação prática em obra na cidade de Lille, no norte da França (EUROVIA, 2006), bem como as frações granulares de mesma origem e os teores de ligante betuminoso, a fim de verificar o impacto da utilização da tecnologia HiMA nos parâmetros físicos e funcionais das misturas BBDr.

## 1.1. OBJETIVOS DA PESQUISA

### 1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar comparativamente, em âmbito laboratorial, formulações de misturas asfálticas do tipo BBDr com o uso de ligante betuminoso de alto módulo HiMA, em relação à matriz betuminosa POLIFLEX 60/85 E utilizada por UNISESKY (2018), quanto à viabilidade técnica e o impacto nos parâmetros físicos e funcionais.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- Determinar os parâmetros físicos (viscosidade dinâmica, massa específica aparente e real, teor de vazios) e funcionais (vazios comunicantes, permeabilidade e desgaste por abrasão no ensaio Cántabro) das formulações provenientes da inserção da matriz betuminosa HiMA, a partir de corpos de prova produzidos pela metodologia Marshall;
- Analisar comparativamente os parâmetros físicos e funcionais da formulação proposta com ligante betuminoso HiMA, em relação à formulação previamente estudada por UNISESKY (2018), de mesma curva granulométrica, origem das frações granulares e dosagem dos teores de ligante betuminoso, porém, composta pela matriz POLIFLEX 60/85 E;

- Indicar quais dosagens possuem viabilidade técnica para aplicação em campo, ponderando os contextos limitadores de produção da metodologia Marshall.

## 1.2. PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR O OBJETIVO

Como a base comparativa é a pesquisa efetuada por UNISESKY (2018) a partir do uso de matriz betuminosa POLIFLEX 60/85 E, os procedimentos adotados para análise do comportamento funcional e da viabilidade técnica das misturas asfálticas drenantes BBDr, com inserção do ligante betuminoso do tipo HiMA, foram regidos por esse trabalho, seguindo o mesmo padrão de execução da campanha experimental, a fim de viabilizar a comparação dos resultados obtidos.

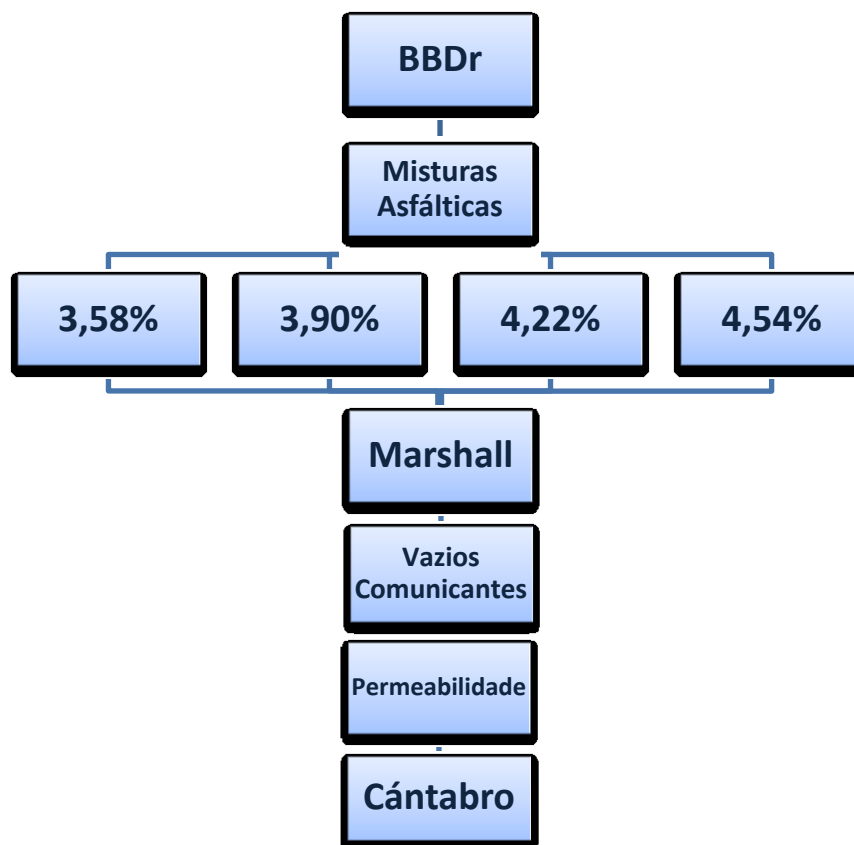
Sendo a França considerada como o país de vanguarda em misturas BBDr no mundo, a metodologia de formulação deste país (MANUEL LPC, 2007) foi utilizada para a elaboração das misturas asfálticas, desde a formulação granulométrica, tendo como exemplo prático a mistura BBDr que aplicada na cidade de Lille, no norte da França (EUROVIA, 2006), devidamente adaptadas à distribuição de peneiras disponíveis no mercado brasileiro, e em observância às particularidades dos materiais da região de Joinville, Santa Catarina.

O fornecimento de insumos foi realizado por empresas parceiras do Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), situado no Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A CBB Asfaltos de Curitiba-PR concedeu o ligante betuminoso HiMA, enquanto a Rudnick Minérios Ltda localizada em Joinville-SC as frações granulares.

Por se tratar do material granular proveniente de mesma jazida, lote amostral e processo de britagem utilizado na pesquisa de UNISESKY (2018), os mesmos parâmetros de caracterização foram considerados. No caso da matriz betuminosa HiMA, os dados de caracterização foram fornecidos pela CBB Asfaltos.

O fluxograma representado na Figura 1.1 exemplifica o caminho das etapas percorridas para chegar ao cumprimento dos objetivos traçados.

Figura 1.1 - Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Autor (2020).

A adaptação das curvas granulométricas utilizadas nesta pesquisa em relação à de referência (EUROVIA, 2006), foi realizada a partir do método teórico utilizando as equações de Fuller-Talbot, com o expoente ‘ $n$ ’ igual a 0,63, caracterizando a curva como aberta, no caso, com característica drenante. Os teores de ligante adotados seguiram as mesmas dosagens aplicadas por Unisesky (2018): 3,58%; 3,90%; 4,22% e 4,54%, a fim de que pudessem ser feitos comparativos diretos quanto à influência da matriz betuminosa utilizada, eliminando qualquer outra variável interveniente no estudo.

Considerando as etapas apresentadas no fluxograma (Figura 1), tem-se que para cada teor de ligante foram moldados 5 corpos de prova pelo método Marshall (DNER-ME 043, 1995) e 3 para os ensaios Cántabro (DNER-ME 383, 1999), cada um com massa em torno de 1200 gramas. Houve o consumo de 1,6 kg de ligante betuminoso e 36,8 kg de frações granulares, compreendendo a confecção dos 32 corpos de prova.

### 1.3. DELIMITAÇÃO DO ESPAÇO DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada integralmente em âmbito laboratorial, sem a realização de procedimentos de campo ou uso de métodos computacionais analíticos. Todas as etapas da campanha experimental foram realizadas no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) do Centro Tecnológico de Joinville (CTJ) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), onde a estrutura disponível atende às demandas necessárias para cumprir os objetivos da pesquisa.

### 1.4. RELEVÂNCIA DO TEMA

A avaliação das características funcionais das misturas asfálticas tem grande pertinência à razão das condições climáticas no Brasil, em que diversas cidades e regiões apresentam média a elevada pluviometria (MEURER FILHO, 2001). Como exemplo, a região sul do Brasil, possui clima temperado, ou seja, tem estações do ano bem definidas, compreendendo altas temperaturas no verão e baixas no inverno. Especificamente, a circunscrição da cidade de Joinville/SC, onde a presente pesquisa foi realizada, possui um histórico de elevada pluviosidade, tendo apresentado no ano de 2019 um acúmulo superior a 2000mm de precipitação (INMET, 2020).

De acordo com o MTPA (2018) foram registrados 89.396 e 58.716 acidentes totais e com vítimas de trânsito, respectivamente, em rodoviárias federais apenas no ano de 2017, em que 4,7% dos acidentes acontece em razão da falta de aderência entre o pneu e o pavimento.

Essas situações tornam-se mais precárias e duplicam as chances de ocorrência em momentos chuvosos (PAULA e DUARTE, 1996). No entanto, mesmo nas situações em que o pavimento se encontra molhado, as condições superficiais devem garantir segurança ao usuário para que possa acelerar, frear e realizar trajetórias curvilíneas durante todo o percurso que o veículo permanecer em deslocamento (GUIMARÃES, 2012).

Desta forma, tem-se que o uso corrente de misturas asfálticas drenantes no Brasil poderá contribuir significativamente com o nível de qualidade dos pavimentos e, por consequência, propiciará maior segurança aos usuários, evitando a formação de filmes aquosos sobre a superfície de rolamento, garantindo menor projeção (*spray*) de água pela passagem dos veículos e melhor visibilidade, consequentemente, maior aderência pneu-pavimento. Essas situações são de crucial importância para reduzir os níveis de acidentes ocasionados pela

hidroplanagem e viscoplanagem, principalmente em veículos de passeio (FAGUNDES, 2020).

Segundo Ferreira (2006) e Brosseaud (1999), a tecnologia aplicada em misturas asfálticas muito delgadas associa ótimas propriedades mecânicas e de aderência, ocasionando maior segurança aos usuários nas situações de tráfego em pista molhada. As condições de conforto também são asseguradas principalmente por meio da redução dos ruídos e da minimização das irregularidades na camada de rolamento.

Ainda, as camadas funcionais atuam na resistência ao acúmulo progressivo de deformações irreversíveis, mais conhecidas como deformação permanente. Auxiliam também as camadas asfálticas estruturais no que diz respeito à proteção da ação direta dos agentes intempéricos, sobretudo a radiação solar (YINFEI et al., 2020; LIU et al., 2019).

As misturas asfálticas concebidas para esta pesquisa são enquadradas na categoria drenante (*Béton Bitumineux Drainante*, BBD<sub>r</sub>) da metodologia francesa de formulação (MANUEL LPC, 2007), aplicáveis apenas em camada superficial de rolamento, com espessuras esbeltas que podem variar no campo de 4,0 cm a 5,0 cm. Portanto, não possuem função estrutural, e por esta razão não são consideradas no dimensionamento de estruturas de pavimento pela metodologia francesa (GUIDE TECHNIQUE, 1997).

O ligante betuminoso HiMA é uma tecnologia desenvolvida pela Kraton® para aumentar a durabilidade das matrizes asfálticas em aplicações na pavimentação asfáltica. Normalmente possui quase ou o dobro da carga de polímero de ligantes convencionalmente modificados, o que faz com que atue praticamente como um polímero modificado por asfalto, contribuindo para que tenha maior resistência à fadiga e à deformação permanente (KRATON CORPORATION, 2019).

O HiMA vem surgindo no Brasil, trazendo consigo a capacidade de gerar procedimentos mais ágeis de execução e restauração dos pavimentos, juntamente com seu alto desempenho na resistência ao trincamento por fadiga e à deformação permanente, podendo ser colaborativo para o crescimento do país (SILVA, 2018).

Desta forma, este presente trabalho busca contribuir na proposição de soluções para aplicação de formulações de misturas asfálticas do tipo BBD<sub>r</sub> utilizando a tecnologia HiMA em pavimentos brasileiros, técnica ainda não dominada e pouco utilizada no país, dando continuidade à pesquisa realizada por Unisesky (2018).

## 1.5. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O conteúdo do presente trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução do tema da pesquisa, apresentando aspectos que a motivam, assim como a metodologia utilizada para seu fim.

Capítulo 2: Histórico, caracterização, e aplicações de misturas asfálticas drenantes do tipo BBDr.

Capítulo 3: Classificação, aspectos e propriedades de ligantes altamente modificados por polímeros (HiMA), em relação aos convencionalmente modificados.

Capítulo 4: Descrição dos materiais que foram utilizados para a pesquisa e os métodos aplicados na campanha experimental.

Capítulo 5: Apresentação dos resultados oriundos dos ensaios realizados e respectiva discussão técnica.

Capítulo 6: Apresentação das conclusões provenientes dos resultados obtidos na pesquisa realizada, como também sugestões para trabalhos futuros.

## 2. MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES (BBDr)

A crescente procura por técnicas que proporcionam maior segurança e conforto ao trafegar, faz com que pavimentos drenantes se tornem mais visados como solução para problemas que vem se afluando devido aos altos índices de acidentes e os crescentes números do tráfego fazendo com que características antes secundárias, se tornam de alta relevância perante ao usuário.

As misturas asfálticas drenantes, segundo o Observatoire des Techniques de Chaussées (1997), são classificadas como revestimentos com porcentagem de vazios na ordem de 20% e com formato de vazios comunicantes que proporcionem a circulação da água da chuva. Essas características fazem com que o escoamento da água se faz pelo corpo do pavimento, escoando para as laterais da pista, evitando a formação de lâminas d'água corroborando as suas funcionalidades.

### 2.1. HISTÓRICO DAS MISTURAS DRENANTES BBDr

Com o objetivo puramente de solucionar problemas com a aderência entre pneu-pavimento em pistas molhadas, na década de 30 os Estados Unidos já trabalhavam com misturas de graduação aberta, e com base nas experiências de campo, em 1974 vem então a especificação de serviço para a aplicação em tráfegos pesados determinado pela Federal Highway Administration (FHWA) (TAKAHASHI & PARTL, 1999).

