



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Luiz Henrique Teixeira

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FUNCIONAL DE MISTURAS
ASFÁLTICAS DRENANTES DO TIPO BBDR COM UTILIZAÇÃO DE MATRIZ
BETUMINOSA ALTAMENTE MODIFICADA HIMA**

Joinville
2021

Luiz Henrique Teixeira

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FUNCIONAL DE MISTURAS
ASFÁLTICAS DRENANTES DO TIPO BBD_r COM UTILIZAÇÃO DE MATRIZ
BETUMINOSA ALTAMENTE MODIFICADA HiMA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Orientador: Prof. Breno Salgado Barra, Dr.

Joinville

2021

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

Teixeira, Luiz Henrique

Avaliação do Comportamento Funcional de Misturas
Asfálticas Drenantes do Tipo BBDr com Utilização de Matriz
Betuminosa Altamente Modificada HiMA / Luiz Henrique
Teixeira ; orientador, Breno Salgado Barra, 2021.

176 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. comportamento
funcional. 3. BBDr. 4. ligante altamente modificado. 5.
HiMA. I. Salgado Barra, Breno. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia e
Ciências Mecânicas. III. Título.

Luiz Henrique Teixeira

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO FUNCIONAL DE MISTURAS
ASFÁLTICAS DRENANTES DO TIPO BBDr COM UTILIZAÇÃO DE MATRIZ
BETUMINOSA ALTAMENTE MODIFICADA HiMA**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Leto Momm, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. Yader Alfonso Guerrero Pérez, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Prof. João Victor Staub de Melo, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Luiz Guilherme Rodrigues de Mello, Dr. Eng.
Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Prof. Rafael de Camargo Catapan, Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas

Prof. Breno Salgado Barra, Dr. Eng.
Orientador

Joinville, 2021.

“Abençoados sejam os corajosos que insistem, persistem, e mesmo nas adversidades de suas vidas encontram forças para nos incentivar, quando todos os caminhos se mostram estreitos, ainda assim não medem esforços para nos alcançar e nos dar a mão.”

Liliana Bays

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

Aos meus pais, pelo sopro de vida.

Aos Diretores da CBB Asfaltos, Vinicius Zózimo Cagliari e Nelson Moraes, pelo apoio institucional.

Às Engenheiras Aline Sendeski e Leticia Bannach, e ao Engenheiro Rafael Lopes Martins, pelo auxílio nesta caminhada.

Ao Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), do Campus de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), pelo suporte de infraestrutura.

Ao meu orientador Prof^o Dr. Breno Barra, por me conduzir aos melhores caminhos da pesquisa.

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o comportamento funcional de misturas asfálticas drenantes do tipo *Béton Bitumineux Drainant* (BBDr), com a utilização de ligante betuminoso altamente modificado denominado *Highly Modified Asphalt* (HiMA), a partir dos princípios conceptivos da metodologia francesa para formulação de misturas asfálticas. Para tanto, os resultados obtidos na campanha experimental desta pesquisa com o uso da matriz betuminosa HiMA – produzida a partir de modificação com 7,5% de polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) –, foram comparados ao de uma matriz de referência estudada previamente, denominada Poliflex 60/85 E, modificada com 4,0% de SBS. O ligante betuminoso 50/70 (0,1 mm), em sua forma pura, foi tomado como base para proceder às modificações das referidas matrizes, sendo proveniente da mesma central de beneficiamento. Todavia, o polímero SBS utilizado em cada processo de modificação comporta cadeias moleculares distintas, ainda que pertencendo à mesma categoria polimérica. A composição das curvas granulométricas é idêntica para ambas as misturas asfálticas, com granulares oriundos de mesma jazida e lote de amostragem, a fim de equiparar as propriedades e qualidade das frações utilizadas, permitindo considerar apenas a influência da variação do ligante betuminoso na avaliação dos resultados, compreendendo os seguintes teores: 3,58%, 3,90%, 4,22% e 4,54%. Neste contexto, adotou-se o método teórico, utilizando a Equação de Füller-Talbot, fracionando as partículas granulares a cada diâmetro de peneira isoladamente, em razão da racionalidade e precisão com que é definida a curva granulométrica por esta metodologia. Como referência, foi utilizada uma curva aplicada em obra pública na França, na cidade de Lille, com ausência de frações no intervalo 4/6 mm, característico de misturas do tipo BBDr, porém, adaptando-a de acordo com as aberturas de peneiras disponíveis no Brasil. A campanha experimental compreendeu ensaios reológicos a partir de reometria por cisalhamento dinâmico (DSR) no plano complexo, com ambas as matrizes betuminosas citadas, avaliações quanto à habilidade de compactação com a Prensa de Cisalhamento Giratório (PCG), resistência à ação da água pelo ensaio de Duriez a 18°C e à deformação permanente a 60°C, além da permeabilidade vertical e horizontal. Complementarmente foram realizados ensaios Hamburgo, apenas para a matriz HiMA, a fim de verificar a resistência à deformação permanente sob a ação direta da água, também a 60°C. Os resultados obtidos indicam que o maior percentual de polímero SBS utilizado na matriz HiMA, aliado à cadeia molecular com predominância de diblocos S-B e ramificação de vinil, confere melhor comportamento reológico que a matriz de referência Poliflex 60/85 E, com predominância de triblocos S-B-S e com presença incipiente de vinil na cadeia molecular. Estas constatações são corroboradas pela menor dissipação de energia sob a forma de calor da parte imaginária (G'') do módulo complexo (G^*), acarretando em menores ângulos de fase (δ) e susceptibilidades térmica e cinética, sobretudo a partir de 40°C. Entretanto, no que diz respeito às propriedades funcionais, tem-se que a maior concentração polimérica da matriz HiMA contribuiu para uma redução nas taxas de permeabilidade e na habilidade de compactação, devido à diminuição dos teores de vazios obtidos nas formulações. Em contrapartida, a resistência à ação da água foi muito similar à da matriz Poliflex 60/85 E. Quanto à resistência à deformação permanente, verificou-se que a temperatura de 60°C utilizada na realização destes ensaios se encontra abaixo daquelas consideradas como ponto de amolecimento de ambas as matrizes, acarretando em um desempenho próximo neste contexto. Ainda assim, é possível concluir que a matriz HiMA possui menor suscetibilidade térmica e cinética que a Poliflex 60/85 E, principalmente à medida que os teores de ligante e as temperaturas de teste aumentam.

Palavras-chave: Comportamento funcional; BBDr; ligante altamente modificado; HiMA.

ABSTRACT

The main aim of this research is to evaluate the functional behavior of porous asphalt mixes so-called *Béton Bitumineux Drainant* (BBDr) by using Highly Modified Asphalt (HiMA) matrix, based on the conceptive principles of the French methodology. The HiMA matrix, modified with 7,5% of polymer Styrene-Butadiene-Styrene (SBS), had its performance compared to a previously researched matrix nominated Poliflex 60/85 E, both provided by the same processing and supplying central, taking the binder 50/70 (0.1mm pen.) in its sheer form as raw material, despite comprising distinct molecular chains with regards to the modifying agents, even that pertaining to the same polymeric category. The aggregate gradation of the granulometric curves is identical for both asphalt mixes, with fractions provided by the same quarry and sampling batch, so as not to vary their properties and qualities, allowing to consider only the influence of asphalt binder variation all over the evaluation of the results, comprising the following contents: 3,58%, 3,90%, 4,22% and 4,54%. In this context, it was adopted the theoretical method, with use of Füller-Talbot's equation, singly fractioning the granular particles at each sieve opening, due to rationality and precision with which granulometric curve is defined by this methodology. As reference, it was taken into account an aggregate gradation applied in a public road work at the city of Lille, in France, considering a fraction gap 4/6mm, typical from BBDr asphalt mixes, however, adapting it according to the sieve openings available in Brazil. The experimental campaign comprised rheological tests carried out by Dynamic Shear Rheometer (DSR) in complex plan spectrum, with both binder matrixes already mentioned, evaluations with regards to compacting hability with Giratory Shear Press, resistance to water action by Duriez test at 18°C and to rutting at 60°C, besides vertical and horizontal permeability. In addition, they were carried out Hamburg tests, only for HiMA matrix, aiming to verify the rutting resistance under direct water action, also at 60°C. The results obtained indicate that the highest percentage of polymer used in the HiMA matrix, combined with the polymeric molecular chain with predominance of S-B diblocks and vinyl branching, provides better rheological behavior than the reference matrix Poliflex 60/85 E, with predominancy of S-B-S triblocks and incipient vinyl branching in the polymeric molecular chain. These findings are supported by lower heating energy dissipation from viscous complex modulus component (G''), resulting in smaller phase angles (δ), thermal and kinetic susceptibilities, principally from 40°C up. However, with regards to the functional properties, it is noted that the higher polymeric concentration of the HiMA matrix contributes for reducing the permeability rates and the compacting hability of the asphalt mixes, due to the decrease of the air void contents obtained for the formulations. The resistance to water action was very similar to that of Poliflex 60/85 E matrix. On the rutting resistance, the temperature of 60°C used along the tests is lower than the softening point of both binder matrixes, leading to a similar performance in this context. Even though, it is possible to conclude that HiMA matrix has lower thermal and kinetic susceptibility than the Poliflex 60/85 E, mainly with increasing binder content and temperature.

Keywords: Functional behavior; BBDr; Highly Modified Asphalt; HiMA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Fluxograma da pesquisa.	19
Figura 2.1	- Desenho esquemático de obtenção das frações do petróleo por destilação fracionada.	25
Figura 2.2	- Estruturas representativas das quatro estruturas que formam os ligantes betuminosos: saturados, aromáticos, resinas e afaltenos.	28
Figura 2.3	- Cromatógrafo IATROSCAN e respectivas colunas capilares.	29
Figura 2.4	- Fluxograma da metodologia de fracionamento proposta pelo químico Corbett.	29
Figura 2.5	- Modelo simplificado de envelhecimento por processo termo-oxidativo do ligante betuminoso.	32
Figura 2.6	- Estruturas copoliméricas.	35
Figura 2.7	- Estruturas moleculares genéricas do copolímero SBS.	37
Figura 2.8	- Estruturas moleculares em blocos lineares e radiais do copolímero SBS.	38
Figura 2.9	- Estruturas moleculares em bloco lineares do copolímero SBS, com aporte de moléculas de Vinil.	39
Figura 2.10	- Mecanismo de reação química de um polímero Etileno-Glicidil-Acrilato e uma molécula de asfalto.	41
Figura 2.11	- Interação das fases asfálticas e poliméricas conforme percentual de polímero SBS incorporado no processo de modificação do ligante betuminoso.	43
Figura 2.12	- Impacto da utilização de ligantes não modificados e modificados pelo processo convencional com SBS (1101 AT), em comparação com matriz HiMA (D0243), na resistência à fadiga de misturas asfálticas.	44
Figura 2.13	- Correlação entre o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ do ligante betuminoso e a taxa média de acumulação da deformação (S) da mistura asfáltica (teste <i>Repeated Shear Constant Height</i> - RSCH).	46
Figura 2.14	- Correlação entre o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ do ligante betuminoso e a resistência à fadiga da mistura asfáltica.	46

Figura 2.15	- Modelo simplificado da estrutura intermicelar coloidal do ligante betuminoso.	49
Figura 2.16	- Ligante betuminoso com característica SOL.	50
Figura 2.17	- Ligante betuminoso com característica GEL.	50
Figura 2.18	- Ângulo de fase (δ) atuando no comportamento viscoelástico dos ligantes betuminosos.	52
Figura 2.19	- Representação gráfica da função de fluência.	53
Figura 2.20	- Representação gráfica da função de relaxação.	53
Figura 2.21	- Representação gráfica vetorial do módulo complexo.	55
Figura 2.22	- Curvas isocrônicas do módulo dinâmico no plano complexo.	56
Figura 2.23	- Curvas isotérmicas do módulo dinâmico no plano complexo.	57
Figura 2.24	- Plano Cole-Cole do módulo dinâmico.	57
Figura 2.25	- Espaço de Black do módulo dinâmico dinâmico no plano complexo.	58
Figura 2.26	- Curva de equivalência frequência-temperatura do módulo dinâmico no plano complexo.	59
Figura 2.27	- Translação das curvas isotérmicas pelo método gráfico.	60
Figura 3.1	- Princípio do escoamento da água superficial em uma estrutura de pavimento com mistura asfáltica drenante (esquerda) em comparação às estruturas tradicionais (direita).	63
Figura 3.2	- Tipos de vazios presentes na estrutura interna das misturas asfálticas.	66
Figura 3.3	- Aspecto macrottextural de uma mistura asfáltica drenante (esquerda) e densa (direita).	68
Figura 3.4	- Fenômeno de (a) hidroplanagem e viscoplanagem, (b) efeito <i>spray</i> e (c) espelhamento ou reflexão.	69
Figura 3.5	- Afundamento na trilha de roda.	70
Figura 3.6	- Proteção das camadas estruturais betuminosas subjacentes da radiação solar.	71
Figura 3.7	- Absorção sonora das misturas asfálticas drenantes (esquerda), em relação às misturas asfálticas densas convencionais (direita).	71
Figura 4.1	- Formas de ação da água sob o aspecto deletério nas misturas asfálticas.	74

Figura 4.2	- Tensões de superfície na interação do conjunto granular-ligante.	78
Figura 4.3	- Ângulos de contato formados entre as tensões de superfície: (a) molhagem completa, (b) molhagem parcial e (c) nenhuma molhagem.	78
Figura 4.4	- Falhas das superfícies adesivas.	79
Figura 5.1	- Níveis de avaliação da metodologia francesa para a formulação de misturas asfálticas.	84
Figura 5.2	- Moinho piloto utilizado na modificação do ligante betuminoso.	88
Figura 5.3	- Curvas de viscosidade das matrizes betuminosas HiMA e Poliflex 60/85E.	90
Figura 5.4	- Comparação entre as curvas granulométricas para mistura BBDr.	93
Figura 5.5	- Reômetro de cisalhamento dinâmico SMARTPAVE 102 – Anton Paar.	94
Figura 5.6	- Moldes de silicone com 25,0 mm, 8,0 mm e 4,0 mm, nesta ordem, contendo ligante betuminoso.	94
Figura 5.7	- Visão geral do banho termostático para circulação do fluido indutor de temperatura.	95
Figura 5.8	- Procedimento <i>zero gap</i> das placas paralelas.	96
Figura 5.9	- Aquecimento da amostra para correta adesão às superfícies das placas paralelas.	97
Figura 5.10	- Procedimento <i>trim</i> e conformação da amostra à geometria das placas paralelas.	98
Figura 5.11	- Prensa de Compactação Giratória (PCG-3) e seu princípio de funcionamento.	99
Figura 5.12	- Preparação das amostras antes da execução do ensaio.	101
Figura 5.13	- Processo de extração dos corpos de prova resultantes do processo de compactação pela PCG.	102
Figura 5.14	- Verificação da conformidade da habilidade de compactação das misturas asfálticas (exemplo de formulação aprovada).	103
Figura 5.15	- Processo de compactação das amostras por duplo pistão.	104
Figura 5.16	- Corpos de prova após o processo de extração.	105

Figura 5.17	- Condicionamento a seco dos corpos de prova com controle da umidade do ar em $50\% \pm 10\%$.	105
Figura 5.18	- Processo de saturação a vácuo dos corpos de prova.	106
Figura 5.19	- Imersão na água pelo período de 7 dias.	106
Figura 5.20	- Ruptura à compressão simples dos corpos de prova.	107
Figura 5.21	- Usinagem das misturas asfálticas em misturador do tipo <i>pugmill</i> .	108
Figura 5.22	- Procedimento de compactação das placas.	109
Figura 5.23	- Máquina de deformação permanente.	110
Figura 5.24	- Pontos de medição do afundamento na trilha de roda.	110
Figura 5.25	- Permeômetro posicionado no bordo esquerdo, eixo e bordo direito da placa.	112
Figura 5.26	- Determinação da permeabilidade vertical das misturas asfálticas BBDr.	113
Figura 5.27	- Conjunto para ensaio de permeabilidade horizontal.	114
Figura 5.28	- Hamburg Wheel Tracking Device (HWTD).	115
Figura 5.29	- Corpos de prova cilíndricos compactados pela PCG (esquerda) e placas extraídas de campo (direita).	116
Figura 5.30	- Corpos de prova utilizados nos ensaios de Hamburgo.	116
Figura 6.1	- Curvas isocrônicas.	118
Figura 6.2	- Curvas isotérmicas.	119
Figura 6.3	- Plano Cole-Cole.	119
Figura 6.4	- Espaço de Black.	120
Figura 6.5	- Curvas de equivalência frequência-temperatura.	120
Figura 6.6	- Habilidade de compactação na PCG da mistura asfáltica BBDr formulada com a matriz betuminosa HiMA.	123
Figura 6.7	- Habilidade de compactação na PCG das misturas asfálticas BBDr formuladas com as matrizes betuminosas Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020) E HiMA.	124
Figura 6.8	- Resistência à ação da água entre as misturas asfálticas BBDr formuladas com as matrizes betuminosas Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020), em azul, HiMA, em laranja.	125
Figura 6.9	- Permeabilidade vertical e horizontal das misturas asfálticas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA.	127

Figura 6.10	- Permeabilidade vertical e horizontal média das misturas asfálticas BBDr formuladas com as matrizes betuminosas Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020) e HiMA.	128
Figura 6.11	- Afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA.	130
Figura 6.12	- Afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas BBDr formuladas com as matrizes betuminosas Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020) e HiMA.	132
Figura 6.13	- Afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA.	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Especificações para os cimentos asfálticos de petróleo (CAP) classificados por penetração.	26
Tabela 2.2	- Composição química dos ligantes betuminosos convencionais.	27
Tabela 2.3	- Especificações dos ligantes betuminosos modificados por polímeros elastoméricos.	34
Tabela 2.4	- Parâmetros considerados para classificação de um ligante betuminoso como matriz HiMA no Estado da Flórida/Estados Unidos.	45
Tabela 2.5	- Parâmetros considerados para classificação europeia de um ligante betuminoso de alto desempenho.	48
Tabela 3.1	- Pontos de controle das proporções granulométricas para as misturas asfálticas drenantes BBDr.	67
Tabela 4.1	- Fatores que interferem nas características de adesividade do conjunto granular-ligante.	76
Tabela 5.1	- Caracterização dos granulares pétreos.	87
Tabela 5.2	- Caracterização da matriz betuminosa HiMA.	89
Tabela 5.3	- Caracterização do ligante betuminoso POLIFLEX 60/85 E.	89
Tabela 5.4	- Composição granulométrica BBDr de referência.	91
Tabela 5.5	- Composição granulométrica proposta para a pesquisa.	92
Tabela 5.6	- Massa Volumétrica Real (MVR) das misturas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA.	100
Tabela 6.1	- Teor de vazios obtidos nos ensaios de habilidade de compactação com a PCG para as misturas asfálticas BBDr formuladas com as matrizes betuminosas Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020) e HiMA.	123
Tabela 6.2	- Permeabilidade das misturas asfálticas BBDr formuladas com as matrizes betuminosas Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020) e HiMA.	126
Tabela 6.3	- Perdas percentuais de permeabilidade das misturas asfálticas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA, em relação à Poliflex 60/85 E (FAGUNDES,2020).	128

Tabela 6.4	- Afundamento na trilha de roda após 3000 ciclos das misturas asfálticas BBDr formuladas com as matrizes betuminosas Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020) e HiMA.	131
Tabela 6.5	- Afundamento na trilha de roda após 3000 ciclos das misturas asfálticas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA.	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i>
AMPT	Teste de desempenho da mistura asfáltica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBD _r	<i>Béton Bitumineux Drainant</i>
BBSG	<i>Béton Bitumineux Semi-Grenus</i>
BBTM	<i>Béton Bitumineux Très Mince</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CPA	Camada Porosa de Atrito
CTJ	Centro Tecnológico de Joinville
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestruturas de Transportes
DRX	Difração de Raio-X
DSR	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico
EPA	<i>U.S Environmental Protection Agency</i>
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
EVA	Etileno Acetato de vinila
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
FRX	Fluorescência de Raio X
FTIR	Espectroscopia Infravermelha com Transformada de Fourier
G *	Módulo Dinâmico; Módulo de Cisalhamento Dinâmico; Norma do Módulo Complexo
HiMa	<i>Highly Modified Asphalt</i>
HWTD	<i>Hamburg Wheel Tracking Device</i>
IFSTTAR	<i>Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux</i>
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>
LDTPav	Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação
LPC	<i>Laboratoire des Ponts et Chaussées</i>

LTP	Laboratório de Tecnologia de Pavimentação
LVDT	<i>Linear Variable Displacement Transducer</i>
MFA	Microscopia de Força Atômica
MINFRA	Ministério da Infraestrutura
MSCR	Multiple Stress Creep Recovery
MVR	Massa Volumétrica Real
NCAT	<i>National Center for Asphalt Technology</i>
NF	<i>Norme Française</i>
NBR	Norma Brasileira
OEVTM	Nanocomposto derivado de vermiculita expandida orgânica
PA	Ponto de amolecimento
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>
PCG	Prensa de Compactação Giratória
PG	<i>Performance Grade</i>
PPA	Ácido Polifosfórico
PVC	Cloreto de Polivinila
REPAR	Refinaria Presidente Getúlio Vargas
RET	Terpolímeros Elastoméricos Reativos
RTFOT	<i>Rolling Thin-Film Oven Test</i>
SB	Estireno-Butadieno-Borracha
SBR	Estireno-Butadieno
SBS	Estireno-butadieno-Estireno
SEBS	Estireno-Etileno-Butileno-Estireno
SETRA	Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SIS	Estireno-Isopreno-Estireno
SMA	<i>Stone Mastic Asphalt</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UGE	<i>Université Gustave Eiffel</i>
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	15	
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	15
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR OS OBJETIVOS	18
1.4	DELIMITAÇÕES DO ESPAÇO DA PESQUISA	21
1.5	RELEVÂNCIA DO TEMA: JUSTIFICATIVA	22
1.6	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	24

CAPÍTULO 2

LIGANTES BETUMINOSOS	25	
2.1	LIGANTES BETUMINOSOS CONVENCIONAIS	25
2.1.1	Composição química do ligante betuminoso	27
2.2	LIGANTES BETUMINOSOS MODIFICADOS POR POLÍMEROS	33
2.2.1	Polímeros para modificação de ligantes betuminosos	34
2.2.1.1	Termorrígidos	36
2.2.1.2	Termoplásticos	36
2.2.1.3	Elastômeros	37
2.2.1.4	Terpolímeros elastoméricos reativos (RET)	40
2.3	TECNOLOGIA HIMA	41
2.4	REOLOGIA DO LIGANTE BETUMINOSO	49
2.4.1	Viscoelasticidade	51
2.4.2	Módulo dinâmico no plano complexo	54
2.4.2.1	Representações gráficas do módulo dinâmico no plano complexo	56

CAPÍTULO 3

MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES	62
3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	62
3.2 BREVE HISTÓRICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES	63
3.3 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES	65

CAPÍTULO 4

AÇÃO DA ÁGUA SOBRE AS MISTURAS ASFÁLTICAS	74
4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	74
4.2 INTERAÇÃO DO CONJUNTO GRANULAR-LIGANTE	75
4.3 AÇÃO DELETÉRIA DA ÁGUA NAS MISTURAS ASFÁLTICAS	80

CAPÍTULO 5

MATERIAIS E MÉTODOS	84
5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA FRANCESA DE FORMULAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS	84
5.2 MATERIAIS UTILIZADOS	86
5.2.1 Granulares	86
5.2.2 Ligante betuminoso	88
5.3 MÉTODOS	91
5.3.1 Curva granulométrica	91
5.3.2 Reometria por cisalhamento dinâmico	93
5.3.3 Prensa de compactação girtória	99
5.3.4 Ensaio de Duriez	104
5.3.5 Deformação permanente	107
5.3.6 Permeabilidade	111

5.3.7	Ensaio Hamburgo	114
-------	-----------------	-----

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES		118
6.1	REOMETRIA POR CISALHAMENTO DINÂMICO	118
6.2	HABILIDADE DE COMPACTAÇÃO NA PCG	122
6.3	RESISTÊNCIA À AÇÃO DA ÁGUA - DURIEZ	125
6.4	PERMEABILIDADE	126
6.5	RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE	129
6.6	ENSAIO HAMBURGO	133

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES		136
-----------------------------------	--	------------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		139
-----------------------------------	--	------------

ANEXOS

ANEXO I	- PROCEDIMENTO UTILIZADO NA COMPACTAÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS BBD _r	164
ANEXO II	- DADOS DAS ANÁLISES REOLÓGICAS DAS MATRIZES BETUMINOSAS POLIFLEX 60/85 E E HiMA	166

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A formulação de misturas asfálticas consiste em um processo minucioso e interdependente e, não raro, o aporte ou melhoramento de uma dada característica pode afetar sensivelmente outra vertente do comportamento do material, seja de forma benéfica ou prejudicial. Em condições gerais, por exemplo, tem-se que o aumento do teor de ligante betuminoso nas dosagens é benéfico para o módulo de rigidez e resistência à fadiga, devido aumentar a espessura da película que envolve as partículas granulares, mas prejudicial para a resistência à deformação permanente, pois potencializa os efeitos do fenômeno da fluência (MANUEL LPC, 2007).

Ainda, a formulação das misturas asfálticas deve ser compatibilizada com as funções que o material desempenhará no campo. Logo, o modo de concepção da curva granulométrica, que tem participação majoritária na composição do produto final, apresenta uma relação direta com as características e propriedades desejáveis pelo projetista (ANDRADE, 2018; ABDO e JUNG, 2016; MOMM, 1998).

O tráfego contínuo, com cargas solicitantes por eixo e projeções de crescimento cada vez maiores sobre as rodovias, exige que os pavimentos sejam mais resistentes, confortáveis e seguros. Por estas razões, as vantagens técnicas e econômicas que as misturas asfálticas oferecem, em função dos materiais utilizados em suas formulações, são aspectos decisivos no âmbito da concepção e construção dos pavimentos (TSUBOTA et al., 2018; BARRA, 2009).

No Brasil, o projeto das estruturas dos pavimentos não prevê que a contribuição da água proveniente das precipitações pluviométricas seja absorvida pelas camadas superficiais de rolamento, ao contrário de países como a França e o Japão, por exemplo. Neste contexto, os revestimentos asfálticos drenantes delgados, bem como soluções ultra delgadas, com previsão de intervalos nas composições granulométricas, são utilizados para proporcionar melhoria das características funcionais, cabendo às camadas estruturais subjacentes prover a resistência às cargas solicitantes aplicadas pelo tráfego (HU et al., 2019; TAKAHASHI, 2013; REIS, 2012; MEURER FILHO, 2001; HUET et al., 1990).

Têm-se como características funcionais a propiciação do conforto e da segurança ao usuário, a partir da garantia de boa condição de rugosidade superficial; do escoamento da água precipitada sobre a estrutura do pavimento em tempo hábil, superficialmente ou por percolação, evitando fenômenos como hidroplanagem, viscoplanagem e o efeito *spray* (ZAKERZADEH et al., 2019; HEYSTRAETEN e MOREAUX, 1990).

Estes fatores contribuem para a ocorrência de menores índices de acidentes, a partir da obtenção de adequada aderência na interface de contato pneu-pavimento e visibilidade, e; de resistência ao acúmulo progressivo de deformações irreversíveis, mais conhecidas como deformação permanente. Auxiliam ainda, em campo, as camadas asfálticas estruturais subjacentes no que diz respeito à proteção dos agentes intempéricos, sobretudo a radiação solar (FAGUNDES, 2020; ALECRIM et al., 2019; IWAMA et al., 2010).

Neste contexto, o presente trabalho propõe a formulação e avalia misturas asfálticas drenantes do tipo BBDr, do francês *Béton Bitumineux Drainant*, a partir do uso de ligante betuminoso altamente modificado *Highly Modified Asphalt* (HiMA), a fim de verificar as suas contribuições às características funcionais, em comparação às formulações BBDr estudadas previamente por Fagundes (2020), produzidas com ligante betuminoso Poliflex 60/85 E.

1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos estabelecidos para esta pesquisa são:

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar, em âmbito laboratorial, o comportamento funcional de misturas asfálticas drenantes (BBDr), com a utilização de ligante betuminoso altamente modificado HiMA, a partir dos princípios conceptivos da metodologia francesa de formulação.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, os objetivos específicos traçados são os seguintes:

- Estudar o comportamento reológico das doravante denominadas matrizes betuminosas HiMA e Poliflex 60/85 E, a partir de reometria por cisalhamento dinâmico (DSR), a fim de verificar o impacto das modificações geradas pelas variações do polímero SBS utilizados nas componentes elástica e viscosa na base comum 50/70 (0,1mm) em estado puro, além dos seus respectivos efeitos no comportamento funcional das misturas asfálticas;
- Verificar a habilidade de compactação das misturas asfálticas com a utilização da Prensa de Compactação por Cisalhamento Giratório (PCG), a partir da análise da curva de evolução do teor de vazios das formulações;
- Avaliar a resistência à ação da água no ensaio de Duriez a 18°C;
- Determinar a resistência ao afundamento na trilha de roda a partir do ensaio de deformação permanente a 60°C, sem a presença da água. Complementarmente, e apenas para as formulações dosadas com a matriz betuminosa HiMA, executar o ensaio Hamburgo, também a 60°C, porém, sob a ação contínua e direta da água;
- Medir a capacidade de escoamento das águas, a partir dos ensaios de permeabilidade, tanto em regime de fluxo vertical quanto horizontal;
- Analisar, considerando cada propriedade mencionada nos itens anteriores, qual o impacto da utilização da matriz betuminosa HiMA no comportamento funcional das misturas asfálticas BBDr, em comparação aos resultados obtidos por Fagundes (2020) com a matriz Poliflex 60/85 E;
- Definir, em função dos níveis de avaliação da metodologia francesa de formulação, bem como dos critérios funcionais adotados, qual o teor de ligante betuminoso mais adequado para compor a dosagem das misturas asfálticas BBDr concebidas nesta pesquisa.

1.3 PROCEDIMENTOS PARA ALCANÇAR OS OBJETIVOS

Para que fosse possível estabelecer uma referência comparativa direta com a pesquisa de Fagundes (2020), as misturas asfálticas BBD_r formuladas nesta pesquisa adotaram a mesma curva granulométrica, com partículas granulares provenientes de mesma jazida e lote de amostragem, bem como as matrizes betuminosas oriundas de igual central de beneficiamento, comportando os mesmos teores percentuais nas dosagens, distintos apenas na estrutura molecular do polímero SBS, com o objetivo de tornar esta a única variável distinta entre as formulações analisadas.

Os materiais foram fornecidos por empresas parceiras do Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), localizado no Campus de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), sendo os granulares oriundos de rocha gnáissica disponibilizados pela Rudnick Minérios Ltda., de Joinville/SC, enquanto o ligante betuminoso pela CBB Asfaltos, localizada na cidade de Curitiba/PR. A cal hidratada CH-1 calcítica, utilizada como filer na composição granulométrica das formulações, foi fornecida pela empresa Cal Cem Indústria de Minérios Ltda., localizada na cidade de Colombo/PR.

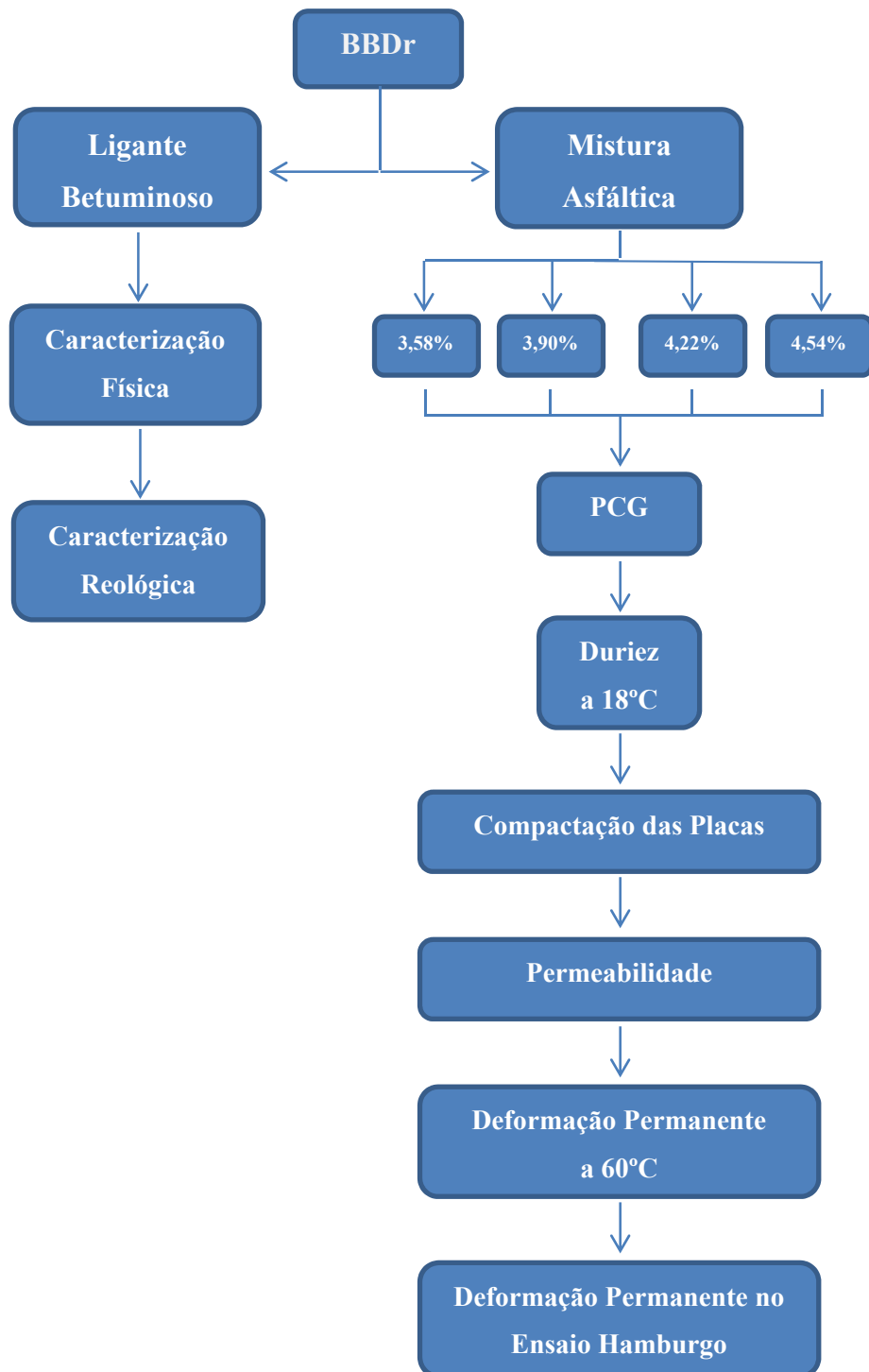
A caracterização física e mineralógica destes insumos foi obtida com base em normas vigentes, por procedimentos laboratoriais diretos ou referências que estudaram amostras de igual procedência.

As matrizes betuminosas HiMA e Poliflex 60/85 E, esta última utilizada na pesquisa referência de Fagundes (2020), foram constituídas a partir da modificação do ligante betuminoso 50/70 (0,1mm), tomado como insumo de base, fornecido pela refinaria REPAR da Petrobrás, em Araucária/PR. Este processo foi executado na planta industrial da empresa CBB Asfaltos, com 7,5% e 4,0% de SBS, respectivamente, fornecidos pela empresa americana Kraton Performance Polymers Incorporated.

Contudo, cabe reiterar que as cadeias poliméricas dos SBS utilizados são distintas quanto à estrutura molecular, recebendo as denominações de fábrica D0243 (HiMA) e 1101 AT (Poliflex 60/85 E). Para tanto, foi procedida a verificação da influência destas variações no comportamento viscoelástico linear das matrizes betuminosas, a partir da determinação das propriedades reológicas por reometria de cisalhamento dinâmico (DSR).

Os teores de ligante betuminoso aplicados nas formulações foram os seguintes: 3,58%, 3,90%, 4,22% e 4,54%. A sequência esquemática de ensaios executados para o cumprimento dos objetivos da pesquisa é ilustrada no fluxograma apresentado na Figura 1.1.

Figura 1.1 - Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Autor.

Observando o fluxograma da Figura 1.1, cabem alguns esclarecimentos sobre a campanha experimental prevista. A etapa de compactação de placas não se trata de um ensaio laboratorial para determinação de propriedades a serem avaliadas das misturas asfálticas, mas de procedimento executivo destinado à produção das placas que serão utilizadas nos ensaios posteriores à sequência indicada.

Neste contexto, será adotada uma diretriz específica de compactação de misturas asfálticas drenantes, indicada e praticada atualmente pela *Université Gustave Eiffel* (UGE), de Nantes, França, antigo *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux* (IFSTTAR, 2019), mas ainda não prevista nas normativas oficiais francesas. Maiores explanações a respeito serão discorridas no transcurso desta pesquisa, notadamente na seção materiais e métodos.

O ensaio de deformação permanente a 60°C não é previsto para misturas asfálticas do tipo BBDr nos níveis de avaliação da metodologia francesa. Esta premissa é fundamentada na consideração de que se forem respeitadas as condições de composição granulométrica conforme as especificações normativas francesas, bem como os teores de ligantes apropriados que garantam habilidade de compactação dentro dos limites previstos no ensaio de PCG, com resistência adequada à ação da água no ensaio de Duriez a 18°C, e atendimento da taxa mínima de permeabilidade correspondente à classe de formulação, a mistura terá perfeita condição para cumprir os seus propósitos funcionais em campo (MANUEL LPC, 2007).

Ainda, nos casos em que ocorrer alguma deformação ou colmatação expressiva no material com o tempo, o que deve ser monitorado continuamente pelos órgãos de controle rodoviário, o revestimento do tipo BBDr deve ser substituído por perda das suas características funcionais.

Entretanto, como mencionado anteriormente, a curva granulométrica francesa de referência sofreu adaptações nesta pesquisa para as condições brasileiras, quanto à seleção das aberturas de peneiras disponíveis. Logo, tem-se que esta variação conceitual, em consonância à utilização da tecnologia HiMA de forma recente no Brasil, gera incerteza quanto à real resistência das misturas asfálticas propostas ao afundamento na trilha de roda em situações críticas de solicitação em campo.

Por esta razão, optou-se pela realização do ensaio de deformação permanente a 60°C para as formulações propostas nesta pesquisa, adotando os limites normativos previstos para misturas ultra-delgadas do tipo *Béton Bitumineux Très Mince* B classe 2 (BBTM) (AFNOR NF EN 13108-2, 2006), que possuem características de composição granulométrica semelhantes às

BBDr.

No caso do ensaio Hamburgo, apesar de não fazer parte dos níveis de avaliação previstos na metodologia francesa para formulação de misturas asfálticas, que é a base técnico-científica desta pesquisa, foi executado de forma complementar para avaliação da resistência à deformação permanente, devido à ação direta da água durante os testes, excepcionalmente a 60°C para esta pesquisa, em relação aos 50°C usuais (AASHTO T-324, 2019).

O objetivo foi estabelecer uma comparação com os resultados dos ensaios de deformação permanente da metodologia francesa, realizados também a 60°C, porém considerando o condicionamento térmico do ar, bem como avaliar a ação deletéria da água sobre este parâmetro funcional das misturas asfálticas. É importante ressaltar que este procedimento foi executado apenas para as formulações propostas nesta pesquisa, ou seja, dosadas com a matriz betuminosa HiMA.

1.4 DELIMITAÇÕES DO ESPAÇO DA PESQUISA

A campanha experimental desta pesquisa foi restrita ao âmbito laboratorial, não tendo sido objeto de estudo qualquer procedimento realizado em campo ou similar.

Foram utilizadas as instalações do Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), no Campus de Joinville, do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação (LTP) da Universidade de São Paulo (USP), e das empresas CBB Asfaltos e E-Vias, ambas na cidade de Curitiba/PR.

No LDTPav/UFSC foram realizados os procedimentos de peneiramento e separação de amostras, bem como a determinação das massas volumétricas reais (MVR) e da resistência à ação da água no ensaio de Duriez a 18°C. No LTP/USP foram executados os testes de compactação de placas, habilidade de compactação com a PCG, permeabilidade e resistência à deformação permanente a 60°C, sem a presença da água. Na empresa CBB Asfaltos foram procedidas as análises das características físicas e reológicas com as matrizes betuminosas HiMA e Poliflex 60/85 E, enquanto na empresa E-Vias foram realizados os ensaios de deformação permanente Hamburgo.

Ressalta-se que todas as análises realizadas são válidas apenas para as condições estabelecidas nesta pesquisa.

1.5 RELEVÂNCIA DO TEMA: JUSTIFICATIVA

Tomando como referência a pesquisa realizada por Fagundes (2020), na qual desenvolveu formulações de misturas asfálticas do tipo BBDr, com o uso da matriz betuminosa Poliflex 60/85 E, a partir da adaptação para o contexto nacional de uma aplicação realizada em obra pública na cidade de Lille, no norte da França; vislumbrou-se a possibilidade de aprofundar o entendimento e a melhoria do comportamento funcional destes materiais, substituindo a matriz betuminosa supracitada por uma altamente modificada do tipo HiMA.

Os critérios conceptivos da metodologia de formulação francesa foram escolhidos não apenas pela manutenção da base técnico-científica da pesquisa de referência mencionada, o que permite análises comparativas diretas, mas pela reconhecida, estreita e comprovada relação campo/laboratório (MANUEL LPC, 2007), garantindo credibilidade aos resultados obtidos.

Além disso, a metodologia francesa é considerada referência no estudo de misturas asfálticas drenantes no mundo, em que segundo o *Observatoire des Techniques de Chaussées* (1997), os primeiros revestimentos com esta função foram desenvolvidos na França em 1984. A partir de 1991 foram denominados de *Béton Bitumineux Drainant* (BBDr).

Para citar como exemplo a região Sul do Brasil, o índice pluviométrico anual atinge níveis em torno de 1.200 mm a 2.000 mm, sendo que na região litorânea algumas localidades podem alcançar valores que ultrapassam o limite máximo mencionado, com destaque para a região Norte do Estado de Santa Catarina, em que apenas Joinville no ano de 2019 acumulou 2.113 mm (INMET, 2020), considerada uma marca expressiva pela meteorologia.

Some-se a esta condição, o fato de que justamente na estação mais quente do ano, o verão, é o período com maior incidência e intensidade de precipitações pluviométricas na região mencionada (CLIMATEMPO, 2020), coincidindo com o deslocamento massivo de usuários às praias do litoral, bem como a outros Estados e cidades em geral, a fim de aproveitar as férias ou feriados prolongados como as festas de fim de ano e o carnaval, por exemplo, aumentando fortemente o uso da malha viária, o que potencializa o risco da ocorrência de acidentes no trânsito.

Como o nível de aderência pneu-pavimento do ponto de vista do usuário não é possível perceber enquanto dirige, quando se percebe esta ausência muitas vezes é tarde para que se evite o acidente. Por esta razão, se torna difícil a determinação estatística e precisa das ocorrências motivadas por esta causa.

Dos dados oficiais que se têm registro em rodovias federais no Brasil, a publicação mais recente do Anuário Estatístico de Segurança Rodoviária pelo Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil (MINFRA, 2018), aponta a falta de aderência como a causa principal de 4,7% dos acidentes e de 2,5% de óbitos, números considerados elevados, se considerarmos que a série histórica nacional compreendendo o período de 2010 a 2017 apresenta totais anuais acima de 50.000 ocorrências com vítimas, e se somados aos acidentes somente com ileso ultrapassam a barreira de 85.000, atingindo picos com mais de 190.000.

Neste contexto, a chance de um acidente de trânsito ocorrer em um dia de chuva é duas vezes maior do que em dias secos (PAULA e DUARTE, 1996). No entanto, para Guimarães (2012), mesmo nas situações em que o pavimento se encontra molhado, deve proporcionar condições de aderência na área de contato com os pneumáticos que garantam segurança ao usuário nas ações de aceleração, frenagem e realização de trajetórias curvilíneas durante todo o percurso que o veículo permanecer em deslocamento.

Para se ter uma ideia dos impactos gerados com a implantação de soluções adequadas à segurança dos usuários nas rodovias, um estudo realizado por Momm et al. (1997) sobre a ocorrência e os custos dos acidentes na Via Anchieta/SP, indicou que a economia obtida com a redução de apenas 21% dos acidentes, no segmento estudado, seria suficiente para pagar os custos de uma reabilitação do pavimento, melhorando a qualidade de sua superfície.

A proposição do uso da tecnologia de matriz betuminosa HiMA vem ao encontro da necessidade de se garantir maior qualidade das características funcionais, e conseqüentemente, maior tempo de vida útil às camadas asfálticas drenantes em condições práticas de aplicação. Neste âmbito, cabe esclarecer que estudos aplicados à aderência pneu-pavimento e ao fenômeno da colmatação não são abordados nesta pesquisa, pois dependem de campanhas experimentais de longo curso em campo, estando fora do domínio proposto para esta pesquisa.

Em relação à matriz betuminosa Poliflex 60/85 E utilizada nas formulações de referência estudadas por Fagundes (2020), intenta-se que a matriz HiMA, devido à elevada concentração polimérica presente em sua constituição, diminua ainda mais a suscetibilidade térmica e cinética das misturas asfálticas drenantes, garantindo ao mesmo tempo uma habilidade de compactação geradora de teores de vazios capazes de formar canais comunicantes, propiciando taxas de permeabilidade compatíveis com as características funcionais desejadas.

A busca pelo atendimento das características descritas anteriormente visa à eficiência drenante por percolação intersticial da água, resistência à ação deletéria da água, bem como à deformação permanente. Portanto, esta pesquisa assume a função de prosseguir no aprimoramento de soluções, sobretudo, quanto à perspectiva da segurança, mas também do conforto e economia de custos com manutenção para as camadas funcionais de rolamento dos pavimentos brasileiros, a partir da proposição de formulações de misturas asfálticas drenantes do tipo BBDr, com o uso da matriz betuminosa altamente modificada HiMA.

Espera-se com a disseminação destas técnicas, tecnologias e processos de formulação abordados, o despertar das iniciativas pública e privada relacionadas à área da pavimentação, para a importância de fomentos contínuos na propiciação de melhores condições à infraestrutura rodoviária do país e preservação de vidas no trânsito, como plataforma de política e desenvolvimento nacional prioritária.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado a partir das seguintes subdivisões do conteúdo:

Capítulo 1: Introdução ao tema da pesquisa, remetendo o leitor aos aspectos gerais que nortearão a sua realização.

