Instituto de Pesquisas em Transportes

Relatório de Pesquisa IPR RP – 033

RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO SOBRE O COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DOS MATERIAIS EM CONCRETO ASFÁLTICO – 1ª PARTE

BRASÍLIA/DF
OUTUBRO/2026

DNIT DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES

MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES
DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES
DIRETORIA-GERAL
DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA
INSTITUTO DE PESQUISAS EM TRANSPORTES

Relatório de Pesquisa IPR RP – 033

RESULTADOS DA CAMPANHA EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO SOBRE O COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO DOS MATERIAIS EM CONCRETO ASFÁLTICO – 1ª PARTE

Elaboração: Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Contrato: TED nº 702/2020

Processo: SEI nº 50600.008500/2026-46

DOI: 10.70859/IPR-RP-033/2026

Brasília/DF

Outubro/2026

AUTORIA:

Eng.º Breno Salgado Barra, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.º Gustavo Garcia Otto, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

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

Eng.º Luciana Rohde, Dra. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Eng.º Wellington Longuini Repette, Dr. – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

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

REVISÃO:

Eng.º Luiz Heleno Albuquerque Filho – IPR/DPP/DNIT

Eng.º Galileu Silva Santos – IPR/DPP/DNIT

Eng. ª Beatriz Chagas Silva Gouveia – IPR/DPP/DNIT

Eng.º Huri Alexandre Raimundo – IPR/DPP/DNIT

EDITORAÇÃO:

Eng.ª Simoneli Fernandes Mendonça – IPR/DPP/DNIT

Eng.ª Victória Barbosa Costa Garcia Vieira – Consórcio Progen/HPT

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria-geral. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Instituto de Pesquisas em Transportes.

Resultados da campanha experimental em laboratório sobre o comportamento viscoelástico dos materiais em concreto asfáltico – 1ª Parte – Brasília/DF, 2026.

56 p. (Relatório de Pesquisa – IPR RP 033)

O conteúdo apresentado neste documento é de inteira responsabilidade dos autores.

A reprodução completa ou parcial desta publicação é permitida, sem alterar seu conteúdo, desde que não tenha fim comercial e que seja citada a referência bibliográfica completa.

APRESENTAÇÃO

A partir do Termo de Execução Descentralizada (TED) nº 702/2020, firmado entre o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), foi acordado o desenvolvimento do projeto intitulado “Avaliação do Comportamento Viscoelástico Linear de Misturas Asfálticas no Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Submetidos a Carregamento Dinâmico”, compreendendo a parceria técnico-executiva entre o Laboratório de Transportes e Logística (LabTrans), do campus de Florianópolis, o Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), do campus de Joinville, e o Laboratório de Pavimentação (LabPav), do campus de Florianópolis, da UFSC.

Neste contexto, a realização dos estudos que perfazem o referido projeto considera, em seu escopo, o desenvolvimento de estudos quanto à influência do comportamento viscoelástico linear de misturas asfálticas no dimensionamento de estruturas de pavimento em regime dinâmico de solicitação, compreendendo as seguintes vertentes: temperatura crítica de dissipação de energia sob a forma de calor; frequência de aplicação do carregamento; habilidade de compactação; resistência à ação da água; deformação permanente; e módulo complexo e fadiga. Tais estudos têm o intuito de colaborar com o Instituto de Pesquisas Rodoviárias (IPR) na elaboração da nova metodologia de dimensionamento de pavimentos de concreto asfáltico para o Brasil.

Para tanto, as atividades previstas no Plano de Trabalho são elencadas a seguir:

Atividade A – Compra de equipamentos e ações de adaptação dos laboratórios.

Atividade B – Estudo do comportamento reológico e mecânico em misturas de concreto asfáltico.

Atividade C – Avaliação de parâmetros influentes na formulação de misturas asfálticas e no dimensionamento de pavimento de concreto asfáltico.

Atividade D – Aplicação da metodologia proposta nas rotinas numéricas de dimensionamento das estruturas de pavimento.

O andamento para cada uma das quatro atividades será apresentado em Relatórios Gerenciais quadrimestrais e os resultados serão consolidados nos relatórios previstos no plano de trabalho. O presente documento corresponde ao Relatório de Pesquisa 033 – Resultados da Campanha Experimental em Laboratório sobre o Comportamento Viscoelástico dos Materiais em Concreto Asfáltico – 1ª Parte.

O conteúdo do RP 033 – Resultados da Campanha Experimental em Laboratório sobre o Comportamento Viscoelástico dos Materiais em Concreto Asfáltico – 1ª Parte, abrange os resultados iniciais obtidos no escopo da campanha experimental pactuada entre as partes envolvidas na execução do referido TED, compreendendo os parâmetros de caracterização dos materiais granulares e ligantes betuminosos, bem como dos aspectos relacionados à definição das curvas granulométricas, teores de ligante utilizados nas dosagens, além das análises correspondentes à habilidade de compactação com o uso da Prensa de Compactação Giratória (PCG), resistência à ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18 ºC e à deformação permanente a 60 ºC.

Cabe destacar que nesta primeira etapa do RP 033, no que tange às misturas asfálticas, serão apresentados os resultados da campanha experimental executada a partir do protocolo de ensaios e seus respectivos níveis de avaliação previstos na metodologia francesa de formulação, apresentados em detalhes no RP 031 – Metodologia de Formulação de Misturas Asfálticas – Método Francês, e que constituem o cerne técnico-tecnológico dessa pesquisa.

Logo, o RP 033, foi produzido no contexto de uma ferramenta técnico-consultiva, capaz de contribuir com o corpo técnico do DNIT na tomada de decisões quanto aos critérios a serem adotados para a implantação da nova metodologia de dimensionamento de pavimentos para o Brasil.

RESUMO

O objetivo principal do Relatório de Pesquisa 033 – Resultados da Campanha Experimental em Laboratório sobre o Comportamento Viscoelástico dos Materiais em Concreto Asfáltico – 1ª Parte, é apresentar os resultados iniciais da campanha experimental, desenvolvida no escopo do protocolo avaliativo previsto na metodologia francesa para a formulação de misturas asfálticas. Para tanto, tratar-se-á dos parâmetros de caracterização dos materiais granulares e ligantes betuminosos, considerando-se o desempenho no plano complexo a partir de Reometria por Cisalhamento Dinâmico (DSR), bem como dos aspectos relacionados à definição das curvas granulométricas, teores de ligante utilizados nas dosagens, além das análises correspondentes à habilidade de compactação com o uso da Prensa de Compactação Giratória (PCG), resistência à ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18 ºC e à deformação permanente a 60 ºC. Neste contexto, duas formulações foram desenvolvidas, utilizando dois tipos de ligantes betuminosos produzidos a partir da modificação em planta industrial da matriz CAP 50/70, denominadas 60/85 E e *Highly Modified Asphalt* (HiMA), com a incorporação de 4,0 % e 7,5 % de diferentes cadeias moleculares do polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), respectivamente, com o intuito de se conceber as misturas asfálticas do tipo *Grave-Bitume* (GB) e *Enrobé à Module Élevé* (EME). É importante destacar que o escopo experimental apresentado neste RP 033 compreende apenas os níveis 0, 1 e 2 da metodologia francesa de formulação, apresentados em detalhes no RP 031. Logo, não fornecem parâmetros aplicados diretamente à rotina de cálculo para dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto asfáltico, tema abordado no RP 032, mas apresentam avaliações preliminares necessárias para a verificação do potencial das formulações concebidas quando sujeitas, na prática, à incidência de fenômenos considerados fisicamente caóticos e, portanto, de difícil descrição matemática. Por fim, são apresentados e discutidos os resultados obtidos de forma comparativa entre as formulações estudadas, a fim de atestar a viabilidade técnica para prosseguimento das análises experimentais nos níveis fundamentais 4 e 5, correspondentes aos parâmetros de módulo de rigidez complexo e de resistência à fadiga, nesta ordem, utilizados diretamente na metodologia de dimensionamento das estruturas de pavimento de concreto asfáltico.

Palavras-chave: caracterização; formulação; metodologia francesa; misturas asfálticas.

ABSTRACT

The main aim of this research report is to present the initial results of the experimental campaign carried out within the scope of the evaluation protocol provided by the French methodology, with regards to formulation of asphalt mixes. Technical parameters are approached on characterization of granular materials and bituminous binders, considering their performance in complex plane after Dynamic Shear Reometry (DSR), as well as aspects such as definition of the aggregate gradation, asphalt contents, besides analyses related to compaction ability with use of the Compaction Shear Press, resistance to deleterious action of water in Duriez test at 18 ºC and to rutting at 60 ºC. In this context, two asphalt mix formulations were developed, comprising two types of bituminous binders produced from industrial modification process of the original matrix CAP 50/70, hereinafter referred as 60/85 E and Highly Modified Asphalt (HiMA), by adding of 4.0 % and 7.5 % of distinct polymeric molecular chains from Styrene-Butadiene-Styrene (SBS), respectively, aiming to conceive the asphalt mixes so-called *Grave-Bitume* (GB) and *Enrobé à Module Élevé* (EME). It is important to highlight that the experimental scope presented in this Product III comprises only the levels 0, 1 and 2 from French formulation methodology, explained in details along the Product I. Thus, they do not supply parameters directly applied into the calculation routine for designing of asphalt concrete pavement structures, but preliminary assessments necessary to verify the potential use of the formulations designed, when subjected in the field to the incidence of phenomena considered physically chaotic and, therefore, difficult to describe mathematically. Finally, the results obtained are presented and discussed in a comparative way between the formulations tested, in order to attest their technical feasibility for continuing experimental analyses at fundamental levels 4 and 5, related to the complex stiffness modulus and fatigue resistance parameters, in that order, which are directly used into the calculus routine of the French pavement design methodology.

Keywords: characterization; formulation; French methodology; asphalt mixes.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

AFNOR – *Association Française de Normalisation*

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DSR – Reometria por Cisalhamento Dinâmico

EME – *Enrobé à Module Élevé*

GB – *Grave-Bitume*

GNT – Granulares Não Tratados

HiMA – *Highly Modified Asphalt*

IFSTTAR – *Institut Français des Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux*

IPR – Instituto de Pesquisa em Transportes

LabPav – Laboratório de Pavimentação

LabTrans – Laboratório de Transportes e Logística

LDTPav – Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação

MeDiNa – Método de Dimensionamento Nacional

MVR – Massa Volumétrica Real

NF – *Norme Française*

PCG – Prensa de Compactação Giratória

SB – Estireno-Butadieno

SBR – Estireno-Butadieno-Borracha

SBS – Estireno-Butadieno-Estireno

SETRA – Sérvice d'Études Techniques des Routes et Autoroutes

SHRP – *Strategic Highway Research Program*

TED – Termo de Execução Descentralizada

UGE – *Université Gustave Eiffel*

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

°C – Grau Celsius

cP – Centipoise

|G*| – Módulo de cisalhamento complexo

G' – Módulo de armazenamento

G''– Módulo de perda

Hz – Hertz

kPa – Quilopascal

R – Tensão de ruptura a compressão simples sem condicionamento na água

r – Tensão de ruptura a compressão simples com condicionamento na água

μm – Micrometro

δ – Ângulo de fase

%V – Teor de vazios

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Visão geral do pátio de britagem da jazida Rudnick Minérios 17
Figura 2.2 – Moinho-piloto utilizado na modificação do ligante betuminoso 19
Figura 2.3 – Estruturas moleculares em blocos lineares e radiais do copolímero SBS 20
Figura 2.4 – Estruturas moleculares em blocos lineares do copolímero SBS, com o aporte de moléculas de vinil 20
Figura 2.5 – Curvas de viscosidade das matrizes betuminosas HiMA e 60/85 E 23
Figura 2.6 – Representação gráfica vetorial do módulo dinâmico no plano complexo 25
Figura 2.7 – Reômetro de cisalhamento dinâmico SMARTPAVE 102 – Anton Paar 26
Figura 2.8 – Representações gráficas típicas do módulo dinâmico |G^*| de ligantes betuminosos no plano complexo (continua) 27
Figura 2.8 – Representações gráficas típicas do módulo dinâmico |G^*| de ligantes betuminosos no plano complexo (conclusão) 28
Figura 2.9 – Curvas granulométricas de referência e proposta da mistura asfáltica GB e respectivos pontos de controle normativos 30
Figura 2.10 – Curva granulométrica da mistura asfáltica EME e respectivos pontos de controle normativos 32
Figura 2.11 – Curvas granulométricas das misturas asfálticas EME e GB 33
Figura 3.1 – Curvas isocrônicas 35
Figura 3.2 – Curvas isotérmicas 35
Figura 3.3 – Plano Cole-Cole 36
Figura 3.4 – Espaço de Black 36
Figura 3.5 – Curva de equivalência frequência-temperatura 37
Figura 3.6 – Habilidade de compactação na PCG das misturas asfálticas GB 39
Figura 3.7 – Habilidade de compactação na PCG das misturas asfálticas EME 39
Fonte: [1]Rodrigues (2022); [2]LDTPav (2022) 41
Figura 3.8 – Resistência à ação da água das misturas asfálticas GB formuladas 41
Figura 3.9 – Resistência à ação da água das misturas asfálticas EME formuladas 42
Figura 3.10 – Evolução do afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas GB formuladas 44
Figura 3.11 – Evolução do afundamento da trilha de roda das misturas asfálticas EME formuladas 44
Figura 3.12 – Mistura asfáltica GB formulada com 4,86 % de ligante betuminoso: (a) antes e (b) após a execução do ensaio 46
Figura 3.13 – Mistura asfáltica EME formulada com 5,82 % do ligante betuminoso: perfil (a) antes e (b) após a execução do ensaio 46