Nos anos 70 foram construídos os primeiros trechos experimentais com uma camada de aproximadamente 4 cm de espessura eficaz na absorção e evacuação de grande parte da água superficial, assim se desencadeou uma técnica europeia que é considerada conceito na pavimentação (MEURER FILHO, 2001).

Na França, a partir do ano de 1984, começaram a ser desenvolvidas as misturas drenantes, e em 1991 tornou-se objeto da normativa francesa NF P 98-134 sendo intitulado como Béton Bitumineux Drainante (BBDr) (OBSERVATOIRE DES TECHNIQUES DE CHAUSSÉES, 1997).

No Brasil, as primeiras experiências com pavimentos drenantes começaram com aplicação em aeroportos, sendo em 1983 no aeroporto de Confins em Belo Horizonte (MG) utilizando um CAP comum, e em 1987 foi a vez do aeroporto de Santos Dumont (RJ). (OLIVEIRA, 2003).

Trechos experimentais foram executados, em 1992 com camada porosa de atrito na Rodovia dos Bandeirantes, e em 1997 na via marginal da Rodovia Presidente Dutra (BR-116) com camada de 4,0 cm de espessura e 18% de vazios inicial, ambas no estado de São Paulo (PORTO, 1999).

Oliveira (2003) lembra da primeira experiência com pavimentos drenantes no Nordeste aconteceu na Bahia em 2000, nas obras de duplicação da Estrada do Coco (BA-099). A execução de 33,5 km de revestimento asfáltico drenante ocorreu com aplicação de CAP-20 modificado com 4% de polímero SBS.

No estado de Santa Catarina, também em 2000, foi executado um trecho experimental de 600 metros na BR-101 sentido Joinville – Garuva com 3,0 cm de espessura, e em 2011 entre os municípios São José do Cerrito e Vargem Grande, fora executado um trecho com 53 km (GUIMARÃES, 2012).

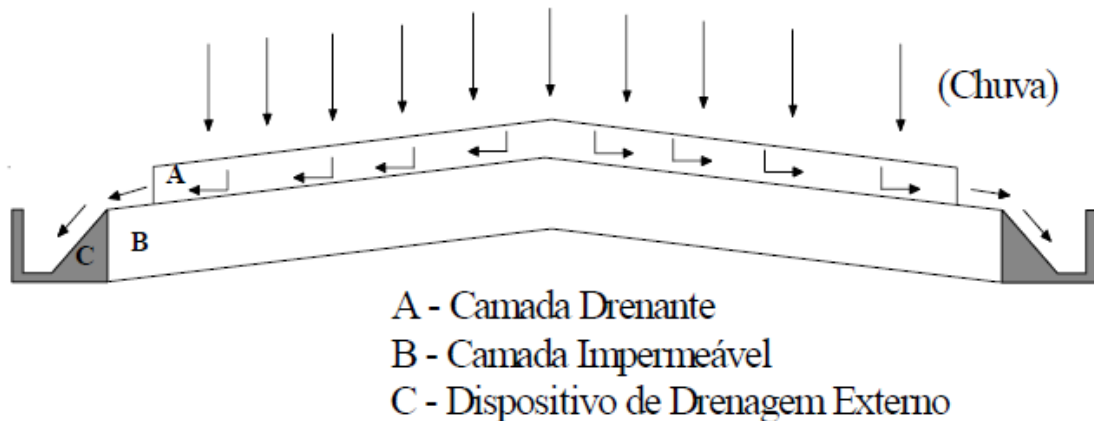
## 2.2. CARACTERIZAÇÃO DAS MISTURAS BBD<sub>r</sub>

As misturas asfálticas drenantes se diferenciam pelo alto índice de vazios que permitem a percolação da água proveniente das chuvas, arrançados devido a uma dosagem adequada de agregados minerais britados, filler, e ligantes asfálticos puros ou modificados por polímero, tornando o pavimento uma superfície permeável (OLIVEIRA, 2003).

O modo de funcionamento do BBD<sub>r</sub> reduz a drenabilidade por escoamento superficial, fazendo acontecer através da infiltração da água verticalmente, acumulando-se no fundo da camada drenante, sobrejacente à camada impermeável, formando uma zona saturada, vertendo a água para o bordo do pavimento devido a inclinação transversal da mesma (OLIVEIRA, 2003). Assim a superfície do pavimento fica livre de água, a qual é responsável por diminuir o contato entre pneu-pavimento ocasionando os fenômenos de hidroplanagem e viscoplanagem, eliminando a projeção de respingos gerado pelos pneus na passagem dos veículos, resultando em maior visibilidade (RACASENS, 2006). Na Figura 2.1 fica ilustrado de forma didática o funcionamento de um pavimento drenante.



Figura 2.1 - Esquema de funcionamento do asfalto drenante.



Fonte: Oliveira (2003, p. 20).

Com a formação da película de água em dia de chuva nos pavimentos convencionais, o reflexo da luz aumenta significativamente, com a eliminação dessa película pelo pavimento drenante automaticamente o fenômeno de reflexão é mitigado corroborando também desta forma para a melhora da visibilidade na pista (RACASENS, 2006).

Já com o pavimento drenante em condições secas, foi comprovado em uma pesquisa na França que as pistas apresentam a ocorrência de efeito espelho, e isso acontece pelo espesso filme de ligante sobre os granulares, porém essa situação diminui progressivamente com a utilização da pista pela remoção dessa película (MEURER FILHO, 2001).

A eficiência do pavimento drenante na diminuição da poluição sonora é notável, mesmo não tendo sido desenvolvido para essa finalidade, e isso ocorre devido ao elevado índice de vazios da mistura que permite a penetração do ar situado a frente dos pneus, reduzindo o bombeamento do ar auxiliando na absorção acústica (OLIVEIRA, 2003).

A classificação dos concretos asfálticos drenantes pode ser feita pelo número de camadas, volume de vazios característicos e a existência ou não da lacuna (gap) bem definida na curva granulométrica (MOMM, 2002). Na Figura 2.2 deixa evidente a diferença de características entre um pavimento drenante e o outro denso.

Figura 2.2 – Diferença entre pavimento drenante e convencional.



Fonte: NCAAT (1988).

Quanto ao processo de fabricação, espalhamento e compactação do BBDr se faz semelhante as misturas densas, assim como sua durabilidade; contudo se faz necessário cuidados extras relacionados a menor quantidade de finos e temperaturas mais elevadas na usinagem, que ocasionam eventualmente o escorrimento do ligante, desde a usina até a liberação do tráfego. Para garantir a vida útil do pavimento, recomenda-se evitar a utilização dos asfaltos drenantes nos locais sujeitos a grandes esforços tangenciais tais como zonas de frenagem, rotatórias, curvas com pequenos raios e sobre camadas de suporte com fissuras (MEURER FILHO, 2001).

O principal fator na perda de eficiência do asfalto drenante é a colmatação dos vazios, influenciados pela poluição no ambiente, tamanho dos vazios e declividade da camada impermeável subjacente. Mesmo tendo a colmatação mais lenta causada na zona de passagem dos pneus que causa o efeito de sucção, a manutenção deve ocorrer de forma ainda mais intensa comparado com pavimentos convencionais. Para tal se faz necessário a utilização de máquinas com dispositivos de jateamento e aspiração de água, lavando o pavimento em toda a sua camada, mantendo a limpeza dos poros, garantindo as funcionalidades do mesmo (NASCIMENTO, 2012).

O envelhecimento do ligante em pavimentos drenantes se faz de forma mais acelerada devido uma maior área de superfície em contato com as intempéries. Motomatsu *et al.* (2004) citam que os ligantes altamente modificados por polímeros são aplicados exclusivamente para aumentar a vida útil como também melhorar as condições de suporte de

cargas do pavimento, sem alterar o processo executivo, sem diferenciação na aplicação da solução, mas apenas no ligante betuminoso. Na Figura 2.3 fica demonstrado a quantidade de vazios e a exposição da superfície coberta por ligante.

Figura 2.3 – Corpo de prova de uma mistura drenante BBDr com ligante HiMA.



Fonte: Autor (2020).

Sendo a desagregação superficial como principal patologia do pavimento drenante, causada pelas tensões tangenciais em locais de mudança brusca de movimento ocasionam a perda de coesão da mistura assim desprendendo as partículas (NASCIMENTO, 2012). Tais condições tornam de maior relevância os fatores que agregam para melhor adesão entre os granulares e o ligante.

A adesividade do sistema granular-betume se faz de uma gama de fatores físicos, climáticos, mecânicos e químicos o que tornam o tema complexo. Pode-se dividir em duas etapas: adesividade ativa, ocorre no momento da fabricação da mistura asfáltica sendo quanto o granular é envolvido pelo ligante, tendo toda sua superfície molhada pelo mesmo, criando assim uma alta interação entre toda porosidade e sua geometria amarrada pelo betume; e adesividade passiva, ocorrendo após o cobrimento do grão pelo ligante, o quão resistente a película seja ao descolamento pela ação do tráfego combinado a exposição da água, podendo sofrer fissura coesiva ocorrendo entre as moléculas do ligante ou do agregado, ou falha adesiva na interface granular/betume (BARRA, 2009).

Barra (2009) reforça que na condição da adesividade ativa, a tensão superficial do ligante é crucial para melhorar o desempenho da mistura asfáltica. O sistema granular/betume

possui uma tensão interfacial deficitária comparada com o sistema granular/água; isso devido a sua natureza de cargas elétricas. Para tal condição de melhora, Barra (2005) cita a contribuição da formação eletropositiva do calcário quando empregado como filer na mistura asfáltica, melhorando a tensão interfacial do sistema granular/betume, criando uma espécie de “sal insolúvel” resistente à ação da água, criando assim a adesividade ativa.

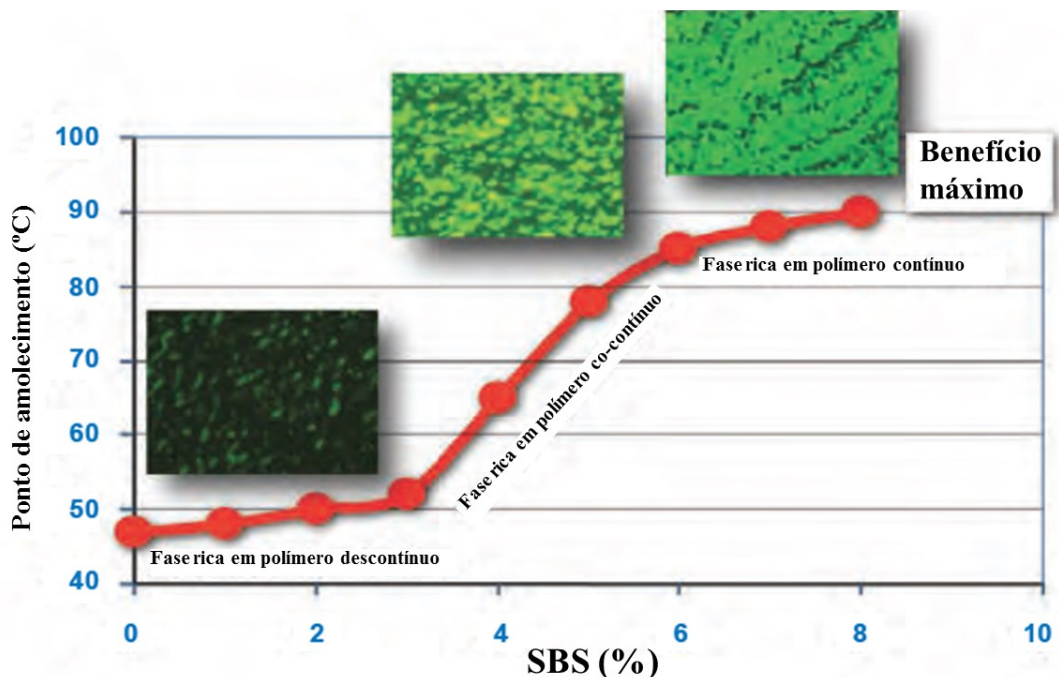
O avanço na utilização das misturas asfálticas drenantes combinado com novas tecnologias, desde a formulação, até a execução da obra e manutenção da mesma, garante a entrega de um bom produto, durável e funcional durante toda a vida útil de projeto trazendo consigo melhora da qualidade de vida dos usuários.

### 3. LIGANTE ALTAMENTE MODIFICADO POR POLÍMERO - HIMA

O aumento da carga de polímero no ligante melhora a durabilidade do pavimento com relação a trincas, sulcos e a fadiga, mas trazendo consigo consequências ruins na produção e aplicação da mistura como: a instabilidade do ligante com risco de separação dos polímeros; alta viscosidade da mistura fazendo com que haja necessidade de trabalhar com temperaturas muito altas, gerando problemas na compactação devido a rápida perda de calor. Tais problemas trouxeram a necessidade de produção de modificadores sem as limitações acima (BIAŚEJOWSK, et al. 2015).

O Highly Modified Asphalt (HiMA) é uma tecnologia desenvolvida pela Kraton Polymers, com o intuito de melhorar a durabilidade de pavimento asfáltico não perdendo na trabalhabilidade da mistura, pois possui mais que o dobro da carga de polímero de um ligante modificado convencional. O polímero Kraton <sup>TM</sup> D0243 utilizado no HiMA possui uma excelente compatibilização e viscosidade baixa, criado justamente para resolver esses gargalos (KRATON®, 2019). A característica do aumento do teor de polímero pode ser visualizada na Figura 3.1.