Capítulo 2: Trata das características dos ligantes betuminosos convencionais e modificados por polímeros, com destaque para a matriz altamente modificada HiMA, com foco nas propriedades físicas, constituição da cadeia polimérica, comportamento reológico e no desempenho de misturas asfálticas.

Capítulo 3: Aborda conceitos, aspectos de concepção e aplicação de misturas asfálticas drenantes do tipo BBDr.

Capítulo 4: Discorre sobre a ação da água nas misturas asfálticas, apresentando suas principais características e os parâmetros influentes.

Capítulo 5: Trata dos materiais e métodos utilizados para a realização da pesquisa, apresentando os princípios técnicos dos ensaios executados.

Capítulo 6: Apresenta os resultados obtidos e discussões técnicas com base na campanha experimental realizada.

Capítulo 7: Discorre sobre as conclusões acerca da pesquisa e aponta recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

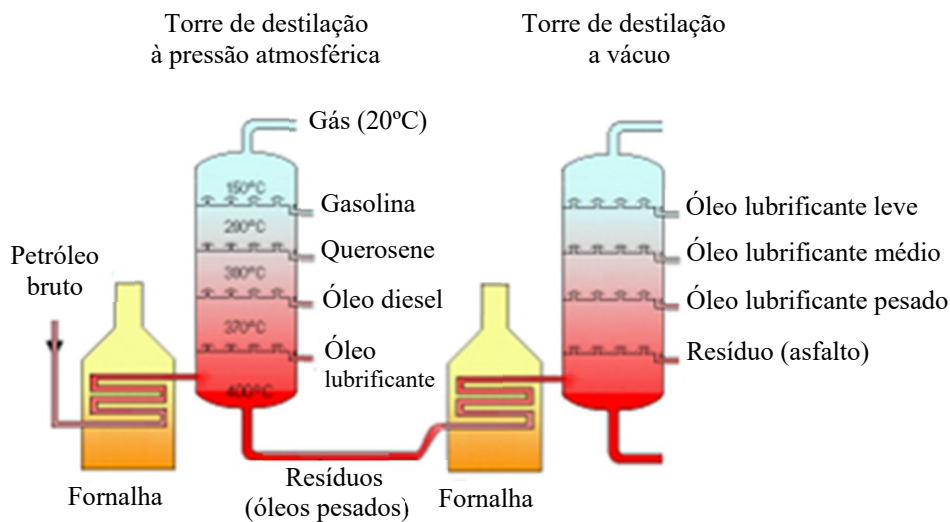
LIGANTES BETUMINOSOS

2.1 LIGANTES BETUMINOSOS CONVENCIONAIS

Além da etapa de exploração, a atividade de refino é considerada uma das mais importantes da indústria do petróleo, pois é somente a partir dela que há acesso aos mercados consumidores, devido possibilitar a transformação do petróleo bruto em derivados padronizados amplamente utilizados em diversos setores da economia, principalmente no setor de transportes (NASCIMENTO, 2008).

A Figura 2.1 apresenta de forma simplificada os produtos obtidos em cada estágio do processo de destilação fracionada, à pressão atmosférica e na destilação à vácuo, considerada a primeira etapa de refino.

Figura 2.1 - Desenho esquemático de obtenção das frações do petróleo por destilação fracionada.



Fonte: Adaptado de Celart Dois (2015).

Os resíduos de vácuo, também denominados asfaltos, cimentos asfálticos de petróleo (CAP) ou ainda ligantes betuminosos, são produtos que necessitam de aquecimento após refino por destilação fracionada. Entretanto, os procedimentos de manuseio e estocagem devem ser realizados à temperatura adequada e a mais baixa possível, a fim de evitar o envelhecimento

precoce. Neste contexto, tem-se buscado diminuir este efeito com a adição de produtos e novas tecnologias executivas, podendo ser citados os aditivos surfactantes na produção de misturas asfálticas mornas, antioxidantes e agentes modificadores que propiciem maior trabalhabilidade em temperaturas inferiores às usualmente praticadas (CAVALCANTI, 2010). A Tabela 2.1 apresenta as especificações brasileiras para os CAP.

Tabela 2.1 - Especificações para os cimentos asfálticos de petróleo (CAP) classificados por penetração.

Características	Unidade	Limites				Métodos (<i>apud</i> ANP, 2005)		
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 40	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D5	ME 003/1999
Ponto de amolcimento (mín.)	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D36	-
Viscosidade Saybolt Furol								
135°C (mín)	Ssf	92	141	110	80	NBR 14950	E102	ME 004/1994
150°C (mín)		90	50	43	36			
177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60			
Viscosidade Brookfield, Spindle 21								
135°C 20 rpm (mín)	cP	374	274	214	155	NBR 15184	D4402	-
150°C 50 rpm (mín)		203	112	97	81			
177°C 100 rpm		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114			
Índice de Susceptibilidade térmica (IP)	-	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	-	-	-
Ponto de Fulgor (mín)	°C	235	235	235	235	NBR 1134	D92	ME 148/994
Solubilidade em tricloroetileno (mín)	% em massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D2042	ME 153/1994
Ductibilidade a 25°C (min)	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D113	ME 163/1998
Efeito do calor e do ar (RTFOT), a 163°C e 85 minutos								
Varição em massa (mín)	% em massa	0,5				-	D 2872	-
Ductibilidade a 25°C (min)	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D113	ME 163/1998
Aumento do ponto de amolecimento (máx)	°C	8				NBR 6560	D36	-
Penetração retida, (mín)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D5	ME 003/1999

Fonte: Adaptado de ANP (2005).

2.1.1 Composição química do ligante betuminoso

O ligante betuminoso é considerado um material complexo, tanto pela composição química quanto pelas propriedades reológicas. Apresenta um comportamento viscoelástico linear, no domínio das microdeformações, caracterizado pela alteração de propriedades como viscosidade, rigidez e consistência, em função da variação da temperatura e da frequência de sollicitação (THODESEN et al., 2009).

Quimicamente, tem-se que o ligante betuminoso é um composto hidrocarboneto, logo, formado predominantemente pelos elementos químicos Carbono (C) e Hidrogênio (H), sobretudo o primeiro, em que Nitrogênio (N), Enxofre (S), Oxigênio (O), Vanádio (Vn) e Níquel (Ni) complementam em menor escala a sua constituição (LEITE e MENEZES, 2003; Tabela 2.2).

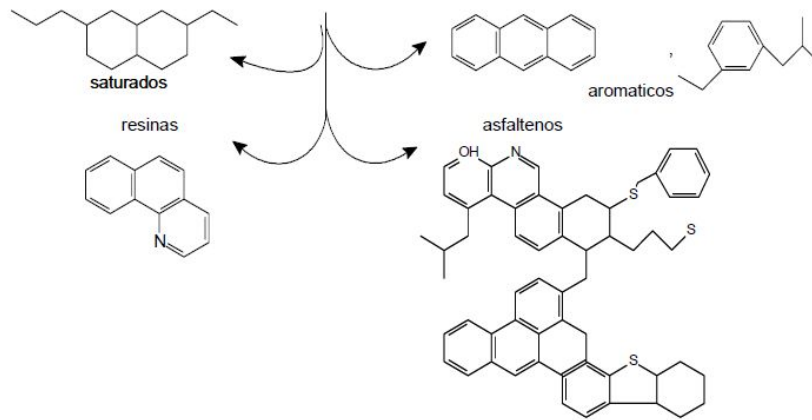
Tabela 2.2 - Composição química dos ligantes betuminosos convencionais.

Origem	Mexicano	Boscan Venezuela	Califórnia Estados Unidos	Cabiúnas Brasil	Cabiúnas Brasil	Árabe Leve Oriente Médio
Refinaria	-	RLAM Bahia	-	REGAP Minas Gerais	REPLAN São Paulo	REDUC Rio de Janeiro
Carbono (%)	83,8	82,9	86,8	86,5	85,4	83,9
Hidrogênio (%)	9,9	10,4	10,9	11,5	10,9	9,8
Nitrogênio (%)	0,3	0,8	1,1	0,9	0,9	0,5
Enxofre (%)	5,2	5,4	1,0	0,9	2,1	4,4
Oxigênio (%)	0,8	0,3	0,2	0,2	0,7	1,4
Vanádio (ppm)	180	1380	4	38	210	78
Níquel (ppm)	22	109	6	32	66	24

Fonte: Adaptado de Leite e Menezes (2003).

Além disso, caracteriza-se por um sistema coloidal com fortes interações moleculares, compreendendo micelas de asfaltenos dispersas em um meio intermicelar oleaginoso, formado pela mistura de óleos aromáticos e saturados que originam a fração maltênica (GOLUBEV et al., 2008). A Figura 2.2 ilustra a disposição das quatro principais estruturas químicas que compõem o ligante betuminoso.

Figura 2.2 - Estruturas representativas das quatro estruturas que formam os ligantes betuminosos: saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos.



Fonte: Masson et al. (2000).

Nos Estados Unidos, a técnica mais utilizada para fracionamento estrutural do ligante betuminoso consiste na precipitação dos glóbulos asfáltênicos, em relação às frações leves dos compostos saturados, nafteno-aromáticos e polar-aromáticos, com uso do reagente n-heptano. Os asfaltenos são separados por primeiro, devido não serem solúveis ao contato com o n-heptano. As demais frações maltênicas, solúveis em n-heptano, são separadas por cromatografia de adsorção (READ e WHITEOAK, 2003).

Na Europa existe método similar, denominado SARA, sendo realizada a separação dos compostos saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos, a partir de cromatografia fina, denominado método IATROSCAN, com detecção por ionização de chama. A precipitação dos glóbulos asfáltênicos se dá com a adição de n-heptano, enquanto dos constituintes maltênicos ocorre em colunas capilares preenchidas com sílica ou alumina (Figura 2.3), como meio de adsorção, e posterior eluição com solventes de diferentes polaridades (LEITE, 1999).

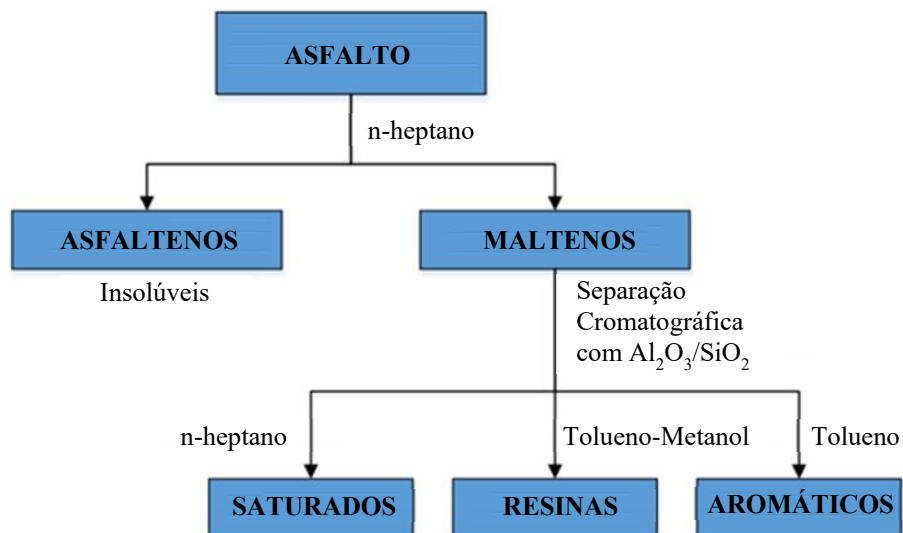
Figura 2.3 - Cromatógrafo IATROSCAN e respectivas colunas capilares.



Fonte: NTS IATROSCAN® (2021)

A metodologia de fracionamento citada foi desenvolvida pelo químico Corbett (1969) e pode ser esquematizada conforme a Figura 2.4.

Figura 2.4 - Fluxograma da metodologia de fracionamento proposta pelo químico Corbett.



Fonte: Autor.

As frações SARA que compõem a estrutura molecular do ligante betuminoso têm significativas influências em suas propriedades, destacando-se as seguintes (LEITE, 1999; WHITEOAK, 1991):

- Saturados: são óleos viscosos não-polares transparentes. Exercem influência à suscetibilidade térmica, pois quanto maior a concentração, contribuem para a diminuição da consistência do ligante. Representam cerca de 5% a 20% da composição;
- Aromáticos: são líquidos viscosos polares amarelados e constituem cadeias não saturadas de Carbono. Possuem dois subgrupos principais: os nafteno-aromáticos, e os polar-aromáticos, e contribuem mais diretamente à elasticidade e à viscosidade dos ligantes betuminosos, respectivamente. Representam a maior proporção da composição, compreendendo cerca de 40% a 65%;
- Resinas: são constituídas por Hidrogênio e Carbono, com pequena proporção de Oxigênio, Enxofre e Nitrogênio. Contribuem para a melhoria da ductilidade e dispersão dos glóbulos asfáltênicos;
- Asfaltenos: são partículas sólidas amorfas que apresentam cor preta ou marrom. Formam aglomerados de compostos polares e polarizáveis, constituídos por associações intermoleculares de hidrocarbonetos naftênicos condensados e em cadeias saturadas curtas, não solúveis no n-heptano. Quanto maior a concentração no ligante betuminoso, maior será a rigidez e viscosidade. Contribuem para a diminuição da suscetibilidade térmica e aumento da viscosidade. Representam cerca de 5% a 25% da composição.

Neste contexto, Petersen et al. (1993) avaliam que quando há maior proporção de compostos ácidos e básicos, denominados anfóteros, com baixa reatividade na composição do ligante betuminoso, há aparente deficiência em sua polaridade. Logo, grandes quantidades relativas de ácidos e bases pouco reativas ou fracas é uma característica de ligantes mais compatíveis. Conseqüentemente, a energia de ativação do fluxo viscoso se correlaciona positivamente com o valor da proporção de ácidos e bases fracas, em relação ao cenário contrário.

Okorokov et al. (1980) corroboram esta constatação, quando afirmam que ácidos e bases fortes são eletrólitos que em solução aquosa se dissociam completamente, enquanto em

condições fracas a constante de dissociação é baixa, predominando, em solução, na forma molecular.

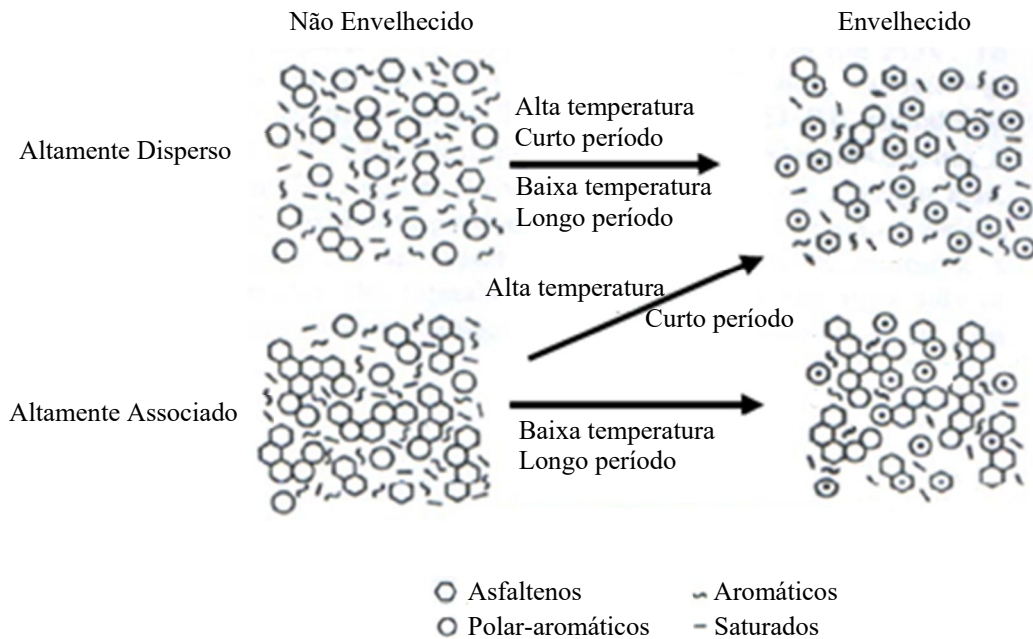
Compostos ácidos e básicos quando pouco reativos, podem constituir, em grande parte, o que se costuma denominar como resinas, as quais conferem solubilidade ao ligante betuminoso em meio solvente à metade das frações asfáltênicas. Portanto, quanto mais resinas estiverem presentes em sua composição, mais compatível a matriz tende a ser (LIU et al., 2019).

No que diz respeito à viscosidade, tem-se que é determinada pela polaridade dos compostos presentes no ligante betuminoso, possuindo relação muito próxima com o peso molecular. As substâncias de caráter anfótero, associadas fortemente aos compostos com elevada polaridade, notadamente as frações polar-aromáticas, são responsáveis pelo ganho de viscosidade, pois embora variem de 19% a 27% da massa total do ligante betuminoso, contribuem com cerca de 60% a 75% dos níveis de polaridade (STORM et al., 1990).

A partir deste entendimento, tem-se que com o aumento da temperatura, as reações químicas são aceleradas e os efeitos da polaridade sobre a viscosidade se tornam mais significativos, indicando que a polaridade determina a suscetibilidade térmica para um dado estado viscoso.

Este cenário fica evidente quando são observadas as mudanças estruturais dos ligantes betuminosos quando submetidas a processos termo-oxidativos, como por exemplo durante a usinagem e ações intempéricas ao longo do tempo (Figura 2.5).

Figura 2.5 - Modelo simplificado de envelhecimento por processo termo-oxidativo do ligante betuminoso.



Fonte: Adaptado de Petersen et al. (1993).

A partir da Figura 2.5, verifica-se que tanto em matrizes dispersas quanto associadas, após a ocorrência de processos termo-oxidativos em curto e longo prazo, com baixa e elevada temperatura, há expressivo envelhecimento de glóbulos asfálticos, bem como de compostos polar-aromáticos, situação indicada pelos pontos pretos ilustrados. Ainda, constata-se uma presença menor de compostos aromáticos e saturados.

Estas condições ocorrem devido à presença de Oxigênio à elevada temperatura contribuir para o contato mais direto dos glóbulos asfálticos com o ar, em razão da volatilização de boa parte das frações leves aromáticas e saturadas. Assim, como estas últimas constituem as mais atuantes nas propriedades elásticas, dúcteis e solubilizantes dos ligantes betuminosos, tem-se que a maior ausência destas torna a matriz betuminosa mais concentrada em compostos asfálticos e polar-aromáticos, propiciando maior rigidez e viscosidade ao material.

Porém, este aumento de rigidez após o processo de envelhecimento do ligante betuminoso ocorre no sentido negativo de tornar a matriz mais frágil aos esforços solicitantes, fato comprovado por Barra et al. (2012) quando avaliaram o comportamento de misturas asfálticas densas no módulo complexo e na fadiga sob diversos ciclos de condicionamento térmico, inclusive sob a ação da água.

Logo, é possível depreender que melhores serão as matrizes de ligante betuminoso aptas aos processos de modificação, à medida que contenham substâncias anfóteras com elevada proporção de compostos ácidos e básicos pouco reativos, e participação polar-aromática não muito elevada. Assim, menor será a viscosidade, e maiores serão a trabalhabilidade e a compatibilidade do material aos agentes modificadores, como os polímeros, por exemplo.

2.2 LIGANTES BETUMINOSOS MODIFICADOS POR POLÍMEROS

O uso de modificadores, como polímeros elastoméricos originados de matrizes sintéticas do tipo Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) e Estireno-Butadieno-Borracha (SBR), além da borracha de pneu inservível, melhora significativamente o desempenho reológico e mecânico das misturas asfálticas, aumentando a participação da componente elástica, e conseqüentemente, o módulo de rigidez dos ligantes betuminosos. Das matrizes citadas, a que vem sendo mais utilizada no mundo é o polímero SBS (XIAO et al., 2021; KUENNEN, 2012).

A classificação dos ligantes betuminosos modificados por polímeros elastoméricos se dá de maneira distinta daqueles em forma pura, também denominados convencionais, pois levam em consideração o ponto de amolecimento e a recuperação elástica a 25°C, ao invés da penetração. No Brasil, existem três classificações de ligantes modificados por polímeros elastoméricos aprovadas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2010), a saber: 55/75-E, 60/85-E e 65/90-E. O primeiro algarismo da classe corresponde ao ponto de amolecimento mínimo (°C) e o segundo à recuperação elástica mínima (%).

A Tabela 2.3 apresenta as especificações determinadas pela agência reguladora brasileira.

Tabela 2.3 - Especificações dos ligantes betuminosos modificados por polímeros elastoméricos.

Características	Unidades	Limites			Métodos
		55/75 - E	60/85 - E	65/90 - E	
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	45-70			NBR 6576
Ponto de amolecimento (mín)	°C	55	60	65	NBR 6560
Viscosidade Brookfield, Spindle 21					
135°C, 20rpm, (máx)		3000	3000	3000	
150°C, 50rpm, (máx)	cP	2000	2000	2000	NBR 15184
177°C, 100rpm (máx)		1000	1000	1000	
Ensaio Separação de fase (máx)	°C	5	5	5	NBR 15166
Recuperação Elástica à 25°C, 20cm, (mín)	°C	75	85	90	NBR 15086
Efeito do calor e do ar (RTFOT), a 163°C e 85 minutos					
Varição em massa (máx)	% massa	1	1	1	ASTM D2872
Varição do ponto de amolecimento (máx)	°C	(-5) a (+7)	(-5) a (+7)	(-5) a (+7)	NBR 6560
Penetração retida, (mín)	%	60	60	60	NBR 6576
Recuperação Elástica retida, (mín)	%	80	80	80	NBR 15086

Fonte: Adaptada de ANP (2010).

Os ligantes modificados são utilizados em diversos tipos de formulação de misturas asfálticas, tanto densas quanto com características granulométricas mais abertas, podendo-se destacar as Camadas Porosas de Atrito (CPA), *Stone Mastic Asphalt* (SMA), *Béton Bitumineux Très Mince* (BBTM) e *Béton Bitumineux Drainant* (BBDr), em que esta última é objeto de estudo desta pesquisa.

2.2.1 Polímeros para modificação de ligantes betuminosos

A etimologia da palavra polímero remonta ao idioma grego, em que significa muitas (*poli*) partes (*meros*). Estruturalmente, grandes moléculas formadas por unidades químicas simples são denominadas monômeros ou meros, porém, ao se associarem em cadeias repetitivas recebem o nome de polímeros (MANO e MENDES, 2001).

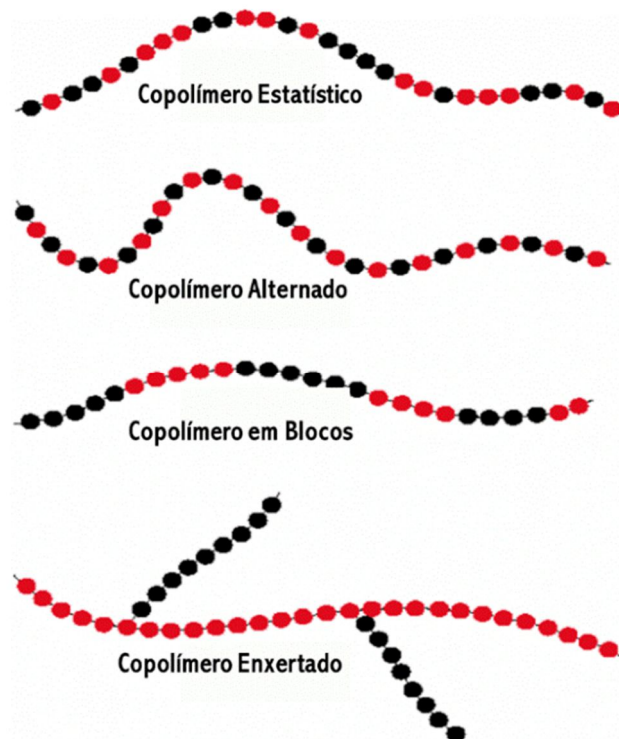
Para se ter ideia da escala de valores, o peso molecular em unidade de massa atômica ‘u’ (igual a 1/12 avos da massa do isótopo carbono-12, ¹²C) dos blocos de poliestireno e butadieno que compõem a cadeia do polímero SBS possuem 104 u e 54 u, respectivamente,

enquanto elementos como a água (H_2O), Hidrogênio (H), Nitrogênio (N), Oxigênio (O) e Carbono (C), por exemplo, possuem pesos moleculares de 18,015324 u, 1,00784 u, 14,0067 u, 15,99943 u e 12,0107 u, nesta ordem (ALGER, 1997).

Os primeiros estudos sobre processos de polimerização foram conduzidos por Whöler (1828), na Alemanha, conhecido como Síntese de Whöler, ao obter uréia a partir da síntese de dois compostos inorgânicos, o Cianeto de Prata ($AgCN_{(s)}$) e o Cloreto de Amônio ($NH_4Cl_{(s)}$) (COHEN e COHEN, 1996).

Os polímeros que apresentam a repetição de apenas um tipo de *mero* são classificados como homopolímeros. Aqueles que contêm mais de um tipo de unidade de repetição na composição de suas macromoléculas são denominados copolímeros. Essa repetição pode ser classificada em algumas categorias, de acordo com a disposição de cada tipo de *mero* na cadeia. Entre as classificações mais usuais podem ser citadas: em bloco, alternado, estatístico ou randômico e, enxertado ou grafitizado. As classificações são dadas de acordo com a disposição de cada *mero* na cadeia do copolímero (AFINKO, 2017) (Figura 2.6).

Figura 2.6 - Estruturas copoliméricas.



Fonte: Adaptado de Afinko (2017)

Segundo Xiaohu e Isacson (2000) e Varma et al. (2002), a adição de polímeros ao ligante betuminoso vem sendo estudada desde o final da década dos anos 60, tendo sido observada uma melhora significativa nas propriedades de resistência à fratura a baixas temperaturas e ao escoamento sob condições de aquecimento elevado.

Taylor e Airey (2008) mostram em seu estudo que a utilização de polímeros sintéticos contribuem para modificar o desempenho de ligantes betuminosos convencionais, como redução da suscetibilidade térmica, aumento da coesão e melhoria das características reológicas, como o módulo de rigidez no plano complexo $|G^*|$ e dos ângulos de fase (δ).

Os polímeros têm sido usados principalmente para melhorar as propriedades dos ligantes betuminosos quando estão submetidos a elevadas temperaturas, propiciando melhor resistência à deformação (ISACSSON e LU, 1995; KING et al., 1993; GOODRICH, 1988). Além disso, a modificação do ligante por polímero contribui para obtenção de melhor resistência à fissuração térmica e por fadiga (MAILLARD, 2005; BROWN et al., 1991).

Os polímeros são normalmente divididos em três grupos: termorrígidos, termoplásticos e elastômeros. Há ainda o grupo dos terpolímeros elastoméricos reativos (RET) (JIANG et al., 2018). Maiores explicações acerca destas categorias serão discutidas nos tópicos seguintes, com enfoque maior aos elastoméricos, devido variações matriciais moleculares do polímero SBS terem sido utilizadas na modificação do ligante betuminoso de base nesta pesquisa.

2.2.1.1 Termorrígidos

São também conhecidos como termofixos ou termoendurecidos. Constituem plásticos, cuja rigidez não se altera com a temperatura, diferentemente dos termoplásticos, que amolecem e se fundem. Quando submetidos a elevadas temperaturas, os polímeros termorrígidos se decompõem e não podem ser fundidos ou remoldados novamente. Poliuretano, poliéster e resinas epóxi, são exemplos desta categoria (KEYF et al., 2007).

2.2.1.2 Termoplásticos

São compostos de longas cadeias lineares ou ramificadas. A principal característica está na sensibilidade ao calor. Neste caso, a alta temperatura influi negativamente na estrutura do material, tornando-o pouco resistente. Em contrapartida, é passível de remoldagens, por isso,

estes plásticos podem ser facilmente reciclados. São exemplos desta categoria o polietileno, polipropileno e cloreto de polivinila (PVC) (SABOO, 2015).

2.2.1.3 Elastômeros

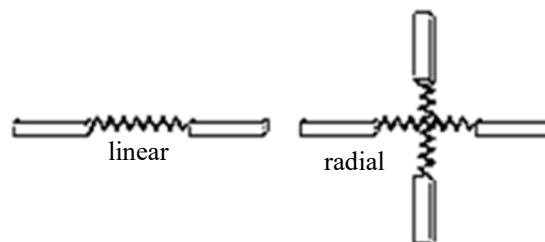
Sua força e elasticidade derivam da interligação de cadeias poliméricas lineares ou ramificadas, formando uma rede tridimensional no ligante betuminoso, fenômeno conhecido como reticulação. Possuem como principal característica a elasticidade, podendo, em condições normais, deformar-se e rapidamente retornar ao seu estado inicial após receberem a ação de cargas solicitantes (GOOSWILLIGEN et al., 1989).

Vários tipos de homopolímeros e copolímeros podem ser usados em suas composições. Os mais comuns pertencem ao grupo dos copolímeros Estireno-Butadieno (SB) e Estireno Acetato de Vinila (EVA). Entretanto, análises efetuadas com microscopia de força atômica (MFA) têm demonstrado que o EVA é muito suscetível à separação de fases, pois adquire entumescimento quando em contato com a fração polar aromática do ligante betuminoso, necessitando de processos de reticulação por óleos extensores para prevenir estas situações (ALENCAR, 2009).

Há ainda os copolímeros de estrutura randômica, como os Estireno-Butadieno-Borracha (SBR), porém, também utilizados em escala bem menor que os oriundos da cadeia SB na indústria de modificação dos ligantes betuminosos.

A estrutura molecular do copolímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS) pode variar de uma cadeia linear para ramificada, também denominada radial (LEITE, 1999) (Figura 2.7).

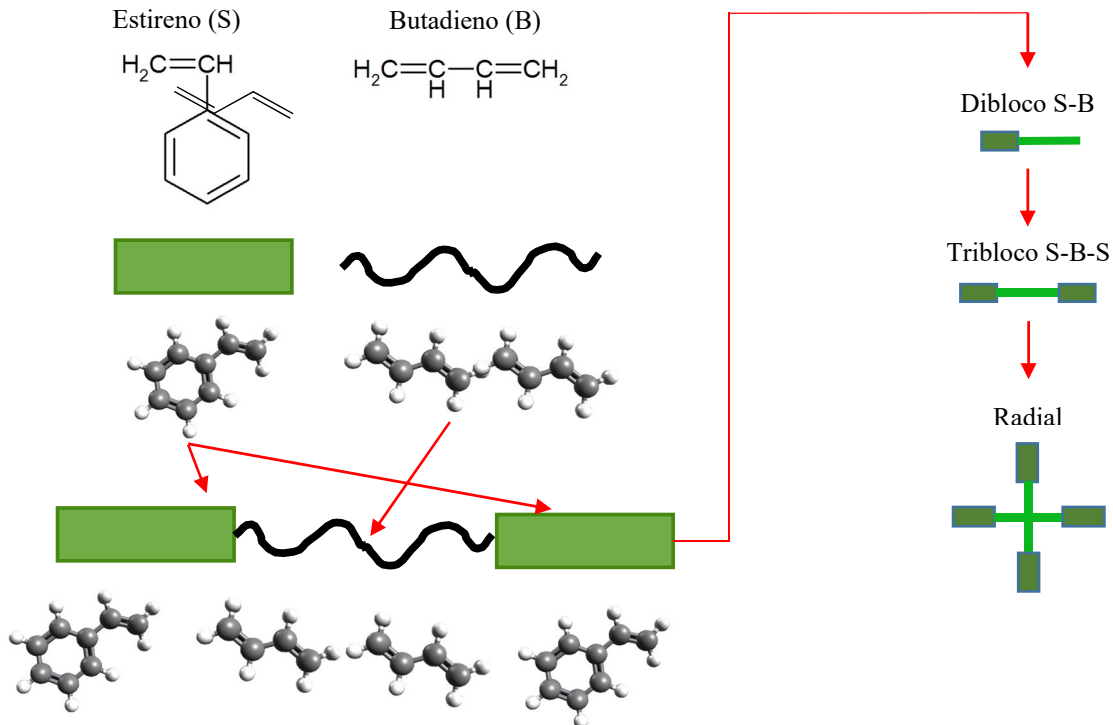
Figura 2.7 - Estruturas moleculares genéricas do copolímero SBS.



Fonte: Leite (1999).

Ainda, a partir da estrutura molecular dos monômeros Estireno e Butadieno podem ser constituídos copolímeros SBS lineares em diblocos (SB) e triblocos (SBS), além dos radiais (MAGALHÃES, 2004) (Figura 2.8).

Figura 2.8 - Estruturas moleculares em blocos lineares e radiais do copolímero SBS.



Fonte: Adaptado de Kraton® (2021).

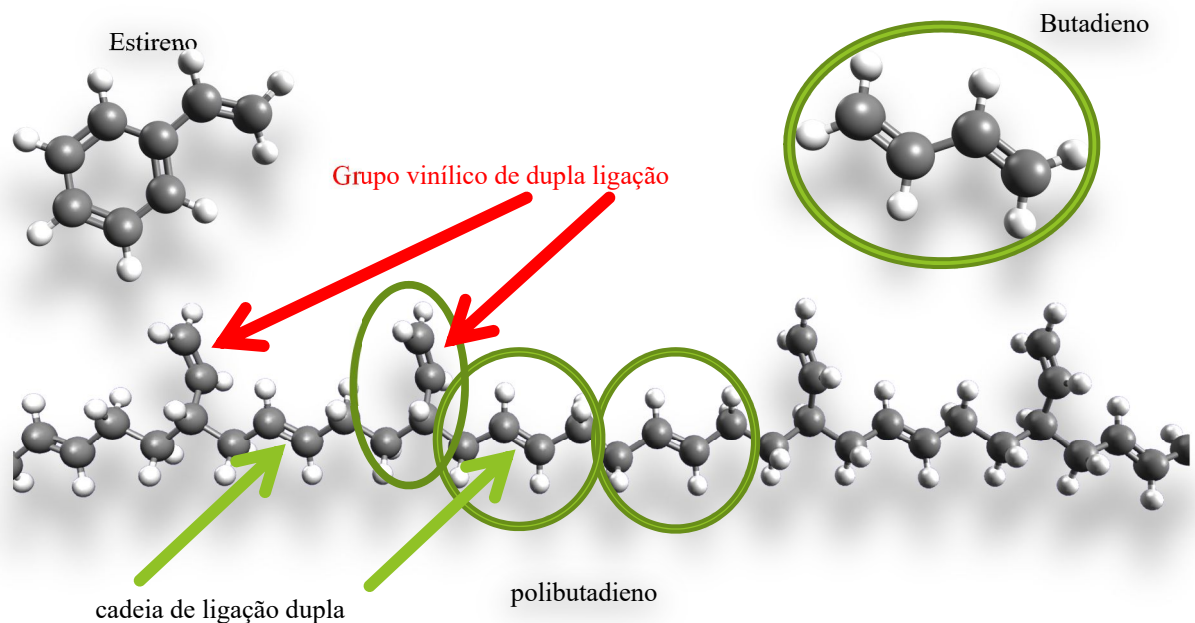
Em geral, os copolímeros lineares SBS possuem viscosidades em temperaturas de fusão mais baixas do que os copolímeros radiais, logo, permitem temperaturas de processamento mais baixas. Entretanto, o benefício dos modificadores poliméricos depende da concentração, morfologia, peso molecular, composição química e estrutura molecular do material. Além disso, a reatividade residual do polímero é importante para melhorar a compatibilidade do modificador com o ligante. Neste contexto, a indústria de polímeros pode fornecer diferentes variações de SBS, conferindo propriedades distintas aos ligantes betuminosos (ZHANG et al., 2014; BULATOVIC et al., 2013; JIANGA e ZHANG, 2010).

No contexto desta pesquisa cabem alguns esclarecimentos, pois os resultados obtidos na campanha experimental confrontarão matrizes betuminosas produzidas a partir do mesmo ligante de base 50/70 (0,1 mm), porém, modificados por distintas variações de estruturas moleculares do copolímero SBS, denominadas 1101 AT e D0243, produzidas e fornecidas pela

empresa Kraton Performance Polymers Incorporated®. A primeira constitui o agente modificador utilizado na matriz Poliflex 60/85 E na pesquisa desenvolvida por Fagundes (2020), enquanto a segunda foi utilizada na produção da matriz HiMA deste trabalho.

As variações 1101 AT e D0243 constituem cadeias poliméricas lineares formadas por diblocos e triblocos, com menor peso molecular se comparadas às estruturas radiais. Todavia, a distribuição estrutural dos blocos é distinta, sendo aproximadamente 16% de diblocos SB e 84% de triblocos SBS para 1101 AT, contando ainda com uma participação praticamente desprezível de moléculas de Vinil em sua composição. Em contrapartida, a D0243 contabiliza cerca de 75% de diblocos SB e 25% de triblocos SBS, além do aporte significativo de moléculas de Vinil acopladas à ponta da cadeia polimérica (KRATON, 2021) (Figura 2.9).

Figura 2.9 - Estruturas moleculares em blocos lineares do copolímero SBS, com o aporte de moléculas de Vinil.



Fonte: Adaptado de Kraton® (2021).

A importância da inserção de moléculas de Vinil na cadeia polimérica da variação D0243 tange ao fato de permitir maior compatibilização com as frações apolares dos ligantes betuminosos, possibilitando a incorporação de maior percentual de diblocos em sua composição. Este procedimento é denominado de inversão de fases poliméricas (SENISE et al., 2017).

Como resultado, tem-se uma matriz mais compatível e que garante boa trabalhabilidade ao ligante betuminoso nas temperaturas de serviço, sobretudo de usinagem, devido à redução da viscosidade pela diminuição percentual de triblocos na estrutura molecular, mesmo contando com maior percentual de polímero na matriz HiMA (7,5%), em comparação à Poliflex 60/85 E (4,0%) modificada pela incorporação da variação 1101 AT.

Quanto à possibilidade de se formular uma matriz betuminosa, como a Poliflex 60/85 E, a partir da incorporação de 7,5% da variação polimérica 1101 AT, tem-se que em razão da predominância de triblocos SBS e da ínfima presença de moléculas de Vinil acopladas à cadeia, ocorreria um aumento muito expressivo da viscosidade da matriz betuminosa, gerando perda de trabalhabilidade e muita sensibilidade à separação de fases, além de menor compatibilidade às frações apolares do ligante betuminoso (SCHOLTEN et al., 2009).

Ainda, sobre utilizar estruturas poliméricas radiais nas mesmas proporções mencionadas para as lineares, com o intuito de modificar os ligantes betuminosos de base, cabe destacar que as cadeias radiais têm maior potencial de contribuir para a melhoria de características físicas, como o aumento do ponto de amolecimento e recuperação elástica. Entretanto, possuem um fator detrator importante, que é a dificuldade de compatibilização com os ligantes betuminosos, devido à extensa ramificação da cadeia formada, gerando elevada viscosidade, menor trabalhabilidade e, conseqüentemente, muita suscetibilidade à separação de fases (CHEN et al., 2021).

2.2.1.4 Terpolímeros elastoméricos reativos (RET)

Além dos processos físicos de mistura entre ligantes betuminosos e polímeros, a modificação química é outra tecnologia utilizada para melhorar as propriedades do ligante, produzindo compostos denominados terpolímeros elastoméricos reativos (RET) (KANABAR, 2010).

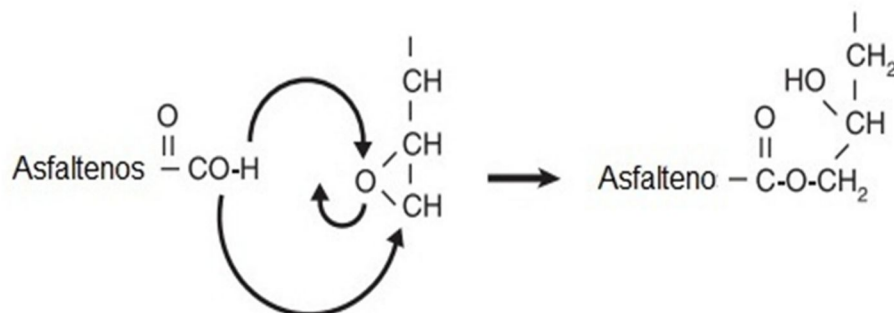
Suas cadeias compreendem elementos como Etileno, grupos Éster de grupos Metil, Etil ou Butil Acrilato, além de grupos Metacrilato de Glicidil, também conhecidos como funções epóxi reativas. Podem reagir quimicamente com estruturas presentes nos ligantes betuminosos, como grupos Carboxílicos presentes nos asfaltenos, que contribuem para melhorar o comportamento reológico do ligante e o desempenho da mistura asfáltica (DuPONT®, 2014).

Entre os diferentes ácidos que podem ser usados no ligante betuminoso, o ácido polifosfórico (PPA) é normalmente adicionado em baixo teor ($\leq 2,0\%$) para melhorar as propriedades do ligante por meio de modificação química. O PPA é definido como um modificador polimérico inorgânico com diferentes distribuições de comprimentos de cadeia, com o número de unidades repetidas variando de uma cadeia para outra. A investigação das reações que ocorrem entre os tipos de ligante betuminoso e o PPA é difícil, devido ao grande número de moléculas com diferentes estruturas químicas e suas possíveis interações (HUNTER, 2000).

Terpolímeros elastoméricos reativos (RET) são usados para minimizar a separação de fases pela formação de redes poliméricas densas em processos de modificação de ligantes betuminosos. Um RET é potencializado com Metacrilato de Glicidil e pode reticular-se quimicamente a moléculas de asfalto e grupos funcionais correlatos para melhorar o desempenho da matriz resultante (XU et al., 2019).

A palavra “reativo” em sua nomenclatura se dá pela sua distribuição química, que propicia a ocorrência de reação química com os asfaltenos do ligante betuminoso, com o intuito de formar um composto inseparável (GECKIL e SELOGLU, 2018; GAMA et al., 2018) (Figura 2.10).

Figura 2.10 - Mecanismo de reação química de um polímero Etileno-Glicidil-Acrilato e uma molécula de asfalto.



Fonte: Adaptada de Geckil e Seloglu (2018).

2.3 TECNOLOGIA HIMA

A nomenclatura HiMA provém do termo *Highly Modified Asphalt*, ou seja, uma matriz betuminosa altamente modificada, compreendendo o desenvolvimento de uma cadeia

polimérica associada à modificação da estrutura molecular convencional 1101 AT do copolímero SBS, a partir de uma nova geração molecular D0243, conforme explanado no tópico 2.2.1.3. Esta tecnologia foi incorporada ao mercado da pavimentação asfáltica pela empresa americana Kraton Performance Polymers Incorporated (KRATON[®], 2021).

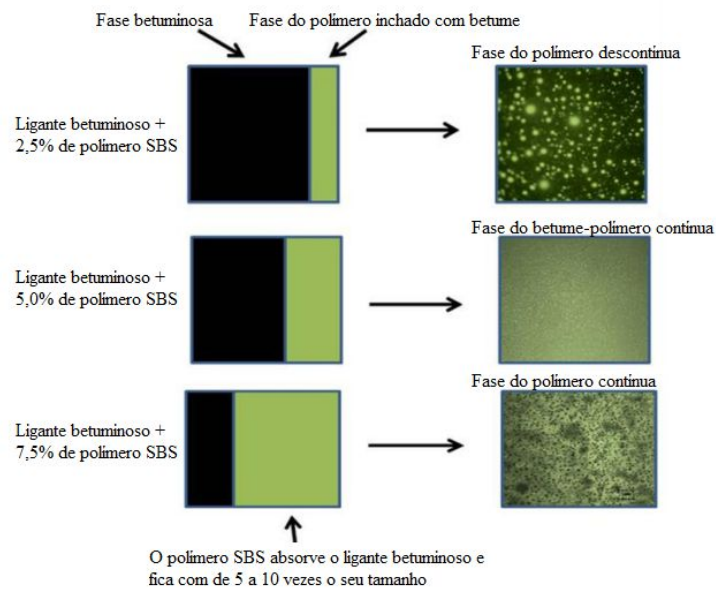
A estrutura copolimérica D0243 pode ser incorporada ao ligante betuminoso em dosagens de até 8,0% em peso, que representam o dobro da quantidade de polímeros SBS tradicionalmente utilizados na indústria de modificação (4,0%), a partir da molécula usual 1101 AT. Entre os benefícios verificados com esta tecnologia constam o aumento do teor de polímero sem que ocorra o aumento expressivo da viscosidade do ligante nas temperaturas de trabalho, bem como aumento do módulo de rigidez e da recuperação elástica (SCHOLTEN et al., 2009).

Ainda, dadas as qualidades descritas, tem-se que o ligante betuminoso HiMA modificado com a variação polimérica D0243 é capaz de reduzir a espessura da camada de rolamento entre 30% a 50%, quando comparado às misturas asfálticas formuladas com matrizes betuminosas em forma pura ou modificadas com cadeias poliméricas convencionais. Estas verificações foram obtidas a partir de testes realizados na pista experimental do *National Center for Asphalt Technology* (NCAT), da *Auburn University*, nos Estados Unidos, sendo ressaltado que estas variações de espessura dependem da condição da estrutura de pavimento adotada em projeto e do clima local (KLUTTZ et al., 2013).

Os copolímeros SBS podem absorver até dez vezes o seu peso quando incorporados ao ligante betuminoso. Portanto, quando 2,5% de SBS são adicionados ao ligante, a matriz modificada apresentará comportamento reológico correspondente à proporção de 25% de elastômero e 75% de betume. Neste contexto, as características principais do material, principalmente a resistência mecânica, continuarão a ser proporcionadas pela fase betuminosa. No entanto, se forem incorporados 7,5% de SBS ao ligante, este se comportará a uma proporção com 75% de elastômero e 25% de betume. Tem-se, portanto, uma inversão de fases a partir da formação de uma rede polimérica contínua e resistente, corroborando à geração dos benefícios já mencionados (WATSON et al., 2018; JELLEMA e VONK, 2016).

A Figura 2.11 ilustra o processo de inversão de fases proporcionada pelo aumento gradual na incorporação de SBS no processo de modificação do ligante betuminoso.