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros de caracterização das frações granulares 18
Tabela 2.2 – Caracterização da matriz betuminosa HiMA 22
Tabela 2.3 – Caracterização do ligante betuminoso 60/85 E (continua) 22
Tabela 2.3 – Caracterização do ligante betuminoso 60/85 E (conclusão) 23
Tabela 2.4 – Distribuições granulométricas de referência e proposta da mistura asfáltica GB e respectivos pontos de controle normativos 29
Tabela 2.5 – Distribuição granulométrica da mistura asfáltica EME 31
Tabela 2.6 – Pontos de controle da distribuição granulométrica para as misturas asfálticas EME 31
Tabela 3.1 – MVR das formulações GB e EME 34
Tabela 3.2 – Teores de vazios médios obtidos nos ensaios de habilidade de compactação na PCG para as misturas asfálticas GB e EME 39
Tabela 3.3 – Resultados da relação r/R no ensaio de Duriez 41
Tabela 3.4 – Afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas GB formuladas 43
Tabela 3.5 – Afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas EME formuladas 43
Tabela AP 1 – Resultados da análise reológica da matriz betuminosa 60/85 E (continua) 50
Tabela AP 1 – Resultados da análise reológica da matriz betuminosa 60/85 E (conclusão) 51
Tabela AP 2 – Resultados da análise reológica da matriz betuminosa HiMA (continua) 51
Tabela AP 2 – Resultados da análise reológica da matriz betuminosa HiMA (conclusão) 52

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 16
2.1 FRAÇÕES GRANULARES 17
2.2 LIGANTES BETUMINOSOS 19
2.2.1 ESTRUTURA DA CADEIA POLIMÉRICA SBS 19
2.2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATRIZES BETUMINOSAS MODIFICADAS 21
2.2.3 REOMETRIA POR CISALHAMENTO DINÂMICO 24
2.3 CURVAS GRANULOMÉTRICAS 28
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES 34
3.1 MASSA VOLUMÉTRICA REAL 34
3.2 REOMETRIA POR CISALHAMENTO DINÂMICO 35
3.3 HABILIDADE DE COMPACTAÇÃO 38
3.4 RESISTÊNCIA À AÇÃO DELETÉRIA DA ÁGUA 41
3.5 RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE 43
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS 47
APÊNDICE 50
APÊNDICE A – MÓDULO DINÂMICO DAS MATRIZES BETUMINOSAS GB E EME 50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 53

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de metodologias para a formulação de misturas asfálticas necessita de extensos estudos conceptivos prévios com forte base científica, a fim de que se possa determinar com assertividade as propriedades dos materiais constituintes, bem como compreender o comportamento das dosagens propostas, sobretudo reológico e mecânico. Para tanto, deve-se dispor de técnicas que possuam a capacidade para testar os materiais conforme as condições mais próximas possíveis dos fenômenos observados no campo, ou seja, com estreita relação campo/laboratório, garantindo assim credibilidade aos resultados obtidos (Mikowski *et al*., 2021; Barra *et al*., 2016).

Neste contexto, tem-se que a metodologia Marshall, cujo desenvolvimento é atribuído ao engenheiro Bruce Marshall do *Mississippi State Highway Department,* nos Estados Unidos, pode ser tomada contemporaneamente como ponto de partida desta abordagem na década dos anos 1940, considerando que ainda é utilizada na área da pavimentação atualmente. Além disso, é a metodologia oficial homologada no Brasil até o momento para a determinação do teor de ligante betuminoso de serviço nas dosagens de misturas asfálticas, bem como em outros países no mundo (Polaczyk *et al*., 2018; Barros, 2017).

Com o avanço dos conceitos matemáticos, físicos e mecânicos aplicados às Engenharias ao longo do tempo, principalmente no que diz respeito ao comportamento mecânico e reológico das misturas asfálticas, tornou-se evidente o empirismo e as limitações do método Marshall, principalmente no que concerne aos processos de compactação e de ruptura dos corpos de prova, bem como dos parâmetros estabelecidos para a escolha dos teores de serviço. Estas constatações permitiram verificar a incompatibilidade da técnica utilizada em relação à reprodutibilidade dos estados de tensão-deformação impostos a estes materiais em serviço, não permitindo avaliar corretamente o seu desempenho (Tapkin, 2013; Castañeda, 2004).

Novos métodos então foram desenvolvidos para avaliar o desempenho das misturas asfálticas, de modo a considerar propriedades e fenômenos físicos relacionados mais diretamente às condições intrínsecas de cada formulação, principalmente no que tange ao comportamento reológico nos ensaios de módulo de rigidez, e mecânico, quanto à resistência à deformação permanente e à fadiga (Jitsangiam *et al*., 2012; Tarakji, 1992).

Destacam-se neste cenário o *Strategic Highway Research Program* (SHRP), lançado no início dos anos 1990, que deu origem à metodologia *Superpave*, atualmente em sua quinta versão (Rahbar-Rastegar *et al*., 2021 e a metodologia francesa (Manuel LPC, 2007), concebida a partir da década de 1960 (Huet, 1963; Sayegh, 1965), as quais aportaram análises de cunho empírico-mecanístico às pesquisas realizadas com misturas asfálticas.

De acordo com o então Ministério da Infraestrutura (MINFRA, 2019), o modal rodoviário mantém-se como o principal meio de transporte no Brasil, tanto para cargas como para passageiros, com cerca de 70 % e 90 % de participação, respectivamente. Andrade *et al*. (2020) atribuem a significativa danificação da malha viária atualmente a diversos motivos, destacando: cargas excessivas por eixo, metodologia inadequada de formulação das misturas asfálticas, falta de manutenção em grande escala e falhas conceptivas, causadas pelo uso de técnicas obsoletas de projeto e de construção.

Portanto, analisando o problema apresentado, tem-se claramente que há a necessidade cada vez mais latente de se projetar estruturas de pavimento com critérios técnicos e científicos, que sejam capazes de garantir ao usuário o tripé conforto, segurança e economia de custos com a manutenção dos veículos, e que requeiram níveis mínimos de intervenção pelo poder público ou concessionário durante o período de vida útil projetado.

A utilização de métodos mais acurados para a formulação e a avaliação do desempenho de misturas asfálticas se apresenta como um fator imperativo. Neste contexto, destaca-se a metodologia desenvolvida na França (Manuel LPC, 2007), que visa determinar diversos parâmetros de comportamento das respectivas formulações, em condições aceleradas e simulando situações próximas à realidade observada na prática, ou seja, compreendendo uma estreita relação entre campo e laboratório.

O uso de ensaios com capacidade de acelerar a ocorrência de fenômenos em laboratório, que podem demorar meses ou anos para ocorrerem no campo, é fundamental como ferramenta de apoio ao processo de tomada de decisões durante a etapa de testes de novos materiais, podendo, assim, apontar melhores soluções em menor tempo, gerando eficiência técnica e econômica dos projetos (Guizzardi, 2021; Vale, 2008).

Dado o exposto, a motivação principal desta pesquisa consiste em formular e verificar a viabilidade técnica de misturas asfálticas do tipo *Grave-Bitume* (GB) e *Enrobé à Module Élevé* (EME), destinadas à composição de camadas estruturais de rolamento, ligação, base e sub-base em pavimentos de concreto asfáltico, a partir dos níveis de avaliação previstos na metodologia francesa (Manuel LPC, 2007). A primeira parte do RP 033 – Resultados da Campanha Experimental em Laboratório sobre o Comportamento Viscoelástico dos Materiais em Concreto Asfáltico – 1ª Parte dá enfoque aos parâmetros como habilidade de compactação, resistência à ação deletéria da água, e, sobretudo, à deformação permanente.

Conforme vem sendo a tônica dos produtos apresentados, reitera-se que a abordagem discorrida nas seções seguintes não visa relacionar a metodologia francesa a outras existentes, tampouco esgota a gama de contextos e de aplicabilidades que a concerne. Ao invés disso, espera-se contribuir com o balizamento do novo método de dimensionamento dos pavimentos de concreto asfáltico para o Brasil, em atual desenvolvimento.

Para tanto, este terceiro produto, previsto no plano de trabalho, propõe, em sua primeira parte, tratar sobre os resultados iniciais da campanha experimental realizada, tendo sido organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: introduz o tema ao leitor, deixando-o a par das considerações gerais do estudo.
- Capítulo 2: trata dos aspectos relacionados à caracterização dos materiais utilizados na formulação das misturas asfálticas.
- Capítulo 3: discorre sobre os resultados obtidos para os níveis avaliativos 0, 1 e 2 da metodologia francesa, de forma comparativa entre as formulações desenvolvidas.
- Capítulo 4: apresenta as conclusões acerca das análises efetuadas e da viabilidade técnica das formulações estudadas.

Por fim, são informadas as referências utilizadas para a sua elaboração.

2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Este capítulo apresenta os dados de caracterização dos materiais utilizados na formulação das misturas asfálticas estudadas, notadamente as frações granulares e os ligantes betuminosos, bem como estabelece as curvas granulométricas e os teores de ligantes aportados nas dosagens.

No caso do material pétreo, os parâmetros de caracterização serão apresentados na forma de tabela, conforme a cronologia de recebimento das amostras no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav). Neste âmbito, cabe destacar que houveram apenas dois grandes lotes amostrais coletados desde o início da pesquisa, sendo o primeiro no ano de 2020, que permitiu a realização da primeira etapa da campanha experimental apresentada neste RP 033 – Resultados da Campanha Experimental em Laboratório sobre o Comportamento Viscoelástico dos Materiais em Concreto Asfáltico – 1ª Parte, bem como dos ensaios referentes ao escopo da metodologia MeDiNa, ainda em andamento, e outro em 2023, utilizado para a produção das amostras referentes aos ensaios de módulo complexo e de fadiga, que seguem em curso e serão apresentados na entrega da segunda parte do RP 033 – Resultados da Campanha Experimental em Laboratório sobre o Comportamento Viscoelástico dos Materiais em Concreto Asfáltico, conforme cronograma pactuado no plano de trabalho.

Para a situação dos ligantes betuminosos, tem-se que os lotes amostrais obtidos junto à empresa fornecedora são suficientes para a execução de toda a campanha experimental prevista e pactuada na elaboração do plano de trabalho. Logo, não houve a necessidade da realização de atualizações quanto à caracterização destes insumos, prevalecendo o disposto desde o início dos trabalhos em relação às análises realizadas.

Quanto aos procedimentos metodológicos referentes à formulação das misturas asfálticas, de acordo com os princípios conceptivos da metodologia francesa, tem-se que os ensaios de habilidade de compactação com o uso da Prensa de Compactação Giratória (PCG), resistência à ação deletéria da água no ensaio de Duriez a 18 ºC e à deformação permanente a 60 ºC estão descritos em detalhes no RP 031 – Metodologia de Formulação de Misturas Asfálticas – Método Francês. Logo, não serão objeto de abordagem neste RP 033 – Resultados da Campanha Experimental em Laboratório sobre o Comportamento Viscoelástico dos Materiais em Concreto Asfáltico – 1ª Parte.

Neste contexto, tem-se que apenas o procedimento metodológico adotado nas análises de Reometria por Cisalhamento Dinâmico (DSR) das matrizes betuminosas, no plano complexo, será descrito neste capítulo, devido não ter sido abordado nos produtos anteriores.

2.1 FRAÇÕES GRANULARES

As frações granulares foram provenientes da central de britagem pertencente à empresa Rudnick Minérios Ltda. (Figura 2.1), localizada no distrito de Pirabeiraba, região metropolitana da cidade de Joinville/SC.