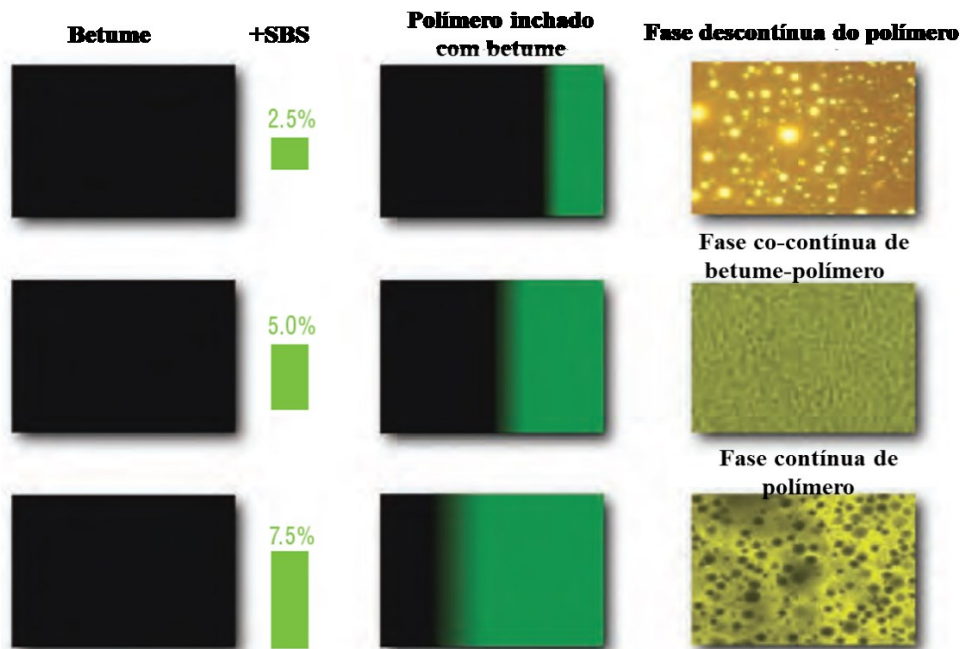
Figura 3.1 – Efeito do aumento do teor de polímero SBS no ponto de amolecimento.



Fonte: Adaptado de Kraton® (2019).

Segundo Faria (2012), os polímeros SBS apresentam alta absorção quando incorporados ao asfalto, podendo chegar a dez vezes seu peso, assim sendo quando é adicionado 2,5% do polímero, irá se comportar como sendo 25% da mistura, ainda sendo do asfalto as principais características; já quando adicionarmos mais de 7% de SBS, o mesmo se comportará como sendo 70% da composição da mistura, como demonstrado na Figura 3.2, fazendo com que as propriedades do ligante sejam a de elastômero, formando uma rede polimérica contínua e resistente com alto ponto de amolecimento, alto módulo e grande recuperação elástica.

Figura 3.2 – Fases da incorporação do polímero SBS no ligante asfáltico.

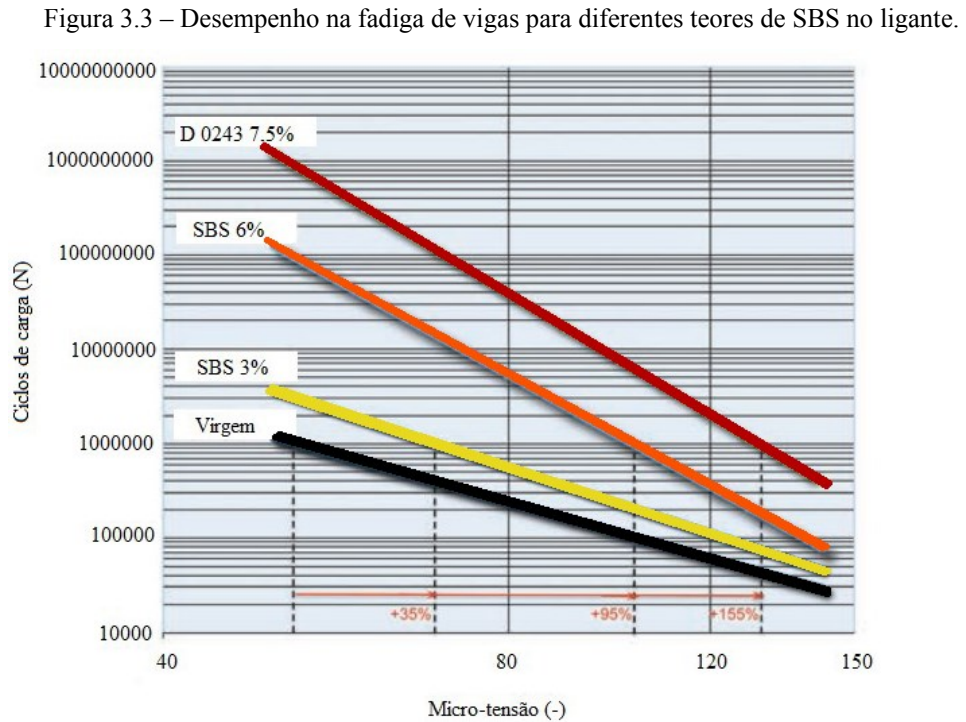


Fonte: Adaptado de Kraton® (2019)

O alto teor de polímero tendo comportamento como maior parcela na mistura asfáltica atua com principal objetivo de formar uma rede polimérica contínua trabalhando como um reforço elástico diminuindo a propagação de fissuras; quando a proporção do modificante é baixa, a rede polimérica fica descontínua formando pontos de fraqueza propício para formação de fissuras (SILVA, 2018).

A versatilidade do ligante HiMA permite seu uso em diversas situações, desde em camadas de recapeamento devido seu alto teor de polímero, podem ser executados reforços de pavimentos estruturais com espessura inferior ao convencional e com melhor comportamento quanto a fissuras e deformação permanente. Devido sua alta resistência a fadiga e com os novos polímeros Kraton™ D0243 de alta compatibilidade, pode-se modificar ligantes puros

geralmente aplicados em camadas de base; também sendo eficaz em ambientes severos devido a amplitude de temperatura de  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $+70^{\circ}\text{C}$  mantendo suas propriedades elastoméricas (FARIA, 2012). Na figura 3.3 podemos analisar o aumento de performance contra fadiga do pavimento para diferentes teores de SBS.



Fonte: Adaptado de Kraton® (2019).

O asfalto altamente modificado com seu alto desempenho pode aumentar a vida útil do pavimento, mesmo com espessuras reduzidas, diminuindo o uso geral da matéria-prima, conseqüentemente diminui o custo inicial de construção e o custo geral do ciclo de vida da obra (KLUTTZ et al., 2016).



## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nos tópicos seguintes são apresentadas as propriedades dos materiais utilizados, a curva granulométrica adotada, bem como os ensaios laboratoriais executados na campanha experimental.

### 4.1. MATERIAIS GRANULARES

A empresa Rudnick Minérios Ltda., localizada no distrito de Pirabeiraba em Joinville/SC, foi responsável pelo fornecimento dos materiais granulares (Figura 4.1). A posição geográfica de sua jazida compreende a zona de transição do Complexo Granulítico Santa Catarina e o Granito Pirai, sendo a matéria-prima produzida classificada como de característica geológica predominantemente gnáissica (MEURER, 2015).

Figura 4.1 - Jazida Rudnick Minérios Ltda.



Fonte: Rudnick Minérios Ltda. (2019) - <http://www.rudnickminerios.com.br/> - última consulta 09/02/2021

Em razão de terem sido utilizadas frações granulares oriundas de mesma jazida e lote amostral caracterizado por Unisesky (2018), a Tabela 4.1 apresenta os resultados dos ensaios realizados.



Tabela 4.1 - Caracterização das frações granulares.

<b>Ensaio</b>	<b>Resultado Obtido em Laboratório</b>	<b>Limite Normativo</b>	<b>Norma</b>
<b>Desgastes por Abrasão Los Angeles</b>	17,5%	≤50%	DNER-ME 35/98 e DNER- EM 37/97
<b>Durabilidade ao Sulfato de Sódio</b>	5,3%	≤12%	DNER-ME 89/94 e DNER- EM 37/97
<b>Índice de Forma (Lamelaridade)</b>	600,0%	≥0,5	ABNT NBR 7809/2006
<b>Adesividade ao Agregado Graúdo</b>	Má	-	DNER-ME 78/94
<b>Equivalente de Areia</b>	78,0%	-	DNER-ME 54/97
<b>Teor de Material Pulvulento</b>	0,4%	≤1%	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: Adaptado de Unisesky (2018, p. 35).

Cabe esclarecer que devido à má adesividade do pó de pedra gnáissico ao ligante betuminoso, motivada pela predominância de elementos eletronegativos em sua composição mineralógica, como a sílica e o quartzo (CLARA, 2020; SIROMA, 2018) houve a substituição na curva granulométrica das misturas asfálticas de parte dos 4,0% de pó de pedra por 2,0% de cal hidratada CH-1, na fração passante na peneira de abertura 0,075mm.

A escolha da CH-1 ocorreu em razão do forte potencial eletropositivo que possui, melhorando assim a adesividade entre o conjunto ligante-granular pela formação do composto Naftanato de Cálcio com o ligante betuminoso, aumentando a robustez do mástique pela suspensão das partículas de finos na película de ligante que envolve os granulares, viabilizando maior resistência à desagregação das misturas (SANTANA, 1992).

## 4.2. LIGANTE BETUMINOSO

O ligante betuminoso utilizado é denominado Highly Modified Asphalt (HiMA), fornecido pela CBB Asfaltos de Curitiba/PR, a partir da modificação do Cimento Asfáltico do Petróleo (CAP) base 50/70, procedente da Refinaria Getúlio Vargas (REPAR), Araucária/PR, utilizando moinho piloto desenvolvido pela empresa.

O aporte de quase o dobro de polímero SBS (7,5%) na composição do HiMA comparado aos ligantes modificados convencionais (4,0%), como o POLIFLEX 60/85 E, acarretaria, a princípio, comportamentos não desejados para a trabalhabilidade do produto, como elevada viscosidade e a necessidade de se trabalhar com temperaturas muito acima daquelas habitualmente aplicadas para ligantes modificados; também a perda rápida de

temperatura no momento do espalhamento e compactação geraria falhas nestes processos. Neste contexto, a tecnologia HiMA tem o propósito de oferecer a resistência aos esforços solicitantes no nível de um ligante com altas taxas de polímero, aliado à trabalhabilidade de um ligante betuminoso modificado convencionalmente, a partir do desenvolvimento da variação do polímero SBS denominada D0243, a qual torna possível obter as características mencionadas (BŁAŚEJOWSK; OLSZACKI; PECIAKOWSKI, 2015).

As Tabelas 4.2 e 4.3 apresentam as características dos ligantes betuminosos HiMA e POLIFLEX 60/85 E, este último utilizado na mistura asfáltica de referência estudada por Unisesky (2018).

Tabela 4.2- Caracterização do ligante betuminoso HiMA.

Características	Unidade	Método de Ensaio	Resultados	Limites	
				Mínimo	Máximo
Ponto de Amolecimento	°C	NBR 6560	90	80	-
Penetração, 100g, 5 s, 25°C, 0,1mm	0,1 mm	NBR 6576	41	40	70
Recuperação Elástica, 20cm, 25°C	%	NBR 15086	96	90	-
Viscosidade Brookfield	135°C spindle 21 20 rpm	cP	1775	-	3000
	150°C spindle 21 50 rpm	cP	668	-	2000
	177°C spindle 21 100 rpm	cP	266	-	1000
Ponto de Fulgor	°C	NBR 11341	261	235	-
Separação de Fase	$\Delta$ P.A. (°C)	NBR 15166	2,0	-	5
Ductilidade a 25°C, 5 cm/min	cm	NBR 6293	99,9	100	-
Solubilidade em Tricloroetileno	% (em massa)	NBR 14855	1,011	-	-
Massa específica a 25°C	kg/m <sup>3</sup>	NBR 6296	90	-	-

Fonte: Adaptado de CBB Asfaltos (2020).

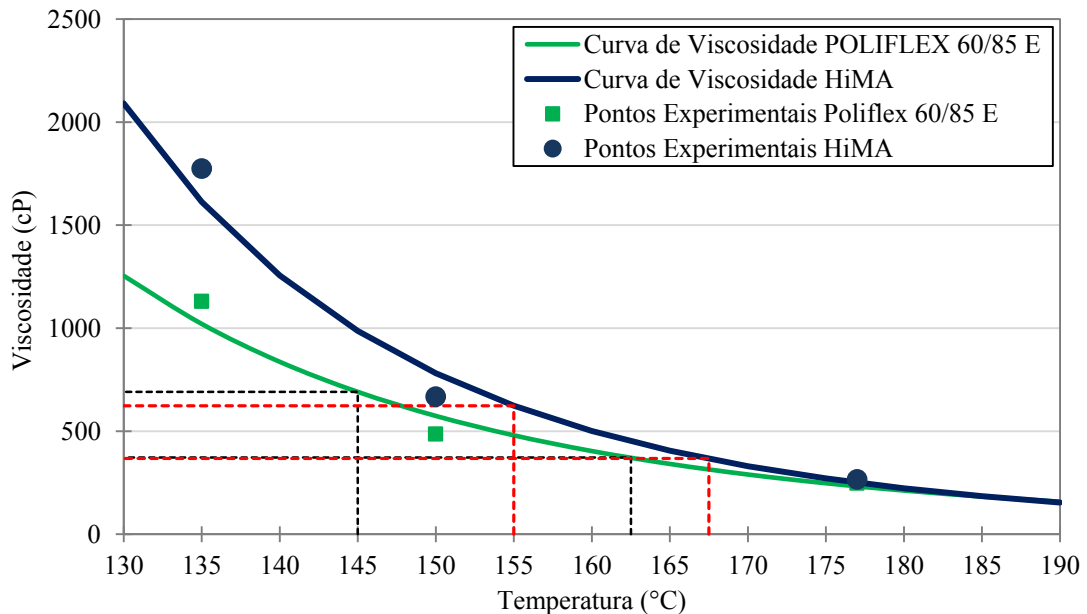
Tabela 4.3 - Caracterização do ligante betuminoso POLIFLEX 60/85 E.