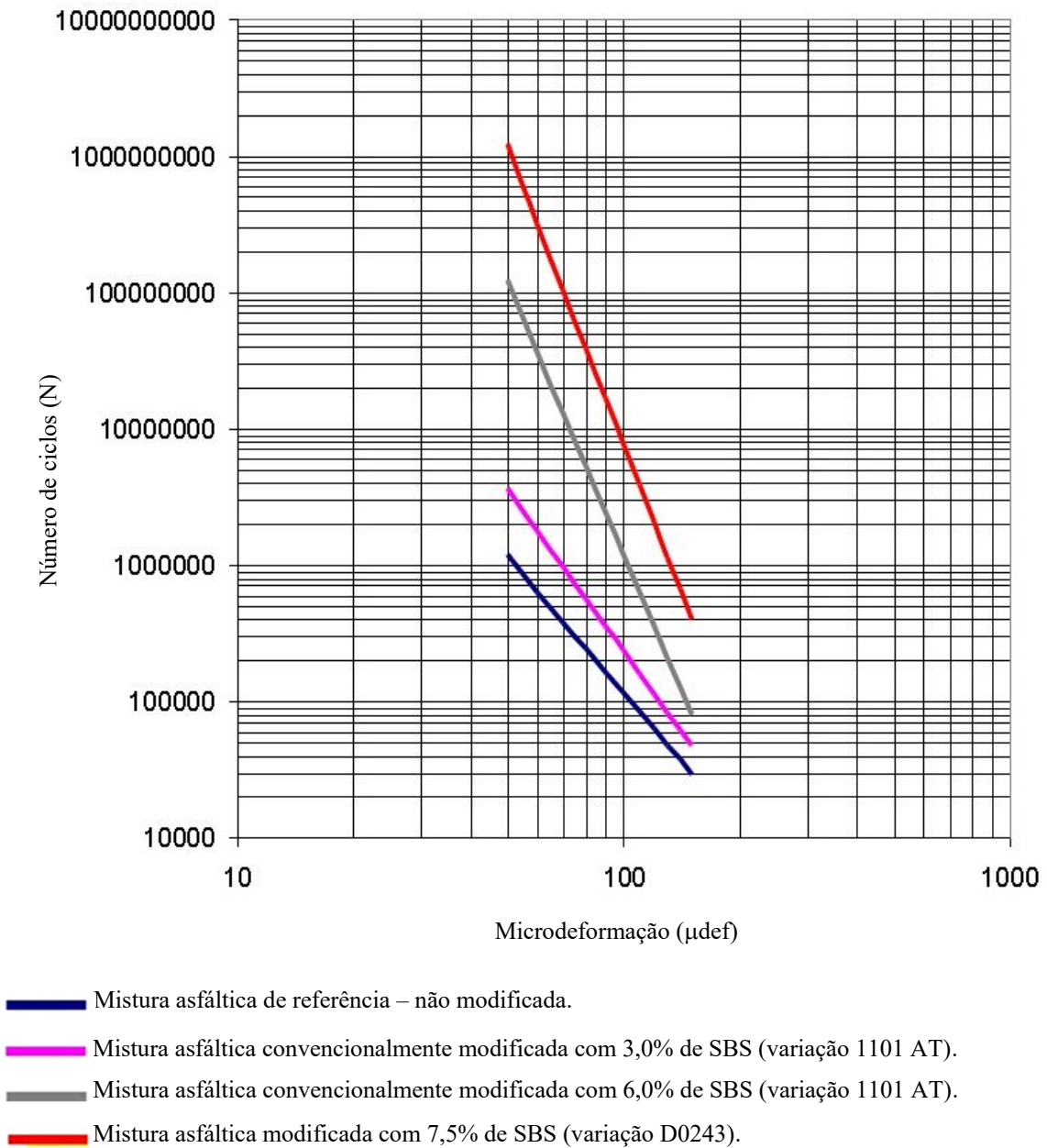
Figura 2.11 - Interação das fases asfálticas e poliméricas conforme percentual de polímero SBS incorporado no processo de modificação do ligante betuminoso.



Fonte: Adaptado de Jellema e Vonk (2016).

De acordo com Scholten et al. (2009), a partir ensaios realizados com misturas asfálticas em vigas 4 pontos, a matriz HiMA aporta um aumento na resistência à fadiga do ligante betuminoso até 100 vezes maior em relação aos ligantes convencionais e até 60 vezes maior que as matrizes modificadas por SBS no processo tradicional (Figura 2.12).

Figura 2.12 - Impacto da utilização de ligantes não modificados e modificados pelo processo convencional com SBS (1101 AT), em comparação com a matriz HiMA (D0243), na resistência à fadiga de misturas asfálticas.



Fonte: Adaptada de Scholten et al. (2009).

Para fins de classificação do ligante betuminoso como HiMA, ainda não há muitas publicações normativas difundidas no mundo até o momento, devido ser uma tecnologia relativamente recente, e portanto, ainda não utilizada em larga escala em muitos países.

A metodologia americana *Superpave* utiliza os ensaios de *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR) (AASHTO T-332, 2021) para definição do grau de desempenho (*performance grade* – PG), determinação da porcentagem de recuperação e conformidade de fluência irreversível (*compliance* J_{nr} e R) com uso do reômetro de cisalhamento dinâmico

(DSR) (AASHTO T-350, 2019), além da determinação de propriedades reológicas no plano complexo com o uso do DSR, tais como o parâmetro de suscetibilidade à deformação permanente $G^*/\text{sen}\delta$ e de resistência à fadiga $G^*.\text{sen}\delta$ (AASHTO T-315, 2020).

Ainda, no contexto americano, cada Estado possui valores limites particulares a serem considerados entre os indicadores mencionados (PG, J_{nr} , $G^*/\text{sen}\delta$, e $G^*.\text{sen}\delta$), para atestação da conformidade das especificações dos ligantes betuminosos como matriz HiMA (HABBOUCHE et al., 2021). No Brasil, em razão da ausência de normas a respeito para o momento e da proximidade das características climáticas, tem-se sugerido utilizar os parâmetros adotados pelo Estado da Flórida com o intuito de estabelecer esta classificação (Tabela 2.4).

Tabela 2.4 - Parâmetros considerados para classificação de um ligante betuminoso como matriz HiMA no Estado da Flórida/Estados Unidos.

Norma	Parâmetro	Limites Normativos
AASHTO T-332 (2021)	PG	76E -22
AASHTO T-350 (2019)	J_{nr} ; R	$J_{nr,3,2} \leq 0,1 \text{ kPa}^{-1}$; $R_{3,2} \geq 90\%$ a 76°C
AASHTO T-315 (2020)	$G^*/\text{sen}\delta$	$G^*/\text{sen}\delta \geq 1,0 \text{ kPa}$ e $\delta \leq 75^\circ$ a 76°C - em amostra virgem
	$G^*.\text{sen}\delta$	$G^*.\text{sen}\delta \leq 5000 \text{ kPa}$ a 26°C – após PAV*

*Ensaio Pressure Aging Vessel (PAV) (AASHTO R-28, 2021): simulação de envelhecimento da amostra.

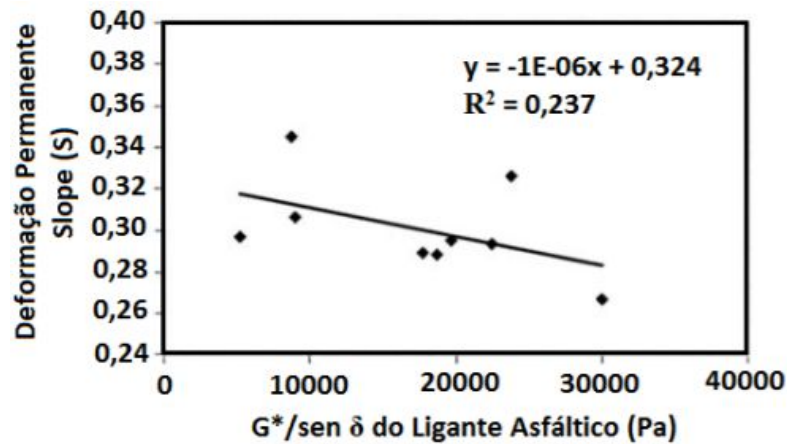
Fonte: Adaptada de Habbouche et al. (2021).

A metodologia *Superpave* resultante do *National Cooperative Highway Research Program – Project 9-10* (NCHRP, 2001), pautou-se por indicadores de desempenho na análise dos ligantes betuminosos, buscando uma abordagem correlacional com os defeitos mais importantes verificados nos pavimentos de concreto asfáltico, a saber: trincas por fadiga e deformação permanente.

Conforme já mencionado e apresentado na Tabela 2.4, no que diz respeito ao trincamento por fadiga o parâmetro associado foi o $G^*.\text{sen}\delta$, determinado em amostras de ligante betuminoso residual envelhecido a longo prazo, em temperatura tomada como intermediária para o pavimento. Quanto à deformação permanente, o parâmetro associado foi o $G^*/\text{sen}\delta$, determinado em amostras virgens, podendo também eventualmente ser utilizado ligante betuminoso residual envelhecido a curto prazo, em temperatura tomada como elevada para o pavimento. Ambos os parâmetros são selecionados a partir do conceito de energia dissipada (WEN e BAHIA, 2009).

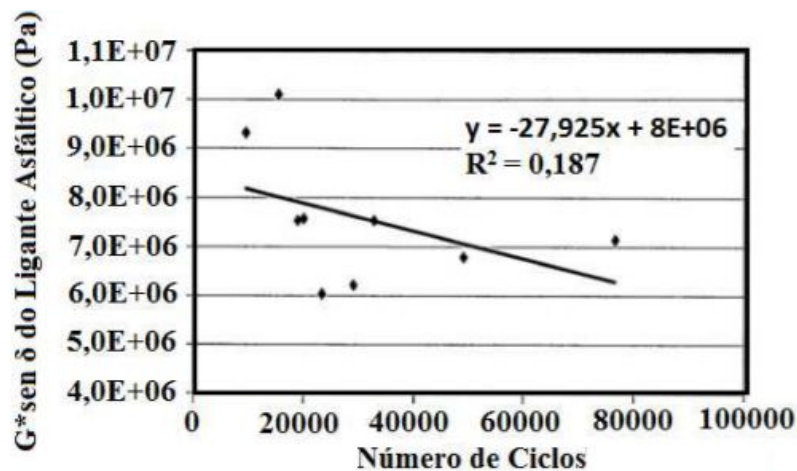
Todavia, em NCHRP (2001) foi demonstrado que o parâmetro $G^* \cdot \text{sen} \delta$ não é efetivo na predição da contribuição do ligante betuminoso na resistência à fadiga das misturas asfálticas. E nesta mesma direção, que o parâmetro $G^*/\text{sen} \delta$, quando relacionado principalmente a ligantes modificados, apresenta grandes limitações na previsão da contribuição do ligante betuminoso no desempenho à deformação permanente da mistura asfáltica. De acordo com os pesquisadores envolvidos no projeto, apresentam uma fraca correlação entre o desempenho mecânico das misturas asfálticas e os parâmetros $G^* \cdot \text{sen} \delta$ e $G^*/\text{sen} \delta$ da especificação *Superpave* (Figuras 2.13 e 2.14).

Figura 2.13 - Correlação entre o parâmetro $G^*/\text{sen} \delta$ do ligante betuminoso e a taxa média de acumulação da deformação (S) da mistura asfáltica (teste *Repeated Shear Constant Height* - RSCH).



Fonte: Adaptado de NCHRP (2001) (*apud* MELO, 2014).

Figura 2.14 - Correlação entre o parâmetro $G^* \cdot \text{sen} \delta$ do ligante betuminoso e a resistência à fadiga da mistura asfáltica.



Fonte: Adaptado de NCHRP (2001) (*apud* MELO, 2014).

Segundo Delgadillo e Bahia (2005), uma das limitações que tornam o parâmetro G^* não confiável está relacionada ao fato deste ser calculado com base na energia dissipada inicial do material após poucos ciclos de carregamento, ao passo que o acúmulo de dano por fadiga acontece após vários ciclos de carregamento. Ainda, concluem que o parâmetro G^* abrange o uso simplista e equivocado do conceito de energia dissipada para o âmbito do fenômeno da fadiga, pois compreende análises que representam majoritariamente o amortecimento viscoelástico no âmbito tixtrópico e não, necessariamente, a energia dissipada no dano por fadiga, que se dá sob a forma de calor.

A metodologia francesa, a partir da norma europeia AFNOR NF EN 13924 (2006), especifica os ligantes betuminosos de alto desempenho a partir de classes ordenadas de 0 a 4, sendo que melhor é a qualidade do material quanto maior for a numeração de sua classe. A Tabela 2.5 apresenta os indicadores considerados neste contexto.

Tabela 2.5 - Parâmetros considerados para classificação europeia de um ligante betuminoso de alto desempenho.

Característica	Parâmetro	Norma*	Unidade	Classes				
				0	1	2	3	4
Consistência à temperatura intermediária de serviço	Penetração a 25°C	EN 1426	0,1 mm	NPD	TBR	15 a 25	10 a 20	-
	Ponto de amolecimento	EN 1427	°C	NR	TBR	55 a 71	58 a 78	60 a 76
Consistência à temperatura elevada de serviço	Viscosidade dinâmica a 60°C	EN 12596	Pa.s	NPD	TBR	≥ 550	≥ 700	-
	Variação de massa	EN 12607-1 ou 3	%	NPD	TBR	≤ 0,5	-	-
Durabilidade**	Penetração retida	EN 1426	%	NPD	TBR	≥ 55	-	-
	Ponto de amolecimento após envelhecimento	EN 1427	°C	NPD	TBR	≥ Original mín. +2°C	-	-
	Aumento do ponto de amolecimento	EN 1427	°C	NPD	TBR	≤ 8	≤ 10	-
	Aumento do ponto de amolecimento e IP (amostra viegem)	EN 1427	°C	NR	TBR	≤ 10 IP -1,5 a +0,7	≤ 10 IP ≤ -1,5	-
	Viscosidade cinemática a 135°C	EN 12595	mm ² /s	NR	TBR	≥ 600	≥ 700	-
Outras propriedades	Ponto de Fraass	EN 12593	°C	NR	TBR	≤ 0	≤ 3	-
	Ponto de fulgor	EN ISO 2592	°C	-	-	≥ 235	≥ 245	-
	Solubilidade	EN 12592	% em massa	NR	TBR	≥ 99,0	-	-

**apud* AFNOR NF EN 13924 (2006).

**Envelhecimento a 163°C após RTFOT (EN 12607-1).

NPD: sem desempenho determinado.

NR: sem exigência de classe.

TBR: a ser reportado.

Fonte: AFNOR NF EN 13924 (2006).

Entretanto, a norma AFNOR NF EN 13924 (2006), no item 5.1.5, torna claro o contexto momentâneo dos parâmetros apresentados na Tabela 2.5, indicando que novos indicadores estão sendo desenvolvidos e serão publicados em momento futuro, com base em condições mais específicas e atuais de ensaios disponíveis.

Ainda, na mesma norma europeia é possível verificar no Anexo B, Tabela B.1, que a França postula classificar futuramente os ligantes betuminosos a partir dos resultados do módulo de cisalhamento dinâmico $|G^*|$, com o uso do DSR, determinados a 15 °C e 10 Hz.

2.4 REOLOGIA DO LIGANTE BETUMINOSO

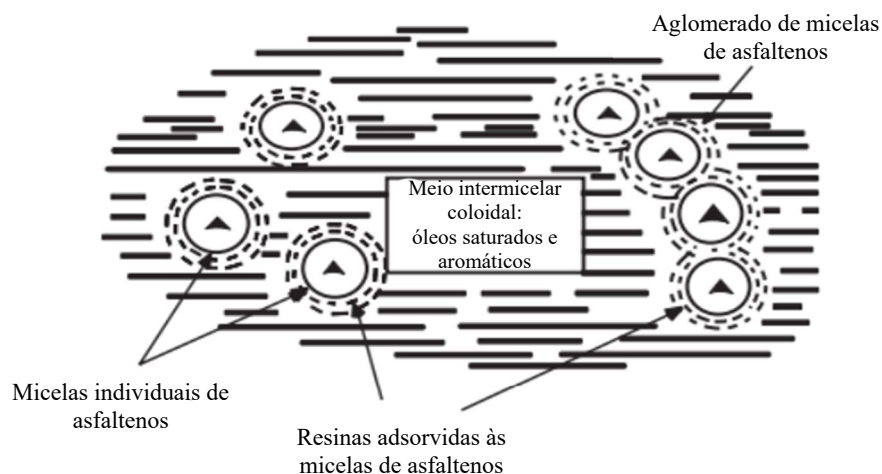
O termo reologia é oriundo do idioma grego *rhéo* e significa fluxo. Logo, é o ramo da Física que estuda o escoamento da matéria, ou seja, das mudanças na forma e no fluxo de um material, englobando todas estas variantes (MARTIN e BUSTAMANTE, 1993).

Os fluidos, em geral, são classificados em função do seu comportamento reológico, o qual compreende a determinação e análise da relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento ou deformação para uma determinada condição de temperatura e pressão. Podem ser classificados reologicamente como newtonianos e não newtonianos (CHHABRA e RICHARDSON, 2008).

Quando os fluidos possuem comportamento newtoniano, as deformações resultantes são proporcionais à taxa de tensão aplicada, e a viscosidade é independente da taxa de deformação, ocorrendo o cenário inverso para as condições não-newtonianas. Não se encontra na natureza um fluido perfeitamente newtoniano, porém, fluidos mais homogêneos como a água e o ar costumam ser estudados como newtonianos para muitas finalidades práticas de referência (MACIEL, 2010).

O clássico modelo de Yen (1991) ilustra de forma simplificada e didática a estrutura do ligante betuminoso, em que as micelas de asfalto se encontram adsorvidas a resinas e envolvidas por um meio coloidal formado por compostos oleaginosos de frações saturadas e aromáticas (Figura 2.15).

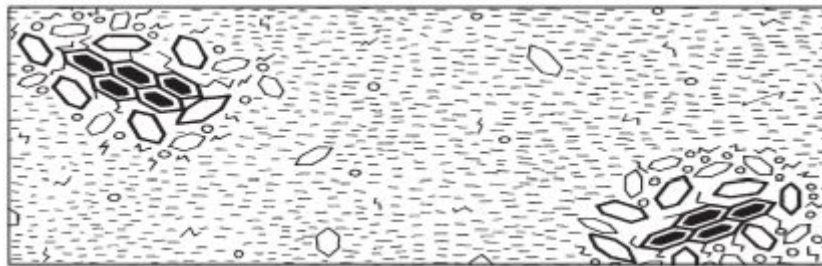
Figura 2.15 - Modelo simplificado da estrutura intermicelar coloidal do ligante betuminoso.



Fonte: Yen (1991).

Segundo Lucena (2005), a presença de bases nitrogenadas no ligante betuminoso é responsável pela característica denominada SOL, de solvente. Apresentam susceptibilidade térmica muito elevada e baixo ponto de amolecimento. O escoamento do fluido é facilitado pela presença das múltiplas camadas de compostos solventes, isto é, oleaginosos, em torno das micelas, como os saturados e aromáticos (Figura 2.16). Neste contexto, tem-se que o estado SOL pouco contribui ao ligante para resistir à aplicação das cargas solicitantes, devido à elevada capacidade de escoamento, em compensação, é decisivo para o retorno das micelas à posição original, ou seja, atua na parcela elástica do material.

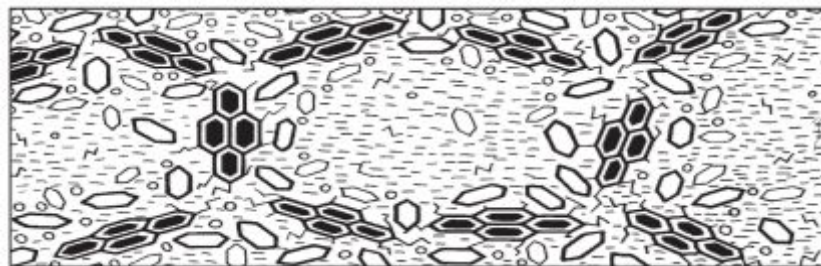
Figura 2.16 - Ligante betuminoso com característica SOL.



Fonte: Adaptado de Read and Whiteoak (2003).

Por outro lado, o estado GEL (Figura 2.17) necessita de temperaturas mais elevadas para que sofra alteração enérgica em relação ao estado SOL, devido a maior concentração de micelas asfáltênicas em sua composição, o que lhes garante menor suscetibilidade térmica e ponto de amolecimento mais alto.

Figura 2.17 - Ligante betuminoso com característica GEL.



Fonte: Adaptado de Read and Whiteoak (2003).

Assim, nos casos em que os asfaltenos se encontram em um meio dispersivo com elevada concentração de compostos oleaginosos, o comportamento do ligante betuminoso é praticamente newtoniano, também conhecido como estado sol. Em contrapartida, quando o

suporte estrutural for assegurado pelas partículas de asfaltenos, assumirá um comportamento não-newtoniano, denominado de estado gel (ANDERSON et al., 1991; ZANZOTTO, 1989).

A influência dos componentes estruturais do ligante betuminoso no comportamento reológico, notadamente as frações SARA, já abordadas no tópico 2.1.1, tem sido estudada por diversos pesquisadores (MAILLARD, 2005; GRIFFIN et al., 1961; GRIFFIN et al., 1959; PFEIFFER, 1950; PFEIFFER et al., 1939), observando-se as seguintes tendências em se mantendo as concentrações de asfaltenos em uma amostra:

- O aumento do teor de frações aromáticas em uma proporção constante de compostos saturados/resinas tem pouco efeito reológico, exceto por uma redução marginal na suscetibilidade aos esforços de cisalhamento;
- A manutenção de uma relação constante de resinas e aromáticos, em conjunto com o aumento do teor de compostos saturados, acarreta em amolecimento do ligante;
- A adição progressiva de resinas endurece o ligante, reduzindo a penetração e a suscetibilidade ao cisalhamento, mas aumenta a viscosidade.

2.4.1 Viscoelasticidade

Os concretos asfálticos herdam o comportamento viscoelástico dos ligantes betuminosos que contêm (De La ROCHE, 1996). Ainda, a linearidade dos materiais betuminosos, como os ligantes e os concretos asfálticos, ocorre no domínio das pequenas deformações correspondentes às amplitudes das solicitações dinâmicas aplicadas no campo (LINDER, 1977).

Neste domínio, verifica-se a superposição dos efeitos pelo princípio de Boltzmann, em que a resposta de um material a um dado regime de solicitação, composto de um certo número de solicitações elementares, é a soma das respostas de cada uma destas solicitações elementares (HUET, 1963).

O limite de proporcionalidade é definido como o ponto além do qual a Lei de Hooke não é mais válida ao deformar um material, e o limite elástico é o ponto além do qual o material sob ação de uma carga se deforma, de tal maneira que o material não consegue retornar ao seu estado original quando a força deixa de ser aplicada (GERSHKOFF, 1995).

À temperatura ambiente, os asfaltenos conduzem o ligante betuminoso a uma estruturação por meio dos seus grupos polares, sobretudo devido à forte atração elétrica gerada

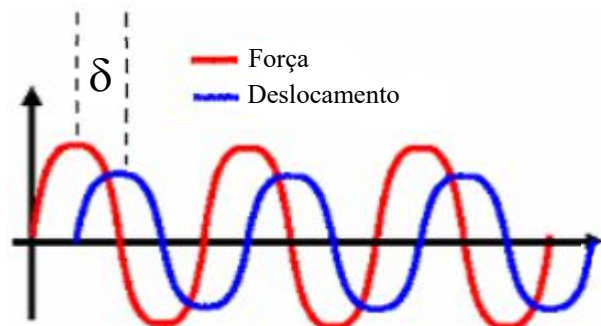
pelas pontes de Hidrogênio, fenômeno denominado coalescência. Caso seja submetido a temperaturas cada vez menores, de ordem notadamente negativa, os ligantes betuminosos tendem a se comportar como materiais elásticos, em que a deformação é recuperada quase totalmente com o alívio da força imposta (CRAVO, 2016).

Porém, quando elevadas temperaturas atuam em sua estrutura, a dispersão molecular é intensa, acarretando em predominância do escoamento proporcionado pelos compostos oleaginosos, prevalecendo o comportamento viscoso (D'ANGELO et al., 2007).

Em condições intermediárias às supracitadas, tem-se a essência do comportamento viscoelástico linear, ou seja, a combinação das componentes elástica e viscosa atuando no domínio da linearidade (BARRA, 2009).

O grau de atuação destas componentes é verificado pelo retardo dos deslocamentos resultantes à força aplicada sobre o material, quantificado pela variável denominada ângulo de fase (δ), a qual varia no intervalo de 0° a 90° . Quanto mais próximo a 0° , o material tende a um comportamento elástico linear, enquanto nas proximidades de 90° tende a um comportamento predominantemente viscoso (MOMM, 1998; De La ROCHE, 1996) (Figura 2.18).

Figura 2.18 - Ângulo de fase (δ) atuando no comportamento viscoelástico dos ligantes betuminosos.

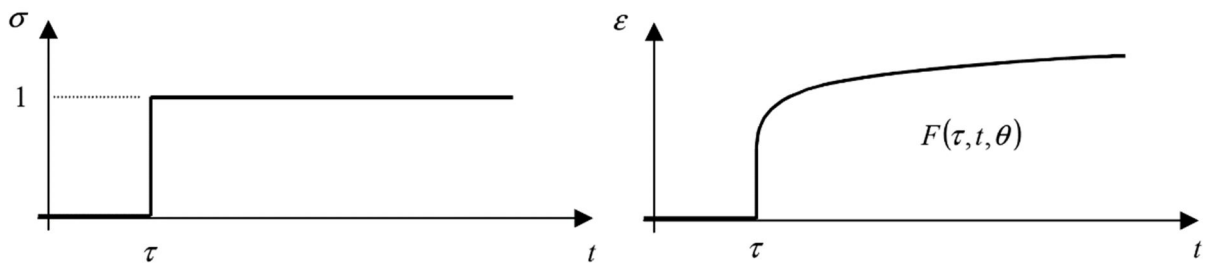


Fonte: Adaptado de Barra (2009).

Pode-se dizer então que a viscoelasticidade linear depende do nível de deslocamento aplicado ao material, com a integração do tempo para os fenômenos viscosos, como: relaxação, fluência, aquecimento interno, tixotropia e auto-reparação (DONGMO-ENGELAND, 2005).

A função de fluência F expressa o comportamento mecânico de um corpo que ao ser submetido à aplicação de uma amplitude de tensão constante a partir de um instante inicial τ , apresenta um aumento progressivo da deformação (fluência), a uma dada temperatura θ , que tende a zero quando interrompida a ação do carregamento no tempo t (HECK, 2001) (Figura 2.19).

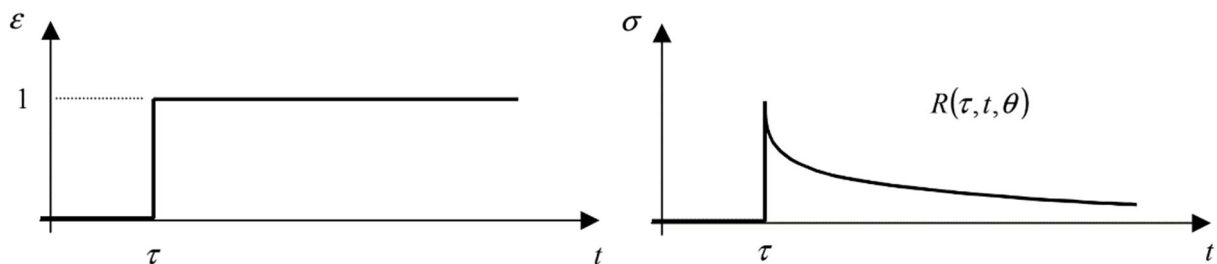
Figura 2.19 - Representação gráfica da função de fluência.



Fonte: Adaptada de Heck (2001).

A função de relaxação R expressa o comportamento mecânico de um corpo que ao ser submetido à aplicação de uma amplitude de deformação constante a partir de um instante inicial τ , apresenta um decréscimo progressivo (relaxação) da tensão, a uma dada temperatura θ , tendendo a zero no tempo t (Figura 2.20). Nos casos em que a tensão retorna completamente ao seu estado inicial (nula) ocorre a chamada relaxação total, e nos casos em que retorna parcialmente, configura-se um comportamento assintótico em relação a um estado estático do tipo sólido, condição típica dos materiais viscoelásticos lineares (HECK, 2001).

Figura 2.20 - Representação gráfica da função de relaxação.



Fonte: Adaptada de Heck (2001).

2.4.2 Módulo dinâmico no plano complexo

Para os ligantes betuminosos, a relação entre as amplitudes da tensão aplicada e da deformação resultante, esta última defasada no tempo de resposta pela caracterização do ângulo de fase (δ) (Figura 2.18), a um dado pulso de solitação, determina o módulo dinâmico no plano complexo G^* , também denominado de módulo complexo, módulo de cisalhamento dinâmico ou, simplesmente, módulo de rigidez (MAILLARD, 2005).

Estas análises são realizadas no domínio frequencial de solitação, normalmente com o uso de reômetros de cisalhamento dinâmico (DSR), em que os procedimentos utilizados serão abordados em detalhes no capítulo 5. Logo, a frequência de carregamento ω é denominada angular, rotacional ou radiana, sendo definida pela da Equação 2.1.

$$\omega = 2\pi f \quad (2.1)$$

Onde:

- ω : frequência angular (rad/s);
- f : frequência linear (Hz).

Conforme abordado no tópico 2.4.1, tem-se que reologicamente o módulo dinâmico dos ligantes betuminosos é constituído pelas componentes elástica e viscosa, as quais são representadas no plano complexo pelas notações G' e G'' , respectivamente. Assim, tem-se que a raiz quadrada da soma destas componentes, elevadas ao quadrado, resultam na determinação da norma do módulo dinâmico no plano complexo $|G^*|$ (Equação 2.2).

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (2.2)$$

Onde:

- $|G^*|$: norma do módulo dinâmico no plano complexo;
- G' : componente elástica do módulo dinâmico;
- G'' : componente viscosa do módulo dinâmico.

Em notação vetorial, o módulo dinâmico pode ainda ser definido conforme a Equação 2.3 e representado graficamente pela Figura 2.21.

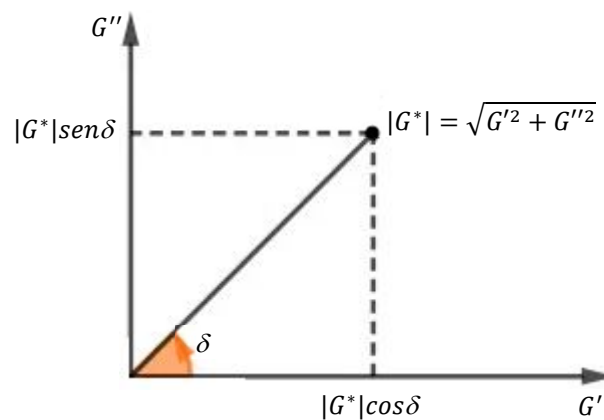
$$G^* = G' + iG'' \quad (2.3)$$

Onde:

G' : módulo real ou de armazenamento, relacionado à conservação de energia do material após solicitado;

G'' : módulo de perda ou imaginário (i), relacionado à perda de energia por dissipação sob a forma de calor do material após solicitado.

Figura 2.21 - Representação gráfica vetorial do módulo complexo.



Fonte: Adaptado de Silva e Frota (2016).

A partir da Figura 2.21, tem-se que a componente elástica ou módulo de armazenamento G' é determinado pelo produto entre $|G^*|$ e o cosseno do ângulo de fase δ (Equação 2.4), enquanto a componente viscosa ou módulo de perda é obtido pelo produto entre $|G^*|$ e o seno do ângulo de fase δ (Equação 2.5).

$$G' = |G^*| \cos \delta \quad (2.4)$$

$$G'' = |G^*| \sin \delta \quad (2.5)$$

Onde:

δ : ângulo de fase.

A tangente do ângulo de fase $\tan(\delta)$, também denominada de função *damping*, é definida pela relação entre as componentes elástica e viscosa do módulo dinâmico (Equação 2.6), a qual expressa a taxa da perda progressiva de rigidez no plano complexo.

$$\operatorname{tg}(\delta) = \frac{G''}{G'} \quad (2.6)$$

Onde:

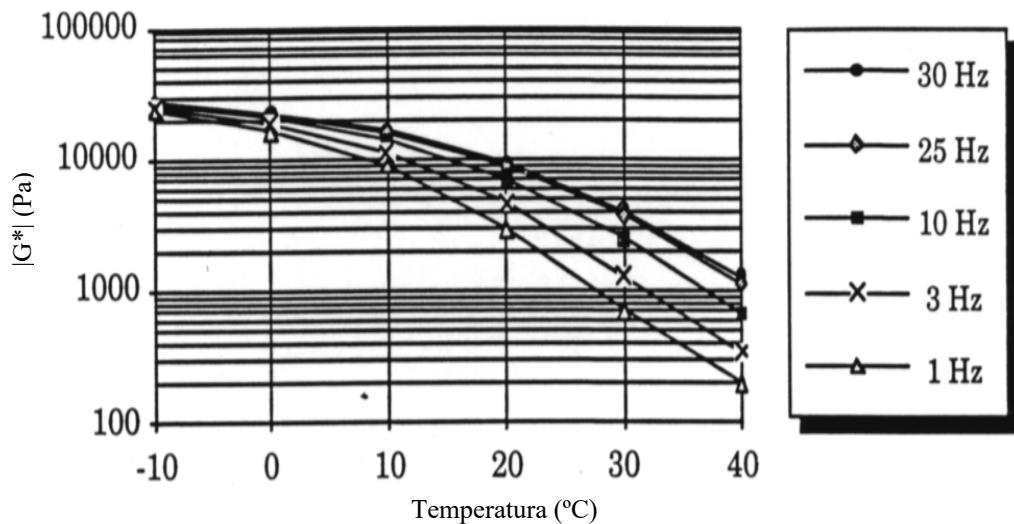
$\operatorname{tg}(\delta)$: tangente do ângulo de fase.

2.4.2.1 Representações gráficas do módulo dinâmico no plano complexo

Existem diferentes maneiras de representar graficamente o comportamento viscoelástico linear das misturas asfálticas, em função da variação da temperatura e da frequência de solitação, considerando as componentes real (G') e imaginária (G'') do módulo dinâmico no plano complexo $|G^*|$, e seu respectivo ângulo de fase δ , tais como: curvas isócronas ou isocrônicas, curvas isotérmicas, curva de equivalência frequência-temperatura, plano Cole-Cole e, espaço de Black (BARRA, 2009; HECK, 2001; MOMM, 1998; De La ROCHE, 1996; HUET, 1963).

As curvas isocrônicas (Figura 2.22) relacionam o módulo dinâmico $|G^*|$, em escala logarítmica, com a temperatura em escala aritmética, para cada nível de frequência de teste, permitindo avaliar a suscetibilidade térmica dos ligantes betuminosos.

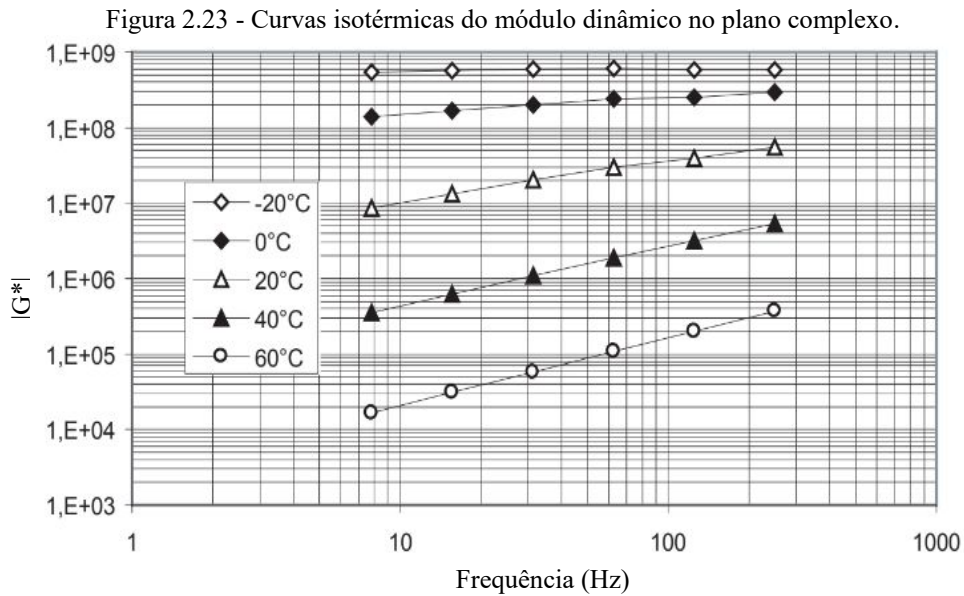
Figura 2.22 - Curvas isocrônicas do módulo dinâmico no plano complexo.



Fonte: Adaptado de Baaj (2002).

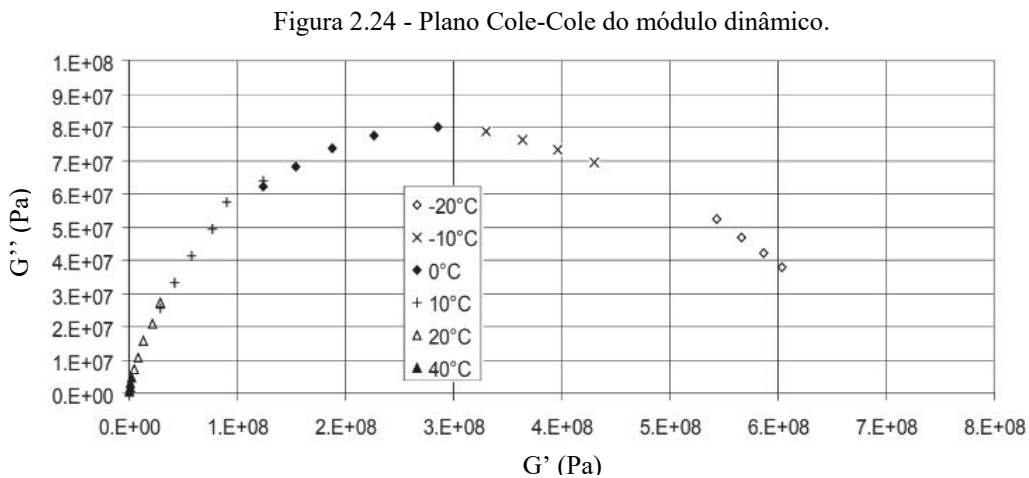
As curvas isotérmicas (Figura 2.23) relacionam os valores do módulo dinâmico $|G^*|$ com os níveis de frequência, ambos em escala logarítmica. O parâmetro de avaliação de um

ligante betuminoso neste caso é a sua suscetibilidade cinética, a qual é verificada a partir da observação da inclinação das curvas geradas a uma dada temperatura de teste.



Fonte: Adaptado de Maillard (2005).

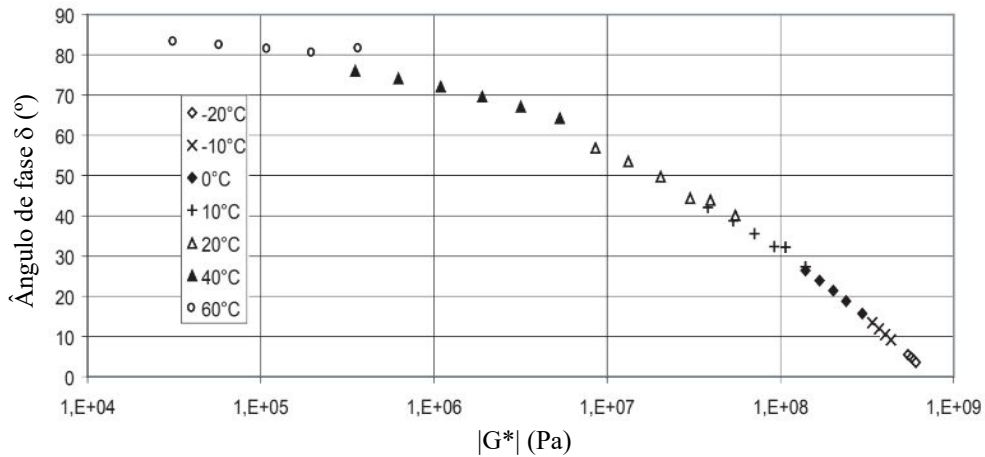
O plano Cole-Cole (Figura 2.24) relaciona as componentes real (G') e imaginária (G'') do módulo dinâmico $|G^*|$, em que é possível verificar a trajetória parabólica da evolução reológica dos ligantes betuminosos, permitindo identificar sobretudo a temperatura crítica de dissipação de energia sob a forma de calor em cada matriz, relacionada ao pico da trajetória mencionada.



Fonte: Adaptado de Maillard (2005).

O espaço de Black relaciona o módulo de rigidez complexo $|G^*|$, em escala logarítmica, com o ângulo de fase δ , em escala aritmética (Figura 2.25). Tem-se que se o ligante betuminoso obedece ao princípio da equivalência frequência-temperatura, pois cada valor de δ corresponde a um único valor de $|G^*|$ na frequência considerada de teste (MAILLARD, 2005).

Figura 2.25 - Espaço de Black do módulo dinâmico no plano complexo.

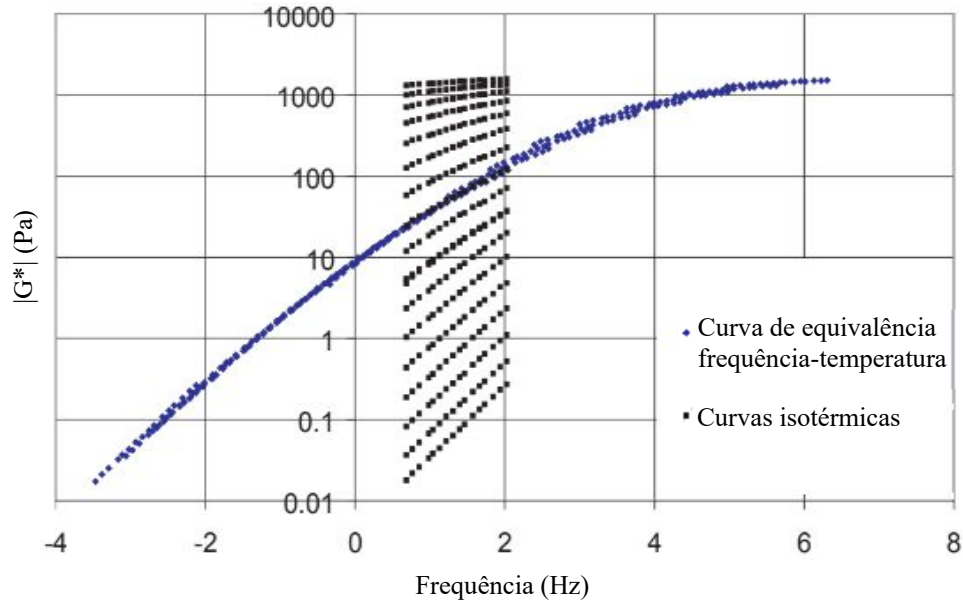


Fonte: Adaptado de Maillard (2005).

A partir das curvas isotérmicas (Figura 2.23), verifica-se que no domínio da viscoelasticidade linear, o valor do módulo dinâmico no plano complexo de um dado ligante betuminoso pode ser obtido para diferentes conjuntos de frequência e temperatura, construindo-se uma única curva. Esta propriedade é denominada de equivalência frequência-temperatura (RIVIÈRE, 1996).

Esta representação gráfica relaciona a norma do módulo dinâmico $|G^*|$ com os níveis de frequência de teste, ambos em escala logarítmica, em função de uma temperatura de referência (T_R) escolhida entre as utilizadas em teste, geralmente 10 °C ou 15 °C. Esta curva, também denominada mestra, é obtida pela translação paralela ao eixo das abscissas (dos níveis de frequência) de cada curva isotérmica, em relação àquela correspondente à T_R , até que se consiga a superposição dos pontos de mesma ordenada, ou seja, de mesmo $|G^*|$ (Figura 2.26).

Figura 2.26 - Curva de equivalência frequência-temperatura do módulo dinâmico no plano complexo.



O coeficiente de translação de uma curva isotérmica, em relação à curva isotérmica correspondente à T_R escolhida, é denominado a_T , tal que seja satisfeita a seguinte notação: $G^*(\omega, T) = G^*(\omega \cdot a_T, T_R)$, com $a_T = 1$ e $\omega = 2\pi f$ (pulsação). Várias equações têm sido propostas para a determinação de a_T , porém, as mais utilizadas são as de Williams, Landel e Ferry (WILLIAMS et al., 1955; Equação 2.7), de Arrhenius (FERRY, 1961; Equação 2.8) e do Método Gráfico (Figura 2.27 e Equações 2.9 a 2.12) (BARRA, 2009; MOMM, 1998).

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (2.7)$$

Onde:

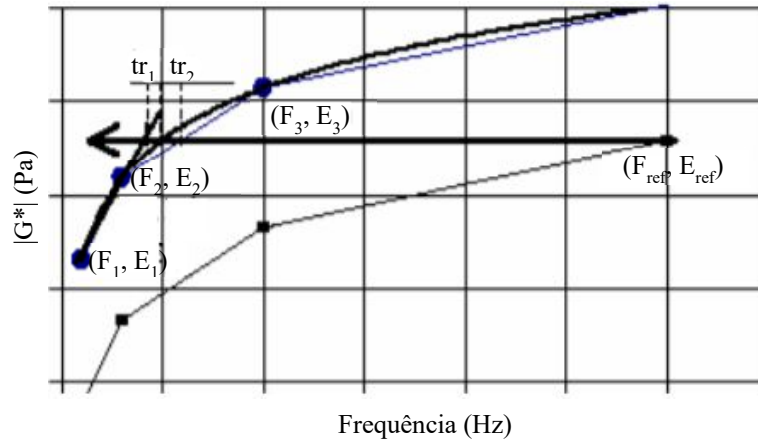
- a_T : coeficiente de translação de uma curva isotérmica;
- C_1, C_2 : constantes de determinadas experimentalmente;
- T : temperatura de uma dada curva isotérmica, em °K;
- T_R : temperatura de referência de uma curva isotérmica, em °K.

$$\log(a_T) = \frac{\delta H}{R} \left(\frac{1}{T} + \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (2.8)$$

Onde:

- at: coeficiente de translação de uma curva isotérmica;
- δH : energia aparente de ativação característica do material ($\cong 50 \text{ kJ/mol}$);
- R: constante universal dos gases perfeitos ($8,31 \text{ J/mol}^\circ\text{K}$);
- T: temperatura de uma dada curva isotérmica, em $^\circ\text{K}$;
- T_R : temperatura de referência de uma curva isotérmica, em $^\circ\text{K}$.

Figura 2.27 - Traslação das curvas isotérmicas pelo método gráfico.