Os critérios para a seleção desta jazida foram: a disponibilidade em larga escala dos materiais requeridos, além da parceria e da proximidade às instalações do LDTPav.



Figura 2.1 – Visão geral do pátio de britagem da jazida Rudnick Minérios

Fonte: Rudnick Minérios (2023)

Ainda, a jazida pertence à zona de transição entre o Complexo Granulítico de Santa Catarina e o Granito Piraí, destacando-se a formação geológica gnáissica como predominante, considerada uma rocha metamórfica composta principalmente por quartzo, plagioclásio e anfibólitos (Fagundes, 2020).

Os resultados dos ensaios de caracterização são apresentados de forma compilada, na Tabela 2.1, em ordem cronológica, conforme explanado na seção introdutória deste capítulo. As normas utilizadas para a execução destas análises abrangem o escopo vigente na catalogação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), de amplo conhecimento da comunidade técnico-científica nacional, visando maior contextualização dos procedimentos correntemente executados no país, e que não prejudicam a aplicação do escopo metodológico francês adotado para as análises de desempenho reológico e mecânico das formulações desenvolvidas.

Tabela 2.1 – Parâmetros de caracterização das frações granulares

Ensaio	Norma	Limites	Resultados	
			2020[1]	2023[2]
Desgaste por abrasão Los Angeles	DNIT- ES 031 (2024)	Máx. 50 %	17,5 %	13,4 %
Índice de forma		Mín. 0,5	0,60	0,65
Resistência ao ataque químico (durabilidade)		Máx. 12 %	5,3 %	3,1 %
Adesividade ao ligante betuminoso		-	Má	Má
Equivalência de areia		Mín. 50 %	78,0 %	82,0 %
Teor de material pulverulento	ABNT NBR 7211 (2019)	Máx. 1,0 %	0,4 %	0,1 %
Absorção		-	0,5 %	0,3 %

Fonte: [1]Clara (2020); [2]Evaldt (2023)

A partir dos resultados apresentados, tem-se que a matriz pétrea selecionada atende aos limites preconizados normativamente, sendo passíveis de utilização em misturas asfálticas.

Entretanto, é importante destacar a exceção da má adesividade do granular gnáissico ao ligante betuminoso, em razão de sua composição mineralógica majoritariamente quartzosa ($Si^{-4}O_2^{-2}$) repelir as moléculas carbônicas (C^{-4}) que formam mais de 80 % da formulação do ligante betuminoso (Leite; Menezes, 2003), pois ambos os elementos citados possuem característica eletronegativa.

Neste contexto, cabe esclarecer que foram utilizados 2,0 % de cal hidratada CH-1 como parte das frações granulares passantes na peneira de abertura 0,075 mm na composição das misturas asfálticas, situação que será abordada adiante. Isto se deve à natureza fortemente eletropositiva deste material pela presença de óxido de cálcio ($Ca^{+2}O^{-2}$) $\geq$ 90 % em sua composição (Cal Cem, 2021). Esta adição tem o propósito de compensar a má adesividade dos granulares de origem gnáissica ao ligante betuminoso.

Ainda, a calcita, mineral que compõe a formação geológica da cal hidratada, adsorve as moléculas do ligante betuminoso por quimissorção e, durante este processo, as partículas reagem com os ácidos naftênicos do ligante, formando o composto Naftanato de Cálcio, que é insolúvel em água, gerando uma blindagem do mástique que envolve as partículas, inibindo a ação deletéria da água (Barra *et al*., 2014; Santana, 1995).

Assim, a cal hidratada CH-1 desempenha a função de melhorador de adesividade, contribuindo para evitar problemas com descolamento da película de ligante betuminoso em relação à superfície das partículas granulares, fato que acarretaria o efeito de desagregação das misturas asfálticas (Fagundes, 2020). Ainda, contribui para tornar o mástique betuminoso mais espesso, devido ao seu caráter pozolânico e de elevada superfície específica, sendo benéfica para a resistência à deformação permanente e à fadiga das misturas asfálticas (Das; Singh, 2017).

2.2 LIGANTES BETUMINOSOS

Os ligantes betuminosos utilizados na dosagem das misturas asfálticas foram o Poliflex 60/85 E e o *Highly Modified Asphalt* (HiMA), denominados doravante de “60/85 E” e “HiMA”. O fornecimento das amostras foi realizado pela empresa CBB Asfaltos Ltda., de Curitiba/PR, a partir da modificação do ligante base CAP 50/70, procedente da Refinaria Getúlio Vargas (REPAR), em Araucária/PR.

A modificação do CAP 50/70 se deu a partir da inserção de 4,0 % e 7,5 % do polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), para os casos de 60/85 E e de HiMA, respectivamente, compreendendo a utilização de moinho piloto desenvolvido pela empresa supramencionada, com capacidade para modificar de 10 kg a 12 kg de amostra por batelada (Figura 2.2).



Figura 2.2 – Moinho-piloto utilizado na modificação do ligante betuminoso

Fonte: Teixeira (2021)

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, consequentemente, 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).

2.2.1 ESTRUTURA DA CADEIA POLIMÉRICA SBS

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 (CAP 50/70). 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 60/85 E, enquanto a segunda foi utilizada na produção da matriz HiMA.

As variações 1101 AT e D0243 constituem cadeias poliméricas lineares formadas por diblocos e triblocos (Figura 2.3), com menor peso molecular se comparadas às estruturas radiais.

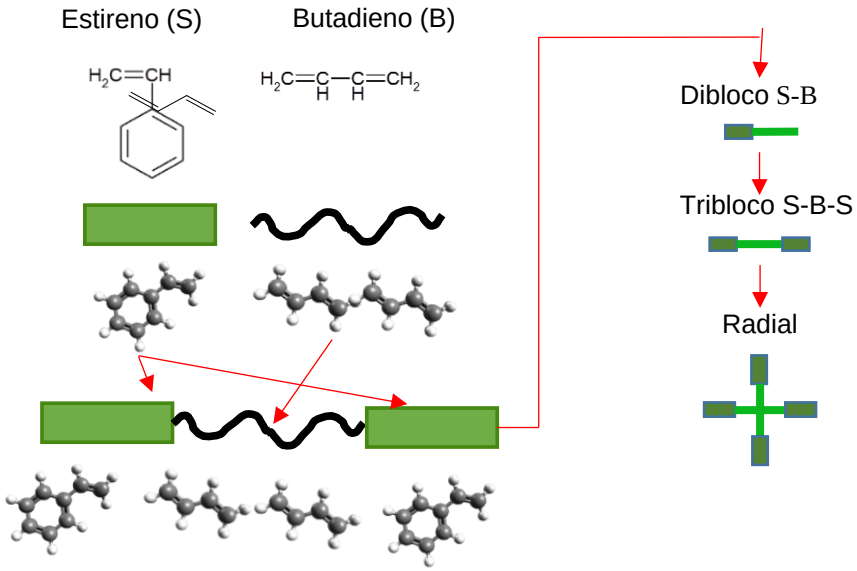


Figura 2.3 – Estruturas moleculares em blocos lineares e radiais do copolímero SBS

Fonte: adaptado de Kraton® (2021)

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, Figura 2.4 (Kraton, 2021).

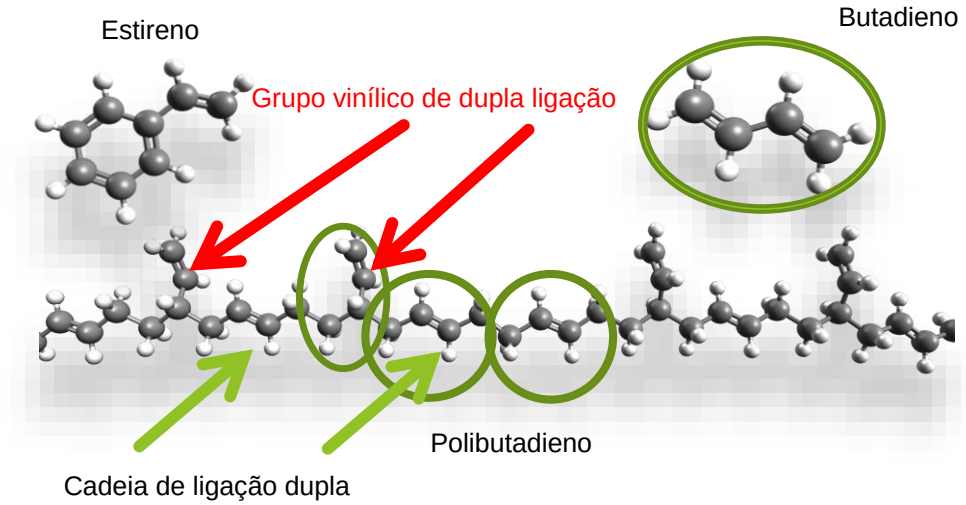


Figura 2.4 – Estruturas moleculares em blocos lineares do copolímero SBS, com o aporte de moléculas de vinil

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 matriz 60/85 E (4,0 %) modificada pela incorporação da variação 1101 AT.

Quanto à possibilidade de se formular uma matriz betuminosa, como a 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 expressivo da viscosidade da matriz betuminosa, gerando a 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 a utilização de 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 contribuírem 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 uma elevada viscosidade, uma menor trabalhabilidade e, consequentemente, muita suscetibilidade à separação de fases (Chen *et al*., 2021).

2.2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS MATRIZES BETUMINOSAS MODIFICADAS

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 ºC, ao invés da penetração. No Brasil, existem três classificações de ligantes modificados por polímeros elastoméricos aprovadas pela Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2010) atualizada pela versão ANP (2022), 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 (%).

No caso desta pesquisa, a matriz 60/85 E foi destinada à formulação de misturas asfálticas do tipo *Grave-Bitume* (GB), recomendadas para aplicação em camadas de ligação, base e sub-base de estruturas de pavimentos de concreto asfáltico, em acordo com a metodologia francesa. A matriz HiMA, ainda não produzida em escala comercial no Brasil, foi concebida

para o desenvolvimento de misturas asfálticas de módulo elevado, denominadas *Enrobé à Module Élevé* (EME), consideradas as formulações mais nobres da metodologia francesa, podendo ser utilizadas em qualquer camada da estrutura de pavimento, sob quaisquer condições de clima e de tráfego.

A Tabela 2.2 e a Tabela 2.3 apresentam as características das matrizes betuminosas HiMA e 60/85 E.

Tabela 2.2 – Caracterização da matriz betuminosa HiMA

Características		Unidade	Método de ensaio	Resultados	Limites*	
					Mínimo	Máximo
Ponto de Amolecimento		°C	ABNT NBR 6560 (2016)	90	80	-
Penetração, 100g, 5 s, 25°C, 0,1mm		0,1 mm	ABNT NBR 6576 (2007)	41	40	70
Recuperação Elástica, 20cm, 25°C		%	ABNT NBR 15086 (2022)	96	90	-
Viscosidade Brookfield	135 °C spindle 21 20 rpm	cP	ABNT NBR 15184 (2021)	1775	-	3000
	150 °C spindle 21 50 rpm	cP		668	-	2000
	177 °C spindle 21 100 rpm	cP		266	-	1000
Ponto de Fulgor		°C	ABNT NBR 11341 (2014)	261	235	-
Separação de Fase		Δ P.A. (°C)	ABNT NBR 15166 (2004)	2,0	-	5
Massa específica a 25 °C		g/cm³	ABNT NBR 6296 (2012)	1,011	-	-

*Como não há especificação de serviço da ANP para os ligantes do tipo HiMA, os limites adotados compreendem especificações particulares da CBB Asfaltos (2019), em conjunto com as especificações estabelecidas pela ANP (2010; 2022) para ligantes modificados por polímero de classificação 65/90 E.

Fonte: Teixeira (2021)

Tabela 2.3 – Caracterização do ligante betuminoso 60/85 E (continua)

Características	Unidade	Método de ensaio	Resultados	Limites (ANP, 2022)	
				Mínimo	Máximo
Ponto de Amolecimento	ºC	ABNT NBR 6560 (2016)	65,4	60	-
Penetração, 100 g, 5s, 25 ºC, 0,1mm	0,1mm	ABNT NBR 6576 (2007)	40	40	70
Recuperação Elástica, 20 cm, 25 ºC	%	ABNT NBR 15086 (2022)	90	85	-

Tabela 2.3 – Caracterização do ligante betuminoso 60/85 E (conclusão)

Características		Unidade	Método de ensaio	Resultados	Limites (ANP, 2022)	
					Mínimo	Máximo
Viscosidade Brookfield	135 ºC spindle 21 20 rpm	cP	ABNT NBR 15184 (2021)	1130	-	3000
	150 ºC spindle 21 50 rpm	cP		486	-	2000
	177 ºC spindle 21 100 rpm	cP		212	-	1000
Ponto de fulgor		ºC	ABNT NBR 11341 (2014)	268	235	-
Separação de fase		Δ P.A. (°C)	ABNT NBR 15166 (2004)	1,2	-	5
Massa específica a 25 ºC		g/cm³	ABNT NBR 6296 (2012)	1,014	-	-

Fonte: Teixeira (2021)

Quanto ao enquadramento da matriz betuminosa HiMA nos parâmetros condizentes a esta classificação, o ponto de amolecimento obtido de 90 ºC é consideravelmente superior ao limite máximo especificado para a classe 4 da metodologia francesa, que é de 76 ºC (AFNOR NF EN 13924, 2006). 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 60/85 E e HiMA determinadas pelo método *Brookfield* (ABNT NBR 15184, 2004) são ilustradas de forma comparativa na Figura 2.5.