Características	Unidade	Método de Ensaio	Resultados	Limites	
				Mínimo	Máximo
Ponto de Amolecimento	°C	NBR 6560	65,4	60	-
Penetração, 100 g, 5s, 25°C, 0,1mm	0,1mm	NBR 6576	40	40	70
Recuperação Elástica, 20 cm, 25°C	%	NBR 15086	90	85	-
Viscosidade Brookfield	135°C spindle 21 20 rpm	cP	1605	-	3000
	150°C spindle 21 50 rpm	cP	873	-	2000
	177°C spindle 21 100 rpm	°C	312	-	1000
Ponto de Fulgor	°C	NBR 11341	268	235	-
Separação de fase	$\Delta$ P.A. (°C)	NBR 15166	1,2	-	5
Solubilidade em Tricloroetileno	% (em massa)	NBR 14855	99,9	-	-
Massa específica a 25 °C	g/cm <sup>3</sup>	NBR 6296	1,014	-	-

Fonte: Adaptado de CBB Asfaltos (2020).

As temperaturas de usinagem do ligante betuminoso e de compactação das misturas asfálticas são ilustradas na curva Temperatura x Viscosidade Brookfield (Figura 4.2), podendo ser verificado um comparativo entre os ligantes HiMA e POLIFLEX 60/85 E.

Figura 4.2 - Curva Temperatura x Viscosidade do ligante HiMA comparado ao POLIFLEX 60/85 E.



Fonte: adaptado de CBB Asfaltos (2020).

Observando os resultados das Tabelas 4.2 e 4.3, é possível perceber que a concentração de 7,5% de polímero SBS (D0243) na matriz HiMA, em comparação aos 4,0% do

POLIFLEX 60/85 E, produz um efeito menos termossuscetível no material, devido ao aumento do ponto de amolecimento, acarretando também em maior recuperação elástica.

Entretanto, verifica-se também que o efeito da incorporação da variação D0243 do polímero SBS na composição do HiMA reduz os efeitos da concentração polimérica no aumento da viscosidade da matriz betuminosa na faixa das temperaturas de usinagem e compactação, quando comparadas ao POLIFLEX 60/85 E, confirmando o atendimento do propósito de desenvolvimento da tecnologia, conforme mencionado no início deste tópico.

Por outro lado, à medida que ocorre o resfriamento do material, o efeito da concentração polimérica é observado atuando de forma intensa em conjunto com o fenômeno da coalescência da matriz betuminosa, em que o HiMA adquire elevados e crescentes níveis de viscosidade ao ser comparado com o POLIFLEX 60/85 E, corroborando os resultados de ponto de amolecimento e recuperação elástica já mencionados.

#### 4.3. CURVAS GRANULOMÉTRICAS

A composição granulométrica de referência para o presente trabalho foi aplicada na execução de uma mistura BBDr, em obra pública na cidade de Lille, norte da França (EUROVIA, 2006) (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 - Formulação BBDr de referência.

<b>Peneira (mm)</b>	<b>Porcentagem Passante (%)</b>
12,50	100,00
10,00	87,40
8,00	56,00
6,30	24,30
5,00	17,00
4,00	15,80
2,00	14,50
1,00	10,00
0,50	7,50
0,32	5,70
0,20	4,60
0,075	3,00

Fonte: Adaptado de EUROVIA (2006, *apud* UNISESKY, 2018, p.32)

A formulação proposta para esta pesquisa foi adaptada da composição de referência por Unisesky (2018), levando em conta as aberturas de peneiras comercialmente disponíveis no Brasil (Tabela 4.5). Como resultado, desenvolveu-se uma formulação com graduação

0/10mm, com descontinuidade intermediária 4/6mm, ou seja, um *gap* que confere característica permeável à mistura, perfazendo 76% de frações graúdas no intervalo 6/10mm e 20% de finos no intervalo 0/2mm, sendo que o percentual de 4,0% passante na peneira de 0,075mm é subdividido em 2,0% de fileres gnáissicos e 2% de cal hidratada CH-1, conforme já discutido no tópico 4.1.

Para compor a distribuição granulométrica das frações foram utilizadas as Equações 4.1 e 4.2 de Füller-Talbot, a fim de garantir o preenchimento gradual dos vazios formados pelos diâmetros maiores de partículas.

$$\%p = a\left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (4.1)$$

$$n = \frac{\log(\%p_{0.075\text{mm}}) - \log(100)}{\log\left(\frac{0.075}{D}\right)} \quad (4.2)$$

Onde:

%p: Percentagem em peso que passa na peneira de menor diâmetro da curva;

a: Constante, tomada igual a 100;

d: Abertura de uma dada peneira (mm);

D: Diâmetro máximo, abertura da peneira que passa 100% (mm); e,

n: Expoente indicador da graduação da curva.

Tabela 4.5 - Formulação estudada.

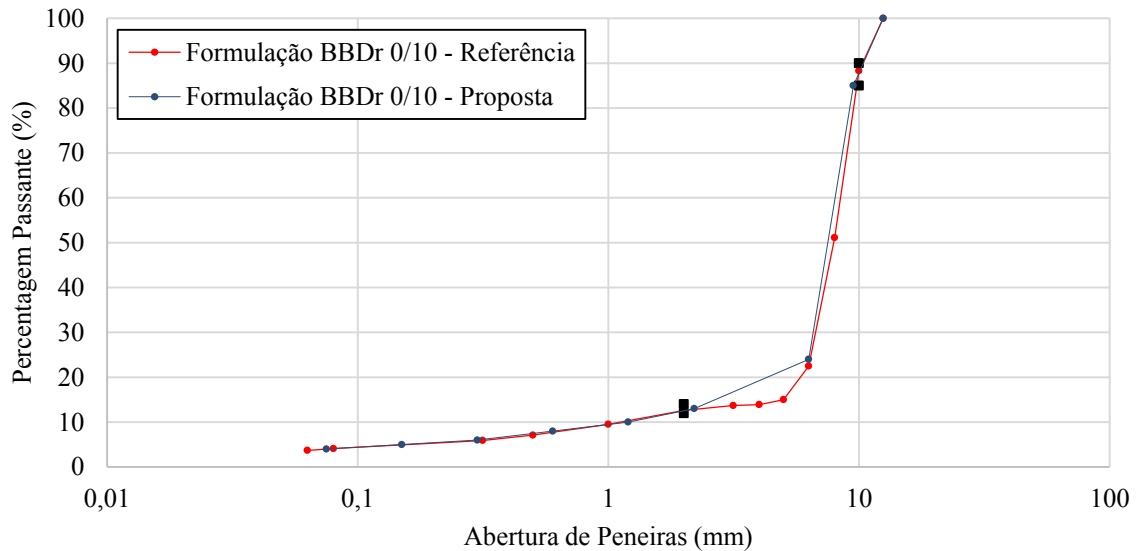
Peneira (mm)	Porcentagem Passante (%)	Porcentagem Retida (%)
12,50	100,00	-
9,50	85,00	15,00
6,30	24,00	61,00
2,20	13,00	11,00
1,20	10,00	3,00
0,60	8,00	2,00
0,30	6,00	2,00
0,20	5,00	1,00
0,075	4,00	1,00
Fundo	-	4,00

Fonte: Adaptado de Unisesky (2018, p. 38)

A Figura 4.3 ilustra as curvas granulométricas das formulações BBDr 0/10mm de referência e proposta, destacando a proximidade no que diz respeito à trajetória de ambas e os

pontos de controle (marcadores em preto), especificados pela metodologia francesa (MANUEL LPC, 2007) para curvas granulométricas de misturas asfálticas BBDr.

Figura 4.3 – Comparação entre as curvas granulométricas para mistura BBDr.



Fonte: Adaptado de Unisesky (2018, p. 39)

Cabe esclarecer com base na Equação 4.1, que a curva granulométrica proposta na ilustrada na Figura 10 possui expoente 'n' 0,63, o que se enquadra na graduação aberta, em razão de estar compreendido no intervalo  $0,55 < n < 0,75$ , de acordo com DNIT (2006).

#### 4.4. ENSAIOS LABORATORIAIS

Os ensaios laboratoriais realizados durante a campanha experimental para a determinação dos parâmetros físicos e funcionais das misturas asfálticas BBDr são apresentados nos tópicos subsequentes.

##### 4.4.1 METODOLOGIA MARSHALL

O método criado por Bruce Marshall foi homologado pelo corpo de engenheiros do exército americano (USACE) em 1930, e no Brasil é designado oficialmente pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) como metodologia de dosagem para teores ótimos de ligante betuminoso nas misturas asfálticas (DNER-ME 043/95) (BARRA, 2005).

Para a confecção dos corpos de prova procede-se à mistura do material pétreo com o ligante betuminoso nas temperaturas previamente determinadas na curva temperatura x viscosidade, tendo sido adotado 168°C para usinagem do ligante e 155°C para compactação das misturas asfálticas (Figura 9). Para a matriz pétreo foi considerada a temperatura de 181°C, isto é, 13°C acima da temperatura de usinagem do ligante betuminoso, estando dentro do intervalo de 10°C a 15°C convencionalmente considerado nestes procedimentos (BERNUCCI et al., 2010).

Os teores de ligante utilizados, em peso, nas dosagens das misturas asfálticas foram os mesmos estabelecidos para a pesquisa de Unisesky (2018): 3,58%, 3,90%, 4,22% e 4,54%. A Tabela 4.6 demonstra as quantidades em gramas da composição de cada mistura.

Tabela 4.6 - Traço das misturas asfálticas.

Quantidades de Material - Marshall				
Teor de Ligante (%)	3,58	3,90	4,22	4,54
Peso de Ligante (g)	42,96	46,80	50,64	54,48
Peneiras (mm)	Quantidades por Fração (g)			
9,50	173,56	172,98	172,40	171,83
6,30	705,79	703,45	701,11	698,77
2,20	127,27	126,85	126,43	126,01
1,20	34,71	34,60	34,48	34,37
0,60	23,14	23,06	22,99	22,91
0,30	23,14	23,06	22,99	22,91
0,15	11,57	11,53	11,49	11,46
0,075	11,57	11,53	11,49	11,46
Fundo	23,14	23,06	22,99	22,91
cal hidratada CH-1	23,14	23,06	22,99	22,91
<b>Total (g)</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>	<b>1200</b>

Fonte: Autor (2020).

De posse das quantidades necessárias para cada fração, são separados dois recipientes, sendo um para as partículas graúdas (peneiras 9,5 mm até 2,2 mm), outro para finos (peneiras 1,2 até fundo, incluindo a cal hidratada CH-1) (Figura 4.4).

Figura 4.4 - Separação das frações finas e graúdas.



Fonte: Autor (2020).

É importante destacar que durante o processo de mistura da matriz pétreia com o ligante betuminoso, iniciou-se com o aporte das frações graúdas, em que somente após estarem completamente envolvidas, foram adicionadas as frações finas. Este procedimento é realizado devido à forte absorção de ligante pelas frações finas, em razão da elevada superfície específica que possuem, acarretando na trabalhabilidade dificultosa e não raro em falhas do recobrimento total dos granulares, caso sejam adicionadas juntamente com as frações graúdas, contribuindo para a desagregação do material em longo prazo, sobretudo pela maior suscetibilidade à ação da água. Além disso, as frações finas sendo adicionadas após o envolvimento das graúdas viabilizam a formação de mástiques com películas robustas, garantindo maior resistência aos arrancamentos provenientes da ação do tráfego (BARRA, 2005), fator crucial em misturas asfálticas drenantes. A Figura 4.5 ilustra a sequência do processo de mistura.



Figura 4.5 - Mistura de agregados graúdos com ligante HiMA: (a) Ligante HiMA sendo adicionado ao agregado graúdo; (b) Agregado graúdo sendo misturado ao ligante asfáltico; (c) Fração fina sendo adicionada junto ao agregado graúdo com ligante.



Fonte: Autor (2020).

Com os materiais misturados homogeneamente, a amostra foi conduzida à estufa na temperatura de compactação por duas horas juntamente com os moldes, a fim de permitir o tempo necessário de interação física e química dos constituintes da mistura asfáltica, bem como para que não haja aderência por troca de calor da mistura asfáltica nas paredes dos moldes, impedindo a acomodação adequada do material durante o processo de compactação.