Fonte: Adaptado de Momm (1998).

$$tr_1 = \exp \left(\frac{\ln(F_1) + \left(\frac{F_2}{F_1}\right)}{\ln\left(\frac{E_2}{E_1}\right)} \ln \left(\frac{E_{ref}}{E_1} \right) \right) \quad (2.9)$$

$$tr_2 = \exp \left(\frac{\ln(F_2) + \left(\frac{F_3}{F_2}\right)}{\ln\left(\frac{E_3}{E_2}\right)} \ln \left(\frac{E_{ref}}{E_2} \right) \right) \quad (2.10)$$

$$tr_m = \frac{(tr_1 + tr_2)}{2} \quad (2.11)$$

$$\ln(a_T) = \ln \left(\frac{F_{ref}}{tr_m} \right) \quad (2.12)$$

Onde:

- tr_1, tr_2 : coeficientes de ajuste da traslação;
- tr_m : coeficiente de ajuste da traslação médio;
- $F_{1,2,3}$: frequência de um dado ponto $i = 1, 2, 3$;
- $E_{1,2,3}$: módulo de um dado ponto $i = 1, 2, 3$;

- F_{ref} : frequência de referência de uma dada temperatura;
 E_{ref} : módulo de referência de uma dada temperatura;
 a_T : fator de translação correspondente a uma dada temperatura.

Cabe esclarecer que os métodos de Arrhenius e Williams, Landel e Ferry são os mais utilizados para a construção das curvas de equivalência frequência-temperatura na análise reológica de ligantes betuminosos, enquanto o método gráfico é mais aplicado às misturas asfálticas.

Todavia, o método gráfico também pode ser aplicado aos ligantes betuminosos, desde que apresentem linearidade na avaliação da evolução reológica do comportamento viscoelástico. Por esta razão em consonância à maior praticidade, foi a metodologia escolhida para aplicação aos resultados desta pesquisa.

CAPÍTULO 3

MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A crescente procura por técnicas que proporcionem maior segurança e conforto ao trafegar, faz com que misturas asfálticas drenantes sejam uma alternativa no âmbito da concepção de estruturas de pavimentos, capaz de evitar ocorrências que induzem a graves acidentes no campo, causadas sobretudo em dias chuvosos por fenômenos como hidroplanagem, viscoplanagem e efeito *spray* (FAGUNDES, 2020).

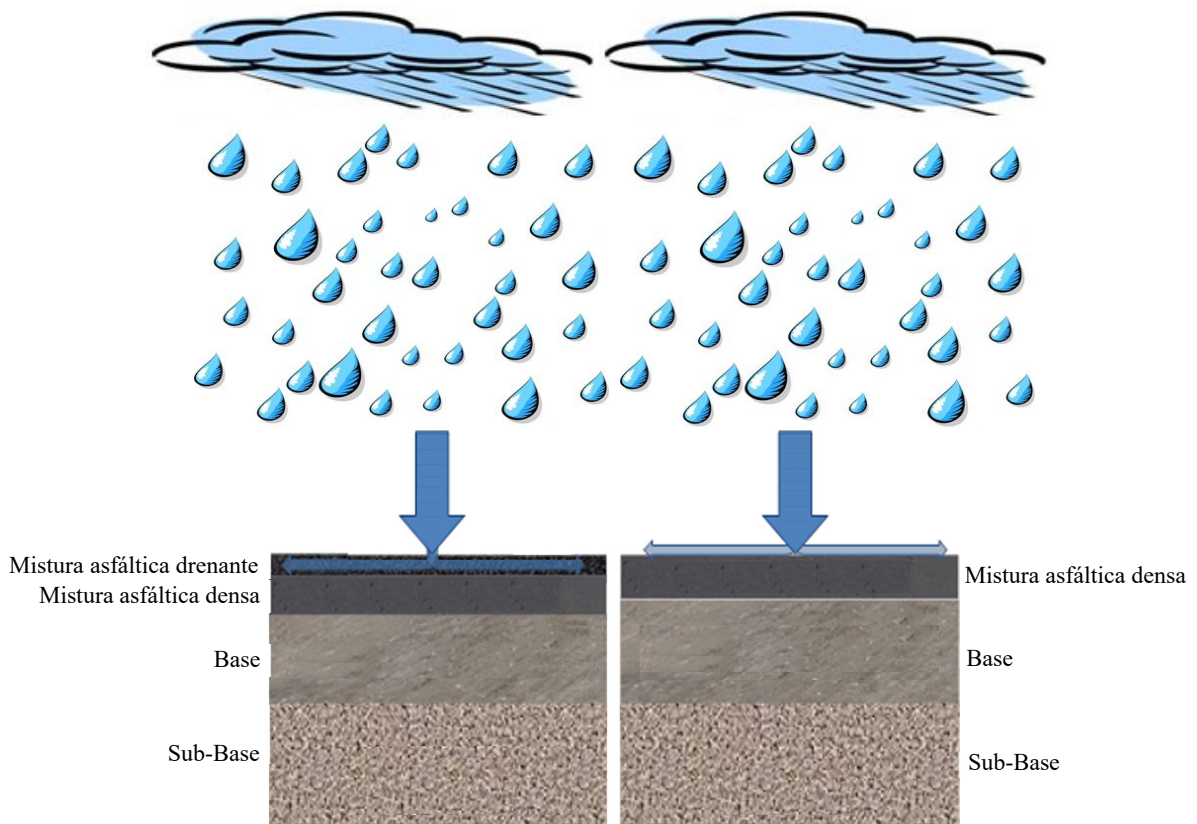
De acordo com o *Observatoire des Techniques de Chaussées* (1997), as misturas asfálticas drenantes são definidas de forma genérica como camadas de revestimento constituídas por elevado teor de vazios, com característica comunicante, que propiciam taxas de permeabilidade suficientes para permitir a percolação da água ao longo de sua estrutura interna.

Nas estruturas de pavimento no campo, as misturas asfálticas drenantes se caracterizam por captar a água oriunda das precipitações pluviométricas, a partir do escoamento por percolação nos interstícios do arranjo granulométrico, denominados vazios comunicantes, em fluxo permeável vertical, até que alcance a interface de contato com a camada subjacente de mistura asfáltica densa. Ato contínuo, e em conjunto com a declividade transversal da plataforma de rolamento, ocorre o escoamento em fluxo permeável horizontal da água, até que seja conduzida aos dispositivos de drenagem superficiais (PUTMAN e KLINE, 2012).

No contexto das estruturas de pavimento tradicionais, água precipitada é retirada por drenabilidade, proporcionada pelos canais de escoamento formados pela rugosidade superficial da camada de revestimento (PELLIZZARI, 2013).

A Figura 3.1 ilustra o princípio destes processos de escoamento da água pluvial para ambas as soluções de pavimentação.

Figura 3.1 - Princípio do escoamento da água superficial em uma estrutura de pavimento com mistura asfáltica drenante (esquerda) em comparação às estruturas tradicionais (direita).



Fonte: Adaptado de Putman e Kline (2012).

3.2 BREVE HISTÓRICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES

Com o objetivo de solucionar problemas de aderência na área de contato pneu-pavimento em pistas molhadas, nos anos 30, os Estados Unidos iniciaram experiências em campo utilizando misturas asfálticas com graduação aberta (TAKAHASHI, 2013).

Porém, somente a partir de estudos desenvolvidos nos anos 70 por Edmund Thelem, no Franklin Institute, na Filadélfia, é que as misturas asfálticas foram concebidas como materiais de estrutura permeável, marcando o uso das misturas asfálticas drenantes, e conseqüentemente, dos pavimentos asfálticos permeáveis, como soluções redutoras de impactos ambientais. O objetivo principal da pesquisa, que contou com o apoio da *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA), era o controle de enchentes ocorridas em 1968 (VIRGILIIS, 2009).

Anos mais tarde, na década de 80, Field et al. (1982) criaram manuais práticos para projeto e construção de pavimentos asfálticos permeáveis. Atualmente, a agência reguladora *American Society for Testing and Materials* (ASTM) possui diversas normas e publicações sobre o tema, podendo-se citar a ASTM C1781 (2018) e o ASTM WK15789 (2007), respectivamente.

Durante os anos 70 e 80, na Europa, destacando-se principalmente as experiências inglesas, holandesas, francesas, belgas, e posteriormente a espanhola, e em países como Japão e África do Sul, foram construídos os primeiros trechos experimentais comportando uma camada de revestimento com aproximadamente 4,0 cm de espessura, tendo sido avaliado à época como eficaz quanto à percolação de grande parte da água superficial. A partir de então, desencadeou-se um ciclo de técnicas conceptivas que viria a ser considerado como referência na área de pavimentação (MEURER FILHO, 2001).

Na França, a partir de 1984, começaram a ser desenvolvidas e aplicadas as misturas asfálticas drenantes (OBSERVATOIRE DES TECHNIQUES DE CHAUSSÉES, 1997), resultando na publicação da normativa francesa AFNOR NF P 98-134 (1991), em que as formulações receberam o nome de *Béton Bitumineux Drainant* (BBDr).

No Brasil, as primeiras experiências com misturas asfálticas drenantes começaram com aplicação em aeroportos no ano de 1983, em Confins - Belo Horizonte/MG, utilizando um ligante betuminoso convencional. Em 1987, aplicou-se a mesma solução no aeroporto Santos Dumont, no Rio de Janeiro (OLIVEIRA, 2003).

Em 1992, no Estado de São Paulo, foram executados trechos experimentais com misturas asfálticas drenantes na Rodovia dos Bandeirantes – entre o km 76 e km 76 + 250 m, pista norte, sentido capital-interior, na faixa de tráfego lento –, tendo como base os estudos previamente desenvolvidos na Bélgica. Em 1997, na via marginal da Rodovia Presidente Dutra (BR-116), próximo à cidade de Guarulhos, foi executada uma camada de revestimento com mistura asfáltica drenante com espessura de 4,0 cm e 18% de teor de vazios inicial (PORTO, 1999).

Oliveira (2003) cita ainda a primeira experiência com misturas asfálticas drenantes na região Nordeste, no ano 2000, no Estado da Bahia, por ocasião das obras de duplicação da Estrada do Côco (BA-099). A execução de 33,5 km de revestimento asfáltico drenante ocorreu com aplicação de CAP-20 modificado com 4,0% de polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS).

No Estado de Santa Catarina, também no ano 2000, foi executado um trecho experimental de 600 m na BR-101, sentido sul, entre as cidades de Garuva e Joinville, com 3,0 cm de espessura, em que a finalidade principal foi melhorar a segurança no trânsito proporcionando à superfície um coeficiente de atrito mais elevado. Em 2011, entre os municípios de São José do Cerrito e Vargem Grande, na região serrana, foi executado um trecho com 53 km de extensão (GUIMARÃES, 2012).

Em 2014, no Estado do Rio Grande do Sul, na BR-158, mais especificamente entre as cidades de Boa Vista das Missões e Palmeira das Missões, foram executados dois trechos comportando revestimentos com misturas asfálticas drenantes, a um teor de vazios inicial de 20,6% e dosagem de ligante betuminoso em 4,0%, assentes sobre uma camada de mistura asfáltica densa (ALVES et al., 2018).

3.3 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS DRENANTES

Das experiências americanas e europeias descritas no tópico 3.2, surgiram duas tendências conceituais de forma geral, correspondentes às soluções para aplicação de misturas asfálticas drenantes no campo:

- Tendência americana (FHWA-HIF-15-009, 2015):

Recebem a denominação de camada asfáltica porosa (*porous asphalt layer*), também conhecidas como camada porosa de atrito (CPA) no Brasil. Possuem espessuras que podem variar de 2,5 cm (1”) a 10,0 cm (4”), com maior atenção às propriedades de aderência pneu-pavimento e menor às de permeabilidade e acústicas. O ganho de aderência se dá pelo conjunto permeabilidade e drenabilidade superficial, esta última pela formação de uma macrotextura elevada, sendo a característica mais predominante.

A curva granulométrica apresenta diâmetros máximo e nominal máximo recomendados de 12,5 mm e 9,5 mm, respectivamente, com descontinuidade entre as peneiras de abertura 2,0 mm e 7,0 mm (2/7 mm), em geral. O teor de vazios varia tipicamente entre 16% e 22%.

O teor de ligante betuminoso é variável, mas para diâmetros nominais máximos de 9,5 mm, por exemplo, recomenda-se dosagens de partida com 5,75% (HANSEN, 2008).

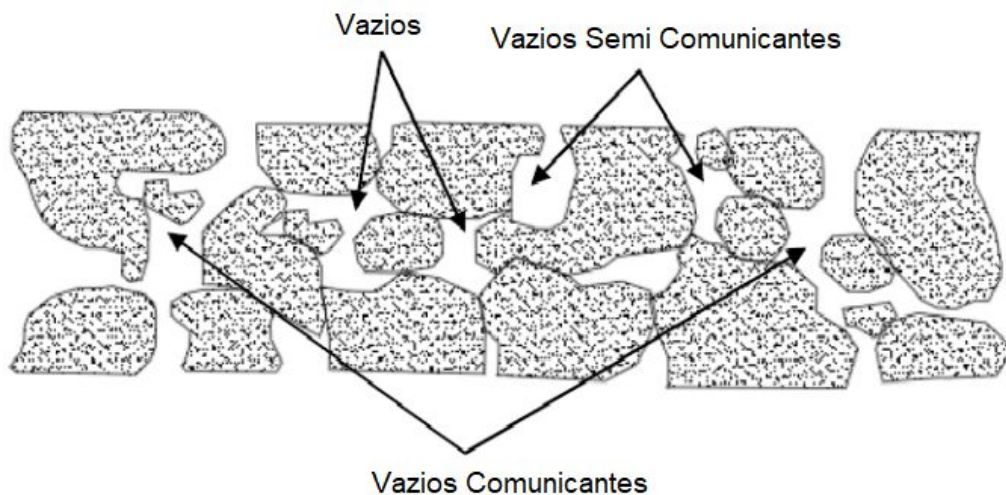
- Tendência europeia/francesa (MANUEL LPC, 2007):

Recebem a denominação de concretos asfálticos drenantes (*Béton Bitumineux Drainant* - BBDr). Possuem espessura geralmente variando de 3,0 cm a 5,0 cm e teor de vazios mínimo de 14% e 20% para as classes 1 e 2, respectivamente. A finalidade principal é escoar por permeabilidade a água superficial precipitada sobre as estruturas de pavimento. Na sua formulação, busca-se maximizar o teor de vazios comunicantes a partir das discontinuidades aportadas nas composições granulométricas, que variam geralmente entre as peneiras de abertura 2,0 mm e 4,0 mm (2/4 mm) e 4,0 mm e 6,0 mm (4/6 mm). Os teores de ligante betuminoso usualmente aplicados compreendem dosagens de 4,0% a 5,0%.

É importante esclarecer que em alguns países, como no Brasil, é comum denominar misturas asfálticas com características permeáveis/drenantes de camada porosa de atrito (CPA). Entretanto, esta nomenclatura não é adequada, pois todas as misturas asfálticas em maior ou menor teor possuem vazios em sua constituição estrutural. Logo, dispõem intrinsecamente de porosidade.

Entretanto, não somente o teor de vazios absoluto é suficiente para propiciar uma permeabilidade adequada, mas a presença de vazios comunicantes é decisiva para que se atinjam níveis drenantes desejados. A Figura 3.2 ilustra os diferentes tipos de vazios existentes na estrutura interna de uma mistura asfáltica, sendo os vazios comunicantes responsáveis diretos pela ocorrência da permeabilidade.

Figura 3.2 - Tipos de vazios presentes na estrutura interna das misturas asfálticas.



Fonte: Adaptado de Nascimento (2012).

Conforme pode ser observado na Figura 3.2, os vazios presentes na mistura asfáltica assumem geometria e disposição aleatórias. Logo, a permeabilidade no campo se dá basicamente em dois sentidos: vertical e horizontal, conforme demonstrado na Figura 3.1. Portanto, fica evidente que mesmo uma dada mistura asfáltica possuindo elevado teor de vazios, poderá não necessariamente ter característica drenante.

No âmbito desta pesquisa, tem-se que as misturas asfálticas drenantes do tipo BBDr, concebidas de acordo com os requisitos normativos franceses, são dispostas em duas classes: 1 e 2. Para ambas as classes mencionadas, há possibilidade de serem projetadas curvas granulométricas com diâmetros máximos de 10,0 mm e de 6,3 mm (AFNOR NF EN 13108-7, 2006).

Os percentuais de frações finas passantes à menor abertura de peneira da série variam de 4,0% a 6,0% e de 2,0% a 6,0%, para as formulações de classe 1 e 2, respectivamente. As descontinuidades granulométricas variam nos intervalos de 2/4 mm e 4/6 mm. A Tabela 3.1 apresenta as proporções percentuais tomadas como pontos de controle para a formulação de curvas granulométricas de misturas asfálticas drenantes (MANUEL LPC, 2007).

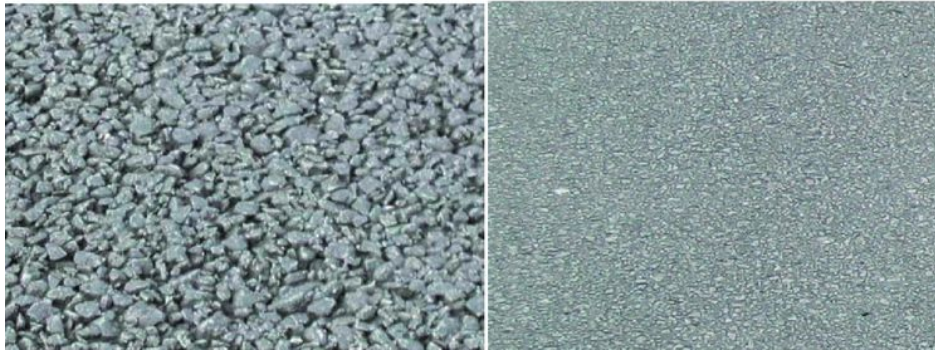
Tabela 3.1 - Pontos de controle das proporções granulométricas para as misturas asfálticas drenantes BBDr.

Peneiras (mm)	Graduação 0/6 mm (%)		Graduação 0/10 mm (%)	
	Classe 1	Classe 2	Classe 1	Classe 2
10,0	90-100	90-100	90-100	90-100
6,3	-	-	15-35	15-22
4,0	15-35	15-22	-	-
2,0	10-15	5-12	10-15	5-12
0,25	6-12	10-20	6-12	10-20
0,063	4-6	2-6	4-6	2-6

Fonte: Manuel LPC (2007).

A aplicação de descontinuidades na composição granulométrica das misturas asfálticas drenantes resulta em um material com elevado teor de vazios em sua estrutura interna, bem como em uma macrotextura com expressiva rugosidade superficial, conforme pode ser observado na Figura 3.3, em comparação com a superfície de uma formulação densa convencional.

Figura 3.3 - Aspecto macrottextural de uma mistura asfáltica drenante (esquerda) e densa (direita).



Fonte: Ohiduzzaman et al (2016).

Considerando principalmente a esbeltez das espessuras utilizadas e o elevado teor de vazios presente na composição granulométrica, tem-se que as misturas asfálticas drenantes não desempenham função estrutural quando aplicadas nas estruturas de pavimento no campo. Por esta razão, não são consideradas nas rotinas numéricas de dimensionamento pela metodologia francesa (GUIDE TECHNIQUE, 1994).

Portanto, são aplicadas para o atendimento de características funcionais durante a vida útil das estruturas de pavimento, atendendo principalmente o binômio conforto e segurança dos usuários, podendo-se destacar (ELIZONDO-MARTÍNEZ, 2020; FAGUNDES 2020; XIE et al., 2019; GUIMARÃES, 2012; KNABBEN, 2012; ASTRANA JÚNIOR, 2006; SANDBERG e EJSMONT, 2002; MOMM, 1998):

- escoamento superficial da água por percolação (Figura 3.1), evitando a ocorrência de fenômenos como a hidroplanagem e viscoplanagem (Figura 3.4 a), efeito *spray* (Figura 3.4 b) e espelhamento ou reflexão (Figura 3.4 c), contribuindo para manutenção de boa aderência pneu-pavimento em condições de pista molhada, bem como de visibilidade do usuário;

Figura 3.4 - Fenômenos de (a) hidroplanagem e viscoplanagem, (b) efeito *spray* e (c) espelhamento ou reflexão.



Fonte: Adaptado de Strata Engenharia (2020).

(a)



Fonte: Kiggundu e Roberts (1988).

(b)



Fonte: CanStock Photo (2021).

(c)

- Rugosidade superficial elevada (Figura 3.3), garantindo boa aderência na área de contato pneu-pavimento, a partir da elevação do coeficiente de atrito;
- Resistência ao afundamento na trilha de roda (Figura 3.5), evitando a formação de desníveis superficiais na plataforma de rolamento, bem como a formação de lâminas d'água;

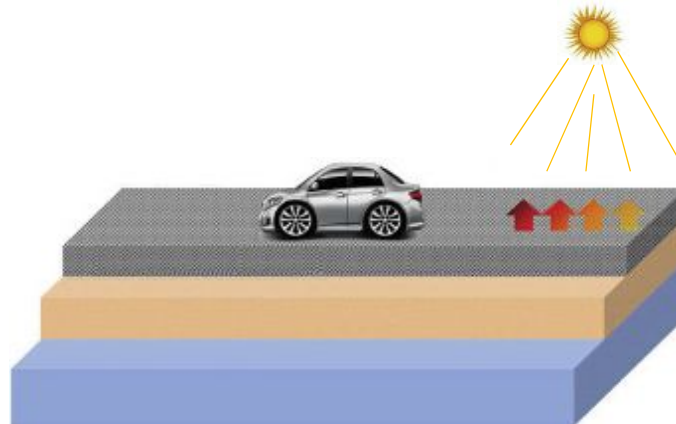
Figura 3.5 - Afundamento na trilha de roda.



Fonte: WAPA (2010).

- Proteção das camadas estruturais betuminosas subjacentes da ação direta das intempéries, principalmente a radiação solar (Figura 3.6), propiciando maior tempo de vida útil e menor custo com manutenção dos pavimentos;

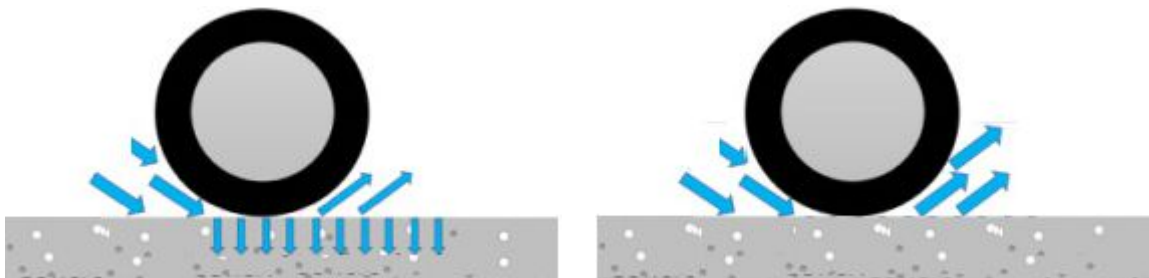
Figura 3.6 - Proteção das camadas estruturais betuminosas subjacentes da radiação solar.



Fonte: Adaptado de Xie et al. (2019).

- Redução de emissão de ruído (Figura 3.7), devido à maior absorção da pressão de ar (*air pumping*) e de água (*water pumping*) gerada no contato pneu-pavimento pelos vazios estruturais da mistura asfáltica, em condições secas e molhadas, respectivamente, atenuando a ocorrência de fenômenos como ressonância acústica, efeito corneta, vibração da estrutura pneumática, hidropressão intersticial e desagregação, por exemplo.

Figura 3.7 - Absorção sonora das misturas asfálticas drenantes (esquerda), em relação às misturas asfálticas densas convencionais (direita).



Fonte: Adaptado de Elizondo-Martínez et al. (2020).

Porém, também devem ser tomados cuidados em relação às formulações de misturas asfálticas drenantes, pois apresentam suscetibilidades em algumas condições observadas em campo, como a desagregação das frações granulares, envelhecimento, colmatagem e aplicação de esforços tangenciais. Caso estes aspectos não sejam devidamente considerados durante os

processos de concepção em projeto e aplicação no campo, acarretarão em significativa redução da vida útil deste tipo de solução (MEURER FILHO, 2001).

A desagregação superficial (*stripping*) é uma das principais suscetibilidades das misturas asfálticas drenantes, em razão principalmente do contato com as bandas de rodagem dos pneumáticos ocorrer majoritariamente sobre as irregularidades superficiais dos granulares de maior dimensão dispostos na camada em campo. Com isso, diminui-se a superfície de contato pneu-pavimento, aumentando o esforço de arrancamento gerado pela solicitação dinâmica dos veículos. Por esta razão, recomenda-se evitar a utilização de misturas asfálticas drenantes em locais sujeitos a grandes esforços tangenciais como zonas de frenagem, rampas e contra-rampas acentuadas, rotatórias, curvas com pequenos raios e sobre camadas de suporte com fissuras (LIU et al., 2020).

Além disso, devido à constante percolação da água pelos interstícios estruturais da mistura asfáltica drenante, tem-se que a tensão superficial do ligante betuminoso e dos granulares, bem como a tensão interfacial do conjunto granular-ligante, são inferiores à tensão superficial da água, contribuindo para a gradativa remoção da película betuminosa que envolve as referidas partículas, causando a desagregação do material (HEFER et al., 2005; CASTAÑEDA, 2004). Maiores detalhes sobre este assunto serão abordados no capítulo 4.

O envelhecimento do ligante betuminoso em misturas asfálticas drenantes se dá de forma mais acelerada que em misturas densas, em razão da elevada quantidade de vazios (Figura 3.3) propiciar maior circulação de oxigênio e penetração de radiação solar na estrutura interna do material (MOTOMATSU et al., 2004).

Tais condições tornam de maior relevância os fatores que contribuem para melhor adesão e resistência do conjunto granular-ligante.

Neste contexto, o uso de ligantes modificados tem ocorrido de forma intensa na formulação de misturas asfálticas drenantes, pois conferem maior robustez e elasticidade à película betuminosa que envolve os granulares, quando comparados às matrizes convencionais. Assim, garante-se maior resistência aos fenômenos de desagregação do conjunto granular-ligante, devido proporcionar pontes de ligação mais fortes no contato entre as partículas (ZHANG et al., 2020; VIRGILIIS, 2009; GONÇALVES et al., 2000; VERHAEGHE et al., 1994).

As modificações realizadas por borracha moída de pneus e por polímeros elastoméricos, como o SBS, EVA, SBR, por exemplo, têm se destacado neste âmbito, pois possuem agentes antioxidantes em suas composições, que auxiliam no retardo do

envelhecimento precoce dos ligantes betuminosos pela incidência da radiação solar (LYU et al., 2021; DAN et al., 2020).

Para citar alguns exemplos, o negro de fumo desempenha esta função na composição da borracha, enquanto nas formulações com SBS, tem-se verificado a interação deste polímero com nanocompostos derivados de vermiculita expandida orgânica (OEVTM), sílica (SiO_2), titânio (TiO_2) e óxido de zinco (ZnO), com inserções da ordem de 1,0% a 2,0%. A nanocomposição multidimensional 1,0% OEVTM + 2,0% TiO_2 tem apresentado os melhores resultados neste sentido (CONG et al., 2021; WU et al., 2020).

Outro fator principal na perda de funcionalidade das misturas asfálticas drenantes, notadamente a permeabilidade, é a colmatação, resultante do preenchimento gradativo dos vazios comunicantes por materiais sólidos orgânicos e inorgânicos transportadas pela ação dos agentes intempéricos, como a chuva e o vento, bem como pelo tráfego. Acompanhamentos permanentes devem ser realizados em campo, a fim de controlar os níveis de condutividade hidráulica (PARIAT, 1992).

Para evitar a redução importante da permeabilidade em campo, soluções como jateamento de água à baixa pressão, aspiração de partículas e limpeza periódica da superfície local com vassouras mecânicas, são recomendáveis para manter a funcionalidade da camada drenante (VIRGILIIS, 2009).

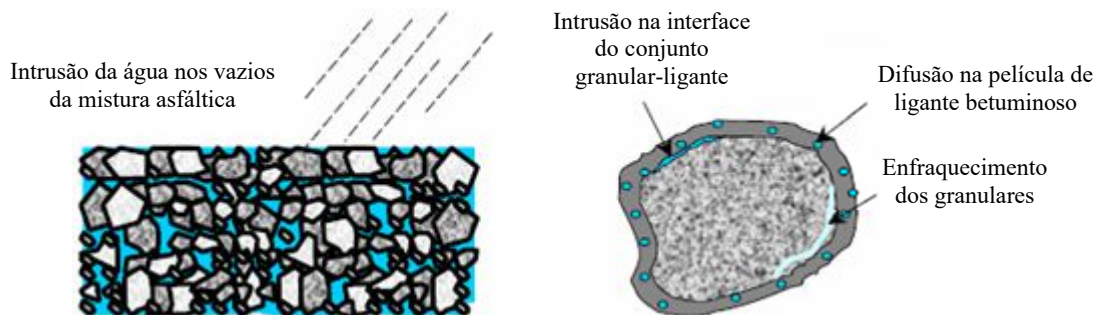
CAPÍTULO 4

AÇÃO DA ÁGUA SOBRE AS MISTURAS ASFÁLTICAS

4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A água que penetra nos vazios das misturas asfálticas modifica o equilíbrio das forças existentes e pode agir de diferentes maneiras (CASTAÑEDA, 2004; TERREL e AI-SWAILMI, 1994): atuando sobre a película de ligante betuminoso que recobre a superfície do granular, ao ponto que a resistência coesiva da mistura asfáltica se degrada pela intrusão da água na interface granular-ligante; por difusão através da película de ligante betuminoso sob forma de emulsão inversa, a partir da formação de gotículas de água no interior da referida película, enfraquecendo a coesão do ligante betuminoso; e no enfraquecimento da resistência coesiva do granular (Figura 4.1).

Figura 4.1 - Formas de ação da água sob o aspecto deletério nas misturas asfálticas.



Fonte: Adaptado de Castañeda (2004).

A sensibilidade à ação água do conjunto granular-ligante é influenciada pelas características físico-químicas dos seus componentes. As principais características dos granulares que têm sido identificadas na literatura incluem a natureza, a textura superficial, a porosidade e, no caso dos ligantes betuminosos, a composição química e a viscosidade (ZHANG et al., 2020; WANG et al., 2020; MCNALLY, 2011; ALIMANI, 1987).

Para Lottman (1978), os principais mecanismos de ação da água sobre os revestimentos betuminosos, no campo, que acarretam a perda adesiva do conjunto granular-ligante, são causados pela dilatação e contração diferenciais dos materiais, aliadas à pressão de água (*water pumping*) provocada pela passagem do tráfego e ciclos de gelo-degelo.

A água estabelece contato com as estruturas de pavimento a partir de diversas formas, como: precipitação pluviométrica, capilaridade e vapor, por exemplo. O efeito deletério oriundo desta ação é um dos principais fatores responsáveis pela redução da vida útil de pavimentos de concreto asfáltico (FERREIRA, 2013; KENNEDY et al., 1983).

No processo de concepção e formulação das misturas asfálticas, é muito importante que sejam realizadas verificações laboratoriais acerca da suscetibilidade destes materiais à ação deletéria da água. Do contrário, defeitos como desagregação, buracos, afundamentos localizados, deformações permanentes, entre outros, podem surgir de forma precoce na estrutura do pavimento, elevando os custos com manutenção e reabilitação em curto período (BRONDANI, 2019).

4.2 INTERAÇÃO DO CONJUNTO GRANULAR-LIGANTE

A interação do conjunto granular-ligante é um fenômeno que vem sendo estudado há muitas décadas, sendo fortemente influenciado pela reatividade química de seus componentes, presença de materiais deletérios, comportamento termodinâmico e composição mineralógica das matrizes (MASTORAS et al., 2021; TAJDINI et al., 2014; SAAL, 1933; WINTERKORN, 1936).

De acordo com Atkins e Jones (2018), a adesão é um fenômeno complexo e muito difícil de ser avaliado, pois ocorre no âmbito das forças intermoleculares, em nanoescala, a partir da atração entre superfícies, unindo corpos de naturezas distintas. Pereira (2009) refere-se ao mesmo fenômeno como a quantidade de energia necessária para romper a concentração molecular entre o ligante betuminoso e as partículas granulares.

Hicks (1991) resumiu os fatores mais importantes que, em sua visão, influenciam na adesividade do conjunto granular-ligante, considerando o dano induzido pela umidade (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Fatores que interferem nas características de adesividade do conjunto granular-ligante.

Fator	Característica Desejável
Granulares	
Macro e microtextura	Subangular e rugosa
Porosidade	Depende do tamanho do poro
Mineralogia	Agregados básicos são mais resistentes, hidrofóbicos
Cobertura do agregado por pó	Limpo
Umidade superficial	Seco
Composição química superficial	Capaz de formar pontes de Hidrogênio
Fíler mineral	Aumenta a viscosidade do ligante e forma os mástiques betuminosos
Ligante betuminoso	
Viscosidade	Elevada
Química	Concentração de Nitrogênio e fenóis
Filme (película)	Espessa
Mástique	Resistente à dilatação e contração
Tipo de mistura asfáltica	
Vazios	Muito baixo ou muito alto
Granulometria	Muito aberta ou muito densa
Teor de ligante	Depende da curva granulométrica
Condições Climáticas	
Temperatura	Quente
Precipitações durante a construção	Nenhuma
Precipitações após construção	Mínima
Ciclos de gelo/degelo	Mínimo
Tráfego	
Volume de tráfego	Baixo tráfego: diminuição de efeitos como <i>water pumping</i>

Fonte: Adaptado de Hicks (1991).

Para Hunter (2015), a Teoria do deslocamento refere-se ao equilíbrio termodinâmico do conjunto granular-ligante em três momentos, assim definidos:

- Se a água for introduzida na interface do conjunto, tem-se que sendo a tensão superficial do ligante betuminoso menor que a da água, a película envoltora formada se retrairá ao longo da superfície do granular;
- O desprendimento ocorre quando um fino filme de água ou outro material deletério separa a película de ligante do granular, sem que necessariamente seja percebida alguma ruptura na superfície da referida película;
- Embora a película de ligante encapsule completamente a partícula granular, não existe vínculo adesivo, e o ligante pode ser facilmente removido de sua superfície. Esse processo pode ser reversível, ou seja, se a água for removida do contato direto

com o conjunto, o ligante betuminoso poderá voltar a aderir ao granular, mas esta condição não é evidente.

Entretanto, MAILLARD (2005) ao analisar superfícies de falha das misturas asfálticas, a partir de amostras *in situ* e em testes de laboratório, demonstrou que fissuras também se desenvolvem na película de ligante betuminoso alojada entre partículas granulares.

A mudança de consistência dos ligantes betuminosos é o fator que viabiliza as operações de mistura com as partículas granulares, sendo controlado a partir de faixas de viscosidade da matriz betuminosa a uma dada temperatura, assegurando que apresente uma fluidez capaz de espalhar-se sobre a superfície dos granulares e, havendo afinidade físico-química, desenvolva adesão (VALENTIN et al., 2021).

O processo de adesão do conjunto granular-ligante distingue-se em duas etapas: a primeira durante o processo de mistura, denominada de adesividade ativa, sendo aquela em que o ligante betuminoso molha e cobre a superfície do granular formando uma película. A segunda, chamada de adesividade passiva, é de grande importância na duração da vida útil do material e corresponde à resistência ao descolamento da película formada durante a etapa de adesividade ativa, quando a água associada às cargas aplicadas pelo tráfego interferem na interface do conjunto (MALLICK et al., 2003).

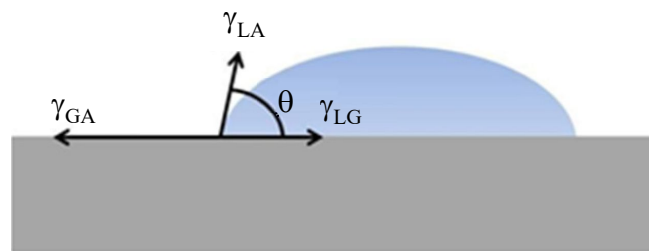
No âmbito da adesividade ativa, tem-se que durante o processo de produção das misturas asfálticas, o ligante betuminoso é derramado sobre a superfície das partículas granulares. Entretanto, devido à irregularidade superficial das frações mencionadas, não ocorre uma molhagem completa até que se atinja uma conformação proporcionada pelo estado de equilíbrio fluido-sólido, definido por Young em 1805, correspondente ao ângulo de contato das forças envolvidas no processo. Estas forças são denominadas tensões de superfície (DI MUNDO et al., 2020; FURLAN, 2006; KINLOCH, 1990), definidas pela Equação 4.1 e ilustradas na Figura 4.2.

$$\gamma_{LG} - \gamma_{GA} + \gamma_{LA} \cdot \cos\theta = 0 \quad (4.1)$$

Onde:

- γ_{LG} : tensão interfacial fluido-granular;
- γ_{GA} : tensão superficial do granular;
- γ_{LA} : tensão superficial do fluido;
- θ : ângulo formado entre os vetores γ_{LG} e γ_{LA} .

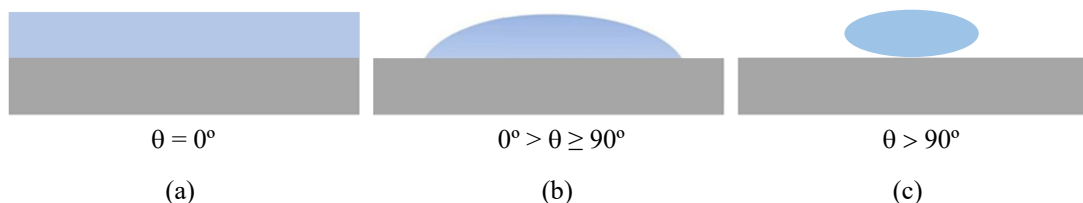
Figura 4.2 - Tensões de superfície na interação do conjunto granular-ligante.



Fonte: Adaptado de Di Mundo et al. (2020).

A tensão superficial é o conjunto de forças moleculares que permite ao fluido ou ao sólido conservar seu estado de coesão e a tensão interfacial é a força resultante do equilíbrio de dois corpos existentes e que geram interface. Esta tensão determina a força de adesão. Quando o ângulo de contato é superior a 90° , o fluido não molha o sólido. Por outro lado, um ângulo de 0° se forma quando o fluido molha completamente a superfície do sólido (Figura 4.3). A molhagem ocorre quando existem fracas tensões de superfície no sólido e no fluido (γ_{GA} e γ_{LA}) e uma tensão interfacial (γ_{LG}) relativamente elevada do conjunto (DI MUNDO et al., 2020; HEFER et al., 2006).

Figura 4.3 - Ângulos de contato formados entre as tensões de superfície: (a) molhagem completa, (b) molhagem parcial e (c) nenhuma molhagem.

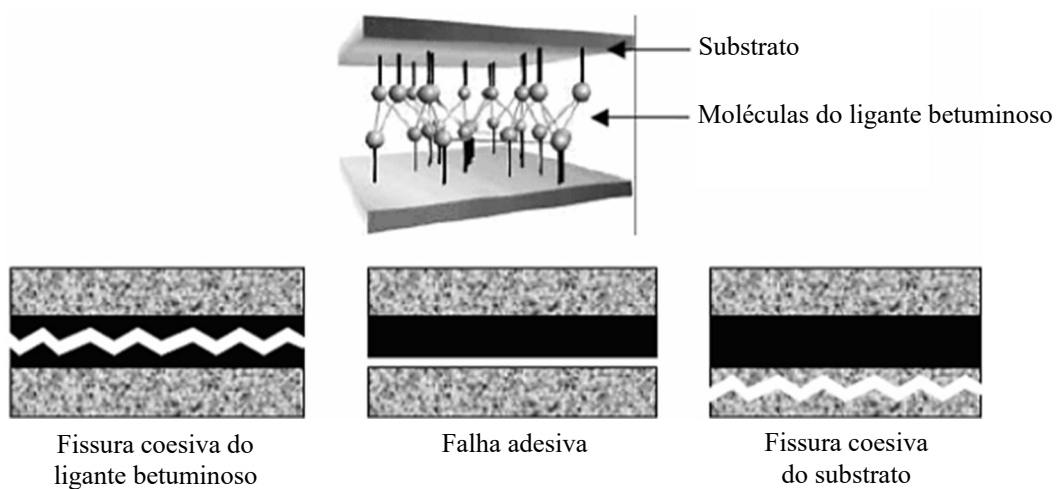


Fonte: Adaptado de Di Mundo et al. (2020).

Quanto à adesividade passiva, pode ser definida como a força de ligação existente na interface entre dois materiais na presença da água, que pode ser avaliada efetuando um teste de

adesividade. Trata-se, portanto, de uma verificação realizada com as misturas asfálticas já produzidas. Neste contexto, a superfície de falha pode se apresentar de três formas (Figura 4.4): por coesão do ligante betuminoso, quando a fissura ocorre nas moléculas que o constitui; por adesão, quando a separação se produz na interface entre o substrato e o ligante betuminoso; e por coesão do substrato, quando a fissura se produz dentro das moléculas do substrato (BARRA, 2009; CASTAÑEDA, 2004).

Figura 4.4 - Falhas das superfícies adesivas.



Fonte: Adaptado de Castañeda (2004).

Logo, as diferentes forças que intervêm no processo de adesão entre o granular e o ligante betuminoso são denominadas de energia interfacial (com dependência direta da magnitude das tensões superficiais de cada componente do conjunto), ancoragem mecânica e reação química (CURTIS et al., 1993).

A energia interfacial é uma medida direta das forças intermoleculares que aparecem quando dois materiais, como o granular e o ligante betuminoso, são postos em contato. Estas forças intermoleculares são atribuídas a diferentes efeitos (CAO et al., 2021): forças de dispersão ou de London, resultantes do movimento interno dos elétrons dentro das moléculas e das forças polares, que são apresentadas pelas moléculas possuidoras de pólos elétricos permanentes ou indutivos.

Diversas pesquisas procuram explicar a interação das tensões de superfície envolvidas na ocorrência dos processos de adesão do conjunto granular-ligante, destacando-se as reações

ácido-base de Lewis, forças de Lifshitz-Van de Waals e Teoria de Gibbs sobre a superfície de energia livre por unidade de massa das frações granulares (XU et al., 2021; YALGHOUZAGHAJ et al., 2021; JI e ARSON, 2020; SINGH et al., 2018; TAN e GUO, 2013).

4.3 AÇÃO DELETÉRIA DA ÁGUA NAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Conforme abordado no tópico 4.2, um dos fatores determinantes para o desenvolvimento da adesão no conjunto granular-ligante é a interação entre os materiais, proporcionada pela composição mineralógica e cargas eletrostáticas de suas superfícies. Desta forma, as matrizes granulares que dispõem de boa adesividade na presença da água são denominadas hidrofóbicas e constituem as melhores alternativas do ponto de vista químico para utilização em misturas asfálticas (KUCHIISHI et al., 2019; MCHALE et al., 2004).

Neste contexto, a classificação dos materiais granulares como ácidos ou básicos, sobretudo em relação ao teor de sílica (SiO_2) presente em suas composições mineralógicas, tem sido bastante explorada. Como resultado, tem sido verificado que um menor teor de sílica na constituição mineral do granular torna-o mais apto a desenvolver adesividade com o ligante betuminoso. Exemplos deste tipo de material são o calcário, basalto e o diabásio, considerados básicos ou máficos (CHOUDARY et al., 2020; TAHERKHANI e TAJDINI, 2019).

Por outro lado, granulares com maiores teores de sílica (SiO_2) não desenvolvem boa adesividade com o ligante betuminoso, além de estabelecerem afinidade à presença da água, razão pela qual são denominados hidrofílicos. Nestas condições encontram-se o granito e o gnaisse, por exemplo, tomados como ácidos ou félsicos (CLARA, 2020; SIROMA, 2018).

Partículas granulares com macrotextura arredondada e microtextura lisa também são prejudiciais à adesão física com o ligante betuminoso, em razão da pouca ancoragem mecânica que propiciam em suas áreas de contato, prejudicando o equilíbrio termodinâmico das tensões de superfície (JI et al., 2020; MAZUMDER, 2018; PAN et al., 2006).

Em geral, os materiais granulares em condição de estoque no campo estão dispostos a céu aberto, logo, não completamente secos e contaminados com poeira. Estas condições causam efeitos prejudiciais às misturas asfálticas, pois quantidades excessivas de pó sobre a superfície das partículas granulares tendem a tornar menos efetivo o processo de molhagem do ligante betuminoso durante a usinagem. A umidade dificulta o processo de secagem das partículas no tambor secador das usinas e, conseqüentemente, a adesão do conjunto granular-ligante (GUNKEL, 1995).

Reis (2012) corrobora sobre os prejuízos causados à aderência do conjunto granular-ligante, no que diz respeito à presença de umidade residual nas partículas granulares após a passagem pelo tambor secador das usinas. Ressalta ainda que granulares com elevada porosidade devem ser evitados na composição das misturas asfálticas.

O ligante betuminoso também pode influenciar na suscetibilidade à umidade das misturas asfálticas. Entre as principais propriedades que influenciam nesta condição podem ser citadas: espessura da película envoltora dos granulares, viscosidade, composição química, grau de envelhecimento e a tensão superficial (CRAVO, 2016).

A vulnerabilidade das misturas asfálticas ao dano por umidade vem sendo estudada a partir do desenvolvimento de pesquisas que buscam identificar esta suscetibilidade, auxiliando na proposição de composições granulométricas, bem como na indicação do uso de aditivos e adições melhoradores de adesividade (BOEIRA, 2014; MOURA, 2010; BOCK et al., 2009; LITTLE et al., 2006).

Hunter e Ksaibati (2002) ao avaliarem comparativamente misturas asfálticas compostas por granulares calcários e graníticos quanto à suscetibilidade ao dano por umidade induzida, concluíram que as composições graníticas apresentaram menor resistência aos esforços de tração indireta, bem como taxas de danos por umidade mais aceleradas, ou seja, com menor número de ciclos de condicionamento, em relação às misturas compostas com granulares calcários.

Barra et al. (2012) reforçam que o conjunto granular-ligante possui uma tensão interfacial com menor intensidade de interação elétrica quando comparada à tensão superficial da água, o que dificulta a adesão dos elementos em sua presença. Como contraponto a esta condição, Barra et al. (2014) atestam a contribuição do pó calcário quando utilizado como filer na composição dos mástiques betuminosos, melhorando a tensão interfacial do sistema granular-ligante, devido à composição mineralógica majoritariamente eletropositiva do mineral calcita.

Ainda, o pó calcário ao interagir com a nafta presente no ligante betuminoso forma o composto denominado Naftanato de Cálcio, constituindo uma 'blindagem' resistente à ação da água. Portanto, hidrofóbico e favorável à condição adesiva do conjunto granular-ligante (SANTANA, 1995).