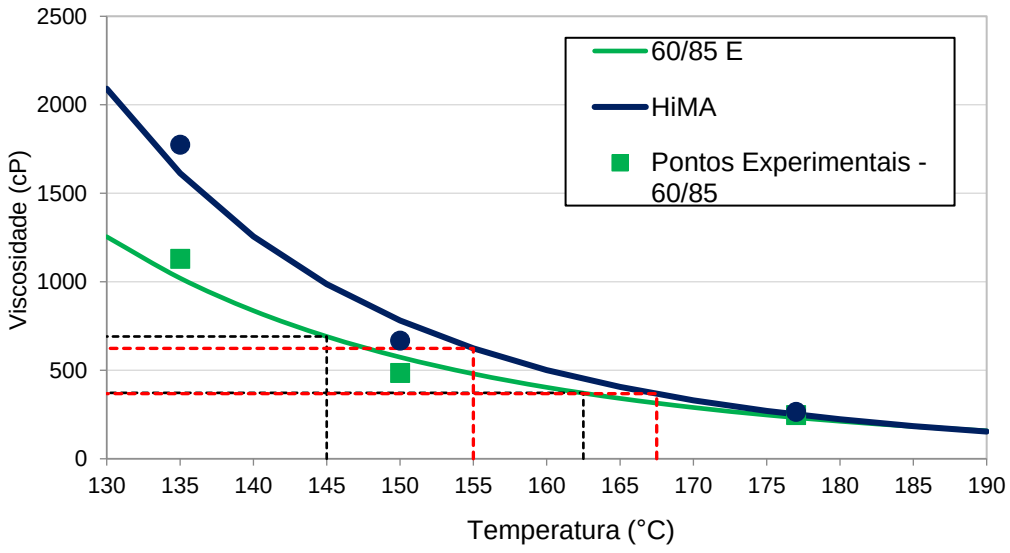


Figura 2.5 – Curvas de viscosidade das matrizes betuminosas HiMA e 60/85 E

Fonte: adaptado de Teixeira (2021)

Observando os resultados da Tabela 2.2 e da Tabela 2.3, é possível perceber que a concentração de 7,5 % de polímero SBS (D0243) na matriz HiMA, em comparação aos 4,0 % da 60/85 E (1101 AT), acarreta em um aumento mais intenso da viscosidade do material com a diminuição progressiva da temperatura.

Esta condição se explica devido ao 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 60/85 E, corroborando os resultados de ponto de amolecimento e recuperação elástica já mencionados.

Na Figura 2.5, 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 60/85 E (1101 AT), confirma o propósito de desenvolvimento da tecnologia, conforme abordado anteriormente.

Portanto, a partir das informações da Figura 2.5 e nos critérios de partida estabelecidos em DNIT 385/2026 - ES, adotou-se as recomendações feitas pelo fornecedor quanto à trabalhabilidade dos materiais e, após testes realizados na planta de produção, as temperaturas de usinagem e de compactação para as misturas asfálticas foram definidas em 167 ºC / 155 ºC e 162 ºC / 145 ºC, formuladas com a matriz betuminosa HiMA e 60/85 E, respectivamente.

Para os granulares, foram aplicados 13 ºC acima da temperatura de usinagem, ou seja, 180 ºC e 178 ºC, nesta ordem, obedecendo o intervalo praticado de 10 ºC a 15 ºC (Bernucci *et al*., 2022).

2.2.3 REOMETRIA POR CISALHAMENTO DINÂMICO

O estudo da reometria dos ligantes betuminosos destina-se a verificar o comportamento reológico destas matrizes, a partir da determinação do módulo dinâmico G^* dos ligantes betuminosos, 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 2.1).

$$|G^*| = \sqrt{G'^2 + G''^2} \quad (2.1)$$

Em que:

$|G^*|$ é a norma do módulo dinâmico no plano complexo;

G' é a componente elástica do módulo dinâmico;

G'' é a componente viscosa do módulo dinâmico.

Em notação vetorial, o módulo dinâmico pode ainda ser definido conforme a Equação 2.2 e representado graficamente pela Figura 2.6.

$$G^* = G' + iG'' \tag{2.2}$$

Em que:

G' é o módulo real ou de armazenamento, relacionado à conservação de energia do material após a solicitação;

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

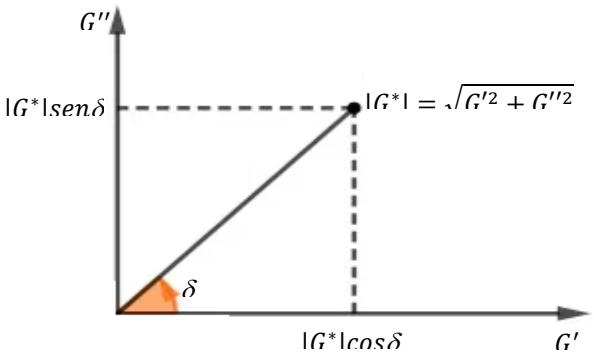


Figura 2.6 – Representação gráfica vetorial do módulo dinâmico no plano complexo

Fonte: adaptado de Silva e Frota (2016)

A partir da Figura 2.6 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 2.3), enquanto a componente viscosa ou módulo de perda G'' é obtido pelo produto entre $|G^*|$ e o seno de δ (Equação 2.4).

$$G' = |G^*|cos\delta \tag{2.3}$$

$$G'' = |G^*|sen\delta \tag{2.4}$$

Em que:

δ é o ângulo de fase.

É importante destacar que δ representa, em graus, o retardo da resposta do material após a solicitação sofrida, sendo uma condição intrínseca dos materiais com comportamento viscoelástico linear, como os ligantes e misturas betuminosas. Há variação entre 0 º e 90 º, em que quanto mais próximo de 0 º estiver o material, tende a desempenhar um comportamento predominantemente elástico, condição encontrada em baixas temperaturas e elevadas frequências de solicitação, enquanto mais próximo de 90 º tende a um comportamento predominantemente viscoso, situação mais propícia em elevadas temperaturas e baixas frequências de solicitação (Mikowski *et al*., 2021; Sayegh, 1965; Huet, 1963).

O equipamento utilizado foi o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR), modelo SMARTPAVE 102, da marca Anton Paar (Figura 2.7), com controlador de temperatura na faixa de -40 ºC a 200 ºC, 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 2.7 – Reômetro de cisalhamento dinâmico SMARTPAVE 102 – Anton Paar

Fonte: Teixeira (2021)

Os procedimentos realizados neste ensaio seguiram as especificações previstas na normativa francesa AFNOR NF EN 14770 (2023), 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.

Nesta pesquisa, 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, foram aplicadas as 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 ºC 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.

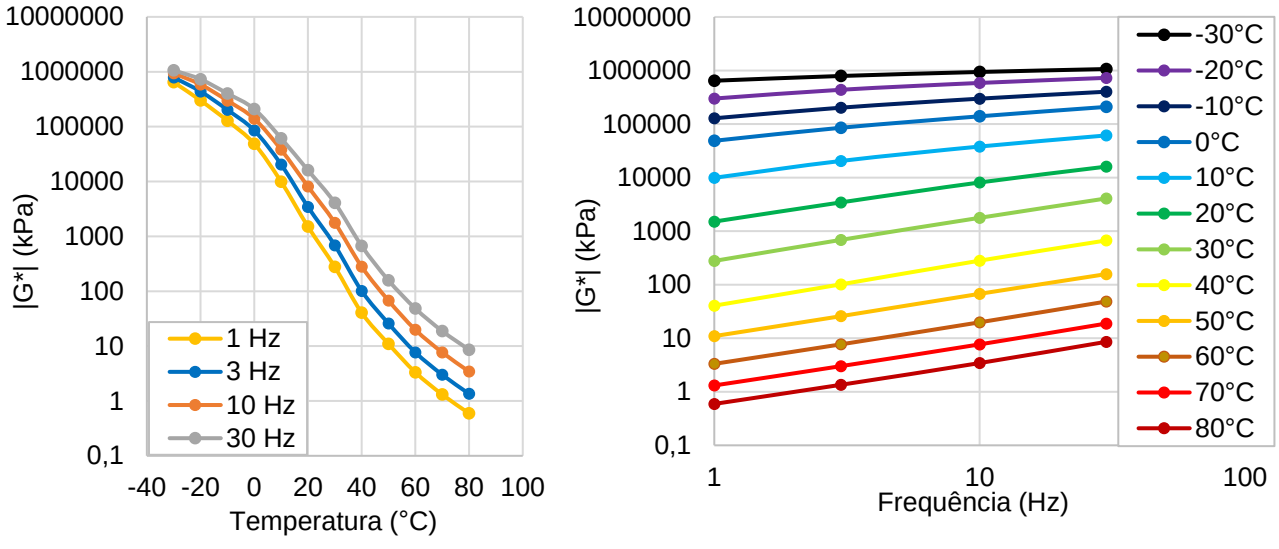
Para as temperaturas de -30 °C a 0 °C, foram utilizadas placas paralelas de 4,0 mm. No intervalo de 10 °C a 30 °C, optou-se por placas de 8,0 mm, enquanto para temperaturas superiores a 30 ºC, empregou-se uma placa de 25,0 mm.

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 de frequência desejadas para o 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.

Iniciado o ensaio, tem-se que o equipamento possui um autoajuste, 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, como as curvas isocrômica (Figura 2.8 a) e isotérmicas (Figura 2.8 b), plano Cole-Cole (Figura 2.8 c) espaço de Black (Figura 2.8 d) e a curva de equivalência frequência-temperatura (Figura 2.8 e), também denominada de curva mestre.



(a) (b)

Figura 2.8 – Representações gráficas típicas do módulo dinâmico |G*| de ligantes betuminosos no plano complexo (continua)