O processo de compactação também prevê a colocação de papel filtro na base e no topo dos corpos de prova, para evitar o arrancamento por adesão tanto na base metálica de moldagem quanto na superfície de compactação do soquete. Imediatamente antes da aplicação dos golpes pelo soquete, são procedidas 15 espatuladas nas bordas e 10 no centro da mistura asfáltica.

Foi utilizado um soquete Marshall eletromecânico (Figura 4.6), disponibilizado pelo LDTPav, transferindo carga à mistura asfáltica por impacto, aplicando 75 golpes em cada face, somando 150 golpes em cada corpo de prova, evitando com isso a variação de energia aplicada e dependendo do operador em processo manualmente conduzidos.

Figura 4.6 - Soquete Marshall automático com o CP posicionado para compactação.



Fonte: Autor (2020).

A desmoldagem dos corpos de prova foi procedida com o auxílio de um macaco hidráulico ilustrado na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Desmoldagem dos corpos de prova Marshall.



Fonte: Autor (2020).

Foram moldados 8 corpos de prova para cada teor de ligante, totalizando 32 unidades (Figura 4.8).

Figura 4.8 – Corpos de prova Marshall e MVR feitos para a pesquisa.



Fonte: Autor (2020).

Após a aferição das características físicas dos corpos de prova Marshall, foram realizados os ensaios de Vazios Comunicantes e Permeabilidade com todas as unidades, e por fim, selecionadas 3 unidades de cada teor de ligante para realização do ensaio Cântabro. Cabe ressaltar que em razão das misturas drenantes BBDr não possuírem característica estrutural, apenas funcional, não foram executados procedimentos de ruptura dos corpos de prova.

#### 4.4.1.1 MASSA VOLUMÉTRICA APARENTE

A massa volumétrica aparente (MVA) é determinada pela relação entre a massa do corpo de prova e o volume ocupado pelo mesmo, nas condições de compactação e adensamento.

A densidade aparente é dada pela Equação 4.3:

$$MVA = \frac{PS}{(\pi * r^2 * Hm)} \quad (4.3)$$

Onde:

MVA: Densidade aparente volumétrica (g/cm<sup>3</sup>)

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

r: raio do corpo de prova (cm);

Hm: altura média do corpo de prova (cm).

#### 4.4.1.2 MASSA ESPECÍFICA VOLUMÉTRICA REAL

A determinação da massa específica volumétrica real (MVR) (ABNT NBR 15619, 2012) segue os procedimentos de usinagem e mistura semelhantes aos do ensaio Marshall, porém a amostra é ensaiada em sua forma solta, e não compactada. A massa da amostra utilizada corresponde a 12 vezes o valor do diâmetro máximo estabelecido para a curva granulométrica da mistura asfáltica. Depois de realizado o procedimento de mistura, a amostra deve resfriar por 24 horas à temperatura ambiente.

Antes da execução do ensaio, desgruma-se a amostra para pesar e aferir seu peso seco. Utiliza-se um picnômetro com rolha, preenchendo-o com água e então confere-se o peso do conjunto. Em seguida, adiciona-se a amostra desgrumada dentro do picnômetro e afere-se o peso total. Completa-se o volume do picnômetro com água e com o auxílio de uma haste metálica retira-se o excesso de bolhas de ar que se formam. Insere-se o picnômetro no dessecador da bomba de vácuo por 30 minutos, e após este período retira-se o excesso de bolhas novamente com o auxílio da haste metálica já mencionada. Por fim, preenche-se com água até o menisco da bolha e faz-se a última aferição de peso.

A Figura 4.9 ilustra a sequência executiva do ensaio.

Figura 4.9 – Sequência executiva do ensaio de MVR: (a) Amostra dentro da máquina de vácuo; (b) Aferição do peso do picnômetro com água até o menisco; (c) Aferição do peso seco da amostra desgrumada; (d) Amostra desgrumada com água no picnômetro para aferição do peso; (e) Nível d'água sendo completada até o menisco.



Fonte: Autor (2020).

Com todos os pesos aferidos, aplica-se a Equação 4.4 para determinar o MVR.

$$MVR = \frac{(c - a)}{[(b - a) - (d - c)]} \quad (4.4)$$

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).

#### 4.4.1.3 TEOR DE VAZIOS

O teor de vazios é determinado pela relação entre o volume de vazios e o volume total do corpo de prova, em função da densidade aparente e real. A Equação 4.5 é utilizada para tal.

$$\%V = \frac{MVR - MVA}{MVR} * 100 \quad (4.5)$$

Onde:

%V = teor de vazios (%);

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

MVA = massa volumétrica aparente (g/cm<sup>3</sup>).

Para a funcionalidade de uma mistura asfáltica drenante do tipo BBDr o teor de vazios tem alta relevância, tendo que ser no mínimo de 14% e 20% para a classe 1 e 2, respectivamente (AFNOR NF EN 13108-7, 2006). Para o DNIT (DNER-ES 386, 1999) especifica-se de 18% a 25% de vazios.

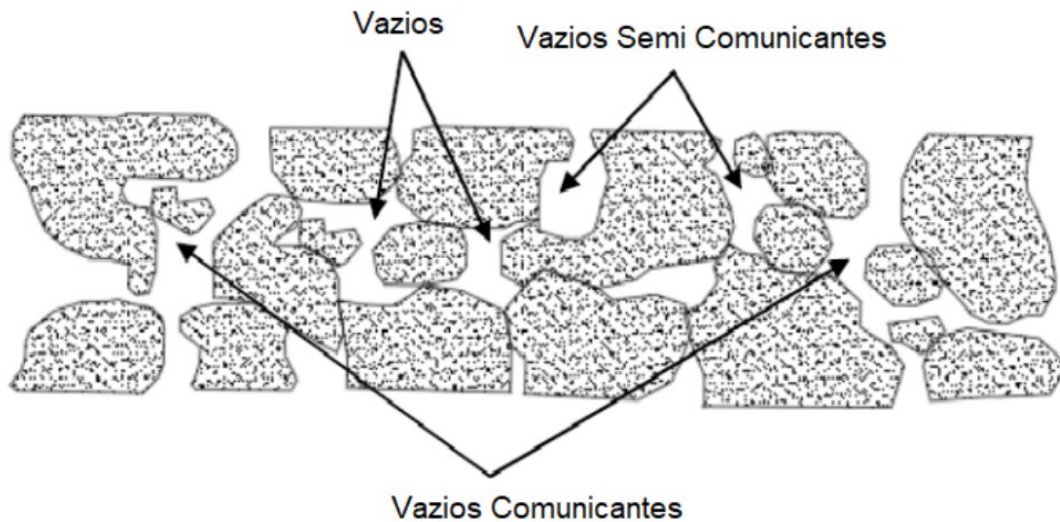
#### 4.5. VAZIOS COMUNICANTES

Em uma mistura asfáltica drenante, para obter a grande funcionalidade desta, os vazios comunicantes são essenciais para a condução das águas



superficiais, pois favorecem à eliminação da película de água sobre o revestimento asfáltico, transportando a mesma através do corpo do pavimento para sentido do caimento, através de dutos formados por vazios que se interligam (FAGUNDES, 2020). A Figura 4.10 demonstra a diferença entre os tipos de vazios no corpo do pavimento.

Figura 4.10 – Demonstração dos diferentes tipos de vazios existentes em uma mistura asfáltica drenante.



Fonte: Adaptado de Nascimento (2012).

A medição dos vazios comunicantes (AFNOR NF EN 13108-7, 2006) foi realizada com corpos de prova impermeabilizados com fita na face lateral e no fundo (Figura 4.11), a fim de permitir o armazenamento da água na estrutura interna do material.

Figura 4.11 - Impermeabilização dos corpos de prova com fita.



Fonte: Autor (2020).

Para tanto, faz-se necessária a percolação de água no interior da mistura asfáltica inserida pela face superior do corpo de prova a uma vazão constante por 10 minutos, capaz de formar uma película d'água estanque. Neste contexto, foi utilizada uma mangueira posicionada sobre o centro do corpo de prova (Figura 4.12).

Figura 4.12 - Execução do ensaio de Vazios Comunicantes.



Fonte: Autor (2020).

Conhecido previamente o peso seco do corpo de prova e suas respectivas dimensões, é tomado o peso após a absorção de água e calculado o percentual de vazios comunicantes ( $V_{com}\%$ ) pela Equação 4.6.

$$\%V_{com} = \frac{P_{H_2O}}{A * H_{red}} * 100 \quad (4.6)$$

Onde:

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

$P_{H_2O}$ : Peso da água absorvida (g);

A: Área da face ( $cm^2$ );

$H_{red}$ : Altura reduzida (cm), expressa pela Equação 4.7.

$$H_{red} = H_m - \frac{D_{máx}}{20} \quad (4.7)$$

Onde:

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

$D_{máx}$ : diâmetro máximo (cm).

Por não existir nenhuma normativa brasileira especificando os limites de vazios comunicantes, tomou-se como parâmetro a norma francesa AFNOR NF EN 13108-7 (2006) que estabelece valores de 16% a 20%.

#### 4.6. PERMEABILIDADE

A determinação da permeabilidade é medida em função do tempo necessário para escoamento de um dado volume de água pelo comprimento de um corpo de prova devidamente impermeabilizado na face lateral, podendo ser definidas a velocidade e a vazão de escoamento. Um permeômetro posicionado sobre os corpos de prova foi utilizado para induzir o volume conhecido de água a ser escoado (Figura 4.13).

Figura 4.13 - Sistema de escoamento para cálculo de vazão.



Fonte: Autor (2020).

Com os dados preestabelecidos de altura da coluna d'água (24,0 cm), diâmetro do tubo (9,3 cm), volume de água (1671,06 cm<sup>3</sup>), diâmetro do orifício (3,0 cm), e com o tempo de escoamento tomado em cada ensaio, foi possível estabelecer a velocidade (permeabilidade) (Equação 4.8) e a vazão (Equação 4.9) em cada caso.



$$V = \frac{HH20}{t} \quad (4.8)$$

Onde:

V: Velocidade (cm/s);

HH20: Altura da coluna d'água;

t: Tempo (s);

A Equação 4.9 determina a vazão de escoamento.

$$Q = \frac{A_{orifício}}{V} \quad (4.9)$$

Onde:

Q: Vazão (cm<sup>3</sup>/s);

A<sub>orifício</sub>: Área do orifício (cm).

A norma francesa AFNOR NF EN 13108-7 (2006) preconiza que valores para permeabilidade a partir de 0,6 cm/s são considerados aceitáveis. Não há nenhuma especificação desse tipo em normas brasileiras.

#### 4.7. ENSAIO CÁNTABRO

O ensaio de perda de massa Cántabro tem origem espanhola e o objetivo de avaliar misturas asfálticas com elevado teor de vazios, ou seja, drenantes. Porém, vem sendo empregado em outros tipos de misturas asfálticas, avaliando de maneira indireta a coesão, resistência à abrasão e a desagregação destes materiais (BARRA, 2005).

No Brasil, esse ensaio é regido pela norma DNER-ME 383 (1999), e consiste em selecionar grupos de três corpos de prova fabricados a partir do método Marshall, com a mesma dosagem de ligante, inserindo-os individualmente na máquina de abrasão Los Angeles sem as esferas de aço, a 33 rpm e com 300 rotações do tambor (BARRA, 2005). A Figura 4.14 ilustra o corpo de prova após ser submetido ao ensaio Cántabro.

Figura 4.14 - Corpo de prova após a realização do ensaio Cántabro.



Fonte: Autor (2020).

Para a presente pesquisa foi utilizado o procedimento B da norma, considerando a condição úmida dos corpos de prova, simulando as condições mais severas da vida de serviço do pavimento. Foi previamente aferido o peso seco dos corpos de prova, para em seguida deixar os mesmos submersos por 24 horas a 60°C na água em estufa, e depois drenando por 2 horas a 25°C.

Após este procedimento, os mesmos foram inseridos individualmente na máquina de abrasão Los Angeles. Encerrado o ciclo de revoluções no tambor, retiraram-se os corpos de prova determinação da perda de massa por desgaste superficial, em função da diferença de pesos antes e após os ensaios (Equação 4.10).

$$DC\% = \frac{(P1 - Pc2)}{P1} * 100 \quad (4.10)$$

Onde:

DC: desgaste superficial do corpo de prova pelo ensaio Cántabro (%);

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

P2: Peso após o ensaio (g).

A norma brasileira DNER-ES 386 (1999) estabelece como sendo 25% o desgaste máximo permitido.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em razão do objeto desta pesquisa tratar da avaliação da viabilidade técnica e funcional de misturas asfálticas do tipo BBDr com o uso da tecnologia HiMA, os resultados obtidos tomaram como parâmetro limites normativos tanto brasileiros quanto franceses (Tabela 5.1), conforme discorrido no Capítulo 4. Também foram utilizados os resultados obtidos por Unisesky (2018) para efeito comparativo, em relação às matrizes compostas com ligante POLIFLEX 60/85 E.

Tabela 5.1 - Limites normativos.