Pereira (2004) pontua que a água livre alojada no interior das misturas asfálticas, associada às cargas solicitantes continuamente aplicadas pelo tráfego, condição geradora do

efeito *water pumping* mencionado no tópico 3.3, é um dos fatores que mais ocasionam danos à estrutura do pavimento no campo, conduzindo à necessidade de intervenções com custos elevados.

Barra (2009), a partir de uma campanha experimental com misturas asfálticas densas, compreendendo ensaios de fadiga a dois pontos, com o controle do deslocamento, utilizando corpos de prova trapezoidais, de acordo com as prerrogativas normativas da metodologia francesa; verificou que amostras submetidas a processos de condicionamento por saturação e imersão direta na água, bem como por ciclagem alternada com imersão em água e secagem em estufa a 60°C, apresentaram perdas de resistência à fadiga de até 3,6% e 25,4%, respectivamente.

Arambula et al. (2007) estudaram a influência da distribuição e conectividade dos vazios na suscetibilidade ao dano por umidade em misturas asfálticas, a partir de ensaios de fadiga à tração por compressão diametral e tomografia por Raio-X, utilizando como parâmetro de análise a taxa de crescimento do dano, confrontando amostras condicionadas e não condicionadas submetidas a 10^3 ciclos de carregamento, contendo o mesmo teor de vazios ($7,0\% \pm 0,4\%$).

Concluiu-se a partir das imagens analisadas que a distribuição dos vazios nas misturas asfálticas possui influência decisiva sobre o dano por umidade induzida, pois menor foi a resistência mecânica das amostras que apresentaram maior concentração de vazios na região superficial, facilitando a entrada da água no interior do material, em relação às amostras que dispunham de uma distribuição uniforme em toda a sua estrutura.

Yang et al. (2019), em um mesmo contexto de análise por imagem tomográfica computadorizada de misturas asfálticas drenantes, concluíram haver forte correlação da morfologia estrutural dos vazios formados com propriedades como resistência à desagregação, permeabilidade e redução de ruído.

Shirini e Imaninasab (2016) avaliaram formulações de misturas asfálticas drenantes quanto à resistência ao afundamento na trilha de roda na presença de água a 50°C, a partir do ensaio Hamburgo. Para tanto, utilizaram a mesma curva granulométrica, porém, variando as matrizes betuminosas, a saber: pura, modificadas com borracha moída de pneus e, por polímero SBS. A pesquisa concluiu que, apesar da diminuição da taxa de permeabilidade, devido à elevada viscosidade das matrizes betuminosas modificadas, apresentaram afundamentos até 25% menores que na condição convencional.

Neste contexto, tem-se que diversas pesquisas corroboram a eficiência de matrizes betuminosas modificadas, especialmente pelo polímero SBS, no que diz respeito a maior resistência à deformação permanente de misturas asfálticas drenantes submetidas à ação da água no ensaio Hamburgo, quando comparadas às composições de referência sem modificação (PAKHOLAK, 2021; HUANG et al., 2021; ZHANG et al., 2021; ZIARI et al., 2015).

Porém, Wang et al. (2018) chamam atenção ao simularem ciclos iniciais, finais e contínuos de precipitação pluviométrica sobre misturas asfálticas drenantes, em ensaios de deformação permanente com variação de temperatura. Após as análises efetuadas, verificaram que o dano por umidade evolui de forma acelerada com o aumento da temperatura, em razão do crescimento progressivo da fluidez do ligante betuminoso, conduzindo ao afundamento na trilha de roda mais precocemente.

CAPÍTULO 5

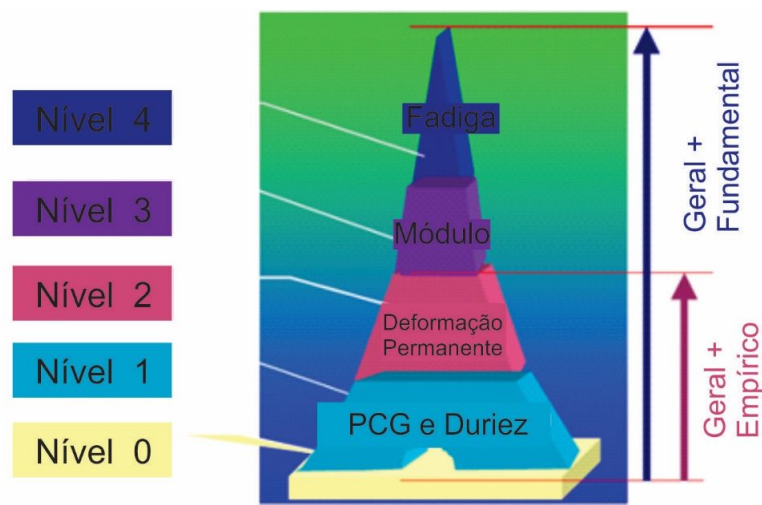
MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentadas as características dos materiais utilizados na formulação das misturas asfálticas drenantes, bem como os princípios técnico-científicos dos ensaios laboratoriais utilizados durante a campanha experimental.

5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE A METODOLOGIA FRANCESA DE FORMULAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS

De acordo com o MANUEL LPC (2007), a metodologia francesa para formulação de misturas asfálticas é fundamentada em uma sequência de cinco níveis classificatórios e eliminatórios compostos por diferentes testes, com o objetivo avaliar o comportamento dos materiais submetidos a distintas condições de condicionamento e sollicitação. Para que uma dada formulação seja considerada apta à aplicação em campo, deverá ser avaliada em cada um dos níveis correspondentes a sua característica de concepção e finalidade na estrutura do pavimento que comporá. A Figura 5.1 ilustra a sequência dos níveis de avaliação previstos pela metodologia francesa.

Figura 5.1 - Níveis de avaliação da metodologia francesa para a formulação de misturas asfálticas.



Fonte: Adaptado de MANUEL LPC (2007).

O nível 0 se caracteriza pelo estudo das propriedades dos materiais, compreendendo a caracterização dos insumos necessários à formulação das misturas asfálticas. Nesse nível são também definidos o tipo e a classe da mistura asfáltica que se pretende formular, sendo estabelecidos a composição granulométrica, o tipo e os teores de ligante betuminoso, e eventuais aditivos e adições que serão utilizados.

O nível 1 verifica a habilidade de compactação das misturas asfálticas com o uso da Prensa de Compactação Giratória (PCG) e a resistência à ação da água no ensaio de Duriez a 18°C.

No nível 2 é avaliada a resistência ao fenômeno da deformação permanente, caracterizada pelo afundamento gerado na trilha de roda das misturas asfálticas.

Os níveis 3 e 4 determinam o módulo de rigidez complexo e a resistência à fadiga das misturas asfálticas, respectivamente, sob condições dinâmicas de solicitação no domínio frequencial, com o controle do deslocamento, em modo contínuo, e geração de sinal senoidal de aplicação da força e do deslocamento resultante.

É importante esclarecer que os níveis 0 (correspondente à caracterização dos materiais), 1 e 2, considerados empíricos, apenas são colocados neste âmbito de classificação por avaliarem fenômenos de natureza caótica, como: o desenvolvimento contínuo do afundamento na trilha de roda, a acomodação da estrutura interna da mistura asfáltica durante o procedimento de compactação por cisalhamento e, a evolução da degradação na interface do conjunto granular-ligante provocada pela tensão superficial da água. Portanto, situações complexas e dinâmicas de difícil modelagem físico-matemática acurada das variáveis envolvidas, e por isso devem ser verificadas em cada caso, diretamente sobre as amostras formuladas para teste (ANDRADE et al., 2020).

Neste contexto, tem-se que a curva granulométrica concebida para esta pesquisa é correspondente à categoria de mistura asfáltica do tipo *Béton Bitumineux Drainant* (BBD_r) de graduação 0/10 mm da metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas (MANUEL LPC, 2007), compreendendo descontinuidade no intervalo granulométrico 4/6 mm. Portanto, possui característica aberta, sendo aplicável somente em camada superficial de rolamento com espessuras esbeltas que podem variar no campo de 4,0 cm a 5,0 cm.

Conforme abordado no capítulo 3, as principais características das misturas asfálticas BBD_r são propiciar em campo condições adequadas de conforto e segurança ao usuário, não possuindo função estrutural. Por esta razão não são consideradas no dimensionamento de

estruturas de pavimento pela metodologia francesa (GUIDE TECHIQUE, 1994). Assim, não necessitam ser avaliadas a partir dos ensaios fundamentais de módulo complexo e fadiga, apenas até o nível 1 (MANUEL LPC, 2007; Figura 5.1).

Entretanto, devido às explanações discorridas no tópico 1.3, também foram realizados ensaios de resistência à deformação permanente, tomando como critério de avaliação o limite normativo previsto para as misturas *Béton Bitumineux Très Mince* 0/10 mm B classe 2 (BBTM), que possuem características semelhantes à BBDr.

5.2 MATERIAIS UTILIZADOS

5.2.1 Granulares

As frações granulares utilizadas neste trabalho são oriundas de mesma jazida e lote amostral à pesquisa realizada por Fagundes (2020), provenientes da central de britagem da empresa Rudnick Minérios Ltda., localizada na região metropolitana de Joinville/SC.

A jazida supracitada está localizada na área de transição do Complexo Granulítico Santa Catarina e o Granito Piraí. A formação geológica predominante é o gnaisse, rocha metamórfica composta por quartzo, plagioclásio e anfibólitos (MEURER, 2015).

Clara (2020) ao realizar procedimentos investigativos microestruturais com a mesma matriz granular, como análise de Difração de Raio-X (DRX) e Espectrometria de Fluorescência de Raios X por Energia Dispersiva (FRX), constatou a presença de picos espectrais referentes aos minerais anortita, albita, biotita e quartzo, sobretudo destes dois últimos, bem como de majoritária percentagem dos elementos químicos SiO_2 (53,602%), Fe_2O_3 (14,505%) e Al_2O_3 (10,928%), respectivamente.

A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização da matriz granular.

Tabela 5.1 - Caracterização dos agregados pétreos.

Ensaio	Método	Limite Normativo	Material Rudnick Minérios
Desgaste por Abrasão Los Angeles	DNER-ME 35/98	≤ 50%	17,5 %
	DNER-EM 37/97		
Sanidade (Durabilidade ao Sulfato de Sódio)	DNER-ME 89/94	≤ 12%	5,3 %
	DNER-EM 37/97		
Índice de Forma	ABNT NBR 7809/2006	≥ 0,5	0,6
Adesividade ao ligante betuminoso	DNER-ME 78/94	-	Insatisfatório*
Equivalente de Areia	DNER-ME 54/97	-	78 %
Teor de Material Pulverulento	DNER-ME 266/97	≤ 1,0%	0,4 %
	DNER-EM 37/97		

Fonte: Adaptada de Fagundes (2020).

A má adesividade do granular gnáissico ao ligante betuminoso, ocorre em razão de sua composição química majoritariamente (53,602%) silicosa ($\text{Si}^4\text{O}_2^{-2}$), que constitui a base do mineral quartzo, repelir as moléculas carbônicas (C^{-4}) que formam mais de 80% da composição do ligante betuminoso (Tabela 2.2), pois ambos os elementos citados são de característica predominantemente eletronegativa.

Este cenário corrobora às análises efetuadas no capítulo 4 quanto à má adesão proporcionada por granulares de natureza ácida ou félsica, sobretudo no que tange à predominância do percentual de sílica (SiO_2) na composição mineralógica.

Para contornar esta adversidade, cabe esclarecer que foram incorporados 2,0% de cal hidratada CH-1 calcítica, fornecida pela empresa Cal Cem Indústria de Minérios Ltda., localizada na cidade de Colombo/PR, como parte do percentual passante na peneira 0,075 mm da composição granulométrica das misturas asfálticas BBDr. Este percentual foi escolhido com base na dosagem de cal utilizada pela curva granulométrica tomada como referência para esta pesquisa, a qual será melhor detalhada no tópico 5.3.1.

Assim, a cal hidratada CH-1 desempenhou a função de melhorador de adesividade e contribuiu para evitar problemas com descolamento da película de ligante em relação à superfície das partículas, fato que acarretaria a desagregação do conjunto granular-ligante, e consequentemente da mistura asfáltica, principalmente em se tratando de BBDr, pois a característica drenante propicia o contato direto e constante com a água percolada em sua estrutura interna.

5.2.2 Ligante betuminoso

O ligante betuminoso utilizado é o *Highly Modified Asphalt* (HiMA), denominado matriz betuminosa nesta pesquisa pelas razões técnicas abordadas no capítulo 2. O fornecimento foi realizado pela empresa CBB Asfaltos, de Curitiba/PR, a partir da modificação do ligante de base 50/70 (0,1 mm), procedente da Refinaria Getúlio Vargas (REPAR), em Araucária/PR, utilizando moinho piloto desenvolvido pela empresa, com capacidade para modificar de 10 kg a 12 kg de amostra por batelada (Figura 5.2).

Figura 5.2 - Moinho piloto utilizado na modificação do ligante betuminoso.



Fonte: Autor.

As Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam as características das matrizes betuminosas betuminosas HiMA e POLIFLEX 60/85 E, reiterando que a última foi utilizada na mistura asfáltica de referência estudada por Fagundes (2020).

Tabela 5.2- Caracterização da matriz betuminosa 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	NBR 15184	1775	-	3000
	150°C spindle 21 50 rpm					
	177°C spindle 21 100 rpm					
Ponto de Fulgor	°C	NBR 11341	261	235	-	
Separação de Fase	Δ P.A. (°C)	NBR 15166	2,0	-	5	
Massa específica a 25°C	g/cm ³	NBR 6296	1,011	-	-	

Fonte: Adaptado de CBB Asfaltos (2020).

Tabela 5.3 - Caracterização do ligante betuminoso POLIFLEX 60/85 E.

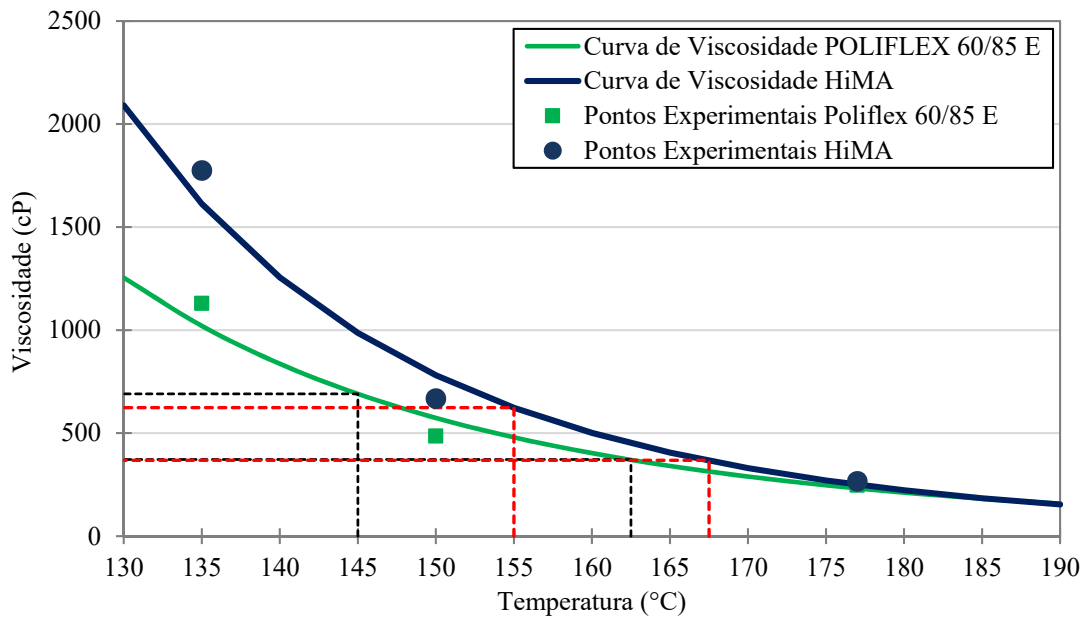
Características	Unidade	Método de Ensaio	Resultados	Limites		
				Mínimo	Máximo	
Ponto de Amolecimento	°C	NBR 6560	65,4	60	-	
Penetração, 100 g, 5s, 25°C, 0,1mm	0,1mm	NBR 6576	40	40	70	
Recuperação Elástica, 20 cm, 25°C	%	NBR 15086	90	85	-	
Viscosidade Brookfield	135°C spindle 21 20 rpm	cP	NBR 15184	1130	-	3000
	150°C spindle 21 50 rpm					
	177°C spindle 21 100 rpm					
Ponto de Fulgor	°C	NBR 11341	268	235	-	
Separação de fase	Δ P.A. (°C)	NBR 15166	1,2	-	5	
Massa específica a 25 °C	g/cm ³	NBR 6296	1,014	-	-	

Fonte: Adaptado de CBB Asfaltos (2018) (*apud* FAGUNDES, 2020; p. 53).

Quanto ao enquadramento da matriz betuminosa HiMA nos parâmetros condizentes à esta classificação, tem-se que os ensaios reológicos (AASHTO T-315, 2021) indicaram um grau de desempenho PG 94-22 (CBB Asfaltos, 2021), acima de 76-22 (Tabela 2.4), enquanto o ponto de amolecimento obtido de 90 °C é bem superior ao limite máximo especificado para a classe 4 da metodologia francesa, que é de 76 °C (Tabela 2.5). Ainda, verificou-se uma forte recuperação elástica de 96%. Portanto, trata-se de uma matriz betuminosa com elevado desempenho, atendendo às características de um HiMA.

As curvas de viscosidade das matrizes betuminosas HiMA e Poliflex 60/85 E determinadas pelo método Brookfield (ABNT NBR 15184, 2004) são ilustradas de forma comparativa na Figura 5.3.

Figura 5.3 - Curvas de viscosidade das matrizes betuminosas HiMA e Poliflex 60/85 E.



Fonte: Adaptado de CBB Asfaltos (2020).

Observando os resultados das Tabelas 5.2 e 5.3, 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 (1101 AT), acarreta um aumento mais intenso da viscosidade do material com a diminuição progressiva da temperatura.

Esta condição se explica devido o efeito da maior concentração polimérica atuar de forma intensa em conjunto com o fenômeno da coalescência da matriz betuminosa, fazendo com que o HiMA adquira 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.

Na Figura 5.3 verifica-se também o efeito da inversão de fases na composição do HiMA, relacionado ao maior aporte percentual de diblocos S-B, proporcionado pela incorporação de moléculas de Vinil na cadeia polimérica D0243 do SBS utilizado. A redução dos efeitos da concentração polimérica na viscosidade da matriz betuminosa HiMA no âmbito das temperaturas de usinagem e compactação, quando comparadas à Poliflex 60/85 E (1101

AT), confirmam o propósito de desenvolvimento da tecnologia, conforme abordado no tópico 2.2.1.3.

Portanto, com base nas informações da Figura 5.3, as temperaturas de usinagem e de compactação para as misturas asfálticas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA foram definidas em 167°C e 155°C, respectivamente. Para os granulares foi utilizada a temperatura de 13°C acima da usinagem, ou seja, 180°C.

5.3 MÉTODOS

5.3.1 Curva granulométrica

A composição granulométrica de referência foi aplicada na execução de uma mistura asfáltica BBDr, em obra pública na cidade de Lille, norte da França (EUROVIA, 2006) (Tabela 5.4).

Tabela 5.4 - Composição granulométrica BBDr de referência.

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

Fonte: Adaptado de EUROVIA (2006).

A formulação proposta para esta pesquisa foi a mesma utilizada por Fagundes (2020), que adaptou a composição de referência apresentada na Tabela 5.4, levando em conta as aberturas de peneiras comercialmente disponíveis no Brasil.

Como resultado, desenvolveu-se uma formulação de graduação 0/10 mm, com descontinuidade intermediária 4/6 mm, ou seja, um *gap* que confere característica permeável à mistura. A distribuição granulométrica compreendeu 76% de frações graúdas no intervalo 6/10

mm e 20% de finos no intervalo 0/2 mm, sendo que o percentual de 4,0% passante na peneira de 0,075 mm foi subdividido em 2,0% de fileres gnáissicos e 2,0% de cal hidratada CH-1, conforme já discorrido no tópicó 5.1.

Para compor a distribuição das partículas granulares na série de peneiras selecionada (Tabela 5.5) foram utilizadas as Equações 5.1 e 5.2 de Füller-Talbot, a fim de garantir o preenchimento gradual dos vazios formados pelos diâmetros maiores de partículas.

$$\%p = a\left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (5.1)$$

$$n = \frac{\log(\%p_{0,075\text{mm}}) - \log(100)}{\log\left(\frac{0,075}{D}\right)} \quad (5.2)$$

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% das frações, mm; e,
- n: expoente indicador da graduação da curva granulométrica.

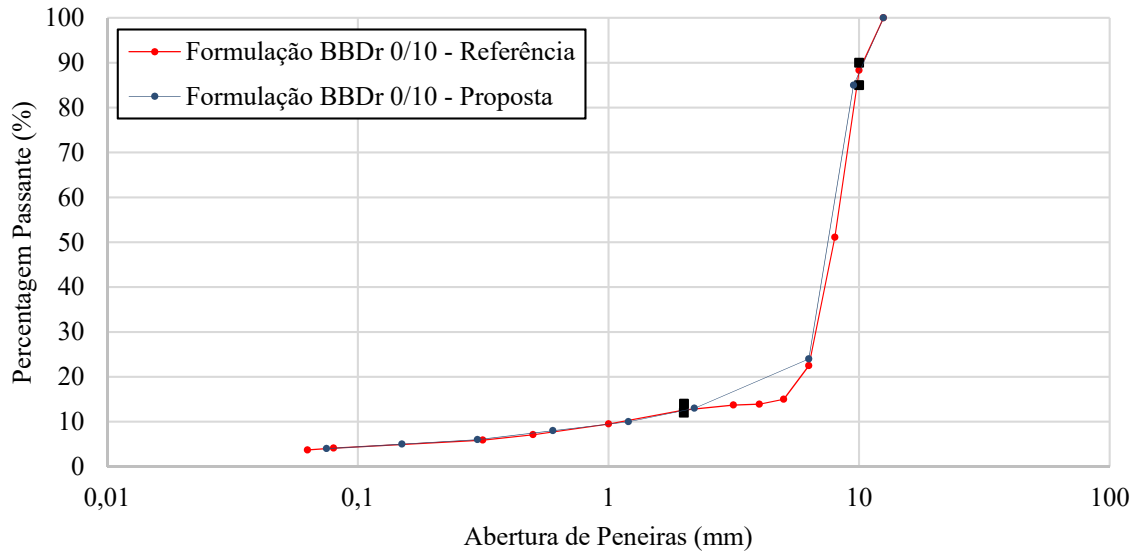
Tabela 5.5 - Composição granulométrica proposta para a pesquisa.

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

Fonte: Adaptado de Fagundes (2020, p. 55).

A Figura 5.4 ilustra as curvas granulométricas das formulações BBDr 0/10 mm 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 (Tabela 3.1) (MANUEL LPC, 2007).

Figura 5.4 - Comparação entre as curvas granulométricas para mistura BBDr.



Fonte: Adaptado de Fagundes (2020, p. 56).

Cabe esclarecer com base na Equação 5.2, que a curva granulométrica proposta possui expoente 'n' 0,63, o que a enquadra na graduação aberta, em razão de estar compreendida no intervalo $0,55 < n < 0,75$, de acordo com DNIT (2006).

5.3.2 Reometria por cisalhamento dinâmico

O equipamento utilizado foi o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), modelo SMARTPAVE 102, da marca Anton Paar (Figura 5.5), com controlador de temperatura na faixa de -40°C a 200°C tipo Peltier, e kit de placas paralelas PP25 (diâmetro de 25,0 mm), PP08 (diâmetro de 8,0 mm) e PP04 (diâmetro de 4,0 mm).

Figura 5.5 - Reômetro de cisalhamento dinâmico SMARTPAVE 102 - Anton Paar.

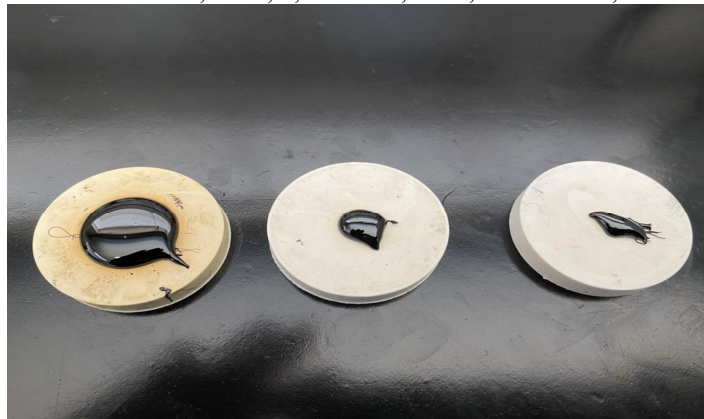


Fonte: Autor.

Os procedimentos realizados neste ensaio seguiram as especificações previstas na normativa francesa AFNOR NF EN 14770 (2012), em que inicialmente o ligante betuminoso virgem é aquecido em estufa até que se encontre suficientemente fluido para ser vertido em moldes de silicone, conforme geometria da amostra a ser utilizada no ensaio.

A amostra de ligante betuminoso deve ser homogeneizada antes de ser colocada nos referidos moldes, em que ao realizar o preenchimento destes uma pequena quantidade excedente é inserida (Figura 5.6) para posterior desbaste. Ato contínuo, aguarda-se, no mínimo, 2 horas para a acomodação da amostra.

Figura 5.6 - Moldes de silicone com 25,0 mm, 8,0 mm e 4,0 mm, nesta ordem, contendo ligante betuminoso.



Fonte: Autor.

Enquanto aguarda-se o período de 2 horas para a acomodação das amostras nos moldes, é realizada a programação do reômetro para a execução do ensaio. Neste trabalho, as amostras de ligante virgem foram ensaiadas nas temperaturas de -30 °C, -20 °C, -10 °C, 0 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C e 80 °C. E, em cada temperatura, nas frequências de 1 Hz, 3 Hz, 10 Hz e 30 Hz. Foram consideradas amplitudes de deformação constantes de 5,0 μm para a faixa de 10 °C a 80 °C e de 0,001 μm para temperaturas entre 0 °C e -30 °C. Os ensaios foram sempre iniciados da frequência mais baixa para a mais elevada em todos os casos.

Ainda, para a realização dos ensaios em temperaturas negativas, foi necessário adicionar à água do banho termostático de circulação (Figura 5.7) um fluido à base de etilenoglicol como agente anticongelante, na proporção de 50% da capacidade volumétrica do tanque.

Figura 5.7 - Visão geral do banho termostático para circulação do fluido indutor de temperatura.



Fonte: Autor.

Para as temperaturas de -30 °C a 0 °C foram utilizadas placas paralelas de 4,0 mm, enquanto de 10 °C a 30 °C as placas de 8,0 mm. Para temperaturas superiores a 30 °C dispôs-se da placa de 25,0 mm.

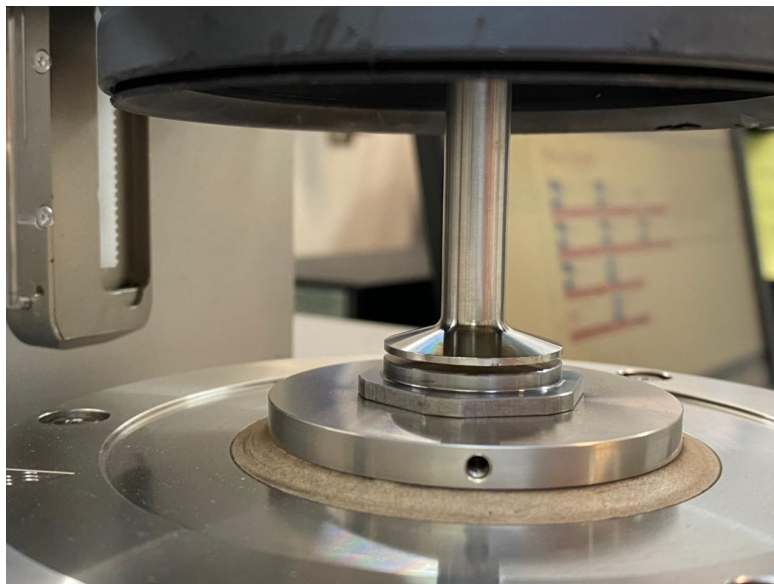
Neste contexto, é importante esclarecer que para a escolha das geometrias de placas em relação às temperaturas e amplitudes de deformação dos testes, faz-se necessária a realização de um teste prévio de linearidade, que consiste em submeter as amostras a variações

de temperatura e frequência desejadas para teste. Durante este procedimento devem ser construídos gráficos que correlacionem a norma do módulo complexo $|G^*|$ com a frequência e o ângulo de fase (δ). Caso sejam verificadas divergências entre as geometrias testadas em mais de 15% dos valores obtidos, significa que os efeitos de conformidade (*compliance*) estão afetando os resultados.

Assim, as geometrias que indiquem brusca redução de $|G^*|$ ou valores de δ muito baixos apontam que o limite de acurácia foi atingido. Da mesma forma, para a maior parte dos reômetros, sobretudo aqueles utilizados com base na norma europeia AFNOR NF EN 14770 (2012), independente da geometria escolhida, valores muito elevados de $|G^*|$, acima de 10^8 , são considerados suspeitos.

Outro fator importante é que antes de posicionar a amostra no reômetro, as placas que comportarão a amostra são instaladas para a realização do *zero gap* do equipamento, na temperatura de ensaio, que significa o ajuste do sistema de medição de inércia para determinação da distância nula entre as placas (Figura 5.8). Ou seja, para cada temperatura de teste é necessário realizar o procedimento *zero gap*.

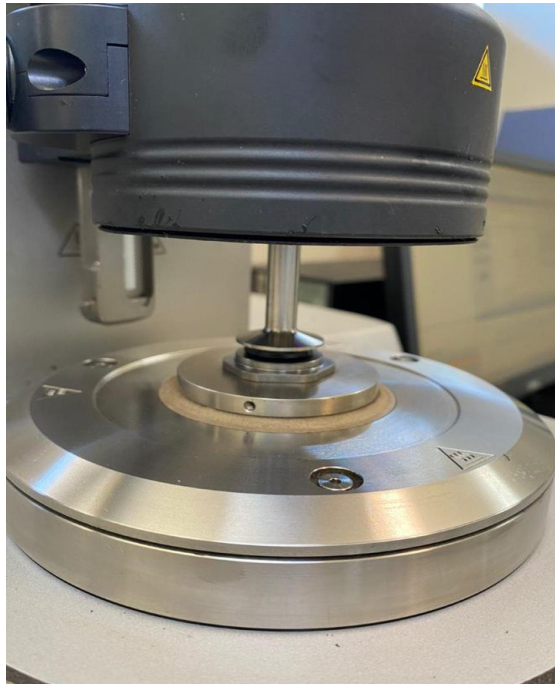
Figura 5.8 - Procedimento *zero gap* das placas paralelas.



Fonte: Autor.

Após 2 horas de acomodação da amostra nos moldes, o ligante betuminoso é desmoldado e colocado sobre a placa já instalada na base do equipamento. Para a correta adesão do ligante betuminoso às placas paralelas, é necessário o aquecimento da amostra até 50°C enquanto em contato direto com as suas superfícies (Figura 5.9).

Figura 5.9 - Aquecimento da amostra para correta adesão às superfícies das placas paralelas.



Fonte: Autor.

Atingida a temperatura mencionada, é executado o acoplamento definitivo da amostra às placas, procedimento denominado *trim*, e o excesso de ligante betuminoso é retirado com o auxílio de uma espátula para conformação da amostra aos limites geométricos (Figura 5.10).

Figura 5.10 - Procedimento *trim* e conformação da amostra à geometria das placas paralelas.



Fonte: Autor.

Iniciado o ensaio, tem-se que o equipamento possui um auto-ajuste, em que dependendo do conjunto temperatura e frequência programados para a sequência de testes, um determinado tempo variável é despendido para a tomada dos resultados, expressos como a média de dez determinações obtidas.

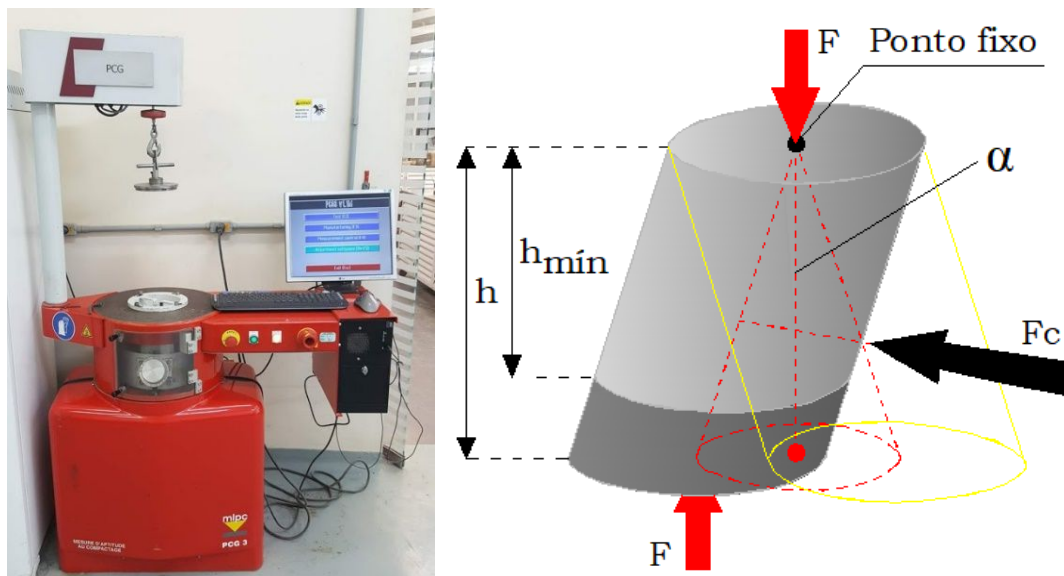
Como resultado são determinados os seguintes parâmetros: deformação de cisalhamento, tensão de cisalhamento, ângulo de fase (δ), módulo de cisalhamento dinâmico ou norma do módulo complexo ($|G^*|$), módulo de armazenamento ou parte real do módulo complexo (componente elástica) (G'), e módulo de perda ou parte imaginária do módulo complexo (componente viscosa) (G'').

De posse destes parâmetros, é possível construir as representações gráficas no plano complexo correspondentes ao comportamento reológico do ligante betuminoso, já apresentadas e definidas no tópico 2.4.2.1, como as curvas isocrônicas e isotérmicas, plano Cole-Cole, espaço de Black e a curva de equivalência frequência-temperatura, também denominada de curva mestre.

5.3.3 Prensa de compactação giratória

Este ensaio é utilizado para verificar a habilidade de compactação das misturas asfálticas, a partir da Prensa de Compactação por cisalhamento Giratória (PCG) (AFNOR NF EN 12697-31, 2019), em função da aplicação de carregamento lento e em condições isotérmicas à baixa compressão estática, executado por um movimento giratório (cisalhante) de uma de suas faces em torno do eixo de simetria do corpo de prova (Figura 5.11).

Figura 5.11 - Prensa de Compactação Giratória (PCG-3) e seu princípio de funcionamento.



Fonte: Siroma (2018).

O objetivo deste ensaio não é determinar o teor ótimo de ligante betuminoso a ser utilizado na dosagem da formulação, conforme é procedido na metodologia americana *Superpave*, em relação ao número de operações do eixo padrão especificado em projeto, mas simular a acomodação gradual das misturas asfálticas, notadamente dos granulares, quando submetidas ao processo de compactação no campo. Logo, trata-se apenas de um dos testes a que as misturas asfálticas são submetidas, ainda no nível 1 de avaliação (Figura 5.1), para que seja verificada a sua trabalhabilidade em situações práticas de execução.

A excentricidade do ângulo ‘ α ’ reproduz durante a força axial aplicada sobre a mistura asfáltica, o esforço cisalhante que ocorre nas interfaces das partículas granulares pela aplicação de carregamento proveniente das unidades compactadoras, até que se intertravem, formando ângulos de atrito que as estabilizam mecanicamente.

Recomenda-se que para cada teor de ligante betuminoso das dosagens seja realizada uma sequência de pelo menos 3 determinações, adotando-se a média dos resultados como o valor final em cada caso.

A altura mínima ($h_{\text{mín}}$) dos corpos de prova é estipulada em 150,0 mm ou 160,0 mm, para moldes com diâmetro interno de 150,0 mm \pm 0,1 mm ou 160,0 mm \pm 0,1 mm, respectivamente, dependendo do tipo da PCG disponível. Nestes casos, as massas dos corpos de prova são calculadas com base no volume final da amostra e na massa volumétrica real (MVR) da mistura asfáltica a vácuo (AFNOR NF EN 12697-5, 2018) (Equações 5.3 e 5.4; Tabela 5.6).

$$M = 2,651 \cdot MVR; \quad \varnothing = 150,0 \text{ mm} \quad (5.3)$$

$$M = 3,016 \cdot MVR; \quad \varnothing = 160,0 \text{ mm} \quad (5.4)$$

Onde:

M: massa do corpo de prova, em g;

MVR: massa específica (volumétrica) real da mistura asfáltica a vácuo, em g/cm³.

Tabela 5.6 - Massa Volumétrica Real (MVR) das misturas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA.

Teor de betume (%)	MVR (g/cm ³)
3,58	2,594
3,90	2,582
4,22	2,576
4,54	2,558

Fonte: Autor.

A força aplicada no momento do ensaio deve ser estar entre 11,5 kN e 13,5 kN, para as PCG equipadas com moldes de diâmetro interno com $160,0 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, e entre 10 kN e 12 kN, para aquelas que comportam moldes de $150,0 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, o que resulta em uma tensão vertical em torno de 0,6 MPa. Os valores médios da força aplicada durante um ensaio normal, com exceção de um período transitório de início inferior a 30 segundos, não devem ter uma variação maior que $\pm 250 \text{ N}$ em relação à faixa de limites determinada, enquanto que no caso de uma verificação a cada giro do eixo, este valor médio não pode variar acima de $\pm 1200 \text{ N}$ ao longo do ensaio.

O ângulo de rotação (α) do molde, em função do eixo de aplicação da força durante o ensaio, varia conforme o tipo de PCG disponível. Em geral, estas inclinações são de 1° e de $0,82^\circ$ nas partes externa e interna dos corpos de prova, respectivamente. A preparação do conjunto molde e mistura asfáltica ocorre da seguinte forma (Figura 5.12):

- Colocar os moldes e as pastilhas na estufa, durante 2 horas, à temperatura de ensaio (varia de acordo com o tipo de ligante betuminoso utilizado);
- Untar os moldes com óleo mineral, com a ajuda de um pincel;
- Pesar em um recipiente separado a massa da mistura asfáltica;
- Colocar de uma só vez a mistura no interior do molde e manter o conjunto completo (molde, pastilhas e mistura) em estufa à temperatura prescrita do ensaio, por um período entre 30 minutos e 2 horas antes do início do ensaio.

Figura 5.12 - Preparação das amostras antes da execução do ensaio.



Fonte: Siroma (2018).

Após o período de condicionamento térmico da mistura no interior do molde, este é inserido na PCG, e imediatamente um pré-carregamento da ordem de 150 N a 3000 N é executado sobre a amostra por menos de 30 segundos, sem o uso de rotação ou inclinação (α). Em seguida, inicia-se o procedimento de rotação da máquina e em menos de um semi-giro do eixo, se aplica a força e a inclinação (α) definitivas do ensaio.

Sem a interrupção da rotação, as alturas $h_i(\text{ng})$ dos corpos de prova, expressas em milímetros, são medidas a uma precisão de $\pm 0,2$ mm, em que esta medição é realizada, no mínimo, pelo número de giros seguintes: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 100 e eventualmente por 120, 150, 200, 250, 300, 400 e 500 giros. A Figura 8 ilustra o procedimento de extração dos corpos de prova dos moldes, bem como uma série de corpos de prova oriundos do processo de compactação pela PCG.

Figura 5.13 - Processo de extração dos corpos de prova resultantes do processo de compactação pela PCG.



Fonte: Clara (2020).

Calculando-se as alturas médias $h(\text{ng})$, e de posse da altura mínima ($h_{\text{mín}}$) dos corpos de prova determinada previamente, é possível para cada número de giros analisado separadamente, obter-se o percentual de vazios das misturas (Equação 5.5).

$$\%v = 100 \cdot \left(\frac{h(\text{ng}) - h_{\text{mín}}}{h(\text{ng})} \right) \quad (5.5)$$

Onde:

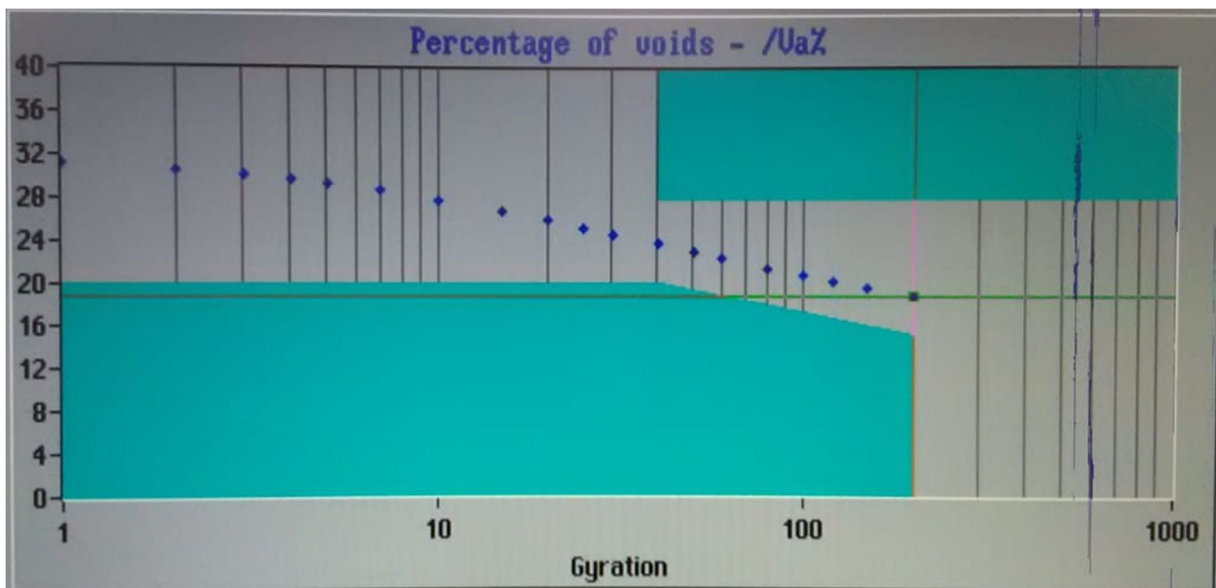
$\%v$: percentagem de vazios das misturas asfálticas;

$h(\text{ng})$: altura média dos três ensaios por número de giros especificado das misturas asfálticas (mm);

$h_{\text{mín}}$: altura mínima dos corpos de prova, em mm.

Com os resultados obtidos, constroi-se um gráfico logarítmico no eixo das abscissas (número de giros) e linear no eixo das ordenadas (percentagem de vazios) (Figura 5.14), sendo rejeitada a mistura que apresentar valores fora da especificação condizente com a sua classificação (MANUEL LPC, 2007).

Figura 5.14 - Verificação da conformidade da habilidade de compactação das misturas asfálticas (exemplo de formulação aprovada).



Fonte: Autor.

Para uma mistura BBDr 0/10 mm ser considerada apta quanto à habilidade de compactação, os seguintes limites devem ser respeitados, em relação à classe desejada em projeto AFNOR NF EN 13108-7 (2006):

- Classe 1: $\%V_{\min} \geq 20\%$ e $\%V_{\max} \leq 26\%$ a 40 giros;
 $\%V_{\max} \geq 14\%$ a 200 giros.
- Classe 2: $\%V_{\min} \geq 26\%$ e $\%V_{\max} \leq 30\%$ a 40 giros;
 $\%V_{\max} \geq 20\%$ a 200 giros.

5.3.4 Ensaio de Duriez

O ensaio de Duriez (AFNOR NF EN 12697-12, 2018) avalia a resistência à ação da água de misturas asfálticas. O principal objetivo é verificar a suscetibilidade mecânica e a hidrofília dos mástiques betuminosos, quando submetidos ao contato contínuo com a água por um período pré-determinado.

Consiste em romper à compressão direta (simples), no mínimo 10 corpos de prova com massa total de 3,5 kg, e no mínimo 12 corpos de prova com massa total de 1,0 kg, para composições granulométricas com $D_{máx} \geq 14,0$ mm e $D_{máx} < 14,0$ mm, respectivamente.

As misturas asfálticas depois de usinadas devem ser introduzidas no interior de moldes de aço com $120,0$ mm \pm 0,1 mm de diâmetro interno, altura mínima de 270,0 mm, para $D_{máx} \geq 14,0$ mm; e $80,0$ mm \pm 0,1 mm de diâmetro interno, altura mínima de 190,0 mm, para $D_{máx} < 14,0$ mm.

Os corpos de prova são compactados no interior dos moldes de aço citados, em uma prensa com velocidade média de avanço correspondente a $1,0$ mm/s \pm 0,1 mm/s, equipada com duplo pistão, ambos com diâmetros externos de $119,8$ mm \pm 0,05 mm e $79,8$ mm \pm 0,05 mm, a uma carga constante de 180 kN e 60 kN, para $D_{máx} \geq 14,0$ mm e $D_{máx} < 14,0$ mm, nesta ordem, por 5 minutos (Figura 5.15).

Figura 5.15 - Processo de compactação das amostras por duplo pistão.



Fonte: Autor.

Após extração (Figura 5.16), deve ser respeitado um período de cura dos corpos de prova por 24 horas em temperatura ambiente, de 15 °C a 25 °C, em que ficarão em repouso sobre uma superfície plana até o momento de serem condicionados.

Figura 5.16 - Corpos de prova após o processo de extração.



Fonte: Autor.

Nesta etapa, os conjuntos de corpos de prova são divididos em dois grupos com igual quantidade, a fim de que sejam conduzidos a distintos processos de condicionamento a $18\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$, em que o grupo a ser rompido a seco é colocado em uma câmara com controle de $50\% \pm 10\%$ da umidade do ar por um período de 7 dias corridos (Figura 5.17).

Figura 5.17 - Condicionamento a seco dos corpos de prova a com controle da umidade do ar em $50\% \pm 10\%$.



Fonte: Barra (2009).

Para o grupo que será rompido após submissão ao condicionamento em água, devem ser procedidas as seguintes etapas antes da imersão: desobstrução dos vazios com jateamento

de ar comprimido, lavação em água corrente e inserção em um dessecador com água a uma pressão residual de vácuo a $350 \text{ mmHg} \pm 5\%$ por 2 horas (Figura 5.18).