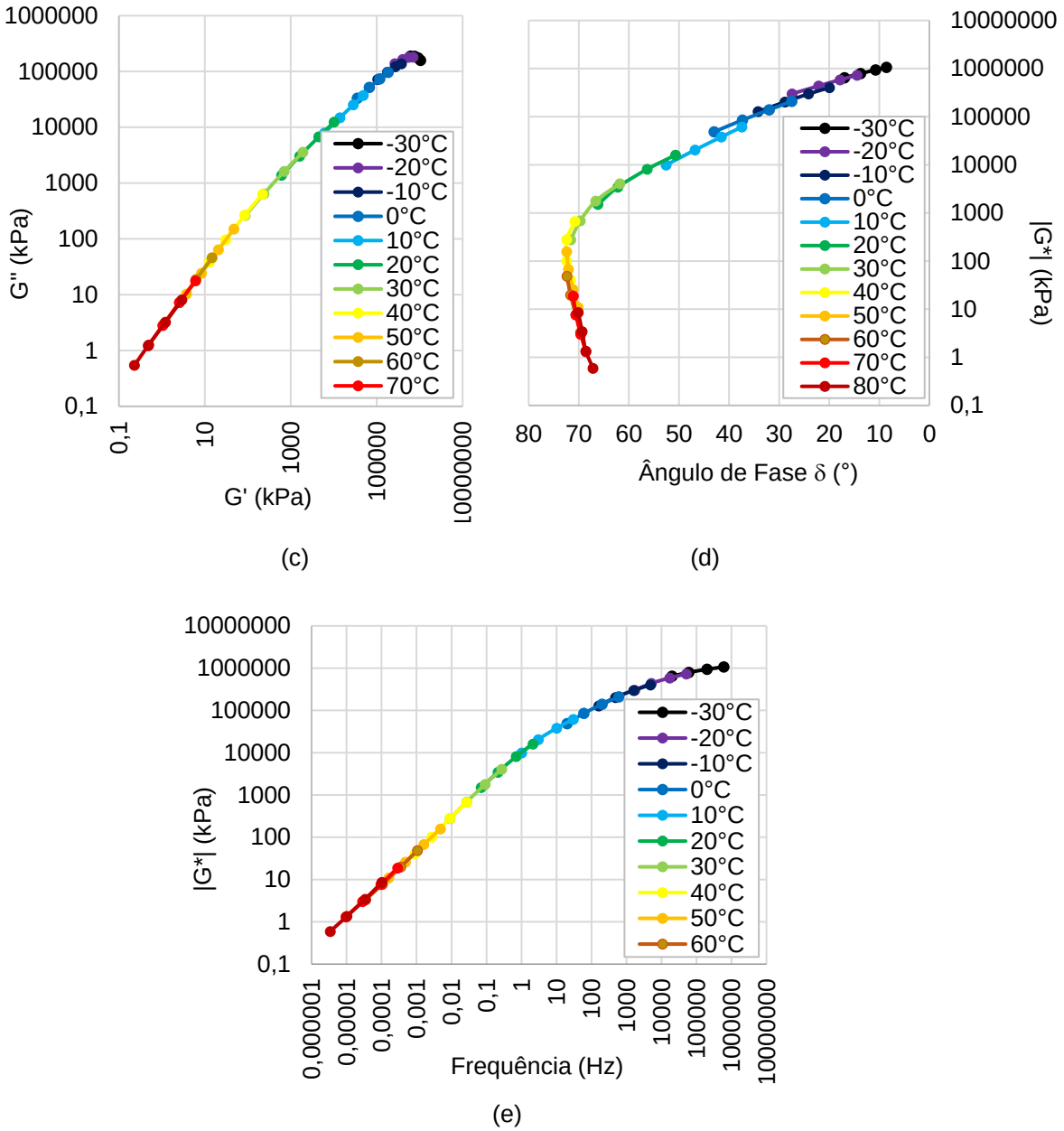


Figura 2.8 – Representações gráficas típicas do módulo dinâmico |*G| de ligantes betuminosos no plano complexo (conclusão)**

Fonte: Teixeira (2021)

2.3 CURVAS GRANULOMÉTRICAS

As composições dos arranjos granulométricos das misturas asfálticas foram concebidas a partir de um método racional, denominado também de Método Teórico, em que, nesta pesquisa, foi explorado o método de Füller-Talbot, muito utilizado na formulação das misturas asfálticas francesas, conforme abordagem já efetuada em detalhes na subseção 2.1 do RP 031 - Metodologia de Formulação de Misturas Asfálticas – Método Francês.

Neste contexto, a curva granulométrica proposta para esta pesquisa referente à mistura asfáltica do tipo *Grave-Bitume* (GB) utilizou como referência uma graduação de 0/20 mm, aplicada em obra pública na cidade de Dakar, no Senegal, com projeto concebido pelo *Institut Français des Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux* (IFSTTAR, 2012), atualmente denominada *Université Gustave Eiffel* (UGE), precursora desta técnica de formulação no mundo.

A escolha desta formulação como referência se deu em razão do Senegal ser um país africano com clima árido a tropical, em que as temperaturas anuais variam entre 18 °C e 33 °C, com pluviosidade anual entre 350 mm e 1500 mm (MEDD, 2023), assemelhando-se às condições de diversas regiões e cidades brasileiras.

No caso da mistura asfáltica de módulo elevado, *Enrobé à Module Élevé* (EME), tem-se que a curva granulométrica foi desenvolvida integralmente no LDTPav, com base nos pontos de controle da metodologia francesa para este tipo de formulação, considerando também uma graduação 0/20 mm.

A Tabela 2.4 apresenta e a Figura 2.9 ilustra, respectivamente, a curva granulométrica proposta em comparação com a de referência para a mistura asfáltica GB. É importante ressaltar que a curva proposta sofreu alterações tanto nos tamanhos das aberturas de peneiras quanto nos percentuais da distribuição granulométrica, a fim de adaptar o projeto original às condições operacionais brasileiras.

Tabela 2.4 – Distribuições granulométricas de referência e proposta da mistura asfáltica GB e respectivos pontos de controle normativos

Curva granulométrica de referência			**Pontos de controle (Manuel LPC, 2007)**		**Curva granulométrica proposta**		
Peneiras (mm)	Percentual passante (%)	Percentual retido (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	Peneiras (mm)	Percentual passante (%)	Percentual retido (%)
20,0	100,0	-	-	-	19,1	100,0	-
16,0	99,1	0,8	-	-	12,7	86,10	13,90
14,0	94,5	4,6	-	-	9,5	71,80	14,30
12,7	86,1	8,4	-	-	6,3	51,50	20,30
10,0	71,8	14,3	-	-	4,8	45,00	6,50
8,0	61,1	10,7	-	-	2,2	31,60	13,40
6,3	51,5	9,6	45	70	1,2	22,50	9,10
5,0	48,3	3,2	-	-	0,6	16,80	5,70
4,0	41,5	6,8	40	60	0,3	12,90	3,90
3,2	36,5	5,0	-	-	0,15	10,00	2,90
2,0	31,6	4,9	25	38	0,075	7,50	2,50
1,0	22,5	9,1	-	-	FUNDO	-	7,50
0,5	16,8	5,7	-	-			
0,25	12,9	3,9	-	-			
0,125	10,0	2,9	-	-			
0,063	7,6	2,4	5,4	7,7			
FUNDO	-	7,6	-	-			

Fonte: Rodrigues (2022)

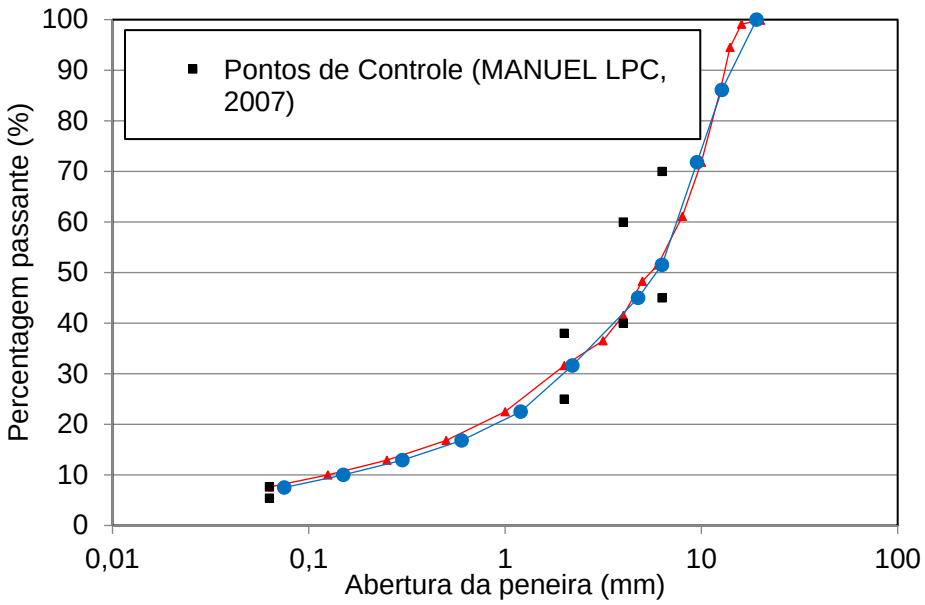


Figura 2.9 – Curvas granulométricas de referência e proposta da mistura asfáltica GB e respectivos pontos de controle normativos

Fonte: Rodrigues (2022)

A partir da observação da Figura 2.9, tem-se que a formulação proposta se encontra muito próxima à curva granulométrica de referência da mistura asfáltica *Grave-Bitume* (GB) de graduação 0/20 mm, abrangendo os principais aspectos que a caracterizam (Manuel LPC, 2007; AFNOR NF EN 13108-1, 2017), como: presença de frações granulares nos três terços da composição (10/20 mm, 2/10 mm e 0/2 mm); ausência de descontinuidades na trajetória da curva; diâmeto máximo próximo a 20 mm (19,1mm); percentual retido na peneira 12,7 mm inferior ao limite máximo recomendável de 15,0 %; percentual passante de 7,5 % na menor abertura de peneira da série selecionada, sendo que 2,0 % são constituídos por cal hidratada CH-1, pelas razões já explanadas no seção 2.1.

Conforme abordado na seção 2.1 do RP 031 - Metodologia de Formulação de Misturas Asfálticas – Método Francês (Equação 2.2), foi obtido o expoente de graduação n de 0,47, confirmando a característica densa da formulação GB desenvolvida, devido ao seu enquadramento no intervalo $0,35 < n \leq 0,55$ (DNIT, 2006).

Para as dosagens testadas na campanha experimental, foram considerados os seguintes teores de ligante betuminoso para as misturas asfálticas do tipo *Grave-Bitume* (GB): 3,90 %, 4,22 %, 4,54 % e 4,86 %. A escolha desta faixa de teores se deve ao fato de que o projeto de referência apresentou uma dosagem de serviço com 4,20 % (IFSTTAR, 2012). Entretanto, como foram realizadas adaptações na curva granulométrica de referência, conforme abordado anteriormente, bem como o tipo de ligante betuminoso também foi distinto ao originalmente utilizado, fez-se necessário avaliar variações de dosagens próximas, a fim de determinar a melhor condição de trabalho para as formulações propostas nesta pesquisa.

A Tabela 2.5 e a Tabela 2.6 apresentam a curva granulométrica e a Figura 2.10 ilustra a curva desenvolvida para a mistura asfáltica EME. Assim como para a formulação GB, houve alterações nos tamanhos das aberturas de peneiras selecionadas, em relação às normalmente utilizadas na França (Tabela 2.4, nas peneiras da curva granulométrica de referência) a fim de adaptar a sua exequibilidade às condições operacionais brasileiras.

Tabela 2.5 – Distribuição granulométrica da mistura asfáltica EME

Peneiras (mm)	Percentual passante (%)	Percentual retido (%)
19,1	100	-
12,7	84,00	16,00
9,5	71,80	12,20
6,3	57,00	14,80
4,76	50,00	7,00
2,2	33,00	17,00
1,2	23,00	10,00
0,6	16,80	6,20
0,3	12,90	3,90
0,15	10,00	2,90
0,075	7,00	3,00
Fundo	-	7,00

Fonte: LDTPav (2022)

Tabela 2.6 – Pontos de controle da distribuição granulométrica para as misturas asfálticas EME

Peneiras (mm)	Limite mínimo	Limite máximo	Limite visado
	%	%	%
6,3	45	70	53
4	40	60	47
2	25	38	33
0,063	5,4	7,7	6,7

Fonte: Manuel LPC (2007)

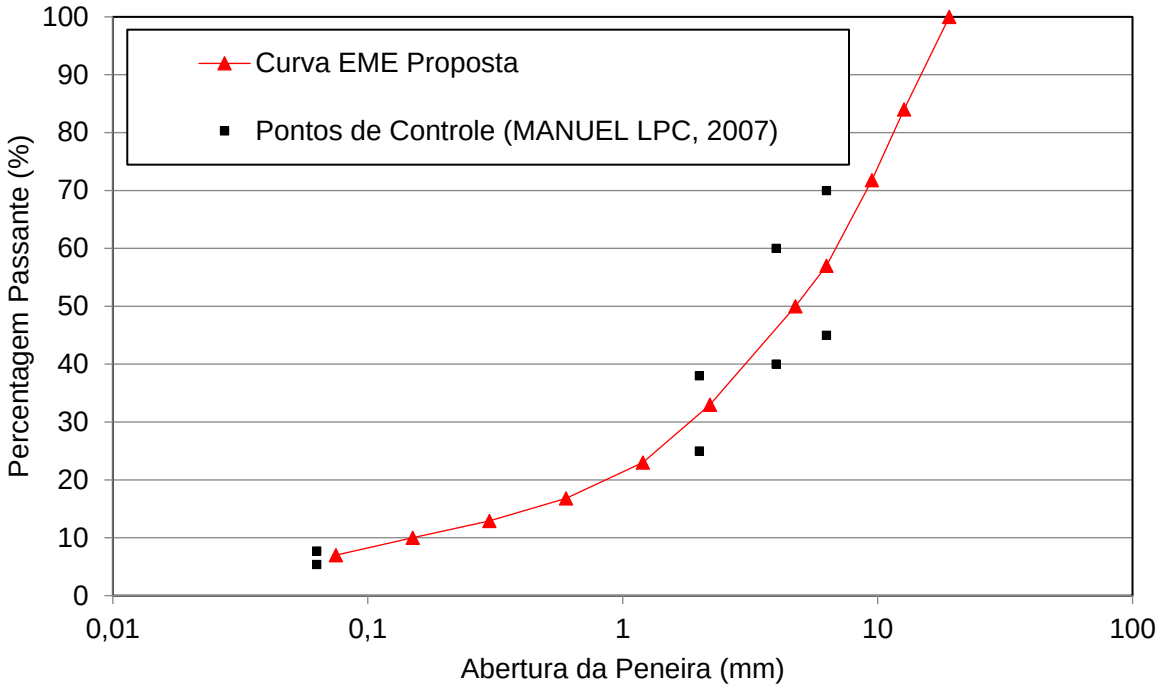


Figura 2.10 – Curva granulométrica da mistura asfáltica EME e respectivos pontos de controle normativos

Fonte: LDTPav (2022)

A partir da observação da Figura 2.10, tem-se que a formulação proposta se encontra em concordância com a curva granulométrica de uma mistura asfáltica Enrobé à Module Élevé (EME) de graduação 0/20 mm, abrangendo os principais aspectos que a caracterizam (Manuel LPC, 2007; AFNOR NF EN 13108-1, 2017), como: presença de frações granulares nos três terços da composição (10/20 mm, 2/10 mm e 0/2 mm); ausência de descontinuidades na trajetória da curva; diâmetro máximo próximo a 20 mm (19,1 mm); percentual retido na peneira 12,7 mm inferior ao limite máximo recomendável de 17,0 %; percentual passante de 7,0 % na menor abertura de peneira da série selecionada, sendo que 2,0 % são constituídos por cal hidratada CH-1, pelas razões já explanadas na subseção 2.1.