Ensaio	Brasil		França	
	Limites	Norma	Limites	Norma
Teor de Vazios	18% a 25%	DNER-ES 386 (1999)	Classe 1	AFNOR NF EN 13108-7 (2006)
			20% $\geq$ %V $\geq$ 26% (40 giros PCG) e $\geq$ 14% (200 giros PCG)	
Vazios Comunicantes	-	-	Classe 2	-
			26% $\geq$ %V $\geq$ 30% (40 giros PCG) e $\geq$ 20% (200 giros PCG)	
Permeabilidade	-	-	$\geq$ 0,6 cm/s (Classe 1)	-
			$\geq$ 1,2 cm/s (Classe 2)	
Perda de Massa Cántabro	$\leq$ 25%	DNER-ES 386 (1999)	-	-

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

### 5.1 MASSAS ESPECÍFICAS E TEOR DE VAZIOS

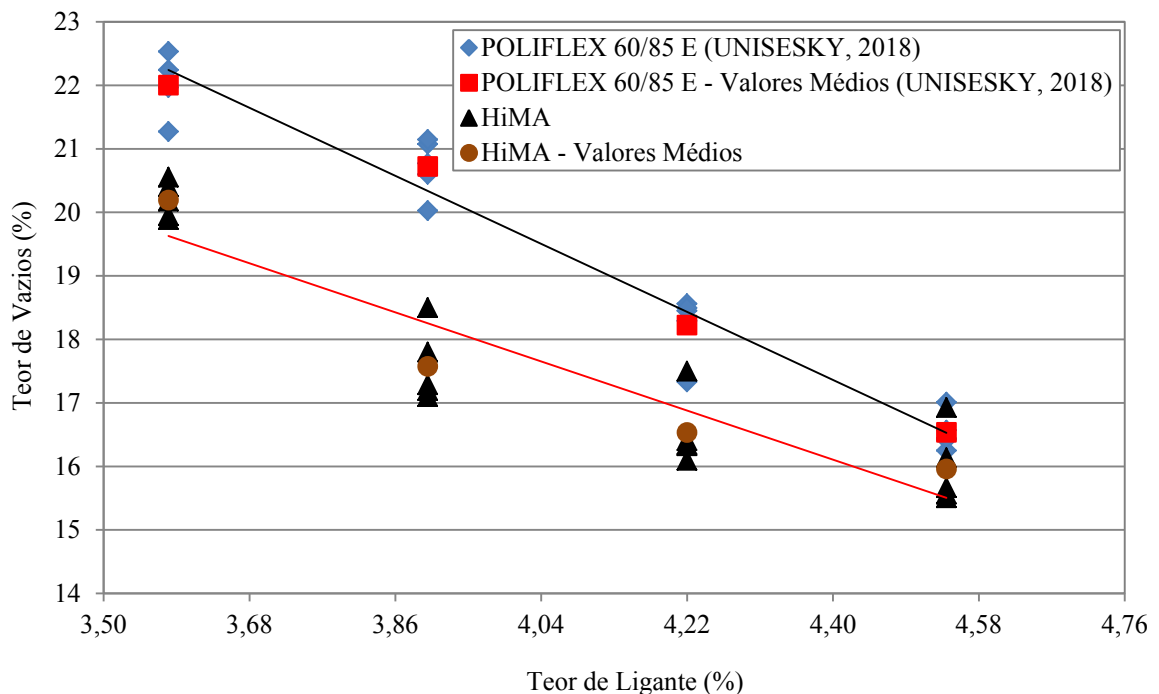
A partir da determinação das massas volumétricas aparente (MVA) e real (MVR) (Tabela 5.2) foi possível determinar o teor de vazios das formulações (Figura 5.1).

Tabela 5.2 - Valores médios de MVA e MVR.

Teor de Ligante (%)	Matriz HiMA		Matriz POLIFLEX 60/85 E Unisesky (2018)	
	MVA (g/cm <sup>3</sup> )	MVR (g/cm <sup>3</sup> )	MVA (g/cm <sup>3</sup> )	MVR (g/cm <sup>3</sup> )
3,58	2,079	2,594	2,039	2,645
3,90	2,149	2,582	2,083	2,627
4,22	2,161	2,576	2,136	2,562
4,54	2,156	2,558	2,163	2,553
4,70	-	-	2,179	2,551
4,86	-	-	2,171	2,548

Fonte: Autor (2020).

Figura 5.1 - Comparativo do teor de vazios das formulações BBDr com as matrizes betuminosas HiMA e POLIFLEX 60/85 E.



Fonte: Autor (2020).

Analisando os resultados da Tabela 5.2 é possível verificar que ambas as matrizes HiMA e POLIFLEX 60/85 E apresentam coerência quanto à evolução dos valores obtidos, pois à medida que os valores de MVA crescem com aumento do teor ligante, ocorre o decréscimo de MVR. Entretanto, entre os teores de 3,58% e 4,22% é notório que a MVA da matriz HiMA possui maior escala que os da POLIFLEX 60/85 E, enquanto a partir da dosagem de 4,54% o cenário se inverte. De forma análoga, mas em condição contrária, a MVR da matriz POLIFLEX 60/85 E apresenta maiores valores nos teores iniciais (3,58% e 3,90%) e decréscimos a partir de 4,22% ao serem comparados aos da matriz HiMA.

As tendências descritas podem ser explanadas em função de que quanto menor a quantidade de ligante betuminoso utilizada na dosagem, mais difícil se torna a penetrabilidade de matrizes com maior concentração polimérica nos interstícios estruturais da composição granulométrica, o que é confirmado pela difícil trabalhabilidade observada nos procedimentos de mistura das formulações HiMA, contribuindo para o aumento da MVA nas dosagens mais baixas.

Porém, com o aumento gradativo do teor de ligante betuminoso, o envolvimento das frações granulares aumenta, em que a maior concentração polimérica aliada à viscosidade dinâmica mais elevada nas temperaturas após a compactação dos corpos de prova da matriz HiMA (Figura 5.1), mostra ter maior efetividade no preenchimento dos vazios da composição granulométrica, situação indicada pela diminuição do valor de MVA ocorrer no teor de 4,54%, o que expressa saturação na dosagem de ligante, enquanto para a matriz POLIFLEX 60/85 E esta condição é observada apenas a partir do teor de 4,86%. Portanto, coerente aos maiores dos valores de MVR da matriz HiMA obtidos desde a dosagem de 4,22% em relação à POLIFLEX 60/85 E.

Logo, tem-se que os cenários percorridos corroboram para a uma diminuição dos teores de vazios das misturas asfálticas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA em comparação àquelas concebidas com POLIFLEX 60/85 E, conforme ilustrado na Figura 5.1.

Considerando os limites normativos brasileiros e franceses estabelecidos para esta avaliação (Tabela 5.1), tem-se:

- Para a matriz HiMA:
  - Apenas o teor de 3,58% atende todas as situações normativas;
  - Todos os teores atendem ao disposto para a classe 1 BBDr 0/10mm da metodologia francesa;
  - Apenas o teor de 3,58% atende ao disposto na classe 2 BBDr 0/10mm da metodologia francesa.
  
- Para a matriz POLIFLEX 60/85 E:
  - Os teores 3,58%, 3,90% e 4,22% se enquadram em todos os limites normativos;
  - Todos os teores atendem ao disposto para a classe 1 BBDr 0/10mm da metodologia francesa;

- Os teores 3,58% e 3,90% atendem ao disposto para a classe 2 BBDr 0/10mm da metodologia francesa.

Deve-se, entretanto, levar em consideração que na normativa francesa, o processo de compactação ocorre na prensa de compactação por cisalhamento giratório (PCG), diferentemente da metodologia Marshall aplicada nesta pesquisa, em que são moldados os corpos de prova a partir de energia transmitida por impacto do soquete de compactação, sendo um procedimento muito mais agressivo que o mecanismo aplicado pela PCG francesa.

Logo, é possível perceber que caso as misturas fossem compactadas por um procedimento menos severo que o utilizado pelo soquete Marshall, teores como 3,90% e 4,22%, por exemplo, teriam condições de serem aprovados quanto ao volume de vazios pela especificação brasileira ou mesmo poderiam ascender à classe 2 das misturas BBDr.

## 5.2 VAZIOS COMUNICANTES

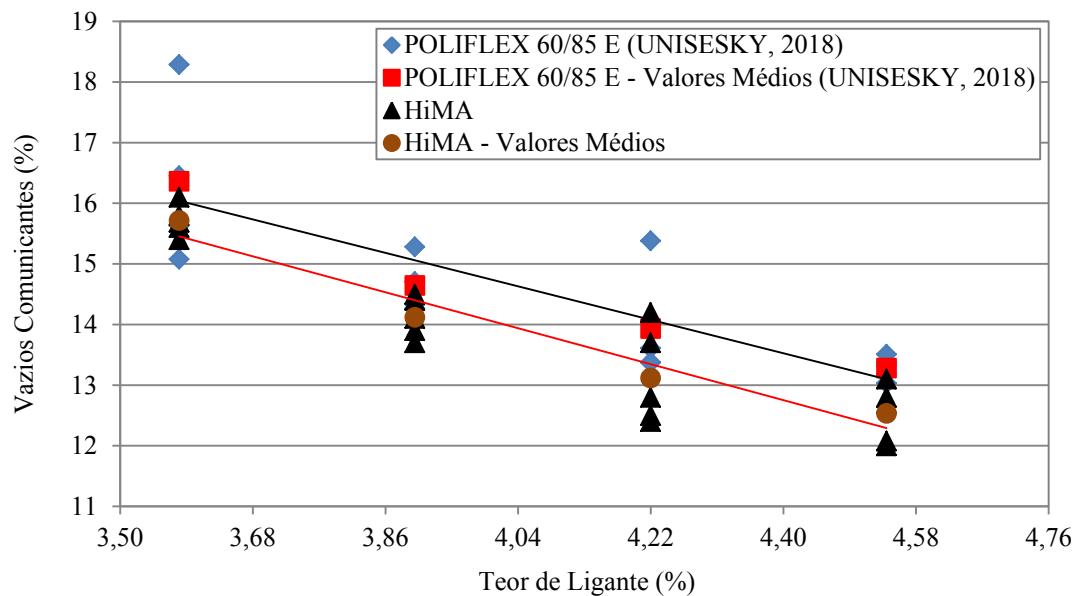
Como não há parâmetros a serem seguidos para o ensaio de vazios comunicantes nas normativas brasileiras, foi tomado como base o intervalo de 16% a 20% especificado pela normativa francesa (AFNOR NF EN 13108-7, 2006), em que os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.3 e ilustrados na Figura 5.2.

Tabela 5.3 - Valores médios do teor de vazios comunicantes das formulações BBDr com as matrizes betuminosas HiMA e POLIFLEX 60/85 E.

Teor de Ligante (%)	Matriz HiMA	Matriz POLIFLEX 60/85 E
	Unisky (2018)	
Vazios Comunicantes (%)		
3,58	15,7	16,4
3,90	14,1	14,5
4,22	13,1	13,7
4,54	12,5	13,1

Fonte: Autor (2020).

Figura 5.2 - Comparativo do teor de vazios comunicantes das formulações BBDr com as matrizes betuminosas HiMA e POLIFLEX 60/85 E.



Fonte: Autor (2020).

Os resultados obtidos corroboram as tendências discutidas no tópico 5.1 quanto ao teor de vazios, pois as misturas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA apresentaram vazios comunicantes menores que as concebidas com POLIFLEX 60/85 E. Nota-se, contudo, que há uma proximidade muito maior dos teores de vazios comunicantes entre as formulações, se comparados aos valores ilustrados na Figura 5.1, sendo possível inferir que a formação de vazios na estrutura interna do material não necessariamente enseja a viabilidade de vazios comunicantes, a qual está relacionada à condição aleatória de acomodação das partículas granulares durante o processo de compactação, bem como de sua macro e microtextura, além do teor de ligante utilizado.

Desta forma, como tanto a curva granulométrica quanto o lote das frações granulares são os mesmos da pesquisa de Unisesky (2018), evidencia-se a condição aleatória da formação de vazios comunicantes, em consonância à influência da matriz betuminosa já tratada nos resultados do tópico 5.1.

Considerando os limites normativos estabelecidos para esta avaliação (Tabela 5.1), tem-se:

- Para as matrizes HiMA e POLIFLEX 60/85 E:
  - Apenas o teor de 3,58% atende aos limites normativos.

Reitera-se, contudo, as condições severas de compactação por impacto do ensaio Marshall, em relação ao procedimento de compactação por amassamento de placas de misturas asfálticas preconizado pela metodologia francesa (MANUEL LPC, 2007), que possui maior proximidade aos esforços aplicados em campo e possibilita a formação de maior teor de vazios comunicantes na estrutura interna do material.

### 5.3 PERMEABILIDADE

Da mesma forma que nos ensaios para a determinação do teor de vazios comunicantes, não há parâmetros normativos para definição dos índices de permeabilidade de misturas asfálticas drenantes na norma brasileira, tendo sido considerados os limites normativos franceses apresentados na Tabela 5.1, ou seja,  $\geq 0,6$  cm/s (BBDr classe 1) e  $\geq 1,2$  cm/s (BBDr classe 2). A Tabela 5.4 compila os valores médios obtidos e a Figura 5.3 ilustra a totalidade amostral testada.