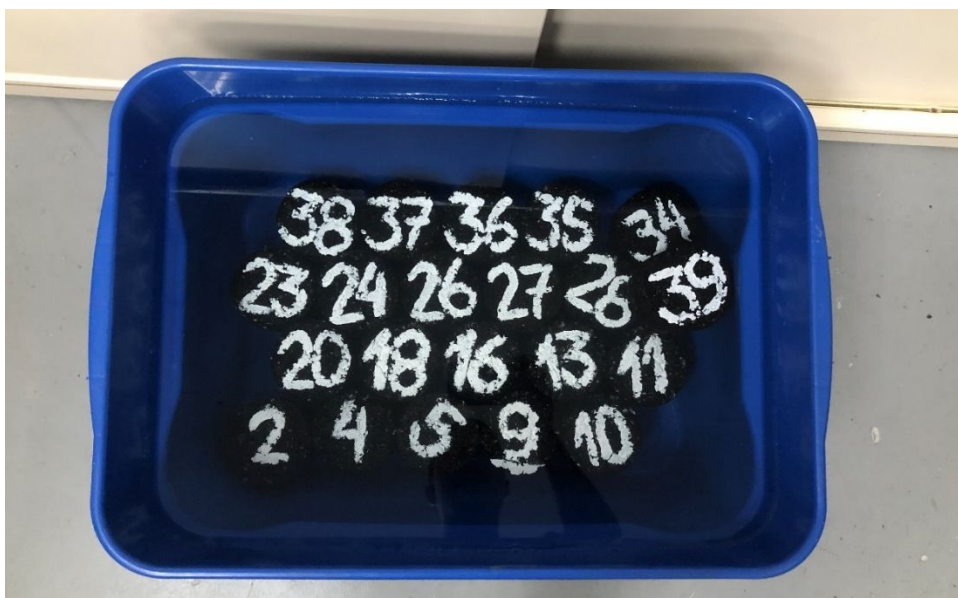
Figura 5.18 - Processo de saturação a vácuo dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

Após as etapas de pré-saturação à vácuo, os corpos de prova são imersos em água por um período também de 7 dias corridos (Figura 5.19).

Figura 5.19 - Imersão na água pelo período de 7 dias.



Fonte: Autor.

Para misturas BBDr 0/10 mm, independente da classe (1 ou 2), a relação r/R entre a resistência à compressão simples (Figura 5.20) dos conjuntos imersos em água (r) e secos (R)

deve apresentar um valor igual ou superior a 0,80 ou até 20% de perda (AFNOR NF EN 13108-7, 2006).

Figura 5.20 - Ruptura à compressão simples dos corpos de prova.



Fonte: Autor.

5.3.5 Deformação permanente

O ensaio de deformação permanente (AFNOR NF EN 12697-22, 2020) consiste em verificar a resistência das misturas asfálticas em relação ao afundamento nas trilhas de roda, a partir da moldagem de placas em uma mesa compactadora pneumática. As placas possuem as dimensões de 180,0 mm de largura, 500,0 mm de comprimento e 50,0 mm ou 100,0 mm de espessura, dependendo da sua categoria e utilização em campo. Para mistura BBDr são utilizadas placas com 50,0 mm de espessura.

O procedimento de usinagem das misturas asfálticas foi realizado em um misturador do tipo *pugmill* (Figura 5.21).

Figura 5.21 - Usinagem das misturas asfálticas em misturador do tipo *pugmill*.



Fonte: Fagundes (2020).

Assim como na pesquisa de Fagundes (2020), o processo de compactação das placas seguiu a orientação da *Université Gustave Eiffel* (UGE), antigo *Institut Français des Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux* (IFSTTAR, 2019) (Anexo I), considerando apenas algumas adaptações aos equipamentos utilizados nesta pesquisa, pois devido se tratar de misturas asfálticas funcionais, o procedimento normatizado (AFNOR NF EN 12697-33, 2019) é demasiadamente severo e pode comprometer a permeabilidade em misturas do tipo BBDr.

Ainda de acordo com Fagundes (2020), este procedimento em campo consiste apenas na utilização de rolo liso com pouca ou nenhuma vibração para a compactação dessas misturas. Ainda, conforme pode ser verificado no Anexo I, as etapas de compactação são espaçadas em tempos diferentes com o objetivo de reproduzir as passadas do rolo compactador em campo, sendo o intuito obter paridade com o procedimento prático, adequando melhor a acomodação da mistura aos esforços solicitantes e à perda gradativa de temperatura.

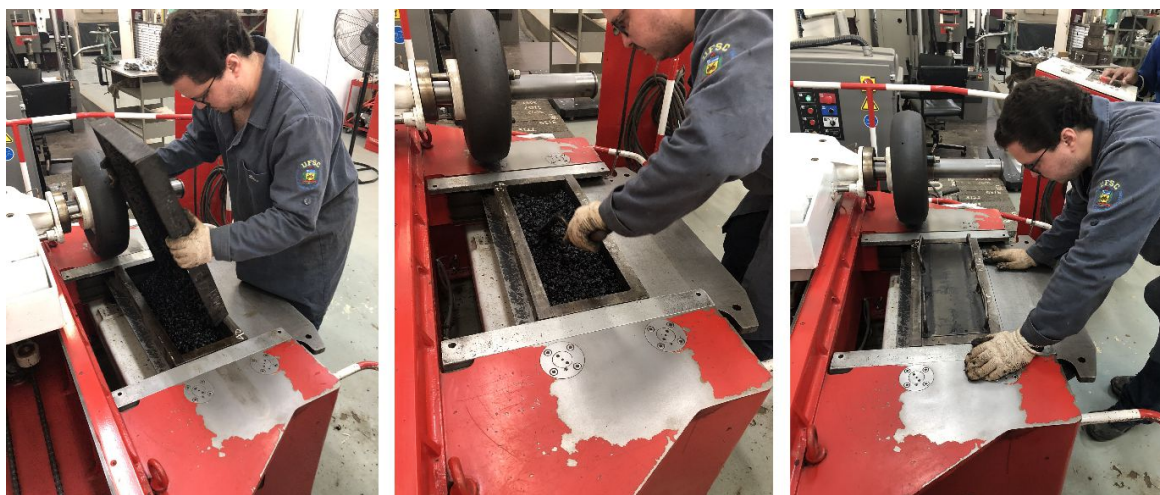
A utilização de rolos lisos em todo o processo de compactação se dá para que o arranjo granulométrico se acomode em condições mais homogêneas, evitando a diminuição de vazios comunicantes provocada por aplicação de cargas em pontos espaçados, como ocorre na utilização de rolos pneumáticos, prejudicando a permeabilidade da mistura asfáltica. Além disso, os rolos lisos permitem a obtenção de uma superfície finalmente acabada com faces

planas das partículas granulares, contribuindo para a diminuição de saliências que corroborem ao efeito de arrancamento na área de contato pneu-pavimento.

Por esta razão foi utilizada uma placa metálica no contato do eixo pneumático com a mistura asfáltica, a fim de que a distribuição das tensões fosse igual em toda a sua superfície, simulando a passagem de um rolo liso.

Outro procedimento importante é a modificação da pressão no eixo, sendo que nos três primeiros ciclos de solicitação é mais baixa (1 bar \approx 0,1 MPa), com o intuito de não provocar uma ação tão forte que ocasione fluência excessiva da mistura asfáltica e forte redução dos vazios internos. Após o terceiro ciclo de compactação, a pressão é aumentada para 2 bar (Anexo I), pois a mistura já se encontra com temperatura mais baixa e, conseqüentemente, mais rígida. A Figura 5.22 apresenta a mesa de compactação durante o procedimento executado.

Figura 5.22 - Procedimento de compactação das placas.



Fonte: Fagundes (2020).

Após a compactação foi necessário um período de cura de quinze dias, a fim de garantir tempo hábil de repouso ao material, bem como para o desencadeamento das reações químicas entre os materiais e estabelecimento da ancoragem adequada das matrizes betuminosas à superfície dos granulares. O próximo passo foi a introdução um par de placas por teor de ligante na máquina de deformação permanente, onde foram testadas simultaneamente com a passagem de um eixo simples de roda simples. Este equipamento dispõe de uma câmara com aquecimento interno, em que a temperatura normatizada de ensaios é de 60°C. A Figura 5.23 ilustra a máquina de deformação permanente.

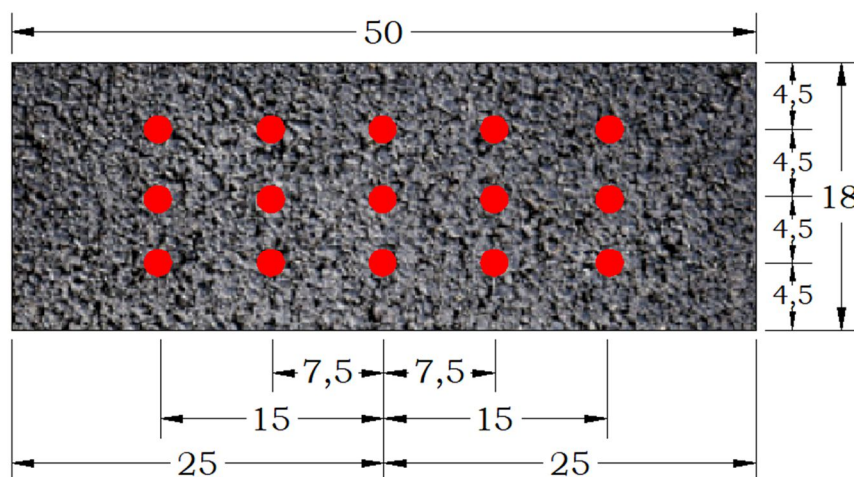
Figura 5.23 - Máquina de deformação permanente.



Fonte: Autor.

O ensaio de deformação permanente consiste em avaliar o afundamento de trilha de roda em diferentes ciclos de passagem. As medições normalmente são realizadas com o uso de extensômetros ou paquímetros em 0, 100, 300, 1000, 3000, 10000 e 30000 ciclos, em 15 pontos distintos (Figura 5.24). No caso de misturas BBDr, tem-se que são avaliadas apenas até 3000 ciclos.

Figura 5.24 - Pontos de medição do afundamento na trilha de roda.



Fonte: Clara (2020).

A frequência em que o eixo solicitante percorre a superfície das placas durante o ensaio é de 1 Hz, onde os esforços são transmitidos por um pneumático de borracha com textura lisa, com carga de 5,0 kN e pressão de inflação em 0,6 MPa.

Para que sejam aprovadas as misturas asfálticas, não devem ultrapassar os limites normativos para as deformações acumuladas, calculados com o uso da Equação 5.6. Nesta pesquisa, pelas razões já explanadas no tópico 1.3, foi adotado o limite normativo previsto para misturas ultra-delgadas do tipo *Béton Bitumineux Très Mince* B Classe 2 (BBTM), em que o afundamento na trilha de roda deve ser $\leq 15\%$ após 3000 ciclos (AFNOR NF EN 13108-2, 2006).

$$Y = A \cdot \left(\frac{N}{1000} \right)^b \quad (5.6)$$

Onde:

- Y: profundidade da deformação a N ciclos;
- A: coeficiente linear obtido experimentalmente;
- N: número de ciclos; e,
- b: coeficiente angular obtido experimentalmente.

5.3.6 Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade foi executado com base na Norma AFNOR NF EN 12697-19 (2020), em que o objetivo é avaliar a percolação da água através dos vazios comunicantes formados na estrutura interna das misturas asfálticas, sendo definida como a velocidade de percolação do fluido (Equação 5.7).

$$V = \frac{H}{t} \quad (5.7)$$

Onde:

- V: velocidade, em cm/s;
- H: altura da coluna d'água, em cm; e,
- t: tempo de escoamento, em s.

Conforme explanado no tópico 3.3, os vazios presentes na mistura asfáltica assumem geometria e disposição aleatórias (Figura 3.2), e a permeabilidade de misturas asfálticas drenantes no campo se dá basicamente em dois sentidos: horizontal e vertical (Figura 3.1).

Logo, em razão da ação da gravidade, o fluxo vertical tende a propiciar maior contribuição para a permeabilidade das águas superficiais, porém, o fluxo horizontal não deve ser desconsiderado, até mesmo para que se possa ter efetividade no escoamento para fora da estrutura do pavimento no menor tempo possível.

Com o intuito de medir a permeabilidade das formulações, foram utilizadas as mesmas placas compactadas na mesa pneumática, previamente à execução do ensaio de deformação permanente descrito no tópico 5.3.5.

Para a medição da permeabilidade vertical, as placas foram dispostas de modo a terem as suas faces inferiores livres para a ocorrência do escoamento da água. Um permeâmetro com altura da coluna d'água de 24,6 cm, diâmetro de 9,3 cm, volume da coluna d'água em 1671,06 cm³ e diâmetro do orifício inferior de escoamento de 3,0 cm, foi posicionado sobre as placas.

A fim de garantir que a água percolasse completamente pela estrutura interna das misturas asfálticas, foi adicionado um peso anelar na base do permeâmetro, para aumentar a aderência na interface de contato superficial com a placa, evitando vazamento lateral. Em cada amostra foram realizadas um total de nove determinações, sendo três em cada posição: bordo esquerdo, eixo e bordo direito (Figuras 5.25 e 5.26).

Figura 5.25 - Permeâmetro posicionado no bordo esquerdo, eixo e bordo direito da placa.



Fonte: Autor.

Figura 5.26 - Determinação da permeabilidade vertical das misturas asfálticas BBDr.



Fonte: Autor.

Quanto à permeabilidade horizontal, tem-se que a sua determinação não ocorre de forma direta como no sentido vertical. Para tanto, foi necessário dispor as placas imersas em uma bandeja preenchida com água e vedadas com massa de calafetar na face inferior, a fim de impedir a passagem de água verticalmente, bem como na interface de contato do permeâmetro com as placas, para evitar vazamento superficial. Além disso, com o objetivo de garantir estabilidade ao permeâmetro, uma sobrecarga foi posicionada na parte superior do tubo. A Figura 5.27 ilustra o conjunto durante o ensaio.

Figura 5.27 - Conjunto para ensaio de permeabilidade horizontal.



Fonte: Fagundes (2020).

A norma AFNOR NF EN 13108-7 (2006) não estabelece parâmetros referentes ao limite mínimo de permeabilidade para as misturas asfálticas BBDr. Porém, o MANUEL LPC (2007) indica que para BBDr 0/10 mm devem ser considerados os seguintes limites, em relação à classe desejada em projeto:

- Classe 1: $\geq 0,8$ cm/s; e,
- Classe 2: $\geq 1,2$ cm/s.

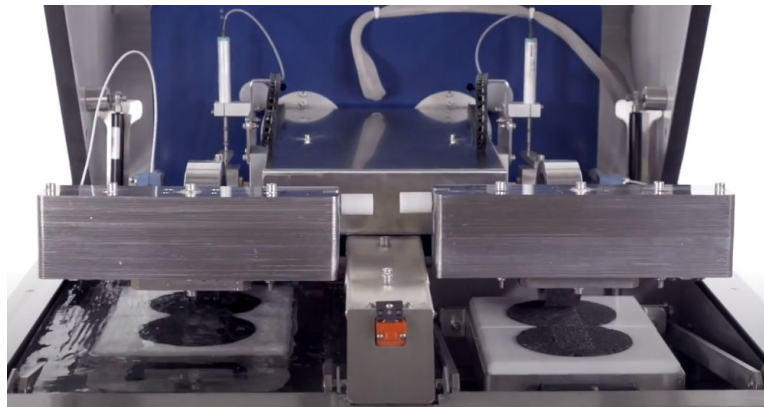
5.3.7 Ensaio Hamburgo

O ensaio Hamburgo foi realizado com o intuito de verificar a influência direta da ação da água na resistência à deformação permanente das misturas asfálticas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA. O fato de ser considerado um ensaio complementar nesta pesquisa,

diz respeito ao fato de não compreender os níveis de teste previstos na metodologia francesa, tomada como o escopo científico desta campanha experimental.

O *Hamburg Wheel Tracking Device* (HWTD) é um equipamento normatizado pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO T-324, 2019), destinado a medir a deformação permanente em trilha de roda e a resistência à desagregação de misturas asfálticas (Figura 5.28).

Figura 5.28 - Hamburg Wheel Tracking Device (HWTD).



Fonte: Autor.

Foi desenvolvido originalmente pela *Helmut-Wind Incorporated* de Hamburgo, na Alemanha. Os corpos de prova utilizados durante os ensaios podem ser oriundos da Prensa de Compactação Giratória (PCG), com dimensões de 150,0 mm de diâmetro e 60,0 mm de altura, ou de placas extraídas de campo, com dimensões de 260,0 mm x 320,0 mm e espessura da ordem de 4,0 cm (Figura 5.29). O procedimento de teste é conduzido com as amostras imersas em água à temperatura variando entre 20°C e 70°C, sendo o mais usual à temperatura de 50°C.

Figura 5.29 - Corpos de prova cilíndricos compactados pela PCG (esquerda) e placas extraídas de campo (direita).



Fonte: Autor.

É importante esclarecer que os parâmetros de dosagem referentes ao tipo e teor de ligante, curva granulométrica, bem como o teor de vazios das amostras, não são definidos em condições específicas da norma do ensaio, logo, tratam-se de informações e condições inerentes a cada projeto.

Nesta pesquisa, foram submetidos ao ensaio Hamburgo os mesmos corpos de prova produzidos e aprovados na Prensa de Compactação Giratória (PCG) francesa, descrita no tópico 5.3.3, após 200 giros e respectivos teores de vazios conforme as prerrogativas técnicas estabelecidas em AFNOR NF EN 12697-31 (2019). Apenas a altura dos corpos de prova necessitou ser ajustada de 150,0 mm para 60,0 mm, por processo de serragem (Figura 5.30), a fim de adequar as amostras às dimensões do molde de ensaio do HWTD.

Figura 5.30 - Corpos de prova utilizados nos ensaios Hamburgo.



Fonte: Autor.

A solicitação dos corpos de prova é realizada por uma roda de aço (Figura 5.29), com largura de 47,0 mm e aplicação de uma carga de 705 N, executando ciclos de ida e volta, perfazendo 50 ciclos por minuto, o que corresponde a uma frequência de 0,83 Hz.

As leituras dos afundamentos nas trilhas de roda são realizadas por transdutores de deslocamento do tipo *Linear Variable Displacement Transducer* (LVDT) após sequências acumuladas de 5, 1000, 2000, 3000, 5000, 10000, 15000 e 20000 ciclos. O critério de parada do ensaio se dá quando são atingidos 20000 ciclos ou quando ocorrer afundamento na trilha de roda acima de 12,0 mm. É considerado que acima de 12,0 mm a mistura asfáltica não atende aos critérios mínimos de resistência exigidos pela norma.

Todavia, para o contexto desta pesquisa, tem-se que como o intuito era estabelecer um comparativo com as condições mais próximas possíveis do ensaio de deformação permanente da metodologia francesa, descrito no tópico 5.3.5, as amostras foram submetidas a sequências acumuladas de 500, 1000, 2000 e 3000 ciclos de solicitação, e imersas em água condicionada a 60°C, ou seja, 10°C a mais que a condição normalmente utilizada nos ensaios Hamburgo tradicionais, portanto, compreendendo uma ação mais severa da água.

CAPÍTULO 6

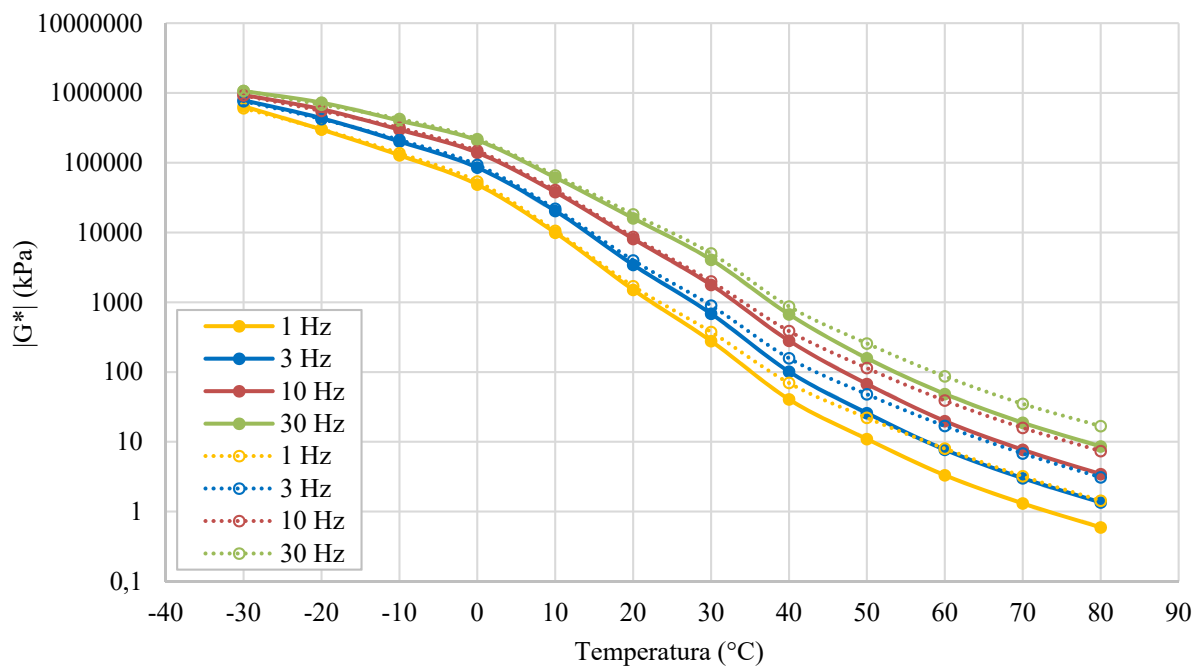
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos, com base na campanha experimental realizada e em comparação com as formulações de referência estudadas por Fagundes (2020).

6.1 REOMETRIA POR CISALHAMENTO DINÂMICO

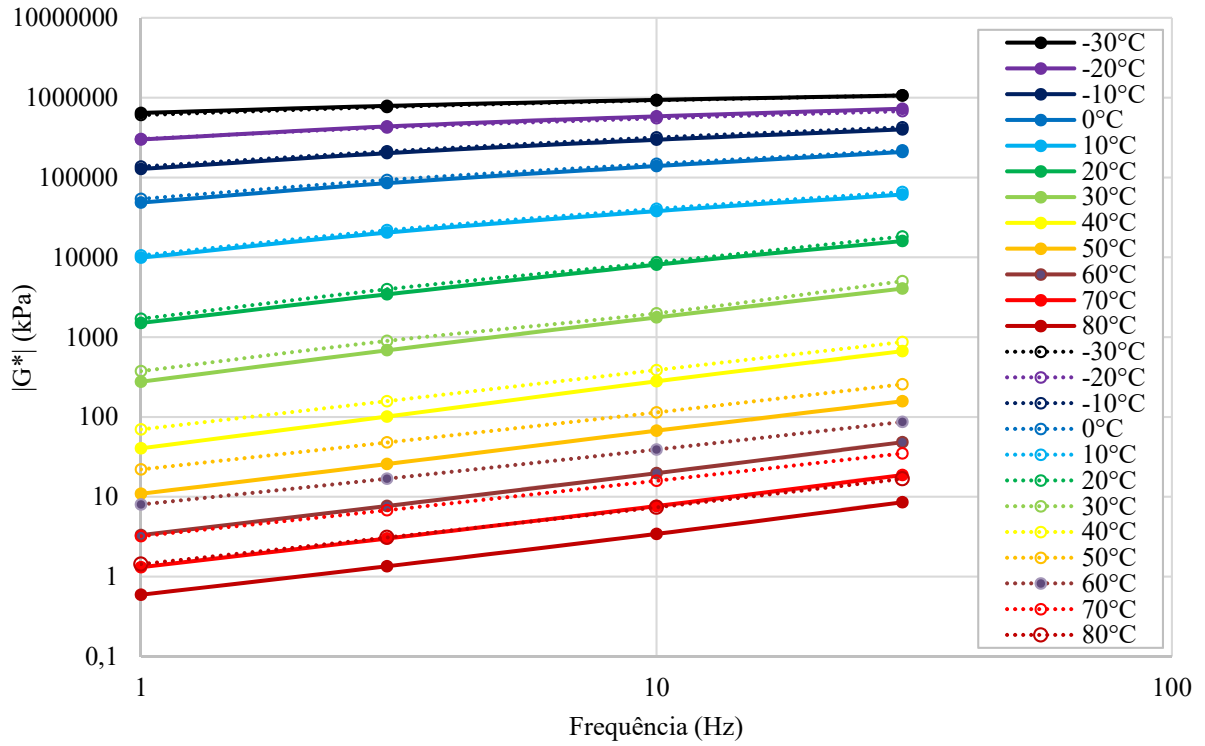
O estudo reológico das matrizes betuminosas HiMA e Poliflex 60/85 E permitiu obter as tabulações de dados (Anexo II) e as representações gráficas no plano complexo, a saber: curvas isocrônicas (Figura 6.1), curvas isotérmicas (Figura 6.2), plano Cole-Cole (Figura 6.3), espaço de Black (Figura 6.4) e curva de equivalência frequência-temperatura, também denominada de curva mestre (Figura 6.5). É importante esclarecer que as colorações identificadoras nas legendas são as mesmas, a distinção se dá pelas linhas contínuas e tracejadas, correspondentes às matrizes Poliflex 60/85 E e HiMA, respectivamente.

Figura 6.1 - Curvas isocrônicas.



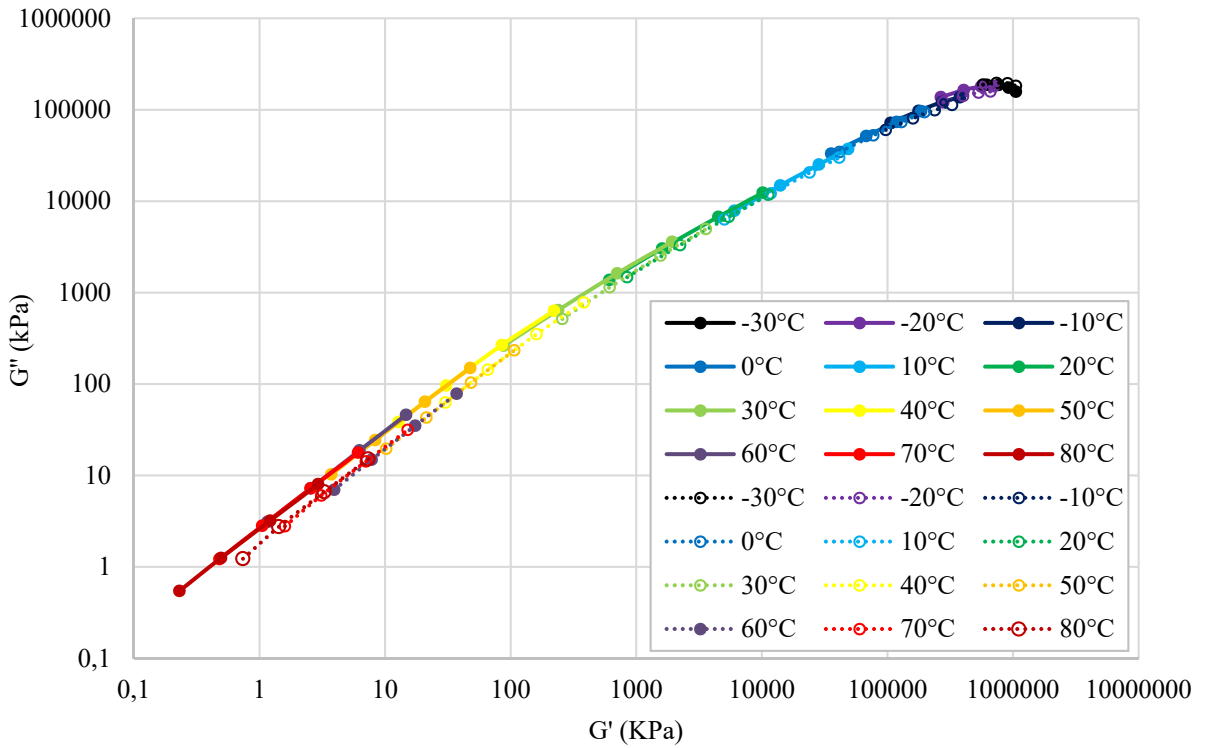
Fonte: Autor.

Figura 6.2 - Curvas isotérmicas.



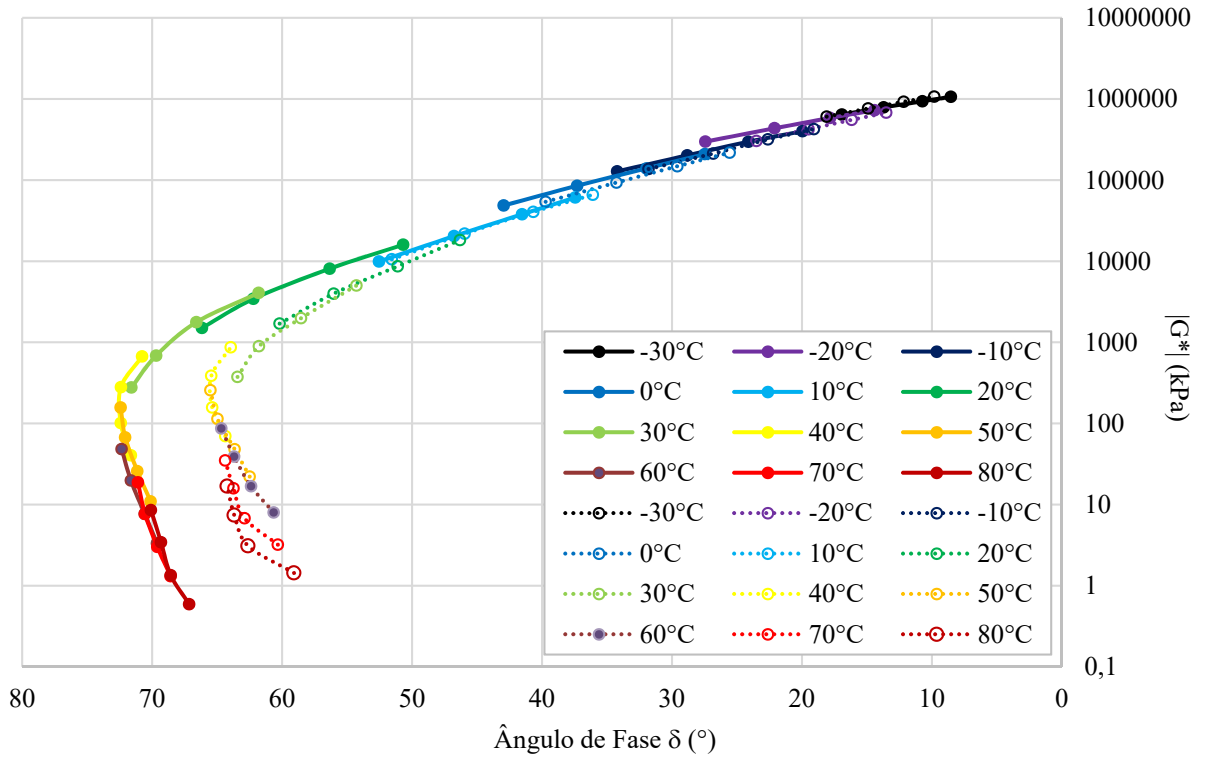
Fonte: Autor.

Figura 6.3 - Plano Cole-Cole.



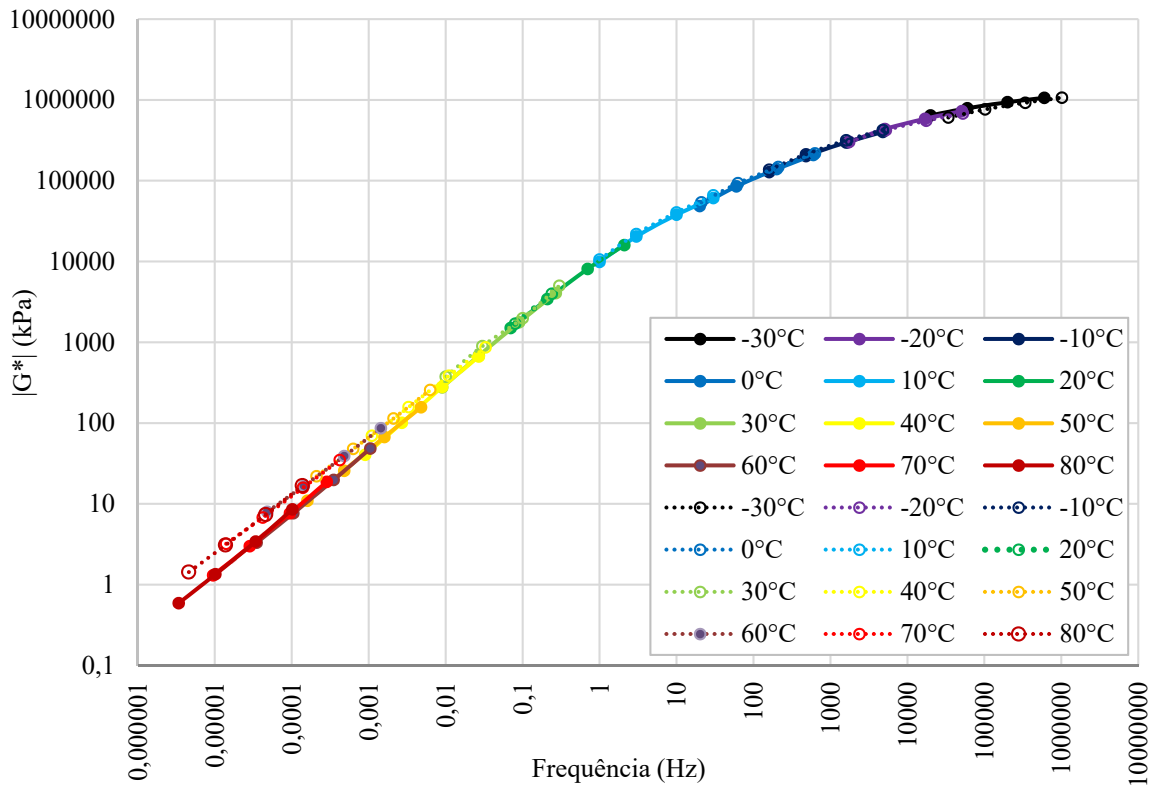
Fonte: Autor.

Figura 6.4 - Espaço de Black.



Fonte: Autor.

Figura 6.5 - Curva de equivalência frequência-temperatura.



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos demonstram que a matriz HiMA é menos suscetível térmica e cineticamente que a Poliflex 60/85 E, devido apresentar maiores valores referentes à norma do módulo de cisalhamento dinâmico $|G^*|$ para as mesmas temperaturas e frequências de testes nas curvas isocrônicas e isotérmicas. Esta condição é bem evidenciada nas situações de temperaturas mais elevadas, a partir de 40°C, e nas menores frequências de solicitação, ou seja, nas condições mais desfavoráveis de aplicação de carregamento sobre os materiais.

Este cenário se confirma na análise do plano Cole-Cole, em que é possível observar uma tendência contínua de menores escalas dos valores correspondentes ao módulo de perda (G'') no plano complexo para a matriz HiMA, o que se intensifica também a partir de 40°C.

Isto indica uma participação de menor intensidade da componente viscosa no comportamento reológico do HiMA em relação à matriz Poliflex 60/85 E. Como resultado, ocorre menor dissipação de energia sob a forma de calor, contribuindo para que haja maior conservação da rigidez do HiMA após os ciclos dinâmicos de solicitação, fato que pode ser verificado nos maiores valores do módulo de armazenamento (G') obtidos durante os testes, que representam a componente elástica da matriz betuminosa.

Em consonância às tendências já discorridas, o espaço de Black indica menores retardos na resposta às solicitações para a matriz HiMA, devido apresentar ângulos de fase δ mais reduzidos para uma mesma escala de $|G^*|$, ratificando a maior contribuição da parcela elástica no comportamento reológico do HiMA, em relação à matriz Poliflex 60/85 E, corroborando os indicadores do plano Cole-Cole.

Ainda, em uma avaliação global do espectro reológico no domínio frequencial de solicitação, verifica-se que nas condições mais críticas de imposição de carregamento sobre um material viscoelástico, isto é, elevada temperatura e regime quase estático de aplicação, os valores de $|G^*|$ são mais favoráveis à matriz HiMA, de acordo com as curvas de equivalência frequência-temperatura.

Além disso, a perfeita continuidade das referidas curvas após a translação de todos as variações binárias de frequência e temperatura testadas, comprovam que as matrizes betuminosas atendem à prerrogativa da linearidade no comportamento viscoelástico, de acordo com o princípio de superposição de Boltzmann, abordado no tópico 2.4.1. Logo, apresentam proporcionalidade entre as amplitudes de tensão aplicadas e deformação resultantes, no âmbito das microdeformações.

As análises efetuadas acerca das representações gráficas no plano complexo também ratificam a abordagem discorrida no tópico 2.2.1.3, sobre o quanto a inserção de moléculas de Vinil acopladas à cadeia polimérica linear do SBS, a partir da estrutura molecular D0243, utilizada na formulação do HiMA, influencia em um melhor comportamento reológico quando comparado à variação 1101 AT, aplicada no Poliflex 60/85 E, a qual dispõe de níveis ínfimos de Vinil em sua formulação.

Assim, tem-se que a presença de moléculas de Vinil acopladas diretamente à cadeia polimérica da estrutura molecular D0243 (Figura 2.9), viabiliza o maior aporte de diblocos de Estireno-Butadieno (SB) (Figura 2.8), em torno de 75%, quando comparado à variação 1101 AT, com apenas 16%.

Como resultado, ocorre maior compatibilidade com o ligante betuminoso de base, aliado ao fato dos copolímeros SBS poderem absorver até dez vezes o seu peso quando incorporados ao ligante betuminoso, diminuindo os efeitos da maior concentração polimérica quanto à viscosidade do material nas temperaturas de trabalho, conforme abordado nos tópicos 2.3 e 5.2.2 e observado na Figura 5.3.

Este cenário viabiliza a inversão de fase no processo de modificação para a constituição da matriz betuminosa HiMA (Figura 2.11), mesmo contendo percentuais de incorporação polimérica maiores (7,5%) que nas modificações tradicionais (4,0%), além de melhor recuperação elástica e ponto de amolecimento (Tabelas 5.2 e 5.3).

6.2 HABILIDADE DE COMPACTAÇÃO NA PCG

No que diz respeito à habilidade de compactação das misturas asfálticas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA, tem-se que a partir dos limites normativos preconizados em AFNOR NF EN 13108-7 (2006) para a graduação 0/10 mm, foi observado o equadramento integral na classe 1, devido terem apresentado em todos os casos $\%V_{\min} \geq 20\%$ e $\%V_{\max} \leq 26\%$ a 40 giros, e $\%V_{\max} \geq 14\%$ a 200 giros.

Em contrapartida, as misturas asfálticas formuladas com a matriz Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020), foram plenamente enquadradas na classe 2 ($\%V_{\min} \geq 26\%$ e $\%V_{\max} \leq 30\%$ a 40 giros e $\%V_{\max} \geq 20\%$ a 200 giros).

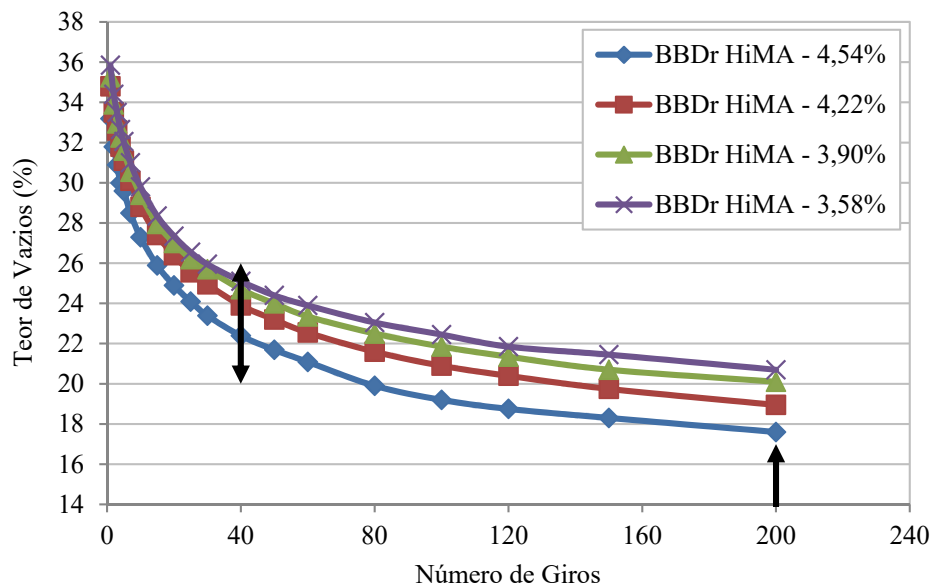
A Tabela 6.1 apresenta e as Figuras 6.6 e 6.7 ilustram, respectivamente, os resultados obtidos após os testes realizados.

Tabela 6.1 - Teor de vazios obtidos nos ensaios de habilidade de compactação com a PCG para as misturas asfálticas BBDr formuladas com as matrizes betuminosas Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020) e HiMA.

Teor de Ligante (%)	Número de Giros	Teor de Vazios (%) Poliflex 60/85 E	Teor de Vazios (%) HiMA
3,58	40	28,2	25,1
	200	23,7	20,7
3,90	40	27,6	24,7
	200	23,1	20,1
4,22	40	27,2	23,9
	200	22,4	19,0
4,54	40	27,1	22,4
	200	21,6	17,6

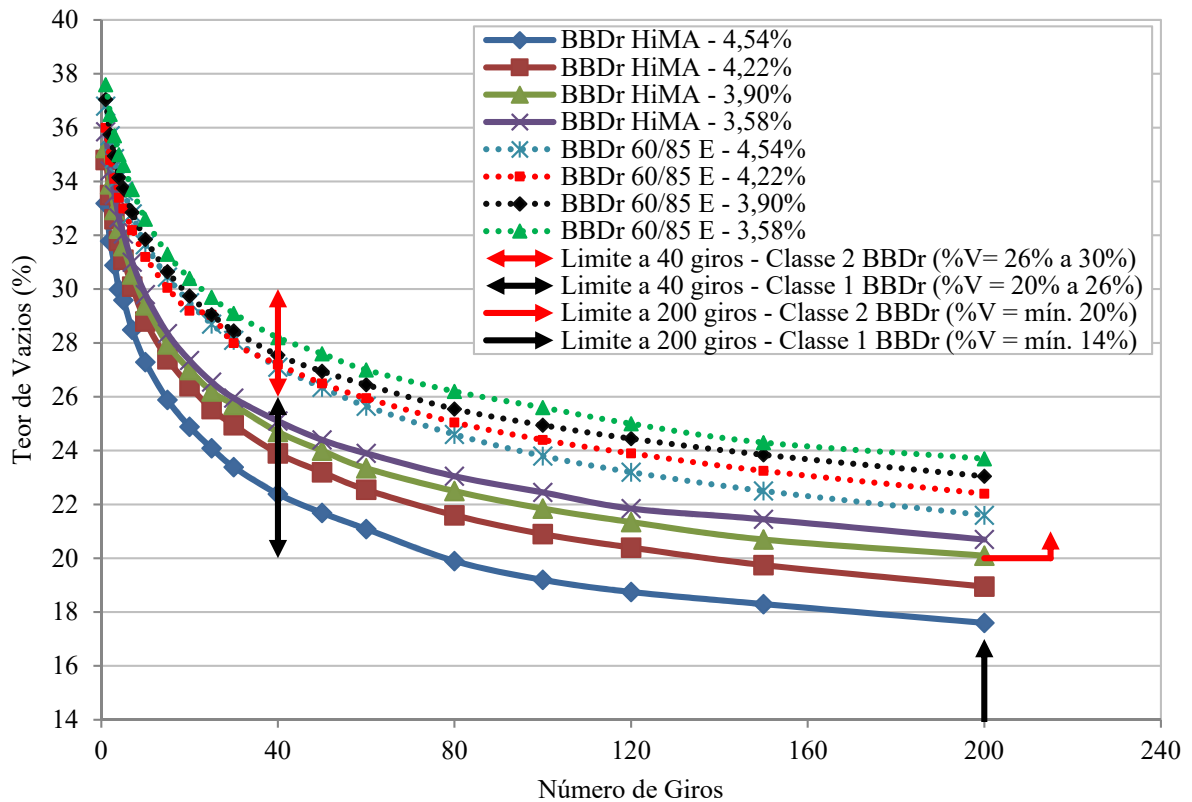
Fonte: Autor.

Figura 6.6 - Habilidade de compactação na PCG da mistura asfáltica BBDr formulada com a matriz betuminosa HiMA.



Fonte: Autor.

Figura 6.7 - Habilidade de compactação na PCG das misturas asfálticas BBDr formuladas com as matrizes betuminosas Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020) e HiMA.



A ocorrência das reduções médias em 1,1% e 1,2% a 40 e 200 giros, respectivamente, em relação ao teor de vazios das misturas asfálticas formuladas com a matriz HiMA, quando comparadas à matriz Poliflex 60/85 E, pode ser explicada pelas temperaturas de compactação determinadas para a execução dos testes com as misturas asfálticas (Figura 5.3), diferindo em 10°C em favor da primeira.

Neste contexto, tem-se que quanto maiores são as temperaturas incididas sobre um material viscoelástico, maior a fluência do ligante betuminoso, situações comprovadas pela diminuição do módulo de cisalhamento dinâmico $|G^*|$ nas curvas isocrônicas (Figura 6.1) e isotérmicas (Figura 6.2), redução do módulo de armazenamento (G') e aumento do módulo de perda (G'') no plano Cole-Cole (Figura 6.3), bem como pelo aumento dos ângulos de fase (δ) no espaço de Black (Figura 6.4).

Estes fatores atuando em conjunto tornam as misturas asfálticas mais suscetíveis aos esforços de cisalhamento gerados durante o processo de compactação, aumentando a compacidade e reduzindo o teor de vazios.