Considerando a metodologia de Füller-Talbot, a partir da Equação 2.2 apresentada na seção 2.1 do RP 031 - Metodologia de Formulação de Misturas Asfálticas – Método Francês, obteve-se o expoente de graduação n de 0,48, confirmando também a característica densa da formulação EME, devido enquadrar-se no intervalo $0,35 < n \leq 0,55$ (DNIT, 2006).

Para as dosagens testadas na campanha experimental, foram considerados os seguintes teores de ligante betuminoso para as misturas asfálticas do tipo EME: 4,54 %, 4,86 %, 5,18 %, 5,50 % e 5,82 %.

A escolha desta faixa de teores se deve ao fato de que a distribuição granulométrica desenvolvida apresenta maiores percentuais de frações passantes na região intermediária quando comparada à curva das misturas asfálticas GB (Figura 2.11), aumentando a superfície específica e consequentemente demandando quantidades maiores de ligante para o adequado envolvimento das partículas.

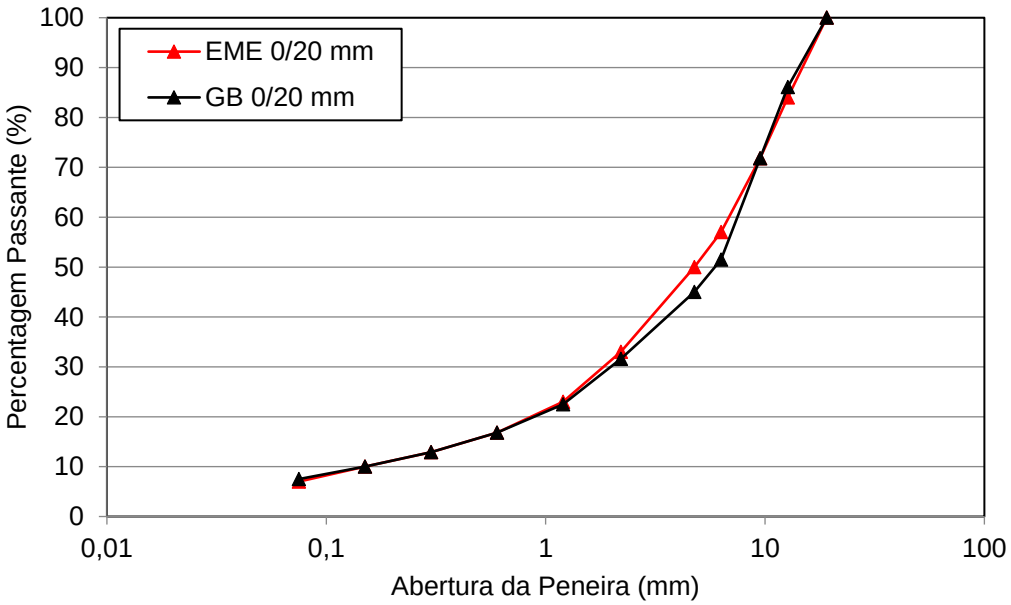


Figura 2.11 – Curvas granulométricas das misturas asfálticas EME e GB

Fonte: LDTPav (2022)

A comprovação do efeito da superfície específica é constatada ao aplicar os dados das frações retidas nas respectivas curvas granulométricas (Tabela 2.4 e Tabela 2.5) na Equação 2.5 do RP 031 - Metodologia de Formulação de Misturas Asfálticas – Método Francês, tendo sido obtidos 11,32 m^2/kg e 12,63 m^2/kg para as misturas asfálticas GB e EME, respectivamente.

Além disso, a experiência francesa com a formulação de misturas asfálticas de módulo elevado aponta que, para ter êxito no alcance dos limites mínimos de desempenho exigidos por norma (Manuel LPC, 2007; vide o Anexo A do RP 031 - Metodologia de Formulação de Misturas Asfálticas – Método Francês, é necessário utilizar ligantes betuminosos com elevado desempenho reológico, bem como aportar teores que permitam a formação de películas robustas sobre os granulares, a fim de garantir módulo de rigidez e resistência à fadiga adequados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos, com base na campanha experimental realizada, em sua primeira etapa, sob a forma comparativa entre as formulações desenvolvidas para as misturas asfálticas *Grave-Bitume* (GB) e *Enrobé à Module Élevé* (EME).

3.1 MASSA VOLUMÉTRICA REAL

A Massa Volumétrica Real (MVR) das misturas asfálticas é um parâmetro essencial no transcurso do processo de formulação (seção 3.1 do RP 031 - Metodologia de Formulação de Misturas Asfálticas – Método Francês, pois além de estabelecer indicadores quanto à compacidade do material para uma dada dosagem, também é um dado de entrada para o cálculo da massa do corpo de prova a ser considerada nos ensaios de habilidade de compactação na Prensa de Compactação Giratória (PCG) (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – MVR das formulações GB e EME

Teor de Ligante (%)	GB[1]	EME[2]
	MVR (g/cm³)	MVR (g/cm³)
3,90	2,592	-
4,22	2,573	-
4,54	2,554	2,492
4,86	2,543	2,472
5,18	-	2,463
5,50	-	2,454
5,82	-	2,447

Fonte: [1]Rodrigues (2022); [2]LDTPav (2022)

É importante destacar que a tendência de decrescimento dos valores de MVR com o aumento do teor de ligante foi verificado para ambas as formulações testadas. Isto é coerente e se explica, pois, sendo as massas específicas dos ligantes betuminosos 60/85 E (Tabela 2.2) e HiMA (Tabela 2.3) inferiores àquelas dos arranjos granulométricos (MVRg $>$ 2,650 g/cm^3), ocorre uma diminuição progressiva da MVR com a maior quantidade de ligante aplicado nas dosagens.

Quanto ao fato dos valores de MVR da mistura asfáltica GB serem maiores que os observados para a EME, tem-se que, devido à menor superfície específica da distribuição granulométrica da primeira, conforme apresentado na seção 2.3, sobretudo em relação à menor quantidade de frações intermediárias passantes (Figura 2.11), há menor demanda por uso de ligante betuminoso nas dosagens quando comparada ao EME. Esta condição acarreta em maior participação das frações granulares na composição das misturas asfálticas, aumentando a MVR.

3.2 REOMETRIA POR CISALHAMENTO DINÂMICO

O estudo reológico das matrizes betuminosas 60/85 E e HiMA permitiu obter as tabulações de dados (Apêndice A) e as representações gráficas no plano complexo, a saber: curvas isocrônicas (Figura 3.1), curvas isotérmicas (Figura 3.2), plano Cole-Cole (Figura 3.3), espaço de Black (Figura 3.4) e curva de equivalência frequência-temperatura, também denominada de curva mestra (Figura 3.5). É importante esclarecer que as colorações identificadoras nas legendas são as mesmas, a distinção se dá pelas linhas contínuas e tracejadas, correspondentes às matrizes 60/85 E e HiMA, respectivamente.

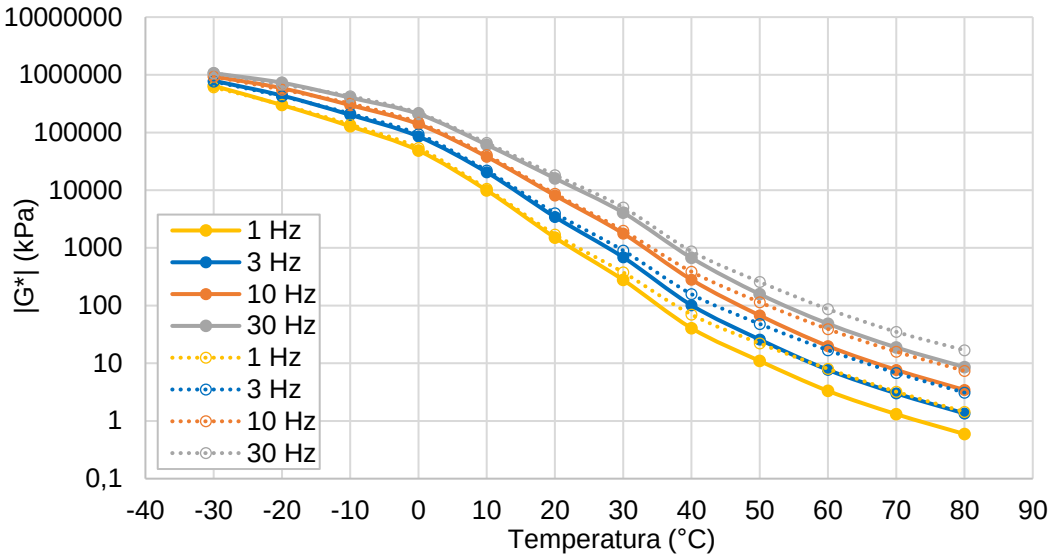


Figura 3.1 – Curvas isocrônicas

Fonte: Teixeira (2021)

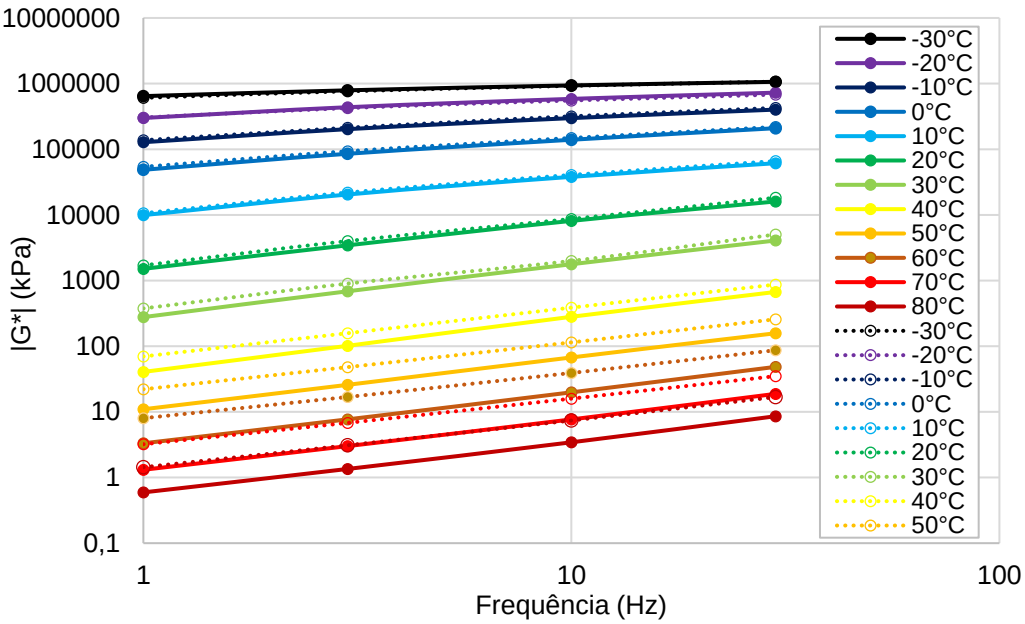


Figura 3.2 – Curvas isotérmicas

Fonte: Teixeira (2021)