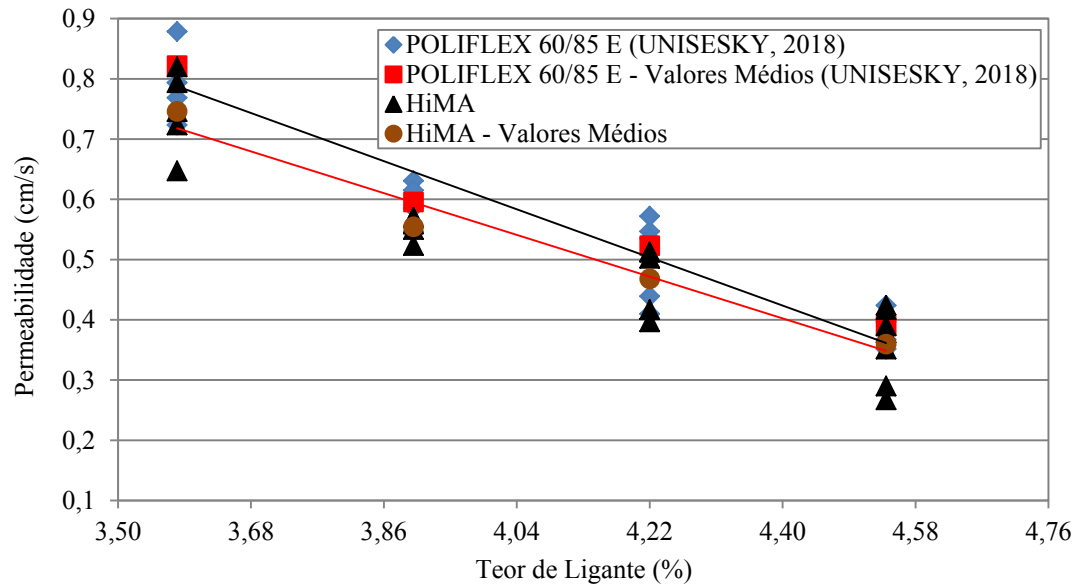
Tabela 5.4 - Valores médios de permeabilidade das formulações BBDr com as matrizes betuminosas HiMA e POLIFLEX 60/85 E.

Teor de Ligante (%)	Matriz HiMA	Matriz POLIFLEX 60/85 E
	Unisesky (2018)	
Permeabilidade (cm/s)		
3,58	0,75	0,82
3,90	0,55	0,60
4,22	0,47	0,53
4,54	0,36	0,39

Fonte: Autor (2020).



Figura 5.3 - Comparativo da permeabilidade das formulações BBDr com as matrizes betuminosas HiMA e POLIFLEX 60/85 E.



Fonte: Autor (2020).

Observando os resultados apresentados na Tabela 5.4 depreende-se que a proximidade na constituição dos vazios comunicantes verificada no tópico 5.3 corrobora ao mesmo cenário ilustrado na Figura 5.3 para a determinação da permeabilidade, apontando coerência entre as tendências obtidas em ambas as condições de ensaio, sobretudo quanto ao decréscimo desta característica ao passo em que ocorre o aumento do teor de ligante, fator que contribui para maior obstrução dos vazios comunicantes, reduzindo a capacidade de percolação da água nos interstícios da mistura asfáltica.

Porém, sendo a permeabilidade a característica mais importante de uma mistura asfáltica drenante, tem-se que com base na campanha experimental realizada é possível inferir que a utilização da tecnologia de ligante betuminoso HiMA não aporta ganhos na capacidade permeável das misturas asfálticas, se comparada à matriz POLIFLEX 60/85 E, devido à equivalência de ambas neste quesito.

Cabe esclarecer que esta constatação não inviabiliza o uso da matriz HiMA na formulação de misturas drenantes, todavia não a torna um diferencial tecnológico para a melhoria da permeabilidade destas misturas asfálticas.

Considerando os limites normativos estabelecidos para esta avaliação (Tabela 5.1), tem-se:

- Para a matriz HiMA:
  - Apenas o teor de 3,58% atende ao disposto para a classe 1 BBDr 0/10mm da metodologia francesa.
  
- Para a matriz POLIFLEX 60/85 E:
  - Os teores de 3,58% e 3,90% atendem ao disposto para a classe 1 BBDr 0/10mm da metodologia francesa.

Deve-se reiteradamente considerar que mesmo tendo sido utilizado um procedimento severo de compactação pela metodologia Marshall, o teor de 3,90% da matriz HiMA atingiu um nível de permeabilidade muito próximo (0,55 cm/s) de aceitabilidade para os padrões da BBDr classe 1 franceses (0,6 cm/s; Tabela 5.1), e também por esta razão nenhuma das formulações alcançou o patamar mínimo de 1,2 cm/s exigido para a classe 2.

#### 5.4 CÁNTABRO

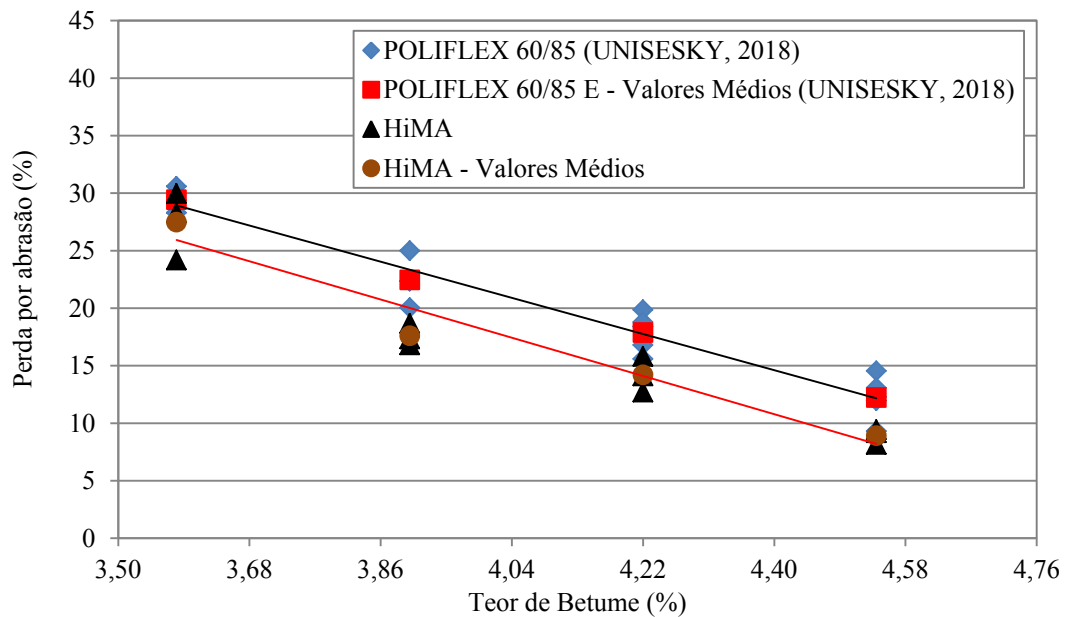
O ensaio Cántabro é previsto na norma brasileira, porém, não exigido como parâmetro nas normativas francesas. Assim, o limite máximo de 25% de perda de massa (Tabela 5.1) foi considerado como referência para a avaliação dos resultados apresentados na Tabela 5.5 e ilustrados na Figura 5.4.

Tabela 5.5 - Valores médios de perda de massa Cántabro das formulações BBDr com as matrizes betuminosas HiMA e POLIFLEX 60/85 E.

Teor de Ligante (%)	Matriz HiMA	Matriz POLIFLEX 60/85 E
	Unisesky (2018)	
Permeabilidade (cm/s)		
3,58	27,5	29,4
3,90	17,6	22,5
4,22	14,2	17,9
4,54	8,9	12,2

Fonte: Autor (2020).

Figura 5.4 - Comparativo de perda de massa Cántabro das formulações BBDr com as matrizes betuminosas HiMA e POLIFLEX 60/85 E.



Fonte: Autor (2020).

Em que pese a matriz betuminosa HiMA apresentar um ponto de amolecimento bem superior à POLIFLEX 60/85 E, 90°C e 65,4°C, respectivamente (Tabelas 4.2 e 4.3), não foi suficiente para que houvesse um decréscimo significativo de perda de massa por abrasão no ensaio Cántabro. Atribuem-se as perdas sofridas por ambas as misturas asfálticas, em razão do procedimento B escolhido para ser executado nesta pesquisa ser muito severo, impondo um condicionamento a 60°C sob a água por 24h às amostras.

Assim, mesmo possuindo 2,0% de cal hidratada CH-1 nas composições granulométricas e ligantes betuminosos modificados por polímeros de características elastoméricas, a atuação da tensão superficial da água a elevada temperatura na ampla cadeia de vazios formados na estrutura interna dos materiais, sobretudo os não comunicantes que alojam mais a água percolada, contribui para a desagregação das misturas asfálticas.

Tem-se, portanto, que a maior concentração polimérica da matriz HiMA (7,5% contra 4,0%) que garante maior recuperação elástica (96% contra 90%) (Tabelas 4.2 e 4.3), são os fatores que contribuem para uma ligeira menor perda de massa por abrasão no comparativo com a POLIFLEX 60/85 E, demonstrando serem matrizes também de comportamentos equivalentes nesta característica para as condições de testes realizados nesta pesquisa.

Considerando o limite normativo estabelecido para esta avaliação (Tabela 5.1), tem-se:

- Para as matrizes HiMA e POLIFLEX 60/85 E:
- Apenas o teor de 3,58% não atende ao disposto na normativa brasileira.

Como consideração final das discussões dos resultados obtidos nesta pesquisa, tem-se que as repetidas ênfases ressaltadas quanto à severidade do procedimento de compactação da metodologia Marshall, se fazem pertinentes ao verificar a comparação dos indicadores de teor de vazios e permeabilidade vertical determinados por Unisesky (2018) e Fagundes (2020) (Tabela 5.6). Este último utilizou também a mesma curva granulométrica, matriz betuminosa POLIFLEX 60/85 E, e teores de ligante nas dosagens, porém, testou a habilidade de compactação das formulações a partir dos ensaios de PCG e aferiu a permeabilidade sobre placas compactadas por rolagem de pneus (amassamento) em mesa pneumática, ambos os procedimentos de acordo com a metodologia francesa, que possui estreita relação campo/laboratório (MANUEL LPC, 2007).

Tabela 5.6 - Comparativo dos resultados de teor de vazios e permeabilidade vertical das formulações BBDr com a matriz betuminosa POLIFLEX 60/85 E obtidos por Unisesky (2018) e Fagundes (2020).

Teor de Ligante (%)	Matriz POLIFLEX 60/85 E Unisesky (2018)	Matriz POLIFLEX 60/85 E Fagundes (2020)	Diferença Fagundes (2020) em relação à Unisesky (2018)
	Teor de Vazios (%)		(%)
3,58	22,0	23,7	1,7
3,90	20,7	23,1	2,4
4,22	18,2	22,4	4,2
4,54	16,5	21,6	5,1

Teor de Ligante (%)	Matriz POLIFLEX 60/85 E Unisesky (2018)	Matriz POLIFLEX 60/85 E Fagundes (2020)	Diferença Fagundes (2020) em relação à Unisesky (2018)
	Permeabilidade Vertical (cm/s)		(vezes)
3,58	0,82	3,68	4,5
3,90	0,60	3,55	5,9
4,22	0,53	3,44	6,5
4,54	0,39	3,16	8,1

Fonte: Autor (2020).

A comparação direta dos resultados apresentados na Tabela 5.6 demonstra que o modo de compactação por impacto utilizado na metodologia Marshall impõe uma severidade tal que além de incompatível com os procedimentos de rolagem dos pneus e rolos lisos em campo, induz à aplicação de intensidades de carregamentos sobre as misturas asfálticas que influenciam diretamente na alteração das propriedades físicas e funcionais destes materiais e, conseqüentemente, impossibilitam uma avaliação adequada das formulações estudadas.

Isto fica evidente ao se observar a maior redução do teor de vazios e da permeabilidade das misturas asfálticas compactadas por impacto, em relação aos procedimentos executados por cisalhamento giratório e por rolagem de pneus em mesa pneumática, em que as diferenças podem atingir até 5,1% e 8,1 vezes, respectivamente, principalmente nos níveis mais elevados de teor de ligante.

Os impactos produzidos pelo soquete Marshall potencializam o efeito lubrificante da matriz betuminosa sobre as frações granulares, à medida que exercem um esforço de esmagamento da mistura asfáltica, não permitindo a aferição de uma habilidade de compactação com base na acomodação gradual por cisalhamento das formulações, como ocorre nos procedimentos executivos no campo.

O resultado destas condições adversas de teste por impacto é uma redução maior do teor de vazios e fortes decréscimos na permeabilidade das misturas asfálticas, conforme verificado na Tabela 5.6, induzindo à reprovação de formulações que poderiam ser aprovadas em condições adequadas de testes. Tanto é fato que os teores de 4,22% e 4,54% que estariam reprovados nos quesitos de teor de vazios e permeabilidade na pesquisa de Unisesky (2018) são aprovados nos testes executados por Fagundes (2020) na classe 2 BBDr, a mais nobre das misturas drenantes francesas.

Desta forma, com base nos resultados obtidos pela campanha experimental executada nesta pesquisa, tem-se que apenas o teor de ligante 3,58% atenderia a todas as condições normativas consideradas para aplicação em estruturas de pavimento no campo, enquadrando-se na classe 1 BBDr, exceto em relação à perda de massa por abrasão.