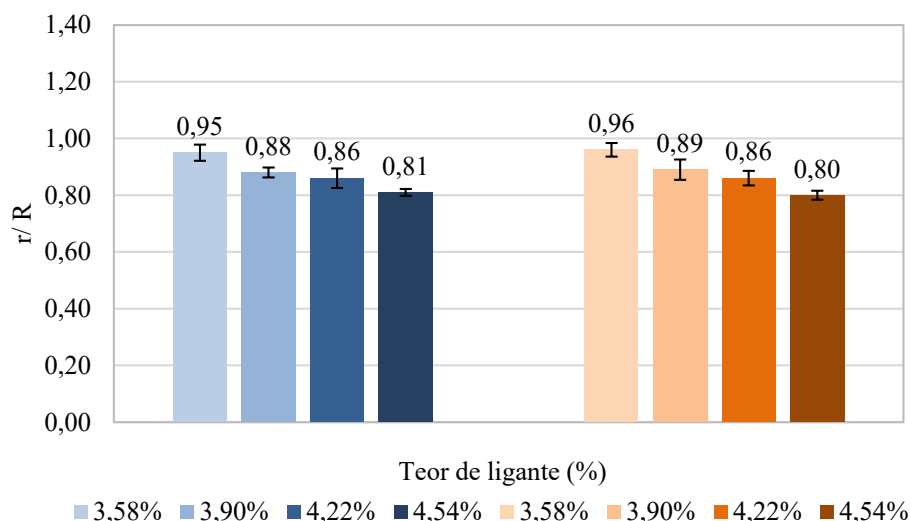
6.3 RESISTÊNCIA À AÇÃO DA ÁGUA - DURIEZ

Para misturas asfálticas do tipo BBDr, ou seja, com característica drenante, verifica-se que o percentual de vazios formados na estrutura interna do material após o processo de compactação é elevado, conforme demonstrado no tópico 6.2. Ainda, parte destes vazios se dispõe de forma comunicante (Figura 3.2), viabilizando a percolação da água através dos interstícios gerados no processo de compactação.

Esta condição acarreta em menor retenção de água nas amostras, sobretudo quando menores teores de ligante betuminoso são utilizados nas dosagens.

Em contrapartida, ao passo em que os teores de ligante aumentam nas dosagens, ocorre a redução na formação de vazios comunicantes, favorecendo o alojamento da água no interior das misturas asfálticas, o que contribui para o majoramento do seu efeito deletério, notadamente a redução da resistência aos esforços mecânicos, devido à elevada tensão superficial que possui, tendendo a remover a película de ligante que envolve os granulares, condição abordada no capítulo 4 (Figura 6.8).

Figura 6.8 - Resistência à ação da água entre as misturas asfálticas BBDr formuladas com as matrizes betuminosas Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020), em azul, e HiMA, em laranja.



Fonte: Autor.

A partir dos resultados observados na Figura 6.8, nota-se que todas as formulações atenderam à relação mínima r/R de 0,80 estabelecida na norma AFNOR NF EN 13108-7 (2006)

para misturas BBDr 0/10 mm, indicando boa resistência do mástique betuminoso à ação deletéria da água.

Cabe ressaltar que esta situação é muito favorecida pela adição de 2,0% de cal hidratada calcítica CH-1 nas composições granulométricas, pois a característica majoritariamente eletropositiva da cal possibilita a formação do dipolo elétrico com a matriz betuminosa e com os granulares gnássicos eletronegativos, aumentando a interação química entre os dois materiais e, conseqüentemente, a adesão do conjunto granular-ligante e a resistência à ação deletéria da água.

Logo, como as misturas asfálticas formuladas com as matrizes betuminosas HiMA e Poliflex 60/85 E possuem a mesma composição granulométrica e os mesmos teores de ligante nas dosagens, verifica-se que o comportamento de ambas neste quesito foi praticamente idêntico.

6.4 PERMEABILIDADE

A Tabela 6.2 apresenta a compilação comparativa dos valores médios obtidos para as determinações de permeabilidade vertical e horizontal das misturas asfálticas formuladas com as matrizes betuminosas Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020) e HiMA.

Tabela 6.2 - Permeabilidade das misturas asfálticas BBDr formuladas com as matrizes betuminosas Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020) e HiMA.

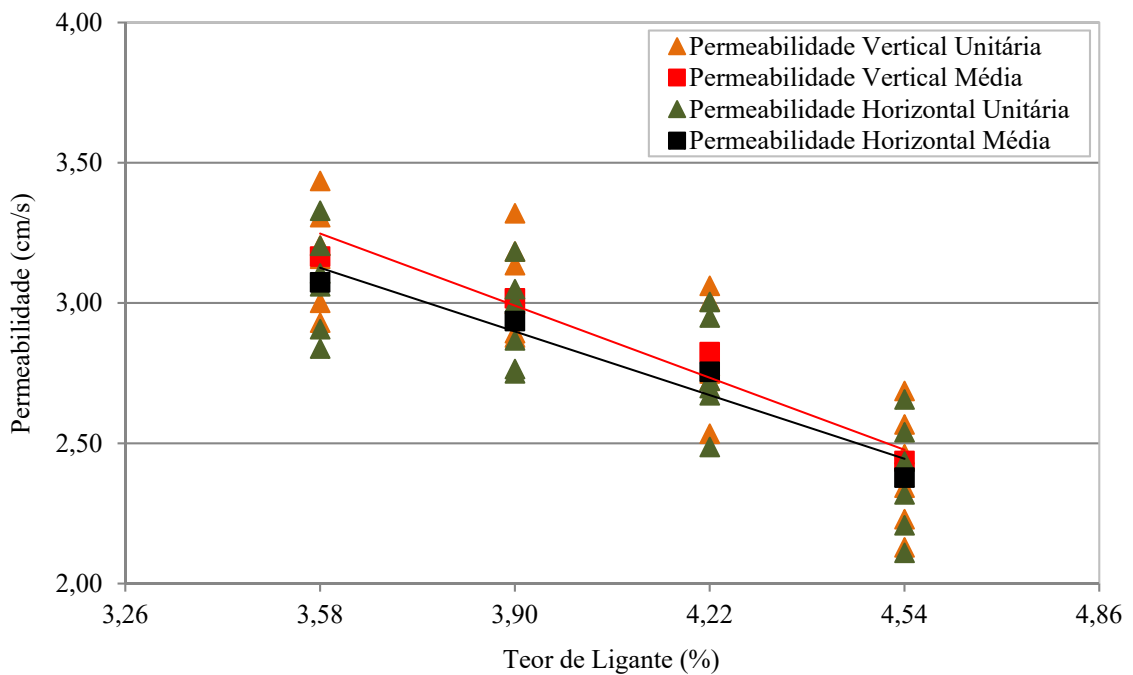
Teor de Ligante (%)	Permeabilidade Poliflex 60/85 E		Permeabilidade HiMA	
	Vertical (cm/s)	Horizontal (cm/s)	Vertical (cm/s)	Horizontal (cm/s)
3,58%	3,68	3,59	3,17	3,07
3,90%	3,55	3,48	3,02	2,94
4,22%	3,44	3,38	2,83	2,76
4,54%	3,16	3,11	2,44	2,38

Fonte: Autor.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6.2, verifica-se que todas as formulações atendem ao dobro do limite mínimo de 1,2 cm/s considerado para misturas asfálticas BBDr de classe 2, e com muita folga ao limite mínimo estabelecido para a classe 1, que é de 0,8 cm/s, de acordo com o MANUEL LPC (2007). Logo, é possível constatar que as formulações concebidas cumprem com as características drenantes exigidas para as misturas BBDr.

Também é importante destacar que assim como na pesquisa desenvolvida por Fagundes (2020), as misturas asfálticas formuladas neste trabalho com a matriz betuminosa HiMA apresentaram permeabilidade vertical próxima à horizontal para um mesmo teor de ligante (Figura 6.9). Esta tendência é igualmente justificada em função da limitação da dimensão superficial da placa moldada, não propiciando grande distância entre o ponto de geração do fluxo d'água, em relação às extremidades, sendo equivalente à espessura da placa.

Figura 6.9 - Permeabilidade vertical e horizontal das misturas asfálticas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA.



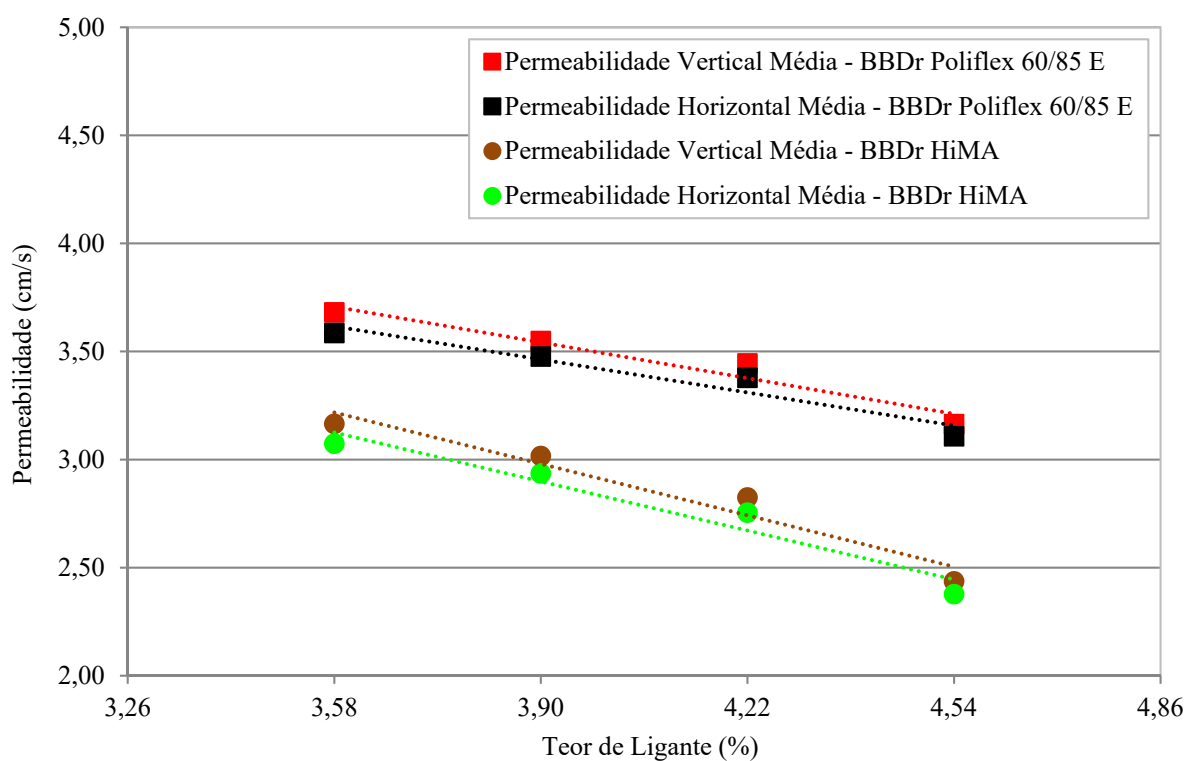
Fonte: Autor.

É possível observar também que os valores de permeabilidade, em todas as direções, foram menores para as formulações da matriz betuminosa HiMA, quando comparadas à Poliflex 60/85 E (Figura 6.10), em que as perdas percentuais são apresentadas na Tabela 6.3, com base nos dados da Tabela 6.2.

Tabela 6.3 - Perdas percentuais de permeabilidade das misturas asfálticas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA, em relação à Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020).

Teor de Ligante (%)	Perdas de Permeabilidade (%)	
	Vertical	Horizontal
3,58%	13,9	14,5
3,90%	14,9	15,5
4,22%	17,7	18,3
4,54%	22,8	23,5

Figura 6.10 - Permeabilidade vertical e horizontal média das misturas asfálticas BBDr formuladas com as matrizes betuminosas Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020) e HiMA.



Fonte: Autor.

Neste contexto, pode-se atribuir esta tendência ao aumento da viscosidade da matriz HiMA à medida que a incidência de calor diminui no material (Figura 5.3), principalmente à temperatura ambiente – condição em que o ensaio de permeabilidade é realizado –, sendo fatores motivados pelo fenômeno da coalescência que ocorre de forma mais intensa, em razão da maior concentração polimérica na constituição da referida matriz. Esta constatação corrobora às conclusões da pesquisa realizada por Shirini e Imaninasab (2016) citada no tópico 4.3.

Além disso, a maior temperatura de compactação exigidas para a moldagem dos corpos de prova também contribui para esta condição, conforme pontuado no tópico 6.2.

Outro fator consoante à pesquisa de Fagundes (2020) é que há uma tendência de maior convergência dos valores de permeabilidade vertical e horizontal à medida que o teor de ligante aumenta nas dosagens. Esta condição é justificada em razão da obstrução do volume de vazios ocorrer gradualmente em ambas as direções, aproximando as taxas de fluxo.

Entretanto, mesmo que próximos, tem-se que a permeabilidade horizontal apresentou valores sempre menores que a vertical, de forma constante, sobretudo pela ação da força gravitacional contribuir para que maiores velocidades de fluxo sejam atingidas verticalmente no contato com a superfície da mistura asfáltica.

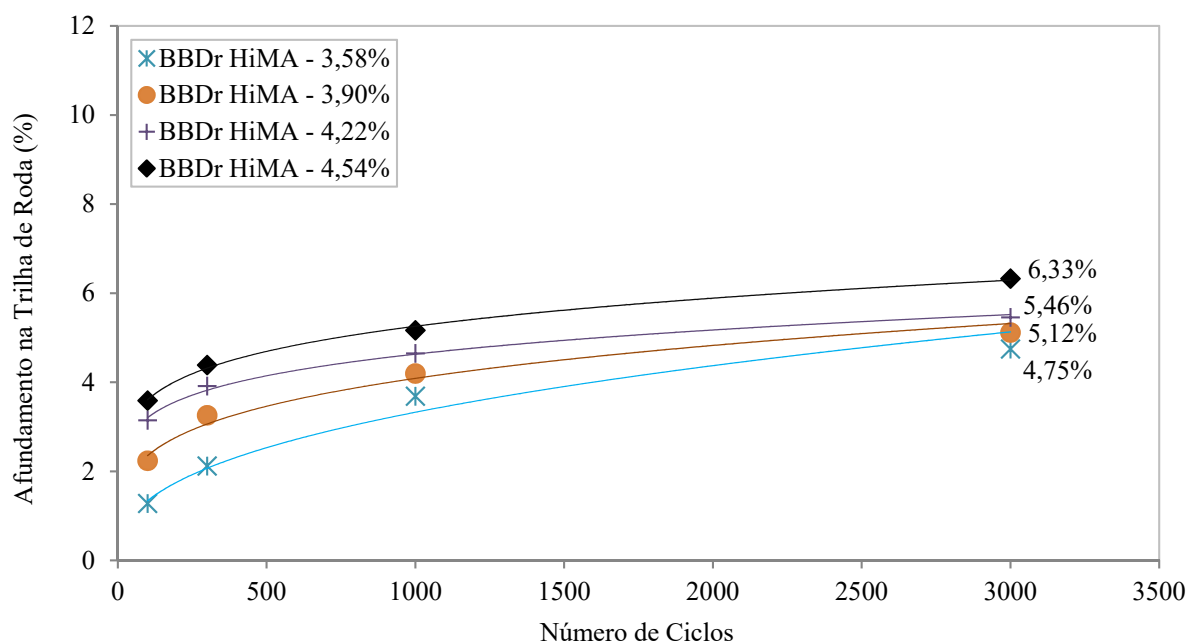
Como suporte também para esta afirmação, destaca-se a anisotropia resultante do processo de compactação das placas (RIVIÈRE, 1996), referente à formação e distribuição aleatória dos vazios, acarretando maiores obstáculos ao escoamento horizontal no interior das misturas asfálticas.

6.5 RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Pelas razões já explanadas nos tópicos 1.3 e 5.3.5, tem-se que devido à ausência de limites normativos para a avaliação da resistência à deformação permanente de misturas asfálticas BBDr, foi adotado o limite previsto para misturas ultra-delgadas do tipo *Béton Bitumineux Très Mince* 0/10 mm B classe 2 (BBTM), que possuem características próximas às BBDr 0/10 mm formuladas para esta pesquisa, considerando um percentual de afundamento na trilha de roda $\leq 15\%$ após 3000 ciclos de solicitação a 60°C.

A Figura 6.11 ilustra os resultados obtidos quanto ao afundamento na trilha de roda para as misturas asfálticas formuladas com a matriz betuminosa HiMA.

Figura 6.11 - Afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA.



Fonte: Autor.

Observando as curvas de evolução dos afundamentos nas trilhas de roda, é possível perceber que todas as formulações apresentaram percentuais inferiores à metade do valor máximo admitido de 15% após 3000 ciclos de solicitação. Portanto, além das taxas de permeabilidade, atendem a outro critério funcional de suma importância às misturas de característica drenante, que é a necessidade de possuir elevada resistência ao fenômeno de deformação permanente.

É importante esclarecer o conceito de funcionalidade ao se tratar do fenômeno de deformação permanente, pois as misturas asfálticas BBDr aplicadas como camada de rolamento em estruturas de pavimento na metodologia francesa, em razão de não possuírem função estrutural, destinam-se principalmente a garantir conforto e segurança ao usuário, logo, características funcionais.

E, no que tange às vertentes conforto e segurança, uma das condições mais importantes no campo é resistir à deformação permanente, a fim de que não sejam produzidos afundamentos nas trilhas de roda capazes de gerar desníveis superficiais que causem desvios de trajetória na condução dos veículos, maior esforço mecânico aos sistemas de suspensão, formação de filmes d'água que propiciam a ocorrência de hidroplanagem e do efeito *spray*, prejudicando a aderência adequada na interface de contato pneu-pavimento e a visibilidade dos usuários,

conforme abordado no tópico 3.3.

Portanto, considerando apenas o âmbito das misturas asfálticas, tem-se que a ocorrência do fenômeno de deformação permanente está diretamente relacionada às condições de concepção, notadamente a qualidade (forma, textura e rigidez) dos granulares, método de composição granulométrica, tipo e dosagem dos ligantes betuminosos, compreendendo a influência da suscetibilidade térmica e cinética destes últimos, conforme demonstrado nas análises do tópico 6.1.

Todavia, os efeitos da ocorrência deste fenômeno afetam diretamente o comportamento funcional das misturas asfálticas, conforme descrito anteriormente.

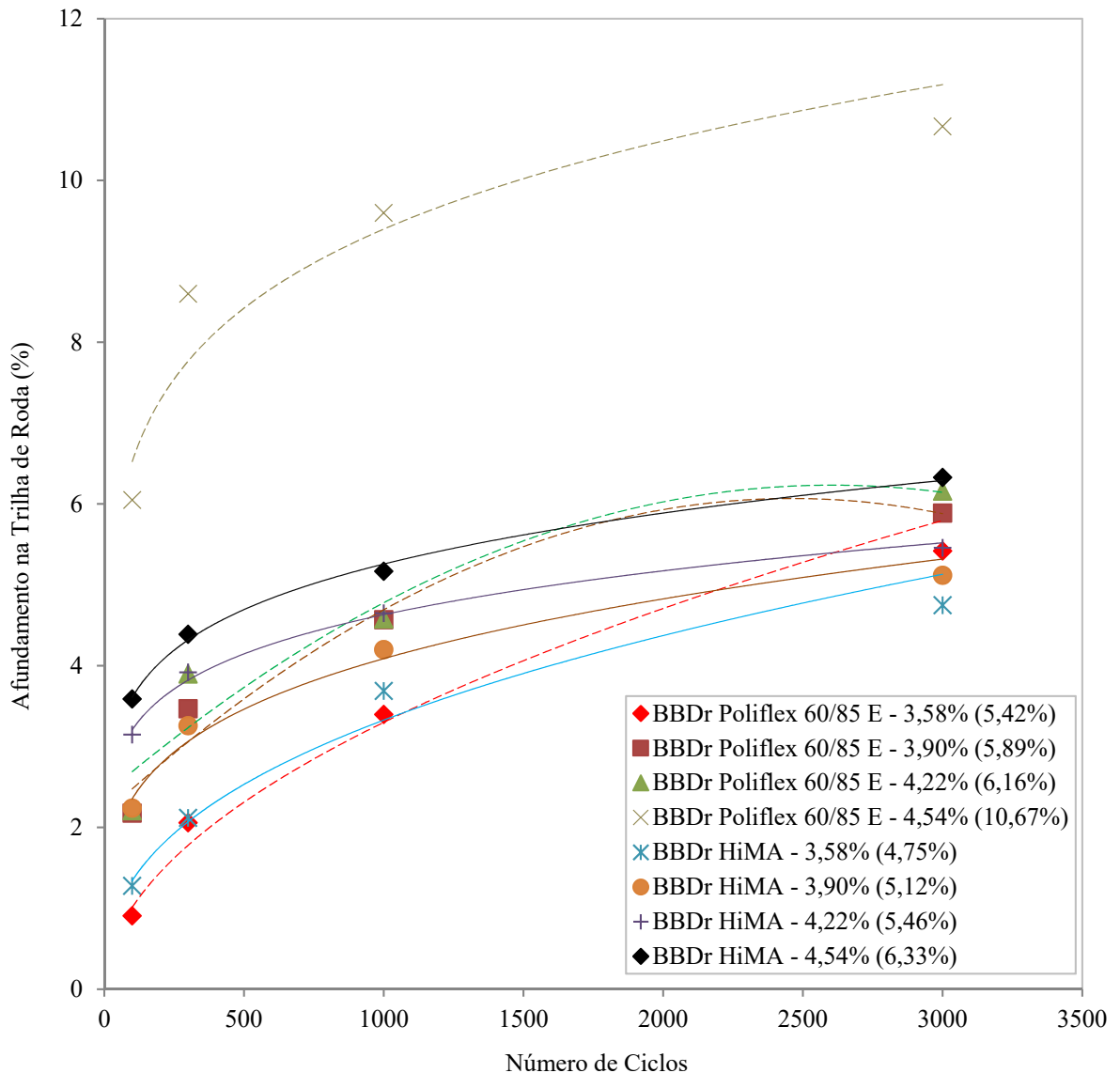
Ao comparar os resultados obtidos com as matrizes betuminosas HiMA e Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020), tem-se que foram obtidos resultados muito próximos de afundamento na trilha de roda, considerando os mesmos teores de ligante, principalmente nas dosagens de 3,58%, 3,90% e 4,22% (Tabela 6.4; Figura 6.12).

Tabela 6.4 - Afundamento na trilha de roda após 3000 ciclos das misturas asfálticas BBDr formuladas com as matrizes betuminosas Poliflex 60/85 E (FAGUNDES, 2020) e HiMA.

Teor de Ligante (%)	Número de Ciclos	Afundamento na trilha de roda (%) Poliflex 60/85 E	Afundamento na trilha de roda (%) HiMA
3,58%	3000	5,42	4,75
3,90%		5,89	5,12
4,22%		6,16	5,46
4,54%		10,67	6,33

Fonte: Autor.

Figura 6.12 - Afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas BBDr formuladas com as matrizes betuminosas Poliflex 60/85 (FAGUNDES, 2020) e HiMA.



Fonte: Autor.

Esta proximidade dos percentuais de afundamentos na trilha de roda para os teores de ligante entre 3,58% e 4,22%, é explicada em função das características dos ligantes betuminosos e das condições de execução do ensaio de deformação permanente.

Neste contexto, tem-se que a metodologia francesa indica normativamente a temperatura de 60°C para a realização do referido ensaio, enquanto os pontos de amolecimento das matrizes betuminosas Poliflex 60/85 E e HiMA atingem os valores de 65,4°C e 90°C, aliados a uma forte recuperação elástica de 90% e 96%, respectivamente (Tabelas 5.2 e 5.3). Logo, a suscetibilidade térmica destes materiais é pouco afetada durante os testes.

Ainda assim, verifica-se um melhor desempenho da matriz betuminosa HiMA, corroborado pelas análises do comportamento reológico efetuadas no tópico 6.1, pois à temperatura de 60°C apresentou menor suscetibilidade térmica e cinética à baixa frequência (1 Hz), menores retardos δ nas respostas aos esforços de cisalhamento no domínio dinâmico à elevada temperatura, além de maiores escalas de módulo de rigidez $|G^*|$.

No caso particular do teor de ligante 4,54%, fica bem evidente o contexto reológico desfavorável à matriz Poliflex 60/85 E, somado à menor viscosidade nas temperaturas inferiores à de trabalho, em relação ao HiMA, conforme abordado anteriormente.

Fagundes (2020) complementa que a partir da dosagem mencionada (4,54%), as misturas asfálticas BBDr testadas parecem também atingir forte suscetibilidade mecânica, devido ao efeito de maior lubrificação do arranjo granular. Como resultado, a resistência aos esforços de cisalhamento diminui e, conseqüentemente, aumenta a deformação permanente, alcançando uma diferença não negligenciável de 4,34% após 3000 ciclos de solicitação, quando comparado ao mesmo teor de ligante da matriz HiMA.

6.6 ENSAIO HAMBURGO

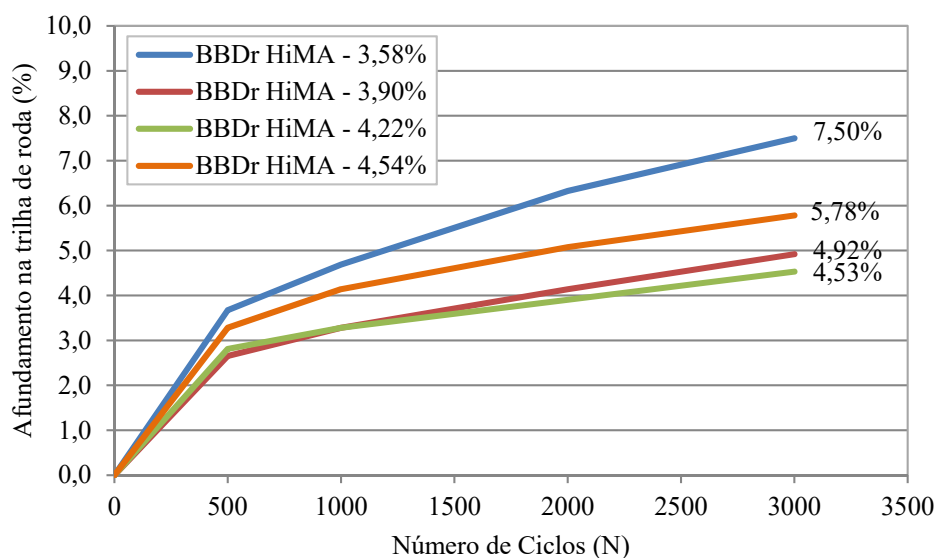
Após 3000 ciclos de solicitação com as amostras imersas em água a 60°C, conforme explanado no tópico 5.3.7, a Tabela 6.5 apresenta os resultados médios de duas determinações referentes aos afundamentos na trilha de roda, bem como os percentuais relativos à espessura de 64,0 mm dos corpos de prova, também ilustrados na Figura 6.13. Reitera-se que estes testes foram executados apenas para as misturas asfálticas formuladas com a matriz betuminosa HiMA, utilizando as mesmas amostras submetidas a 200 giros de solicitação na PCG.

Tabela 6.5 - Afundamento na trilha de roda após 3000 ciclos das misturas asfálticas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA.

Teor de Ligante (%)	Número de Ciclos	Afundamento na trilha de roda (mm) HiMA	Afundamento na trilha de roda (%) HiMA	Teor de Vazios (%) após 200 giros na PCG (Tabela 6.1)
3,58%	3000	4,80	7,50%	20,7
3,90%		3,15	4,92%	20,1
4,22%		2,90	4,53%	19,0
4,54%		3,70	5,78%	17,6

Fonte: Autor.

Figura 6.13 - Afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas BBDr formuladas com a matriz betuminosa HiMA.



Fonte: Autor.

Observando os resultados na Tabela 6.5 e na Figura 6.13, verifica-se que todas as formulações apresentaram percentuais de afundamento na trilha de roda abaixo da metade do limite máximo de 12,0 mm admitido por norma, indicando que possuem boa resistência à aplicação de carregamento solicitante sob condições severas de ação da água.

Este bom desempenho também pode ser explicado pelo ensaio ter sido executado na temperatura de 60°C, em que apesar de ser mais severa que a utilizada tradicionalmente nos ensaios Hamburgo (50°C), se encontra bem abaixo do ponto de amolecimento da matriz betuminosa HiMA, que é de 90°C, logo, sendo pouco afetada em sua suscetibilidade térmica, conforme também abordado no tópico 6.5.

Além disso, a incorporação de 2,0% de cal hidratada calcítica CH-1 na composição granulométrica também contribui na formação de um mástique betuminoso resistente aos efeitos da elevada tensão superficial gerados pela ação deletéria da água, incluindo o fenômeno *water pumping* sobre os vazios, tratado no tópico 3.3, inibindo o descolamento da película de ligante que envolve os granulares, e conseqüentemente, a desagregação da mistura asfáltica. Este cenário corrobora o bom desempenho observado nos resultados do ensaio de Duriez, apresentados no tópico 6.3.

Para a formulação com o menor teor de ligante (3,58%), verifica-se que a maior formação de vazios (Tabela 6.5) permite que a água atue de maneira mais agressiva no interstício estrutural da mistura asfáltica durante a aplicação do carregamento solicitante, em

razão da maior taxa de percolação (Figuras 6.9 e 6.10) e à espessura mais esbelta da película de ligante formada sobre as partículas granulares, resultando no maior percentual de afundamento na trilha de roda (7,50%).

Com o aumento do teor de ligante para 3,90% e 4,22%, ocorre a formação de uma película de recobrimento dos granulares gradativamente mais espessa, diminuindo a formação de vazios e aumentando a eficiência do mástique betuminoso no combate à ação deletéria da água, o que é observado na diminuição e maior estanqueidade de deformação entre as dosagens testadas, caracterizada pelos valores muito próximos obtidos.

Todavia, é perceptível a retomada de um maior percentual de afundamento na trilha de roda à dosagem de 4,54%, configurando a mesma tendência observada nos ensaios de deformação permanente da metodologia francesa.

Esta situação é explicável em razão de que mesmo com a crescente diminuição do teor de vazios e aumento natural da película de ligante que recobre as frações granulares, o acréscimo no teor de ligante neste patamar acarreta em maior lubrificação das interfaces de contato entre as partículas.

Ato contínuo, a resistência ao cisalhamento diminui durante a aplicação dos ciclos dinâmicos de carregamento do ensaio, sobretudo em regime de solicitação à baixa frequência, aliado ao maior alojamento de água nos vazios, devido à perda gradativa da característica comunicante, agravando as deformações permanentes geradas no material.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando os resultados obtidos na campanha experimental, é possível concluir que as formulações concebidas com a matriz betuminosa HiMA atendem às características drenantes especificadas pela metodologia francesa, para misturas asfálticas do tipo *Béton Bitumineux Drainant* (BBDr), cumprindo com o principal objetivo traçado para esta pesquisa. Ainda, no que diz respeito à comparação com os resultados oriundos das formulações dosadas com a matriz Poliflex 60/85 E, correspondente à pesquisa de Fagundes (2020), alguns aspectos importantes são depreendidos.

O acoplamento de moléculas de Vinil na estrutura molecular D0243 da cadeia polimérica SBS utilizada na composição da matriz HiMA, propicia maior compatibilidade com o ligante betuminoso de base, devido à redução dos efeitos da viscosidade no processo de miscibilidade durante a modificação. Esta condição permite maior incorporação de estruturas dibloco S-B (Estireno-Butadieno) na cadeia polimérica do SBS, alcançando participação em torno de 75%, em relação aos 16% normalmente verificados na estrutura molecular convencional 1101 AT utilizada na matriz Poliflex 60/85 E, acarretando a denominada inversão de fases.

O resultado é a recuperação elástica e o ponto de amolecimento mais elevados da matriz HiMA, que contribuem diretamente para a obtenção de um melhor comportamento reológico no plano complexo, considerando os mesmos conjuntos comparativos de temperatura e frequência com a matriz Poliflex 60/85 E. Estes benefícios foram verificados na observação de maiores valores do módulo de rigidez $|G^*|$, com menor parcela de contribuição da componente viscosa no módulo de perda (G''), e ângulos de fase (δ) inferiores, indicando menor suscetibilidade à dissipação de energia sob a forma de calor e menor retardo na resposta das deformações resultantes em relação às solicitações aplicadas, respectivamente.

Todavia, o acoplamento de moléculas de Vinil que permite a inversão de fases mencionada, em que pese contribuir para a redução dos efeitos da viscosidade da matriz HiMA, principalmente quanto à trabalhabilidade nas temperaturas de trabalho, exige em contrapartida a utilização de maiores temperaturas de compactação durante a produção das misturas asfálticas, cerca de 10°C superior à matriz Poliflex 60/85 E.

Este fator contribui para a maior fluidez da matriz HiMA durante o processo de compactação por cisalhamento giratório na PCG após 200 giros, reduzindo em torno de 1,2% o teor de vazios das misturas asfálticas, quando comparadas as mesmas dosagens de ligante em relação à matriz Poliflex 60/85 E. O suficiente para obter uma classificação como BBDr classe 1 no contexto da habilidade de compactação, inferior à classe 2 alcançada pelas misturas asfálticas formuladas com a última matriz mencionada, na pesquisa de Fagundes (2020).

A redução para BBDr classe 1 das misturas asfálticas formuladas com a matriz HiMA após os ensaios realizados com a PCG, impactou diretamente nas determinações de permeabilidade, tanto nas taxas de fluxo vertical quanto horizontal, indicando perdas contínuas e crescentes de capacidade de percolação da água através dos interstícios estruturais. Neste contexto, foram atingidos picos de 22,8% e 23,5% de perda dos fluxos vertical e horizontal, respectivamente, para o maior teor de ligante utilizado nas dosagens (4,54%), quando comparadas à matriz Poliflex 60/85 E.

Ainda assim, mantiveram taxas de permeabilidade ao dobro do limite mínimo de 1,2 cm/s considerado para misturas asfálticas BBDr de classe 2, e com muita folga acima do limite mínimo estabelecido para a classe 1, que é de 0,8 cm/s, indicando que as características drenantes das formulações estão asseguradas. Porém, em longo prazo podem contribuir para um efeito mais precoce do fenômeno de colmatção no campo, caso não haja constante manutenção preventiva neste aspecto.

Quanto à resistência à ação deletéria da água, tem-se que todas as misturas asfálticas conservaram resistência aos esforços de compressão simples a partir de 80% no ensaio de Duriez a 18°C, bem como as formulações dosadas com a matriz HiMA apresentaram afundamentos na trilha de roda abaixo da metade dos 12,0 mm admitidos no ensaio Hamburgo, considerando 3000 ciclos de solitação a 60°C. Atribuem-se estes resultados principalmente ao dipolo formado entre as cargas eletropositivas da cal hidratada calcítica CH-1 incorporadas ao arranjo granulométrica e às matrizes betuminosas predominantemente eletronegativas, aliado à elevada recuperação elástica e ponto de amolecimento destas últimas.

No que diz respeito à resistência à deformação permanente nos testes realizados sem a presença da água, todas as formulações apresentaram percentuais de afundamentos na trilha de roda inferiores à metade do limite máximo de 15% considerado para avaliação, também após 3000 ciclos a 60°C. Assim como observado para o ensaio Hamburgo, tem-se que os elevados pontos de amolecimento de ambas as matrizes betuminosas se encontram acima da temperatura

de 60°C utilizada no ensaio, sendo a suscetibilidade térmica das misturas asfálticas pouco afetada, sobretudo da matriz HiMA.

Dado o exposto, foi possível verificar que as matrizes betuminosas HiMA e Poliflex 60/85 E demonstraram forte viabilidade técnica para utilização em formulações com característica drenante. Entretanto, apesar das misturas asfálticas dosadas com a matriz Poliflex 60/85 E terem apresentado algumas características funcionais em melhor condição para o contexto drenante, como maior teor de vazios e permeabilidade, não se afastaram de forma significativa da matriz HiMA no contexto geral.

Logo, em razão da matriz betuminosa HiMA possuir melhores propriedades físicas e reológicas, conforme já abordado, tem-se que as misturas asfálticas que a contêm apresentaram resultados que indicam melhor resposta em longo prazo às solicitações impostas pelo tráfego no campo, mesmo tendo sido enquadradas como BBDr classe 1.

Ainda, diante das tendências de comportamento observadas, conclui-se que assim como na pesquisa de Fagundes (2020) para a matriz Poliflex 60/85 E, a dosagem de ligante em 4,22% é a mais indicada para utilização entre todas as formulações BBDr testadas com a matriz HiMA. Isto se dá devido além de cumprir com todos os limites normativos exigidos, não apresentarem suscetibilidade mecânica excessiva sob solicitação dinâmica, seja à ação da água, por formação de película esbelta de ligante que envolve os granulares, seja mecânica, em razão da lubrificação importante do contato direto das partículas granulares nas dosagens mais elevadas, conforme observado nos ensaios de resistência à deformação permanente a seco e com imersão em água.

Como recomendação para trabalhos futuros, cabem investigações mais acuradas no domínio nanoparticular sobre o impacto das concentrações moleculares das estruturas moleculares D0243 e 1101 AT, a partir de análises químicas, espectroscopia infravermelha com transformada de Fourier (FTIR) e Raman, além de microscopia eletrônica de varredura, a fim de verificar o impacto estrutural das moléculas S-B nos processos de inversão de fases nas matrizes betuminosas de base.

Convém ainda executar estudos em campo com as formulações propostas, a fim de verificar a eficiência quanto à aderência pneu-pavimento e ao fenômeno da colmatação, em longo prazo, mediante variadas condições intempéricas e às cargas dinâmicas de solicitação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO M-332 (2021), Standard specification for performance-graded asphalt binder using multiple stress creep recovery (MSCR) test. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T-315 (2020), Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T-350 (2019), Standard method of test for multiple stress creep recovery (MSCR) test of asphalt binder using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO T-324 (2019), Standard method of test for Hamburg wheel-track testing of compacted asphalt mixtures. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ABDO, A. M. A.; JUNG, S. J. (2016), Effects of asphalt mix design properties on pavement performance: a mechanistic approach. *Advances in Civil Engineering*, Vol. 2016, Article ID 9354058. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/9354058>.
- ABNT NBR 15184 (2004), Materiais betuminosos - determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- AFINKO (2017), O que são copolímeros e quais as suas classificações? Conceitos e definições de polímeros. Disponível em <https://afinkopolimeros.com.br/o-que-sao-copolimeros-e-suas-classificacoes/>. Último acesso em agosto de 2021.
- AFNOR NF EN 12697-22 (2020), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 22: Essai d'orniérage. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- AFNOR NF EN 12697-19 (2020), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 19: Perméabilité des éprouvettes. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.

- AFNOR NF EN 12697-33 (2019), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 33: Préparation de corps d'épreuve au compacteur de plaque. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- AFNOR NF EN 12697-31 (2019), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 31: Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- AFNOR NF EN 12697-12 (2018), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- AFNOR NF EN 12697-5 (2018), Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai - Partie 5: Masse volumique réelle (MVR). Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- AFNOR NF EN 14770 (2012), Bitumes et liants bitumineux: détermination du module complexe en cisaillement et de l'angle de phase – rhéométrie à cisaillement dynamique (DSR). Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- AFNOR NF EN 13924 (2006), Bitumes et liants bitumineux: Spécifications des bitumes routiers de grade dur. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- AFNOR NF EN 13108-7 (2006), Mélanges bitumineux: spécifications des matériaux - Partie 7: Bétons Bitumineux Drainants (BBDr). Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- AFNOR NF EN 13108-2 (2006), Mélanges bitumineux: spécifications des matériaux - Partie 2: Bétons Bitumineux Très Minces (BBTM). Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- AFNOR NF P 98-134 (1991), Enrobés hydrocarbonés - Couches de roulement: béton bitumineux drainant - Définition - Classification - Caractéristiques - Fabrication - Mise en oeuvre. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France.
- ALECRIM, C. M. C.; MAIA; R. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F. (2019), Avaliação da utilização de mistura asfáltica reciclada em camada porosa de atrito. In: Anais do 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), 12 p. Balneário Camboriú, Santa Catarina.

- ALENCAR, A. E. V. de (2009), Avaliação do uso de polímero EVA, resíduo da indústria de calçados (EVAR) e aditivos no desempenho reológico de ligante asfáltico de petróleo. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Ceará (UFC), 158 p. Fortaleza, Ceará.
- ALGER, M. (1997), Polymer science dictionary. Chapman & Hall, 2nd edition. ISBN: 0-412-60870. London, UK.
- ALIMANI, M. (1987), Contribution à l'étude de l'endommagement par fatigue des enrobés bitumineux. Thèse de Docteur. Université Pierre et Marie Curie, 143 p. Paris, France.
- ALVES, A.; SPECHT, L. P.; DRESCH, F.; ECHEVERRIA, J. A. S. (2018), Estudo acústico de tráfego rodoviário rodante sobre pavimentos em concreto asfáltico e com camada porosa de atrito na rodovia BR 158/RS. Revista Transportes, Vol. 26, Issue 4, ISSN: 2237-1346. DOI: 10.14295/transportes.v26i4.1410.
- ANDERSON, D. A.; CHRISTENSEN, D. W.; BAHIA, H. (1991), Physical properties of asphalt cement and the development of performance-related specifications. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Vol. 60, ISSN: 0270-2932, p. 437-475.
- ANDRADE, V. D.; BARRA, B.; BERNUCCI, L.; MOMM, L.; GUERRERO PEREZ, Y. A.; HASTENPFLUG, D.; NIERWINSKI, H. P.; HEIDEMANN, M. (2020), Impacto da formulação de composições granulométricas nas propriedades mecânicas e funcionais de misturas asfálticas densas. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, p. e12905. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200004.1205>.
- ANDRADE, V. D. (2018), Influência da formulação de esqueletos minerais na deformação permanente de misturas de concreto asfáltico densas. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 167 p. Joinville, Santa Catarina.
- ANP (2010), Resolução ANP nº32: Especificações do cimento asfáltico de petróleo modificados por polímeros elastoméricos, comercializado pelos diversos agentes econômicos em todo território nacional. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Publicada no DOU em 22/09/2010. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/petroleo-derivado/asfalto>. Último acesso em agosto de 2021.

- ANP (2005), Resolução ANP nº19: Especificações do cimento asfáltico de petróleo (CAP), comercializado pelos diversos agentes econômicos em todo território nacional. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Publicada no DOU em 11/07/2005, retificada em 17/03/2006. Disponível em <http://www.anp.gov.br/petroleo-derivado/asfalto>. Último acesso em agosto de 2021.
- ARAMBULA, E.; MASAD, E; MARTIN, A. E. (2007), The influence of air void distribution on the moisture susceptibility of asphalt mixes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 19, Issue 8, pp. 655-664. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:8\(655\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:8(655)).
- ASTM C1781 (C1781M-18e1) (2018), Standard test method for surface infiltration rate of permeable unit pavement systems. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA.
- ASTM WK15789 (2007), New practice for construction of porous asphalt pavements with stone reservoirs. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA.
- ASTRANA JÚNIOR, C. A. L. (2006), Estudo da absorção sonora e permeabilidade em concretos asfáltico drenantes. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 138 p. Florianópolis, SC.
- ATKINS, P.; JONES, L. (2018), *Princípios de Química: questionando a vida moderna e o meio ambiente*. Bookman, 7ª ed., ISBN 978-85-8260-462-5, 874 p. Porto Alegre, RS.
- BAAJ, H. (2002), *Comportement à la Fatigue des Matériaux Granulaires Traités aux Liants Hydrocarbonés*. Thèse de Doctorat présentée devant L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA), 264 p. Lyon, France.
- BARRA, B. S. (2009), Avaliação da ação da água no módulo complexo e na fadiga de misturas asfálticas densas. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 327 p. Florianópolis, Santa Catarina.
- BARRA, B.; MOMM, L.; GUERRERO, Y.; BERNUCCI, L. (2014), Characterization of granite and limestone powders for use as fillers in bituminous mastics dosage. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 86, Issue 2, p. 995-1002. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201420130165>.

- BARRA, B. S.; MOMM, L.; GUERRERO, Y.; BERNUCCI, L. (2012), Fatigue behavior of dense asphalt mixes in dry and environmental-conditioning states. *Construction and Building Materials*, Vol. 29, pp. 128-134, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.003>.
- BOCK, A. L.; HARTMANN, D.; BUDNY, J.; SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. (2009), Avaliação de diferentes métodos de adição de cal em misturas de concreto asfáltico. In: *Anais do IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projeto de Reforço (SINAPPRE)*, Vol. 1, pp.1-14. Fortaleza, CE.
- BOEIRA, F. D. (2014), Estudo do comportamento de concreto asfáltico com diferentes tipos de agregados e cales. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 148 p. Santa Maria-RS.
- BRONDANI, C. (2019), Estudo do efeito deletério da água em misturas asfálticas a quente produzidas no Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 202 p. Santa Maria, RS.
- BROWN, S. F.; ROWLETT, R. D.; BOUHER, J. L. (1991) Asphalt modification. In: *Sharing the benefits – The United States Strategic Highway Research Program*, pp. 181-203. London, UK.
- BULATOVIC, V. O.; REK, V.; MARKOVIC, K. J. (2013), Influence of polymer types on bitumen engineering properties. *Materials Research Innovations*, Vol. 17, Issue nº 3. DOI : <https://doi.org/10.1179/1433075X12Y.0000000059>.
- CanSTOCK PHOTO® (2021), Golpes, reflexão, asfalto, carros, below., chuva, tráfego, poças, luzes, faróis, car's, night., vista. Disponível em <https://www.canstockphoto.com.br>. Último acesso em setembro de 2021.
- CBB ASFALTOS (2021), Ensaio de grau de desempenho de ligantes asfálticos - HiMA. Curitiba, PR.
- CBB ASFALTOS (2020), Laudo de caracterização do ligante betuminoso HiMA. Curitiba, PR.

- CAO, Z.; HUANG, X.; YU, J.; HAN, X.; WANG, R.; LI, Y. (2021), Laboratory evaluation of the effect of rejuvenators on the interface performance of rejuvenated SBS modified bitumen mixture by surface free energy method. *Construction and Building Materials*, Vol. 271, 121866, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121866>.
- CASTAÑEDA, E. (2004), Contribution de méthodes non destructives a l'évaluation de l'effet de l'eau sur les enrobés bitumineux. Thèse de Doctorat, Université de Nantes. Nantes, France.
- CAVALCANTI, L. S. (2010), Efeito de Alguns Modificadores de Ligantes na Vida de Fadiga e Deformação Permanente de Misturas Asfálticas. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 196 p., Rio de Janeiro, RJ.
- CELART DOIS (2015), Processo de refino de petróleo. Disponível em <http://celartdois.blogspot.com/2015/04/processo-de-refino-do-petroleo.html>.
- CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. (2018), Non-newtonian flow and applied rheology: engineering applications. Elsevier, 2nd edition, Butterworth-Heinemann, ISBN: 9780750685320, 518 p.
- CHEN, M; GENG, J.; XIA, C.; HE, L.; LIU, Z. (2021), A review of phase structure of SBS modified asphalt: Affecting factors, analytical methods, phase models and improvements. *Construction and Building Materials*, Vol. 294, 123610, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123610>.
- CHOUDARY, J.; KUMAR, B.; GUPTA, A. (2020), Effect of filler on the bitumen-aggregate adhesion in asphalt mix. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 21, Issue 12. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1549325>.
- 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), 164 p. Joinville, SC.
- CLIMATEMPO (2020), Características climáticas das regiões brasileiras. Disponível em <https://www.climatepo.com.br/>. Último acesso em agosto de 2021.