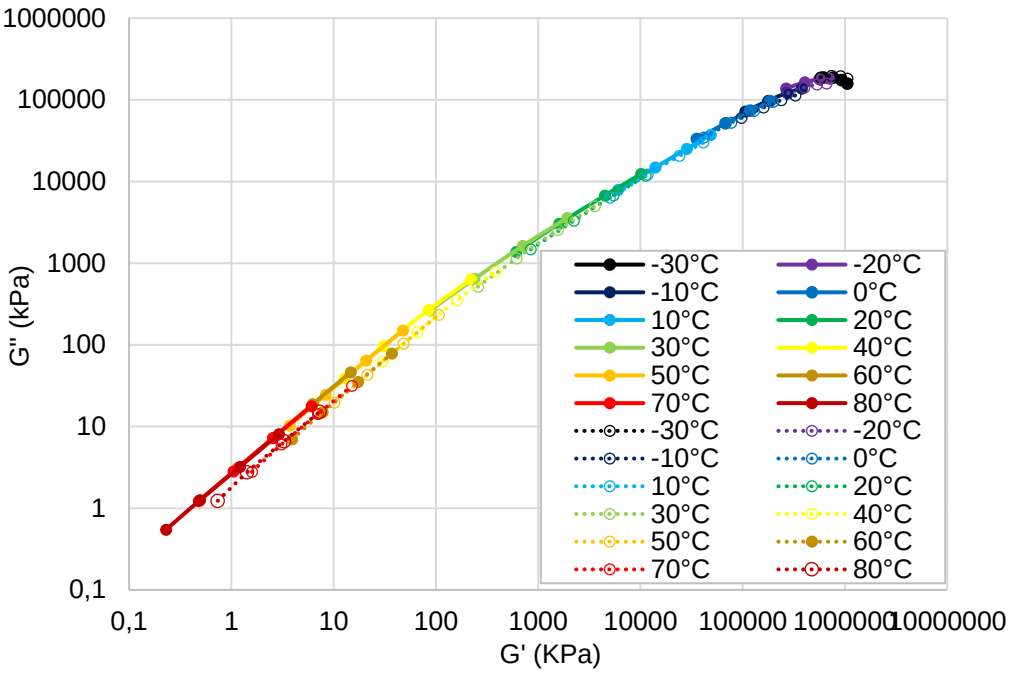


Figura 3.3 – Plano Cole-Cole

Fonte: Teixeira (2021)

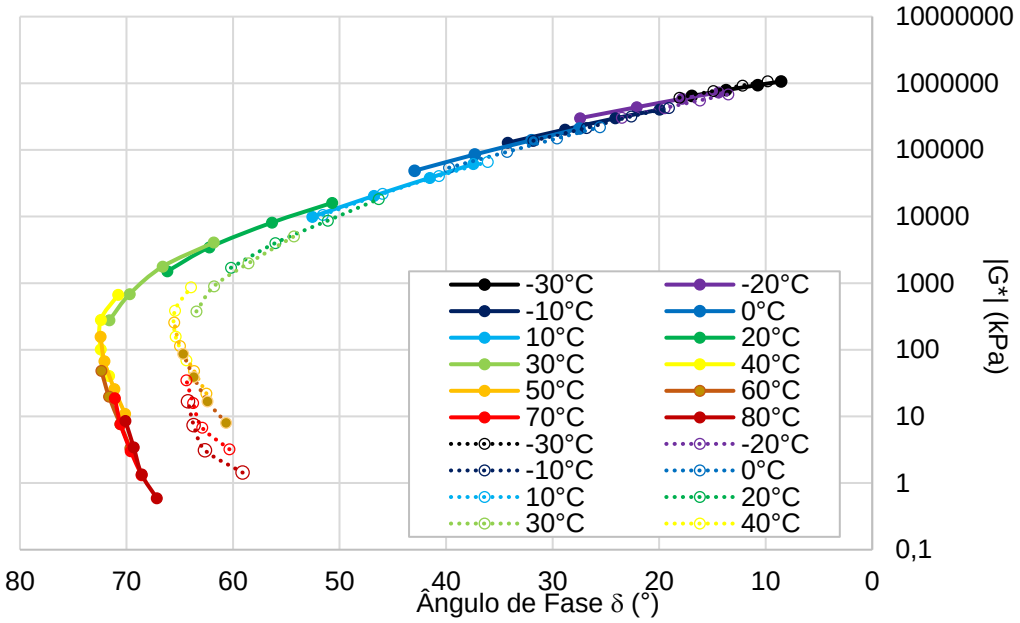


Figura 3.4 – Espaço de Black

Fonte: Teixeira (2021)

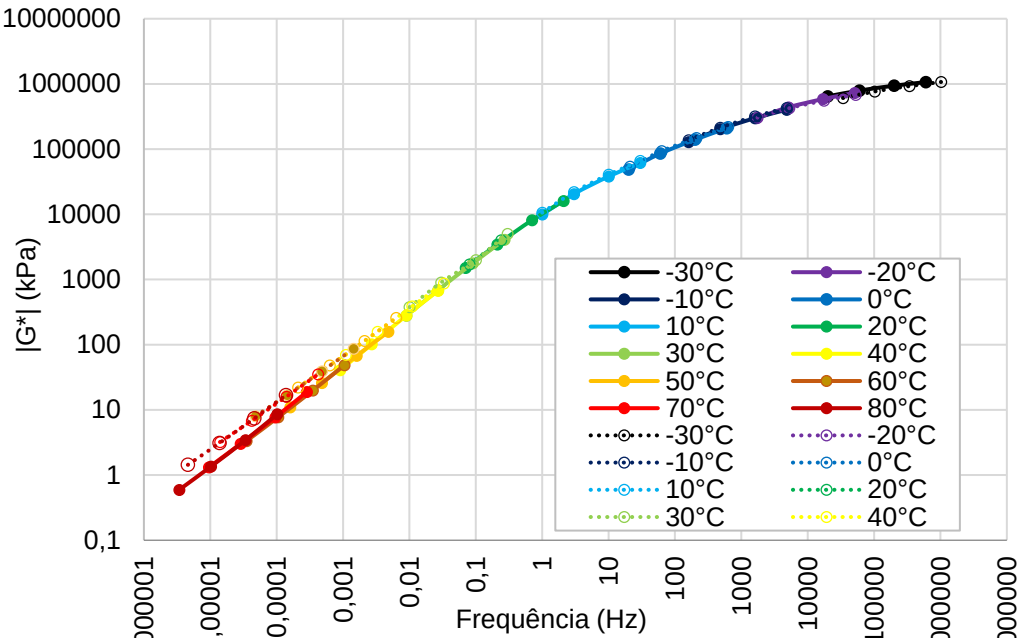


Figura 3.5 – Curva de equivalência frequência-temperatura

Fonte: Teixeira (2021)

Os resultados obtidos demonstram que a matriz HiMA é menos suscetível térmica e cineticamente do que a 60/85 E, apresentando 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 ºC, 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 ºC.

Isto indica uma participação de menor intensidade da componente viscosa no comportamento reológico do HiMA em relação à matriz 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, apresentando 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 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, uma elevada temperatura e um 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 todas as variações binárias de frequência e temperatura testadas comprova que as matrizes betuminosas atendem à prerrogativa da linearidade no comportamento viscoelástico, de acordo com o princípio de superposição de Boltzmann. Logo, apresentam proporcionalidade entre as amplitudes de tensão aplicadas e deformações resultantes no âmbito das microdeformações.

As análises efetuadas acerca das representações gráficas no plano complexo também ratificam a abordagem discorrida na seção 2.2.1, 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 na matriz 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 2.4) viabiliza o maior aporte de diblocos de Estireno-Butadieno (SB) (Figura 2.3) em torno de 75 % quando comparado à variação 1101 AT, com apenas 16 %.

Como resultado, ocorre uma maior compatibilidade com o ligante betuminoso de base (CAP 50/70), 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.

Este cenário viabiliza a inversão de fase no processo de modificação para a constituição da matriz betuminosa HiMA, mesmo contendo percentuais de incorporação polimérica maiores (7,5 %) do que nas modificações tradicionais (4,0 %), além de contar com uma melhor recuperação elástica e ponto de amolecimento (Tabela 2.2 e Tabela 2.3).

3.3 HABILIDADE DE COMPACTAÇÃO

No que diz respeito à habilidade de compactação das misturas asfálticas Grave-Bitume (GB) formuladas, tem-se que, a partir dos limites normativos preconizados em AFNOR NF EN 13108-1 (2017) para a graduação 0/20 mm, foi observado o enquadramento integral na classe 4 (GB 4), devido a terem apresentado, em todos os casos, $\%V_{máx} \leq 9{,}0$ % a 120 giros.

Todavia, para as misturas asfálticas Enrobé à Module Élevé (EME), tem-se que os teores de 4,54 %, 4,86 % e 5,18 % atenderam à classe 1, pois alcançaram % $V_{máx} \geq 6,0$ % a 120 giros, enquanto os teores de 5,50 % e 5,82 % atingiram a classe 2, devido terem alcançado % $V_{máx} \leq 6,0$ % a 120 giros. A Tabela 3.2 apresenta os resultados das médias obtidas após os testes realizados com três amostras por teor de ligante e a Figura 3.6 e a Figura 3.7 ilustram esses resultados.

Tabela 3.2– Teores de vazios médios obtidos nos ensaios de habilidade de compactação na PCG para as misturas asfálticas GB e EME

Teor de ligante (%)	Número de giros	GB[1]	EME[2]
		%V	%V
3,90	120	8,4	-
4,22		7,3	-
4,54		6,1	8,0
4,86		5,4	7,2
5,18		-	6,6
5,50		-	5,5
5,82		-	5,1

Fonte: [1]Rodrigues (2022); [2]LDTPav (2022)

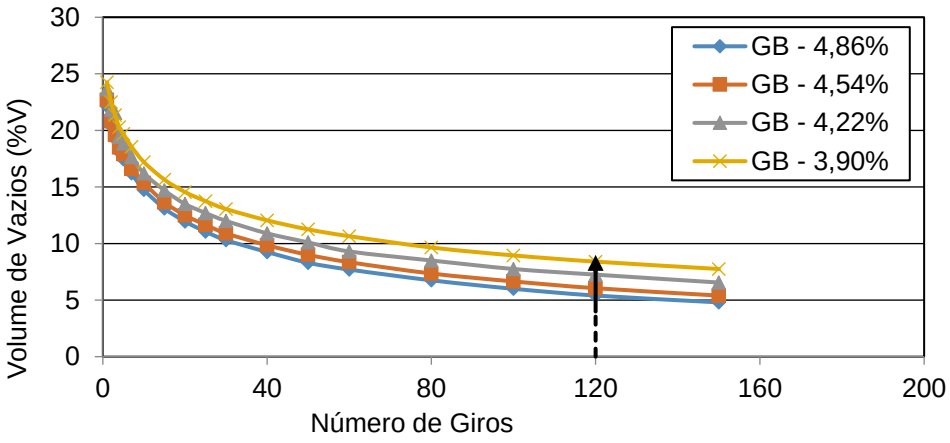


Figura 3.6 – Habilidade de compactação na PCG das misturas asfálticas GB

Fonte: Rodrigues (2022)

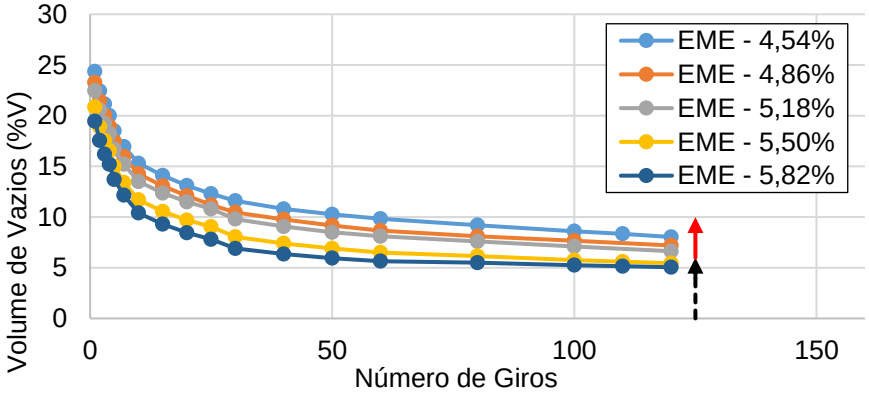


Figura 3.7 – Habilidade de compactação na PCG das misturas asfálticas EME

Fonte: LDTPav (2022)

A partir da observação dos resultados apresentados, é possível atestar a existência de uma boa compatibilização entre o arranjo granulométrico formulado pela metodologia de Füller-Talbot e as dosagens selecionadas de ligante betuminoso. Este aspecto ratifica a viabilidade técnica do referido método na construção de curvas com graduação capazes de propiciar o preenchimento gradual dos vazios formados pelas partículas de maiores dimensões, com absoluto controle individual das frações pelo projetista, permitindo a obtenção de compacidades adequadas às formulações propostas.