Entretanto, diante da severidade do procedimento de compactação utilizado na metodologia Marshall, da proximidade de teores como 3,90% e até mesmo de 4,22%, dos limites mínimos normativos para aceitabilidade nos critérios de avaliação dos vazios comunicantes e permeabilidade, além do cenário comparativo exposto na Tabela 5.6, verifica-se que esta pesquisa não esgota as possibilidades da viabilidade técnica e funcional das demais formulações testadas.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir da avaliação dos indicadores de viabilidade técnica e funcional de misturas asfálticas drenantes do tipo *Béton Bitumineux Drainante* (BBDr), comparando resultados de matrizes betuminosas HiMA e POLIFLEX 60/85 E (Unisesky, 2018), igualmente formuladas na curva granulométrica, lote de frações granulares gnáissicas e cal hidratada CH-1, bem como nos teores de dosagem dos ligantes betuminosos, as seguintes conclusões são estabelecidas com base na campanha experimental realizada:

A maior concentração polimérica da matriz HiMA, em relação à POLIFLEX 60/85 E, exerce forte influência no aumento da viscosidade dinâmica do ligante betuminoso nas temperaturas abaixo daquela determinada para o procedimento de compactação, em conjunto com o fenômeno da coalescência no processo de resfriamento, contribuindo para o preenchimento mais efetivo dos vazios formados na estrutura interna das misturas asfálticas.

Como consequência, tem-se que além da redução do volume de vazios global das formulações, ocorre também a minoração dos teores de vazios comunicantes, bastante dependentes da acomodação aleatória por cisalhamento das frações granulares durante os procedimentos de compactação, influenciando diretamente na maior obstrução da passagem da água e minorando a permeabilidade das misturas asfálticas.

Por outro lado, mesmo as formulações BBDr testadas formando uma ampla cadeia de vazios, se comparado com teores obtidos em misturas asfálticas densas, muito em razão da descontinuidade da curva granulométrica proposta, tem-se que as matrizes betuminosas poliméricas comparadas apresentaram em geral boa resistência à perda de massa por abrasão no ensaio Cántabro. Mesmo tendo sido submetidas à ação da tensão superficial da água a elevada temperatura (60°C) por um longo período (24h), verificou-se que o maior ponto de amolecimento, mas principalmente a maior recuperação elástica, conferiram à matriz HiMA resultados ligeiramente melhores aos da POLIFLEX 60/85 E.

Em todo caso, com base na campanha experimental realizada, pode-se dizer que a matriz HiMA não aporta resultados que permitam inferir ganhos significativos às propriedades funcionais das misturas asfálticas drenantes, quando comparados aos obtidos por Unisesky (2018) para a matriz POLIFLEX 60/85 E. Entretanto, isto não implica em concluir que a tecnologia HiMA não seja viável tecnicamente para a aplicação em misturas asfálticas nas estruturas de pavimento no campo, apenas que apresentou comportamento equivalente à matriz POLIFLEX 60/85 E nos parâmetros testados.

A severidade da compactação por impacto utilizada na metodologia Marshall também contribui para que esta pesquisa não tenha a possibilidade de esgotar o assunto acerca dos comparativos realizados entre as matrizes HiMA e POLIFLEX 60/85 E, pois além de não possuir conformidade com os procedimentos de execução em campo, induz à reprovação de misturas que poderiam ser aceitas, conforme exemplificado ao final do tópico 5.1, dificultando a interpretação adequada das características funcionais das misturas asfálticas, bem como a escolha assertiva do teor ótimo de ligante betuminoso pelo projetista.

Desta forma, recomenda-se como continuidade desta pesquisa que as mesmas formulações testadas com a matriz betuminosa HiMA sejam submetidas aos ensaios na prensa de compactação giratória (PCG), bem como de permeabilidade sobre placas compactadas por amassamento em mesas pneumáticas, com base nas prerrogativas normativas francesas com estreita relação campo/laboratório, a fim de que seja possível verificar o impacto real do processo de compactação Marshall na viabilidade técnica e funcional das misturas asfálticas estudadas, bem como permitir uma assertividade maior na avaliação funcional das formulações e na escolha do teor ótimo de ligante betuminoso.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 15619 (2012), **Misturas asfálticas - Determinação da densidade máxima teórica e da massa específica máxima teórica em amostras não compactadas**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- AFNOR NF EN 13108-7 (2006), **Mélanges Bitumineux - spécifications - Partie 7: Béton Bitumineux Drainante (BBDr)**. Association Française de Normalisation. Paris, France.
- ANDRADE, V. D. (2018), **Influência da formulação de esqueletos minerais na deformação permanente de misturas de concreto asfáltico densas**. 2018. 167 f. Dissertação (Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville.
- APS, M. (2006), **Classificação da aderência pneu-pavimento pelo índice combinado IFI: International Friction Index para revestimentos asfálticos**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Transporte, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BARRA, B. S. (2009), **Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas**. 2009. 327 p. Tese (Doutor em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- \_\_\_\_\_. (2005), **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.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G. da; CERATTI, J. A. P; SOARES, J. B. (2010), **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1. ed. Rio de Janeiro: Abeda. 504 p. v. 4.
- BIASZAJOWSK, K.; OLSZACKI, J.; PECIAKOWSKI, H. (2015), **Highly modified binders orbiton HiMA**. Plock: Orlen Asphalt Sp. Z O.o.
- BROSSEAUD, Y.; ST-JACQUES, M. (2016), **Bilan, évolution et domaine d'utilisation des enrobés drainants**. **Congrès INFRA**, Montréal. 22º Congrès INFRA 2016, Montreal, Canadá.
- \_\_\_\_\_, Y. (1999) **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. Washington, DC.
- CBB ASFALTOS (2018), **LAUDO TÉCNICO DE ENSAIOS**. Curitiba: CBB Asfaltos.
- \_\_\_\_\_. (2018), **POLIFLEX HiMA ESPECIFICAÇÃO DE MATERIAL**. Curitiba: CBB Asfaltos.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (2019), **Pesquisa CNT de rodovias 2019**. Brasília: CNT.



\_\_\_\_\_. (2015), **Pesquisa CNT de rodovias 2015**. Brasília, DF.

CLARA, E. (2020), **Avaliação de misturas asfálticas densas com a incorporação de cinza de carvão mineral**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Joinville, SC, Brasil, 164 p.

CUNHA, M. B. (2004), **Avaliação do método Bailey de seleção granulométrica de agregados para misturas asfálticas**. 2004. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA E RODAGEM. **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-emanuais/normas/meetodo-de-ensaio-me/dner-me383-99.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE (DNIT). **DNIT - ES 031: Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. Rio de Janeiro, 2006. 14 p. Disponível em: <[http://ipr.dnit.gov.br/normas-emanuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit031\\_2006\\_es.pdf](http://ipr.dnit.gov.br/normas-emanuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit031_2006_es.pdf)>. Acesso em: 06 mai. 2018.

DNER-ES 386 (1999), **Pavimentação - Pré-misturado a quente com asfalto polímero - camada porosa de atrito**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

DNER-ME 043 (1995), **Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

DNIT (2006) **Manual de Pavimentação**. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Rio de Janeiro.

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

FAGUNDES, P. M. **Avaliação comparativa do comportamento funcional de misturas asfálticas do tipo BBDr e BBTM**. Orientador: Prof. Dr. Breno Salgado Barra. 2020. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

FARIA, H. M. **Pavimentos asfálticos altamente modificados**. São Paulo: Sinicesp, 2012.

FERREIRA, P. N. (2006) **Estudo da Utilização de Revestimentos Asfálticos Delgados a Quente para Pavimentos tipo BBTM no Brasil**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes (PET). Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, SP.

GUIDE TECHNIQUE (1997) **French Design Manual for Pavement Structures - Guide Technique (English Version)**. Published by Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA) and Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), 248 p.

GUIMARÃES, J. M. F. **Concreto asfáltico drenante em asfáltos modificados por polímero SBS e borracha moída de pneus**. 2012. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

\_\_\_\_\_, J. M. F.; Momm, L.; Quintero, C. F. Q; Shinohara, K. J.; Almeida, A. J. de (2013) **Desagregação e Permeabilidade de Concretos Asfálticos Drenantes com Ligantes Modificados**. In XVII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA). Guatemala.

INMET (2020) **Precipitação Total Anual**. Instituto Nacional de Meteorologia, Brasília, DF. MTPA (2018) Anuário Estatístico de Segurança Rodoviária. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. Brasília, DF.

JAZIDA Rudnick Minérios Ltda. Joinville, 18 nov. 2019. Disponível em: <http://www.rudnickminerios.com.br/>. Acesso em: 18 nov. 2019.

KLUTTZ, R. Q. et al. **Long term performance of a highly modified asphalt pavement and application to perpetual pavement design**. In: 6TH EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, 6., 2016, Prague. Artigo. Prague: E&e Congress 2016, 2016. p. 1-13.

KRATON. **Hilghly modified asphalt**. Disponível em: <https://kraton.com/products/paving/hima.php>. Acesso em: 10 nov. 2019.

LIU, Z.; WANG, X.; LUO, S.; YANG, X.; LI, Q. (2019) **Asphalt Mixture Design for Porous Ultra-Thin Overlay**. Construction and Building Materials, 217, pp. 251-264. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.049>

MANUEL LPC (2007) **Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés**. Groupe de Travail RS. "Formulation des enrobés". 199 p. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris, France.

MENDES, L. de O. **Utilização do método Bailey para a seleção de agregados em dosagem de misturas asfálticas**. 2011. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.

MEURER FILHO, E. **Estudo de granulometria para concretos asfálticos drenantes**. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

MEURER, P. **Caracterização de materiais rochosos do norte de Santa Catarina para fins de aplicação em obras de pavimentação**. 2015. 109 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

MINÉRIOS, Rudnick. **Rudnick Minérios**. 2021. Disponível em: <http://www.rudnickminerios.com.br/>. Acesso em: 09 fev. 2021.

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES (Brasil). Departamento nacional de infraestrutura de transportes (DNIT). Manual de Pavimentação. **Manual de pavimentação**, Rio de Janeiro, 2006.

MOMM, L. **Pavimento drenante em concreto asfáltico**. In: 7º ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA. ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA, *Anais* [...] 27 p. Vitória, 2002.

MOTOMATSU, S.; TAKAHASHI, S.; UESAKA, K.; OUKI, H. **How the property and performance of polymer modified bitumen should be evaluated in porous asphalt mix?** Published on Proceedings of the third Eurasphal and Eurobitume Congress, volume 2, pp. 1339-50, Vienna, 2004.

MTPA, **Anuário Estatístico de Segurança Rodoviária**. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. Brasília, DF, 2018.

NASCIMENTO, C. C. C. do. **Avaliação da permeabilidade de misturas betuminosas drenantes em laboratório e "in situ"**. 2012. 263 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2012.

NCAT. **Review of Test Methods**. Published by National Center for Asphalt Technology, 1988.

OBSERVATOIRE DES TECHNIQUES DE CHAUSSÉES (França). **Nota informativa, 100, Junho 1997**. França: Setra, 1997.

OLIVEIRA, C. G. M. Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante. 2003. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2003.

PAULA, M. E. B. DE; DUARTE, A. M. (1996), **Influência da Chuva na Ocorrência dos Acidentes de Trânsito**. Notas Técnicas. NT 195/96. Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo (CET/SP). São Paulo, SP.

PORTO, H. G. **Pavimentos drenantes**, 1. Ed, D&Z Computação Gráfica e Editora, São Pulo, SP (1999).

RACASENS, R. M. **Nuevas mezclas para capas de rodadura y su influencia em el confort (ruído) y la seguridad**. In: CONFERENCIA CÁTEDRA MARIANO LÓPEZ NAVARRO. Universidad Zaragoza, 2., 2006, p. 1-38, Zaragoza, 2006.

RIBEIRO, T. P. Estudo descritivo das principais patologias em pavimento flexível. **Revista científica multidisciplinar núcleo do conhecimento**, v. 1, ano 2, p. 733-754, jul. 2017.

SANTANA, H. (1992) **Manual de Pré-Misturado a Frio**. Instituto Brasileiro do Petróleo (IBP). 1ª Edição. Rio de Janeiro, RJ.

SENÇO, W. de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2. ed. aum. São Paulo: Editora PINI Ltda, 2008. 758 p. v. 1. ISBN 978-85-7266-199-7.

SILVA, A. M. **Avaliação do desempenho mecânico de misturas asfálticas projetadas com CAP HiMA e CAP 60/85-E aplicadas na restauração de um trecho rodovia SC-114. 2018**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

SILVA, C. E. del B. D. da. **Estudo da permeabilidade de misturas asfálticas de graduação aberta**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SIROMA, R. S. (2018) **Avaliação da deformação permanente em misturas asfálticas densas formuladas com areia descartada de fundição (ADF)**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Joinville, SC, Brasil, 196 p.

SOARES, A. F. dos S. **Análise da ocorrência de hidroplanagem num caso real**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2011.

TAKAHASHI, S. e PARTL, M.N. (1999). **Improvement of Mix Design for Porous Asphalt**. Report 113/11, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf, Switzerland, 114 p.

UNISESKY, C. R. **Avaliação comparativa do comportamento funcional e mecânico de misturas asfálticas do tipo BBDr e BBTM**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

VAVRIK, W. R.; HUBER, G.; PINE, W. J.; CARPENTER, S. H.; BAILEY, Robert. Bailey Method for Gradation Selection in HMA Mixture Design. **Transportation Research Circular**, Washington, 2002.

YINFEL, D.; PUSHENG, L.; JIACHENG, W.; HANCHENG, D.; HAO, W.; YINGTAO, L. (2020) **Effect of Lightweight Aggregate Gradation on Latent Heat Storage Capacity of Asphalt Mixture for Cooling Asphalt Pavement**. Construction and Building Materials, 250, 118849. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118849>