- COHEN, P. S.; COHEN, S. M. (1996), Wöhler's Synthesis of Urea: How Do the Textbooks Report It? *Journal of Chemical Education*, Vol. 73, Issue nº 9, 883. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed073p883>
- CONG, P.; WANG, J; LUO, W.; ZHANG, Y. (2021), Effects of aging on the properties of SBS modified asphalt binders containing anti-aging agentes. *Construction and Building Materials*, Vol. 302, 124413, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124413>.
- CORBETT, L. W. (1969), Composition of Asphalt Based on Generic Fractionation, Using Solvent Deasphalting, Elution-Adsorption Chromatography, and Densimetric Characterization. *Analytical Chemistry*, Vol. 41, pp. 576–579. DOI: 10.1021/ac60273a004
- CRAVO, M. C. C. (2016), Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástique e matriz de agregados finos. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 251 p. Rio de Janeiro, RJ.
- CURTIS, C.; ENSLEY, K.; EPPS, J. (1993), Fundamental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and absorption. Strategic Highway Research Program (SHRP-A-341), ISBN: 0-309-05614-4, National Research Council, 605 p. Washington, D.C. (USA).
- DAN, H-C; ZOU, Z-M; ZHANG, Z.; TAN, J-W (2020), Effects of aggregate type and SBS copolymer on the interfacial heat transport ability of asphalt mixture using molecular dynamics simulation. *Construction and Building Materials*, Vol. 250, 118922, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118922>.
- D'ANGELO, J.; ROBERT, K; DONGRE, R.; STEPHENS, K; ZANZOTTO, L. (2007), Revision of the Superpave high temperature binder specification: the multiple stress recovery test. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, Vol. 76, pp. 126-116.
- De La ROCHE, C. (1996), Module de rigidité et comportement en fatigue des enrobés bitumineux: expérimentations et nouvelles perspectives d'analyse. Thèse de Doctorat, Châtenay-Malabry, École Centrale de Paris, 217 p. Paris, France.

- DELGADILLO, R.; BAHIA, H. (2005), Rational fatigue limits for asphalt binders derived from pavement analysis. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, Vol. 74, ISSN: 0270-2932, Proceedings of the technical sessions, pp.97-138. Long Beach, California.
- DI MUNDO, R.; LABIANCA, C.; CARBONE, G.; NOTARNICOLA, M. (2020), Recent Advances in Hydrophobic and Icephobic Surface Treatments of Concrete. *Coatings*, Vol. 10 (5), 449. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings10050449>.
- DNIT (2006), Manual de pavimentação. 3ª Edição, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Instituto de Pesquisa Rodoviária (IPR) – Publicação IPR-719, 274 p.
- DONGMO-ENGELAND, B-J. (2005), Caractérisation des déformations d'orniérage des chaussées bitumineuses. Thèse de Docteur Ingénieur. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA). Laboratoire GéoMatériaux du Département Génie Civil et Bâtiment de Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE), 265 p. Lyon, France.
- DuPONT® (2014), Technical studies and expert papers confirm performance of Elvaloy RET. Available at <https://www.dupont.com/construction-materials.html>. Último acesso em setembro de 2021.
- EDUARDO-JAVIER ELIZONDO-MARTÍNEZ, E-J; ANDRÉS-VALERI, V-C; JATO-ESPINO, D.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, J. (2020), Review of porous concrete as multifunctional and sustainable pavement. *Journal of Building Engineering*, Vol. 27, 100967, ISSN 2352-7102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100967>.
- EUROVIA (2006), Projet d'un enrobé BBDr 0/10 porphyne lessines. Lille, France.
- FAGUNDES, P. M. (2020), Avaliação do comportamento funcional de misturas asfálticas do tipo BBDr e BBTM. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas (Pós-ECM) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 136 p. Joinville, Santa Catarina.
- FERREIRA, W. L. G. (2013), Avaliação da permeabilidade de misturas asfálticas com diferentes granulometrias. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Civil apresentado ao Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará (UFC), 68 p. Fortaleza, CE.
- FERRY, J. D. (1961), *Viscoelastic properties of polymers*. 1st edition, John Wiley & Sons, Inc., 482 p. New York, USA.

- FHWA-HIF-15-009 (2015), Porous asphalt pavements with stone reservoirs. Tech Brief, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 11 p. Available at <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/asphalt/pubs/hif15009.pdf>. Último acesso em setembro de 2021.
- FIELD, R.; MASTERS, H.; SINGER, M. (1982), An overview of porous pavement research. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, Paper nº 81097. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1982.tb03970.x>.
- FURLAN, A. P. (2006), Considerações acerca da adesão e da suscetibilidade à umidade de misturas asfálticas densas à luz de algumas propriedades mecânicas. Tese de Doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), 202 p. DOI: [10.11606/T.18.2006.tde-12122006-215334](https://doi.org/10.11606/T.18.2006.tde-12122006-215334).
- GAMA, D. A.; YAN, Y.; RODRIGUES, J. K. G.; ROQUE, R. (2018), Optimizing the use of reactive terpolymer, polyphosphoric acid and high-density polyethylene to achieve asphalt binders with superior performance. *Construction and Building Materials*, Vol. 169, pp. 522-529, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.206>.
- GECKIL, A.; SELOGLU, M. (2018), Performance properties of asphalt modified with reactive terpolymer. *Construction and Building Materials*, Vol. 173, pp. 262-271, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.036>.
- GERSHKOFF, D. R. (1995), Polymer modified bitumens: performance in empirical and rheological tests. In: *Proceedings of the 1st European Workshop on Rheology of Bituminous Binders*, paper 34. Brussels, Belgium.
- GOLUBEV, Y. A.; KOVALEVA, O. V.; YUSHKIN, N. P. (2008), Observations and morphological analysis of super molecular structure of natural bitumens by atomic force microscopy. *Fuel*, Volume 87, Issue 1, pp. 32-38, ISSN 0016-2361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.04.005>.
- GONÇALVES, F. J. P.; CERATTI, J. A. P.; SOMACAL, L. (2000), Investigação do desempenho de misturas asfálticas convencionais e modificadas com polímeros: proposição de um estudo envolvendo ensaios acelerados de pavimentos com um simulador linear de tráfego. In: *Anais do Simpósio Internacional de Manutenção e Restauração de Pavimentos e Controle Tecnológico*. São Paulo, SP.

- GOODRICH, J. L. (1988), Asphalt and polymer modified asphalt properties related to the performance of asphaltic concrete mixes. In: Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 57, pp. 116-175. Saint Paul, MN.
- GOOSWILLIGEN, G. V.; DE BATS, F.T.; HARRISON, T. (1989), Quality of paving grade bitumen – a practical approach in terms of functional tests. In: Proceedings of the 4th Eurasphalt & Eurobitume Symposium, pp. 290-297, Madrid, Spain.
- GRIFFIN, R. I.; MILES, T. K.; PENTHER, C. J. (1961), Microfilm durability test for asphalt. In: Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), pp. 24-31.
- GRIFFIN, R. I.; MILES, T. K.; SIMSON, W. C. (1959), Influence of composition of paving asphalt on viscosity, viscosity-temperature, susceptibility and durability. Journal of Chemical and Engineering Data, Vol. 4, pp. 349-354.
- GUIDE TECHNIQUE (1994), Conception et dimensionnement des structures de chaussée. Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) et Le Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA).
- GUIMARÃES, J. M. F. (2012), Concreto asfáltico drenante em asfaltos modificados por polímero SBS e borracha moída de pneus. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 136 p. Florianópolis, Santa Catarina.
- GUNKEL, K. O'C. (1995), Hot Mix Asphalt Mixing Facilities. 'WILDWOOD Environmental-Engineering Consultants, Inc., 24 p. Baltimore, MD. Cited by AP-42: Compilation of Air Emissions Factors - Pollutant Emissions Factors, 5th Edition, Volume 1: Stationary Point and Area Sources. United States Environmental Protection Agency (EPA). Available at https://www3.epa.gov/ttnchie1/old/ap42/ch11/s01/reference/ref02_c11s01_2004.pdf.
Último acesso em setembro de 2021.
- HABBOUCHE, J.; BOZ, I.; DIEFENDERFER, B. K.; SMITH, B. C.; ADEL, S. H. (2021), State of the practice for high polymer-modified asphalt binders and mixtures. Transportation Research Record 1–13, National Academy of Sciences: Transportation Research Board. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198121995190>.
- HANSEN, K. R. (2008), Porous asphalt pavements for stormwater management: design, construction, and maintenance guide. Information Series 131, National Asphalt Pavement Association (NAPA). Lanham, MD.

- HECK, J-V. (2001), Modélisation des déformations réversibles et permanentes des enrobés bitumineux: application à l'orniérage des chaussées. Thèse de Doctorat, l'Université de Nantes, École Doctorale Mécanique, Thermique et Génie Civil, 230 p. Nantes, France.
- HEFER, A. W.; BHASIN, A.; LITTLE, D.N. (2006), Bitumen Surface Energy Characterization Using a Contact Angle Approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, Issue 6. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:6\(759\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:6(759)).
- HEFER, A.W.; LITTLE, D.; ROBERT, L.; AL-QADI, I.L.; TAYLOR, M.; KING, G.; ANDERSON, D. (2005). A synthesis of theories and mechanisms of bitumen-aggregate adhesion including recent advances in quantifying the effects of water. *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT)*, In: *Proceedings of the Technical Sessions*, Vol. 74, pp. 139-195.
- HEYSTRAETEN, V; MOREAUX, C. (1990), Ten years' experience of porous asphalt in Belgium. *Transportation Research Record*, Issue Number: 1265, pp. 34-40, ISSN 0631-1981. Available at <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1990/1265/1265-004.pdf>.
- HICKS, R. P. (1991), Moisture damage in asphalt concrete. *Synthesis of Highway Practice 175*, Transportation Research Board, National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), 91 p. Washington, D.C.
- HU, M.; LI, L.; PENG, F. (2019), Laboratory investigation of OGFC-5 porous asphalt ultra-thin wearing course. *Construction and Building Materials*, Vol. 219, pp. 101-110, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.205>.
- HUANG, W.; LIU, X.; ZHANG, S.; ZHENG, Y.; DING, Q.; BIN, T. (2021), Performance-Guided Design of Permeable Asphalt Concrete with Modified Asphalt Binder Using Crumb Rubber and SBS Modifier for Sponge Cities. *Materials*, 14 (5), 1266. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14051266>.
- HUET, C. (1963), Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés. Thèse de Docteur-Ingénieur, Faculté des Sciences de l'Université de Paris, 69 p. Paris, France.

- HUET, M.; DE BOISSOUDY, A.; GRAMSAMMER, J-C; BAUDUIN, A.; SAMANOS, J. (1990), Experiments with porous asphalt on the Nantes fatigue test track. *Transportation Research Record*, Issue Number: 1265; Transportation Research Board, ISSN: 0361-1981, p. 54-58. Available at <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1990/1265/1265-006.pdf>
- HUNTER, R. N. (2000), *Asphalt in Road Construction*. ICE Publishing, ISBN: 9780727727800, 568 p. London, UK.
- HUNTER, R. N. (2015), *The Shell bitumen handbook*. 6th edition, ICE Publishing, 17 p. Westminster, London.
- HUNTER, E. R.; KSAIBATI, K. (2002), Evaluating moisture susceptibility of asphalt mixes. Mountain-Plains Consortium, MPC Report n° 02-138, 149 p., U.S. Department of Commerce. Springfield, Virginia.
- IFSTTAR (2019), Procédure de compactage des enrobés bitumineux BBDr. N° d’Affaire: 98-15, Formule 30, ornièreur jante acier. Institut Français des Technologies des Transports, de l’Aménagement et des Réseaux. Nantes, France.
- INMET (2020). Precipitação total anual. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=desvioChuvaAnual>. Último acesso em setembro de 2021.
- ISACSSON, U.; LU, X. (1995), Testing and appraisal of polymer modified road bitumens – state of the art. *Materials and Structures*, Vol. 28, pp. 139–159. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02473221>.
- IWAMA, M; YOSHINAKA, T; OMOTO, S. (2010), Advanced use of environmentally-friendly pavement technologies. In: *Annals of the 11th International Conference on Asphalt Pavements (ISAP)*, Session 9B: climate change, pp. 1938-1947. Nagoya, Japan.
- JELLEMA, E.; VONK, W. (2016), Improving durability and functionality retention of porous asphalt by using high performing bituminous binders. In: *Proceedings of the 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 11 p. Prague, Czech Republic. Available at <https://www.h-a-d.hr/pubfile.php?id=964>. Última consulta em setembro de 2021.
- Jl, K.; ARSON, C. (2020), Tensile strength of calcite/HMWM and silica/HMWM interfaces: A Molecular Dynamics analysis. *Construction and Building Materials*, Vol. 251, 118925, ISSN 0950 -0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118925>.

- JI, X.; HOU, Y.; ZOU, H.; CHEN, B.; JIANG, Y. (2020), Study of surface microscopic properties of asphalt based on atomic force microscopy. *Construction and Building Materials*, Vol. 242, 118025, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118025>.
- JIANG, Z.; HU, C.; EASA, S.; ZHENG, X.; EL HALIM, A. O. A. (2018), Identifying optimal polymer type of modified asphalt based on damping characteristics. *Construction and Building Materials*, Vol. 173, pp. 308-316, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.278>.
- JIANGA, Y.; ZHANG, Y. (2010), Interaction and molecular weight distribution behavior in polymer blends of styrene–butadiene–rubber and bitumen. *Advances in Building Materials*. Vols. 168-170, pp. 973-980. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.168-170.973>.
- KANABAR, N. (2010), Comparison of ethylene terpolymer, styrene butadiene, and polyphosphoric acid type modifiers for asphalt cement. Thesis submitted to the Department of Chemistry in conformity with the requirements for the degree of Master of Science on Queen’s University, Kingston. Ontario, Canada.
- KENNEDY, T. W.; ROBERTS, F. L.; LEE, K. W. (1983), Evaluation of Moisture Effects on Asphalt Concrete Mixtures. *Transportation Research Record*, Vol. 911, pp. 134- 143. Available at <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1983/911/911-019.pdf>. Último acesso em setembro de 2021.
- KEYF, S.; ISMAIL, O.; ORBACIOGLU, O. B. (2007), The modification of bitumen with synthetic reactive ethylene terpolymer and ethylene terpolymer. *Petroleum Science and Technology*, Vol. 25, pp. 561-568. DOI: 10.1080/10916460500294259.
- KIGGUNDU, B. M.; ROBERTS, F. L. (1988), Stripping in HMA mixtures: State-of-the-art and critical review of test methods. National Center for Asphalt Technology (NCAT), Report N° 88-2, 44 p. Auburn, AL.
- KING, G. N.; KING, H. W.; CHAVEROT, P. (1993), Using European wheel-tracking and restrained tensile tests to validate SHRP performance-graded binder specifications for polymer modified asphalts. In: *Proceedings of the 5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Vol. 1A (1.06), pp. 51-55. Stockholm, Sweden.

- KINLOCH, A. J. (1990), Adhesion and adhesives. Ed. Chapman, and Hall, University of London, 440 p. London, UK.
- KLUTTZ, R. Q.; JELLEMA, E.; WOLDEKIDAN, M. F.; HUURMAN, M. (2013), Highly modified bitumen for prevention of winter damage in OGFCs. In: Airfield and Highway Pavement Conference, pp. 1075-1087. Los Angeles, California, USA.
- KNABBEN, R. (2012), Estudo do ruído pneu-pavimento e da absorção sonora em diferentes revestimentos de pavimento. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 251 p. Florianópolis, SC.
- KRATON® (2021), Bock copolymer development. Presentation on HiMA slide pack. Kraton Performance Polymer Incorporated. USA.
- KUCHIISHI, A. K.; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L. L. B. (2019), Effect of mixture composition on the mechanical behaviour of cold recycled asphalt mixtures. International Journal of Pavement Engineering, Volume 22, 2021 - Issue 8. DOI: <https://doi.org/10.1080/10298436.2019.1655564>.
- KUENNEN, T. (2012), Oklahoma Anticipates I-40 Performance Gain with HMA. Asphalt Pro Magazine, pp. 38-43. Available at <https://www.pavementpreservation.org/wp-content/uploads/2012/10/Asphalt-Pro-Kraton-Low-Res21.pdf>.
- LEITE, L.F.M. (1999), Estudo de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Polímeros do Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano (IMA), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 266 p. Rio de Janeiro, RJ.
- LEITE, L.F.M.; MENEZES, S.M.C. (2003), Efeito da composição química dos ligantes na resistência ao descolamento de misturas asfálticas. In: Anais do 17º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), CD-ROM, Rio de Janeiro, RJ.
- LINDER, R. (1977), Application de l'essais de traction directe aux enrobes bitumineux. Bulletin de Liaison de Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° Spécial V, pp. 255-274.
- LITTLE, D. N.; EPPS, J. A.; SEBAALY, P. E. (2006), The benefits of hydrated lime in hot mix asphalt. National Lime Association, 79 p. Available at https://www.graymont.com/sites/default/files/benefits_hydrated_lime_hot_mix_asphalt.pdf. Último acesso em setembro de 2021.

- LIU, X; SHA, A.; LI, C.; ZHANG, Z.; LI, H (2020), Influence of water on warm-modified asphalt: Views from adhesion, morphology and chemical characteristics. *Construction and Building Materials*, Vol. 264, 120159, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120159>.
- LIU, L.; HOU, S.; ZHANG, N. (2019), Incorporating numerical molecular characterization into pseudo-component representation of light to middle petroleum distillates. *Chemical Engineering Science: X*, Volume 3,100029, ISSN 2590-1400,. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.cesx.2019.100029>.
- LOTTMAN, R. P. (1978), NCHRP Report 192: Predicting moisture-induced damage to asphaltic concrete. Transportation Research Board, National Research Council, 24p. Washington, D.C.
- LUCENA, M. C. C.; SOARES, S. A. & SOARES, J. B. (2003), Efeito da Adição de SBS nas Propriedades Químicas e Reológicas de Asfalto Oriundo de Petróleo Brasileiro. In: Resumos do 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás, p.160. Rio de Janeiro, RJ.
- LYU, L; PEI, J.; HU, D.; FINI, E. H. (2021), Durability of rubberized asphalt binders containing waste cooking oil under thermal and ultraviolet aging. *Construction and Building Materials*, Vol. 299, 124282, ISSN 0950-0618,. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124282>.
- MACIEL, E. R. (2010), O emprego de borracha termoplástica tipo estireno-butadieno-estireno em cimentos asfálticos de petróleo. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 153 p. Campinas, SP.
- MAGALHÃES, S. T. Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 184 p., Rio de Janeiro, RJ.
- MAILLARD, S. Fissuration et autoréparation des liants bitumineux : apport de l'essai de rupture locale répétée. Thèse de Doctorat. École Centrale de Nantes et Université de Nantes, 223 p. Nantes, France.

- MALLICK, R.; GOULD, J.; BHATTARJEE, S.; REGIMAND, A.; JAMES, L.; BROWN, E. (2003), Development of a rational procedure of evaluation of moisture susceptibility of asphalt paving mixes. 82nd Annual TRB Meeting. Washington, D.C.
- MANO, E. B.; MENDES, L. C. (2001), Introdução à Polímeros. Editora Edgard Blücher Ltda., 2ª edição, 191 p. São Paulo, SP.
- MANUEL LPC (2007), Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Groupe de Travail RST "Formulation des enrobés". Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 199 p. Paris, France.
- MARTIN, A. N; BUSTAMANTE, P. (1993), Physical Pharmacy: physical chemical principles in the pharmaceutical sciences. Edited by Lea & Febiger, 622 p, ISBN 0812114388, 9780812114386.
- MASSON, J-F; PELLETIER, L.; COLLINS, P. (2000). Rapid FTIR method for quantification of styrene-butadiene type copolymers in bitumen. Journal of Applied Polymer Science, Vol. 79, Issue 6, pp. 1034-1041. DOI: [https://doi.org/10.1002/1097-4628\(20010207\)79:6<1034::AID-APP60>3.0.CO;2-4](https://doi.org/10.1002/1097-4628(20010207)79:6<1034::AID-APP60>3.0.CO;2-4)
- MASTORAS, F.; VARVERI, A.; TOOREN, M. V.; ERKENS, S. (2021), Effect of mineral fillers on ageing of bituminous mastics. Construction and Building Materials, Vol. 276, 122215, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122215>.
- MAZUMDER, M; AHMED, R.; ALI, A. W.; LEE, S-J (2018), SEM and ESEM techniques used for analysis of asphalt binder and mixture: A state of the art Review. Construction and Building Materials, Vol. 186, pp. 313-329, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.126>.
- MCHALE, G.; NEWTON, M. I.; SHIRTCLIFFE, N. J. (2004), Water-repellent soil and its relationship to granularity, surface roughness and hydrophobicity: a materials science view. European Journal of Soil Science, Vol. 56, Issue 4, pp. 445-452. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00683.x>.
- MCNALLY, T. (2011), Polymer modified bitumen: properties and characterization. Woodhead Publishing in Materials, ISBN: 9780857090485, 424 p.

- MELO, J. V. S. de (2014), Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 414 p. Florianópolis, C.
- MEURER, P. (2015), Caracterização de materiais rochosos do Norte de Santa Catarina para fins de aplicação em obras de pavimentação. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharias da Mobilidade (EMB) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 92 p. Joinville, SC.
- MEURER FILHO, E. (2001), Estudo de granulometria para concretos asfálticos drenantes. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 163 p. Florianópolis, Santa Catarina.
- MINFRA (2018), Anuário Estatístico de Segurança Rodoviária. Ministério da Infraestrutura. Brasília, DF. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br>.
- MOMM, L. (1998), Estudo dos efeitos da granulometria sobre a macrotextura superficial do concreto asfáltico e seu comportamento mecânico. Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), 259 p., São Paulo, SP.
- MOMM, L.; DOMINGUES, F. A. A.; K. JU, L.; SOUZA, P. B. S.; QUADROS, A. L. (1997), Medição da aderência entre o pneu e o pavimento em pistas molhadas da rede DERSA. Laboratório de Desenvolvimento Tecnológico de Transportes, Universidade de São Paulo (USP), Relatório de Pesquisa.
- MOTOMATSU, S.; TAKAHASHI, S.; UESAKA, K.; OUKI, H. (2004), How the property and performance of polymer modified bitumen should be evaluated in porous asphalt mix? In: Proceedings of the 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress, Vol. 2, pp. 1339-50. Vienna, Austria.
- MOURA, E. (2010), Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório. Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), 299p. São Paulo, SP.

- NASCIMENTO, C. C. C. do (2012), Avaliação da permeabilidade de misturas betuminosas drenantes em laboratório e in situ. Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 263 p. Porto, Portugal.
- NASCIMENTO, L. A. H. (2008), Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 204 p., Rio de Janeiro, RJ.
- NCHRP (2001), Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design. Transportation Research Board, National Research Council, National Cooperative Research Program, Report 459, Project 9-10 FY'96, ISSN 0077-5614, ISBN 0-309-06707-3, 45 p. Available at http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_459-a.pdf. Último acesso em setembro de 2021.
- NTS IATROSCAN® (2021), Cromatógrafo IATROSCAN MK6: Sistema de Detecção TLC-FID/FDP. Disponível em <https://www.iatroskan.com/pt/iatroskan-portuguese>. Última consulta em agosto de 2021.
- OBSERVATOIRE DES TECHNIQUES DE CHAUSSÉES (1997), Enrobés drainants. Service d'Études Technique des Routes et Autoroutes (SETRA), Note d'information, 10 p. Paris, France.
- OHIDUZZAMAN, M. D.; SIRIN, O.; KASSEM, E.; ROCHAT, J. L. (2016), State-of-the-art review on sustainable design and construction of quieter pavements - Part 1: Traffic noise measurement and abatement techniques. Sustainability, Vol. 8, Issue nº 8, 742. DOI: <https://doi.org/10.3390/su8080742>.
- OKOROKOV, L. A.; LICHKO, L. P.; KULAEV, I. S. (1980), Vacuoles: main compartments of potassium, magnesium, and phosphate ions in *Saccharomyces carlsbergensis* cells. Journal of Bacteriology, Vol. 144, Issue nº 2, pp. 661-665. DOI: <https://doi.org/10.1128/jb.144.2.661-665.1980>
- OLIVEIRA, C. G. M. (2003), Estudo de propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto asfáltico drenante. Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília (UnB), 87p. Brasília, DF.

- PAKHOLAK, R.; PLEWA, A.; GARDZIEJCZYK, W. (2021), Influence of type of modified binder on stiffness and rutting resistance of low-noise asphalt mixtures. *Materials*, 14 (11), 2884. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14112884>.
- PAN, T.; TUTUMLUER, E.; CARPENTER, S. H. (2006), Effect of Coarse Aggregate Morphology on Permanent Deformation Behavior of Hot Mix Asphalt. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 132, Issue 7. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2006\)132:7\(580\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2006)132:7(580)).
- PARIAT, J. C. (1992), Permeametre. *Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées*, n° 179, pp. 3-9.
- PAULA, M. E. B de; DUARTE, A. M. (1996), Influência da chuva na ocorrência dos acidentes de trânsito. Nota Técnica 195/96. Companhia de Engenharia de Tráfego (CET). Disponível em <http://www.cetsp.com.br/media/20743/nt195.pdf>. Último acesso em agosto de 2021.
- PELLIZZARI, V. (2013), Avaliação da eficácia da restauração da capacidade de infiltração da camada superior de pavimentos porosos. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRS), 51 p. Porto Alegre, RS.
- PEREIRA, F. J. Q. (2009), Estudo da sensibilidade à água de misturas betuminosas. Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 106 p. Lisboa, Portugal.
- PEREIRA, A. C. O. (2004), Influência da drenagem subsuperficial no desempenho de pavimentos asfálticos. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), 194p. São Paulo, SP.
- PETERSEN, J. C.; BRANTHAVER, J. F.; ROBERTSON, R. E.; HARNSBERGER, P. M.; DUVALLE, J.; ENSLEY, E. K. (1993), Binder characterization and Evaluation. Report SHRP A-368 – Vol. 2, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C.
- PFEIFFER, J. P. (1950), *The properties of asphalt bitumen*. Elsevier Publishing Company, Inc. New York, USA.
- PFEIFFER, J. P.; SAAL, N. J. (1939), Asphaltic bitumen as colloid systems. *Journal of Physical Chemistry*, Vol. 43, pp. 139-149.

- PORTO, H. G. (1999), Pavimentos drenantes, 1ª Edição, D&Z Computação Gráfica e Editora, 109 p. São Pulo, SP.
- PUTMAN, B. J; KLINE, L. C. (2012), Comparison of mix design methods for porous asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 24, Issue 11. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000529](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000529)
- READ, J.; WHITEOAK, C. D. (2003), *The Shell bitumen handbook*. 5th edition, Shell Bitumen, 460 p., London, UK.
- REIS, R. M. M. (2012), *Investigação de campo e laboratório sobre revestimento asfáltico ultra delgado*. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 309 p., Porto Alegre, Rio Grande do Sul.
- RIVIÈRE, N., (1996), *Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux*, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, 170 p. Bordeaux, France.
- SAAL, R. N. J. (1933), *Adhesion of bitumen and tar to solid road building materials*. Bitumen, Vol. 3, 101 p. Highway Research Board (HRB), Special Report 98: State-of-the-Art: Effect of Water on Bitumen-Aggregate Mixtures. Edited by HRB in 1968, Publication n° 1946. Washington, D.C.
- SABOO, N. (2015), Optimum Blending Requirements for EVA Modified Binder. *International Journal of Pavement Research and Technology*, Vol. 8, Issue n° 3, pp. 172-178. DOI: [10.6135/ijprt.org.tw/2015.8\(3\).172](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2015.8(3).172)
- SANDBERG, U.; EJSMONT, J. A. (2002), *Tyre-road noise reference book*. INFORMEX, 640 p. Kisa, Sweden.
- SANTANA, H. (1992), *Manual de pré-misturados a frio*. Instituto Brasileiro do Petróleo (IBP), 1ª Edição, 298 p. Rio de Janeiro, RJ.
- SCHOLTEN, E. J.; VONK, W.; KORENSTRA, J. (2009), Towards green pavements with novel class of SBS polymers for enhanced effectiveness in bitumen and pavement performance. In: *Proceedings of Environmental Friendly Roads (ENVIROAD)*, 12 p.. Warsaw, Poland.

- SENISE, S.; CARRERA, V.; NAVARRO, F. J.; PARTAL, P. (2017), Thermomechanical and microstructural evaluation of hybrid rubberised bitumen containing a thermoplastic polymer. *Construction and Building Materials*, Vol. 157, pp. 873-884, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.126>.
- SHIRINI, B.; IMANINASAB, R. (2016), Performance evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, Vol. 107, pp. 165-171, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.006>.
- SILVA, A. C. L.; FROTA, C. A. (2016), Análise teórico-experimental do módulo dinâmico de compósitos asfálticos com argila calcinada. *Cerâmica*, Vol. 62 (364), pp. 392-399. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132016623642117>.
- SINGH, D.; HABAL, A.; ASHISH, P. K.; KATAWARE, A. (2018), Evaluating suitability of energy efficient and anti-stripping additives for polymer and Polyphosphoric acid modified asphalt binder using surface free energy approach. *Construction and Building Materials*, Vol. 158, pp. 949-960, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.079>.
- SIROMA, R. (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), 200 p. Joinville, SC.
- STORM, D. A.; DeCANIO, S. J.; DETAR, M. M.; NERO, V. P. (1990). Upper Bound on Number Average Molecular Weight of Asphaltenes. *Fuel*, Vol. 69, pp. 735-738. DOI: [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(90\)90038-R](https://doi.org/10.1016/0016-2361(90)90038-R).
- STRATA ENGENHARIA (2020), Medidores de película de água aderente ao pavimento. Disponível em <http://www.strata.com.br/service/medidores-de-pelicula-de-agua-aderente-ao-pavimento/>. Último acesso em setembro de 2021.
- TAHERKHANI, H.; TAJDINI M. (2019), Comparing the effects of nano-silica and hydrated lime on the properties of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 218, pp. 308-315, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.116>.

- TAJDINI, M.; MAHINROOSTA, R.; TAHERKHANI, H. (2014), An investigation on the mechanical properties of granular materials in interface with asphaltic concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 62, pp. 85-95, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.016>.
- TAKAHASHI, S. (2013), Comprehensive study on the porous asphalt effects on expressways in Japan: based on field data analysis in the last decade. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 14, Issue 2, pp. 239-255. DOI: 10.1080/14680629.2013.779298.
- TAN, Y.; GUO, M. (2013), Using surface free energy method to study the cohesion and adhesion of asphalt mastic. *Construction and Building Materials*, Vol. 47, pp. 254-260, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.067>.
- TAYLOR, R.; AIREY, G. (2008), Polymer Modified Bitumens. Part one: background and history. Institute of Asphalt Technology, Issue n° 34, ISSN: 1479-6341, pp. 11-16.
- TERREL, R.; AI-SWAILMI, S. (1994), Water sensitivity of asphalt-aggregate mixes: test selection. Strategic Highway Research Program (SHRP-A-403). National Research Council, ISBN: 0-309-05820-1, 183 p. Washington, D.C.
- THODESEN, C.; SHATANAWI, K.; AMIRKHANIAN, S. (2009), Effect of crumb rubber characteristics on crumb rubber modified (CRM) binder viscosity. *Construction and Building Materials*, Volume 23, Issue 1, pp. 295-303, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.007>.
- TSUBOTA, T.; FERNANDO, C.; YOSHII, T.; SHIRAYANAGI, H. (2018), Effect of road pavement types and ages on traffic accident risks. *Transportation Research Procedia*, Vol. 34, pp. 211-218, ISSN 2352-1465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.11.034>.
- VALENTIN, J.; TREJBAL, J.; NEŽERKA, V.; VALENTOVÁ, T.; FALTUS, M. (2021), Characterization of quarry dusts and industrial by-products as potential substitutes for traditional fillers and their impact on water susceptibility of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 301, 124294, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124294>.
- VARMA, R.; TAKEICHI, H.; HALL, J. E.; OZAWA, Y. F.; KYU, T. (2002), Miscibility studies on blends of Kraton block copolymer and asphalt. *Polymer*, Vol. 43, pp. 4667-4671. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(02\)00303-8](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(02)00303-8).

- VERHAEGHE, B. M., RUST, F., VOS, R.; VISSER, A. (1994), Properties of polymer and fiber modified porous asphalt mixes. In : Proceeding of the Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, Vol. 6, pp. 262-280. Cape Town, South Africa.
- VIRGILIIS, A. L. C. de (2009), Procedimentos de projeto e execução de pavimentos permeáveis visando retenção e amortecimento de picos de cheias. Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), 191 p. São Paulo, SP.
- WANG, L.; SHEN, A.; YAO, J. (2020), Effect of different coarse aggregate surface morphologies on cement emulsified asphalt adhesion. *Construction and Building Materials*, Vol. 262, 120030, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120030>.
- WANG, X; GU, X; NI, F.; DENG, H.; DONG, Q. (2018), Rutting resistance of porous asphalt mixture under coupled conditions of high temperature and rainfall. *Construction and Building Materials*, Vol. 174, pp. 293-301, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.104>.
- WAPA (2010), Rutting. Washington Asphalt Pavement Association. Available at <https://www.asphaltwa.com/rutting/>. Último acesso em setembro de 2021.
- WATSON, D.; TRAN, N. H; RODENZO, C.; TAYLOR, A. J.; JAMES, T. M. (2018), Performance-based mix design for porous friction courses. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Transportation Research Board (TRB), Research Report 877, The National Academies Press. Washington, D.C. DOI: <https://doi.org/10.17226/25173>.
- WEN, H. ; BAHIA, H. (2009), Characterizing fatigue of asphalt binders with viscoelastic continuum damage mechanics. *Transportation Research Record – Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1, Issue nº 2126, ISSN: 0361-1981, pp. 55-62. DOI : <https://doi.org/10.3141/2126-07>.
- WHITEOAK, C. D. (1990), *The Shell bitumen handbook*. 4th edition, Shell Bitumen UK, 463 p. Chertsey, UK.
- WILLIAMS, M. L.; LANDEL, R. F.; FERRY, J. D. (1955), The temperature-dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 77, pp. 3701-3706.

- WINTERKORN, H. F. (1936), Surface chemical aspects of the bond formation between bituminous materials and mineral surfaces. In: Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists (AAPT), Vol. 17, pp. 79-85.
- WU, J.; WANG, Y.; LIU, Q.; WANG, Y.; AGO, C.; OESER, M. (2020), Investigation on mechanical performance of porous asphalt mixtures treated with laboratory aging and moisture actions. *Construction and Building Materials*, Vol. 238, 117694, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117694>.
- XIAO, Y.; CHANG, X.; YAN, B.; ZHANG, X.; YUNUSA, M.; YU, R.; CHEN, Z. (2021), SBS morphology characteristics in asphalt binder and their relation with viscoelastic properties. *Construction and Building Materials*, Vol. 301, 124292, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124292>.
- XIAOHU, L.; ISACSSON, U. (2000), Modification of Road Bitumens with Thermoplastic. *Polymer Testing*, Vol. 20, pp. 77-86. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-9418\(00\)00004-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9418(00)00004-0).
- XIE, N.; AKIN, M.; SHI, X. (2019), Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 210, pp. 1605-1621, ISSN 0959-6526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.134>.
- XU, Z.; WANG, Y.; CAO, J.; CHAI, J.; CAO, J.; SI, Z.; LI, Y. (2021), Adhesion between asphalt molecules and acid aggregates under extreme temperature: A ReaxFF reactive molecular dynamics study. *Construction and Building Materials*, Vol. 285, 122882, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122882>.
- XU, C.; ZHANG, Z.; ZHAO, F.; LIU, F.; WANG, J. (2019), Improving the performance of RET modified asphalt with the addition of polyurethane prepolymer (PUP). *Construction and Building Materials*, Vol. 206, pp. 560-575, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.101>.
- YALGHOUZAGHAJ, M. N.; SARKAR, A.; HAMED, G. H.; HAYATI, P. (2021), Application of the surface free energy method on the mechanism of low-temperature cracking of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, Vol. 268, 121194, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121194>.

- YANG, B.; LI, H.; ZHANG, H.; XIE, N.; ZHOU, H. (2019), Laboratorial investigation on effects of microscopic void characteristics on properties of porous asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, Vol. 213, pp. 434-446, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.039>.
- YEN, T.F. (1991), Asphaltene/resin plus oil interconversion: an investigation into colloidal model of asphaltenes. In: *Proceedings of the Workshop on Chemical Components and Structure of Asphaltic Materials*. Rome, Italy.
- ZAKERZADEH, M.; ABTAHI, S. M.; ALLAFCHIAN, A.; CHAMANI, M. R. (2019), Effectiveness of superhydrophobic material on the hydroplaning risk of asphalt pavements. *International Journal of Pavement Engineering*. DOI: <https://10.1080/10298436.2019.1704756>.
- ZANZOTTO, L; FOLEY, D. D.; WATSON, R. D.; JUERGENS, C. (1989), On some practical aspects of using polymers asphalts in hot mixes. In: *Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association (CTAA)*, Vol. 34, pp 20-41.
- ZHANG, J.; HUANG, W.; HAO, G.; YAN, C.; LV, Q.; CAI, Q. (2021), Evaluation of open-grade friction course (OGFC) mixtures with high content SBS polymer modified asphalt. *Construction and Building Materials*, Vol. 270, 121374, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121374>.
- ZHANG, Z.; SHA, A.; LIU, X.; LUAN, B.; GAO, J.; JIANG, W.; MA, F. (2020), State-of-the-art of porous asphalt pavement: experience and considerations of mixture design. *Construction and Building Materials*, Vol. 262, 119998, ISSN 0950-0618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119998>.
- ZHANG, Q.; WANG, T.; FAN, W.; YING, Y.; WU, Y. (2014), Evaluation of the Properties of Bitumen Modified by SBS Copolymers with Different Styrene-Butadiene Structure. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 131, Issue n° 12. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.40398>.
- ZIARI, H., SHIRINI, B; IMANINASAB, R. (2015), Rutting evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures. *Engineering Solid Mechanics*, 3 (4), pp. 225-262, ISSN 2291-8752 (Online) - ISSN 2291-8744 (Print). DOI: [10.5267/j.esm.2015.6.001](https://doi.org/10.5267/j.esm.2015.6.001).

ANEXO I

PROCEDIMENTO UTILIZADO NA COMPACTAÇÃO DAS
MISTURAS ASFÁLTICAS BBD_r

Tabela AI.1 - Procedimento utilizado na compactação das misturas asfálticas BBDr.

TABLEAU 6

Type d'ennobé : BBDV
N° formule : 30

N° d'affaire 98 - 15 :

TYPE MOULE: OUVRIEREUR SANTE ACIER :

L 500 mm 1 180 mm hauteur 50 mm :

COMPACTAGE :

		position de la masse d'équilibrage			en butée arrière			
AV	AR	C	Hauteur	Pneu	Verin	Repère	Position	OBS Temps
		1	60	6	1	2	LIBRE	
		1	"	"	"	"	"	1'30"
		1	"	"	"	"	"	1'30"
		2	55	6	2	2	LIBRE	1'30"
		2	"	"	"	"	"	2'
		2	"	"	"	"	"	2'
		4	50	6	2	2	LIBRE	3'
		2	"	"	"	"	"	2'
		1	"	"	"	"	"	1'

Fonte: IFSTTAR (2019).

ANEXO II

DADOS DAS ANÁLISES REOLÓGICAS DAS MATRIZES
BETUMINOSAS POLIFLEX 60/85 E e HiMA

Tabela AI.1 - Resultados da análise reológica da matriz betuminosa Poliflex 60/85 E.

Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Ângulo de Fase	Módulo de Cisalhamento Complexo	Módulo de Armazenamento	Módulo de Perda
		δ (°)	$ G^* $ (kPa)	G' (kPa)	G'' (kPa)
-30	1	16,933	644637	616689,4029	187752,6087
-30	3	13,713	790276	767749,4656	187341,7044
-30	10	10,735	938712	922283,7852	174850,9036
-30	30	8,547	1065320	1053488,856	158328,5569
-20	1	27,43	299521	265847,1429	137978,7159
-20	3	22,109	436997	404864,4018	164472,4723
-20	10	17,838	585909	557742,2677	179479,5786
-20	30	14,423	728461	705502,2787	181444,1053
-10	1	34,218	128110	105934,665	72041,78545
-10	3	28,831	202281	177207,4403	97545,50768
-10	10	24,117	298029	272014,9376	121775,0326
-10	30	19,960	401786	377651,1838	137155,2885
0	1	42,957	48654,5	35608,54168	33155,57464
0	3	37,302	85303,1	67854,54943	51695,05771
0	10	31,968	139524	118364,338	73870,35983
0	30	27,473	209256	185657,8511	96536,18933
10	1	52,554	9929,33	6037,166099	7883,160518
10	3	46,776	20448,5	14004,20421	14900,45022
10	10	41,536	38015,1	28455,79393	25207,45167
10	30	37,445	61278	48650,89255	37256,99852
20	1	66,171	1508,15	609,305189	1379,588203
20	3	62,214	3442,69	1604,880458	3045,730315
20	10	56,342	8111,88	4495,883141	6752,009472
20	30	50,694	16030,4	10154,64773	12403,90477
30	1	71,606	277,688	87,62435653	263,5006594
30	3	69,701	686,526	238,1691072	643,8892957
30	10	66,606	1773,7	704,2507447	1627,895137
30	30	61,809	4078,57	1926,766733	3594,760521
40	1	71,640	40,5697	12,77890861	38,50454587
40	3	72,420	101,3867	30,62254951	96,65155145
40	10	72,410	280,817	84,86388672	267,6869594
40	30	70,784	670,509	220,6848642	633,1512535
50	1	70,132	10,9571	3,723818002	10,30491242
50	3	71,145	25,8119	8,341741802	24,4268198
50	10	72,080	67,4695	20,75960734	64,19635607
50	30	72,431	157,575	47,56466307	150,2247764

Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Ângulo de Fase	Módulo de Cisalhamento Complexo	Módulo de Armazenamento	Módulo de Perda
		δ (°)	$ G^* $ (kPa)	G' (kPa)	G'' (kPa)
60	1	69,639	3,32196	1,155822761	3,114400743
60	3	70,586	7,68733	2,555203878	7,250239697
60	10	71,644	19,8324	6,245624554	18,82329046
60	30	72,361	48,4619	14,68485888	46,18344586
70	1	68,585	1,31177	0,478954147	1,22120574
70	3	69,606	3,00846	1,04836977	2,819885175
70	10	70,560	7,67586	2,554676229	7,238263335
70	30	71,102	18,8035	6,090160191	17,78992864
80	1	67,155	0,593106	0,230267175	0,546581884
80	3	68,577	1,35	0,493088181	1,256727514
80	10	69,323	3,4374	1,213743548	3,215982799
80	30	70,102	8,57404	2,918146458	8,06216988

Fonte: Autor.

Tabela AI.2 - Resultados da análise reológica da matriz betuminosa HiMA.

Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Ângulo de Fase	Módulo de Cisalhamento Complexo	Módulo de Armazenamento	Módulo de Perda
		δ (°)	$ G^* $ (kPa)	G' (kPa)	G'' (kPa)
-30	1	18,099	607303	577254,3483	188664,7
-30	3	14,908	765022	739271,4875	196815,5
-30	10	12,176	925782	904955,9118	195261,6
-30	30	9,822	1070600	1054907,648	182631,4
-20	1	23,503	303735	278536,8998	121128,6
-20	3	19,497	424102	399783,5536	141547,2
-20	10	16,177	553327	531418,3508	154160
-20	30	13,518	679806	660973,0172	158905,2
-10	1	31,806	137215	97064,19071	60196,42
-10	3	26,829	212763	159520,5028	80680,97
-10	10	22,616	317861	238032,228	99161,25
-10	30	19,091	425970	326941,7537	113156,2
0	1	39,722	54032,4	41559,24897	34530,12
0	3	34,271	93377,3	77165,45204	52581,49
0	10	29,594	148630	129240,7186	73401,05
0	30	25,563	218851	197427,9748	94434,92
10	1	51,570	10595,7	5031,947392	6341,913
10	3	45,963	21918,3	11760,29531	12162,41
10	10	40,678	40656	24007,42505	20633,61
10	30	36,090	66063	41263,63783	30078,93
20	1	60,198	1701,42	845,6129735	1476,404
20	3	56,036	3994,11	2231,396996	3312,67
20	10	51,106	8677,94	5448,718477	6754,118
20	30	46,320	18272	11237,93146	11768,04
30	1	63,44	376,123	257,6046086	515,3228
30	3	61,788	899,1	614,1304727	1144,773
30	10	58,548	1990,61	1560,452673	2551,222
30	30	54,284	5031,3	3579,256524	4978,128
40	1	64,377	69,8268	30,19644135	62,95996
40	3	65,390	157,94	65,77245109	143,5933
40	10	65,455	386,857	160,703414	351,8988
40	30	63,953	869,474	381,7932363	781,1651
50	1	62,500	22,0942	10,20196621	19,59779
50	3	63,656	48,0463	21,32100265	43,0565
50	10	64,978	114,283	48,33784941	103,557
50	30	65,523	257,333	106,6202485	234,2059

Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Ângulo de Fase	Módulo de Cisalhamento Complexo	Módulo de Armazenamento	Módulo de Perda
		δ (°)	$ G^* $ (kPa)	G' (kPa)	G'' (kPa)
60	1	60,656	8,01292	3,92674754	6,984808
60	3	62,393	16,8575	7,811838019	14,93822
60	10	63,699	39,1306	17,3382538	35,07975
60	30	64,676	86,8355	37,1427152	78,49091
70	1	60,335	3,21252	1,589965968	2,791468
70	3	62,9	6,79294	3,094489222	6,047162
70	10	63,75	15,8997	7,032257488	14,26001
70	30	64,384	35,0027	15,1329823	31,56235
80	1	59,096	1,43537	0,73720769	1,231589
80	3	62,62	3,09754	1,424527208	2,750541
80	10	63,687	7,39153	3,276477399	6,625663
80	30	64,223	16,8186	7,313898749	15,14504

Fonte: Autor.