Ainda, verifica-se que a forma dos granulares é uma propriedade importante quanto à habilidade de compactação das formulações, pois a macrotextura predominantemente subangular, corroborado pelos resultados dos ensaios de lamelaridade (Tabela 2.1), contribui para um bom intertravamento estrutural interno, acarretando em arranjos granulométricos mais estáveis mecanicamente, ou seja, menos suscetíveis às tensões cisalhantes geradas no processo de compactação.

É importante também destacar a influência do teor de ligante betuminoso na compacidade das misturas asfálticas, pois quanto maior a presença deste material na formulação, maior o efeito lubrificante nas interfaces de contato entre as partículas, causando perda de resistência ao cisalhamento do arranjo granulométrico. Logo, maior densificação da mistura, além de um preenchimento mais efetivo dos vazios formados pela maior quantidade de ligante utilizada.

Alia-se à abordagem do parágrafo anterior a menor viscosidade dinâmica da matriz betuminosa 60/85 E em relação à HiMA no ato da compactação das misturas asfálticas (Figura 2.5), diferindo em 10 ºC a menos em relação à primeira. Esta condição em conjunto à menor superfície específica da distribuição granulométrica da GB, permite a utilização de menores teores de ligante nas dosagens e compactabilidade do material em menores temperaturas. Por esta razão, verifica-se que para um teor de vazios obtido a uma dada dosagem da mistura asfáltica GB, se fazem necessários dois teores acima para que se atinja um percentual próximo para a EME (Tabela 3.2).

Neste contexto, cabe observar que, mesmo todas as formulações tendo sido enquadradas na classe GB 4 e parte na classe EME 2, isto é, as mais nobres entre as misturas asfálticas de graduação 0/20 mm na metodologia francesa AFNOR NF EN 13108-1 (2017), deve haver cuidado na avaliação dos teores de ligante betuminoso testados nesta etapa, pois os procedimentos da PCG verificam tão somente a habilidade no ato da compactação das misturas asfálticas, e não a escolha definitiva da dosagem proposta.

Portanto, apenas após a análise conjunta dos níveis de teste previstos para uma dada formulação é que se torna possível definir a viabilidade técnica de sua utilização ou não.

3.4 RESISTÊNCIA À AÇÃO DELETÉRIA DA ÁGUA

Os valores médios obtidos das relações r/R (Tabela 3.3, Figura 3.8 e Figura 3.9) após o teste de 12 corpos de prova por teor de ligante betuminoso indicam que todas as formulações propostas possuem forte resistência à ação deletéria da água, pois apresentaram resultados bem superiores ao limite mínimo exigido de 0,70 (AFNOR NF EN 13108-1, 2017).

Tabela 3.3 – Resultados da relação r/R no ensaio de Duriez

Teor de Ligante (%)	GB[1]	EME[2]
	r/R	r/R
3,90	0,95	-
4,22	0,95	-
4,54	0,95	0,86
4,86	0,96	0,86
5,18	-	0,87
5,50	-	0,87
5,82	-	0,88

Fonte: [1]Rodrigues (2022); [2]LDTPav (2022)

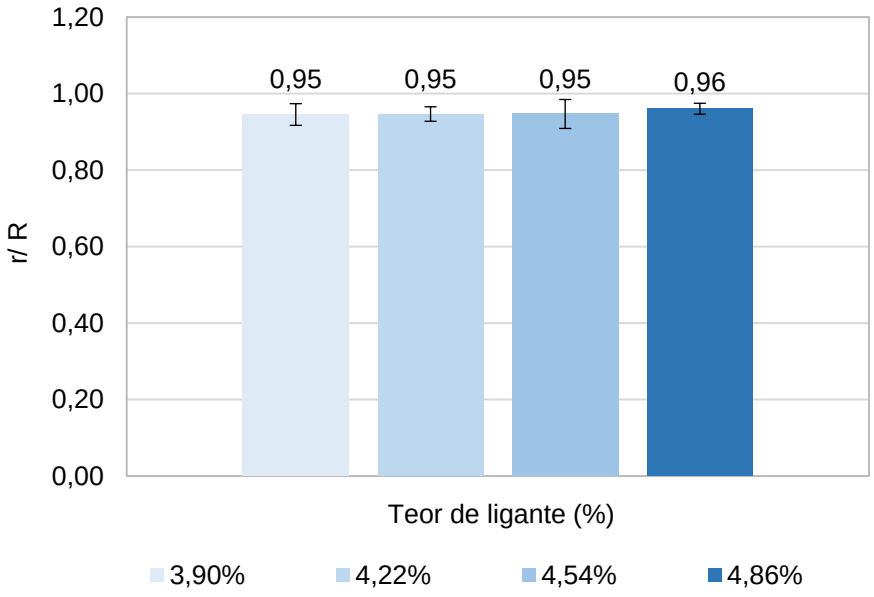


Figura 3.8 – Resistência à ação da água das misturas asfálticas GB formuladas

Fonte: Rodrigues (2022)

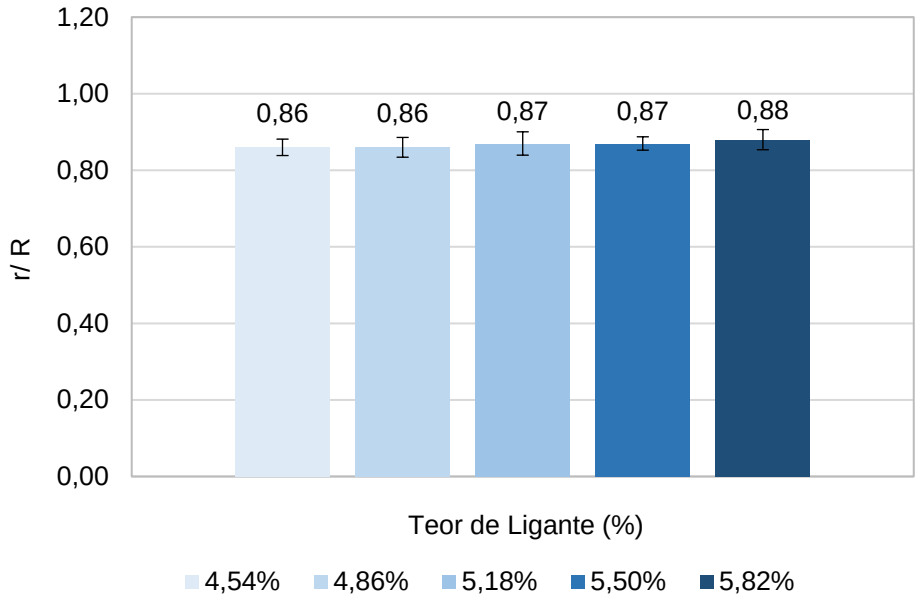


Figura 3.9 – Resistência à ação da água das misturas asfálticas EME formuladas

Fonte: LDTPav (2022)

Como as misturas asfálticas *Grave-Bitume* (GB) e *Enrobé à Module Élevé* (EME) possuem graduação densa, conforme abordado na subseção 2.3, tem-se que os vazios formados na estrutura interna do material após o processo de compactação não dispõem de característica comunicante, como no caso das formulações drenantes, por exemplo. Assim, são dispostos majoritariamente de forma isolada no núcleo estrutural ou próximos à superfície dos corpos de prova.

Portanto, quando a água consegue penetrar no interior destas misturas asfálticas, aloja-se permanentemente, potencializando o efeito deletério de remoção da película do ligante betuminoso que envolve os granulares com o tempo, em razão de sua forte tensão superficial, abordada na seção 3.2 do RP 031 - Metodologia de Formulação de Misturas Asfálticas – Método Francês.

Isto explica os valores das relações r/R obtidos para as misturas asfálticas GB terem sido maiores que os correspondentes às formulações EME, pois quanto mais densas as distribuições granulométricas, mais efetivo é o alojamento da água que consegue penetrar nos interstícios não comunicantes formados pelos vazios, aumentando o seu efeito deletério em longo prazo.

Esta constatação é confirmada pelos baixos valores e pela constância nos percentuais de perda observados na Figura 3.8 e na Figura 3.9, indicando uma atuação da água concentrada na região periférica dos corpos de prova, independente do teor de ligante betuminoso utilizado nas dosagens.

Outro fator que explica os bons indicadores obtidos diz respeito à adição de 2,0 % de cal hidratada CH-1 calcítica na composição da curva granulométrica, em razão da natureza eletropositiva deste material, que corrobora à obtenção de boa adesividade passiva do conjunto granular-ligante betuminoso, bem como ao espessamento da película do mástique que envolve os granulares e permite a resistência à ação deletéria da água pela formação do composto Naftanato de Cálcio, aspectos já reportados na seção 2.3.

É importante destacar que a representação das barras de erros dos resultados na Figura 3.8 e na Figura 3.9, pois apresentaram variações entre 1,5 % e 4,0 % no desvio-padrão das leituras realizadas, inferior ao limite máximo de 5,0 % preconizado normativamente (Manuel LPC, 2007), atestando ótima repetibilidade dos testes realizados e do processo de moldagem, garantindo boa homogeneidade amostral.

3.5 RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Para a verificação da resistência à deformação permanente das formulações GB e EME desenvolvidas para esta pesquisa, foram seguidos os procedimentos descritos na seção 3.3 do RP 031 - Metodologia de Formulação de Misturas Asfálticas – Método Francês.

Os resultados da média obtida para cada par de placas, por teor de ligante, são apresentados na Tabela 3.4 e na Tabela 3.5, e ilustrados na Figura 3.10 e na Figura 3.11, após 30.000 ciclos de carregamento.

Tabela 3.4– Afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas GB formuladas

Teor de ligante (%)	Nº de ciclos	Afundamento na trilha de roda (%)	Limite máximo admissível (%)
3,90	30.000	1,83	10,0
4,22		2,28	
4,54		2,52	
4,86		2,98	

Fonte: Rodrigues (2022)

Tabela 3.5 – Afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas EME formuladas

Teor de ligante (%)	Nº de ciclos	Afundamento na trilha de roda (%)	Limite máximo admissível (%)
4,54	30.000	1,31	7,5
4,86		1,61	
5,18		1,89	
5,50		2,06	
5,82		3,38	

Fonte: LDTPav (2022)

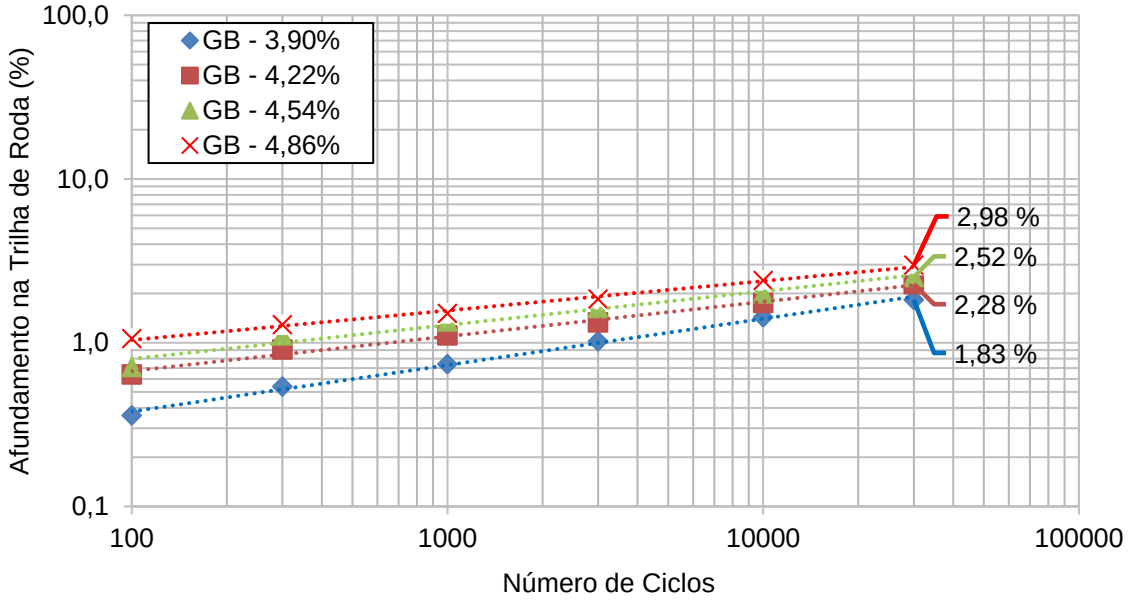


Figura 3.10 – Evolução do afundamento na trilha de roda das misturas asfálticas GB formuladas

Fonte: Rodrigues (2022)

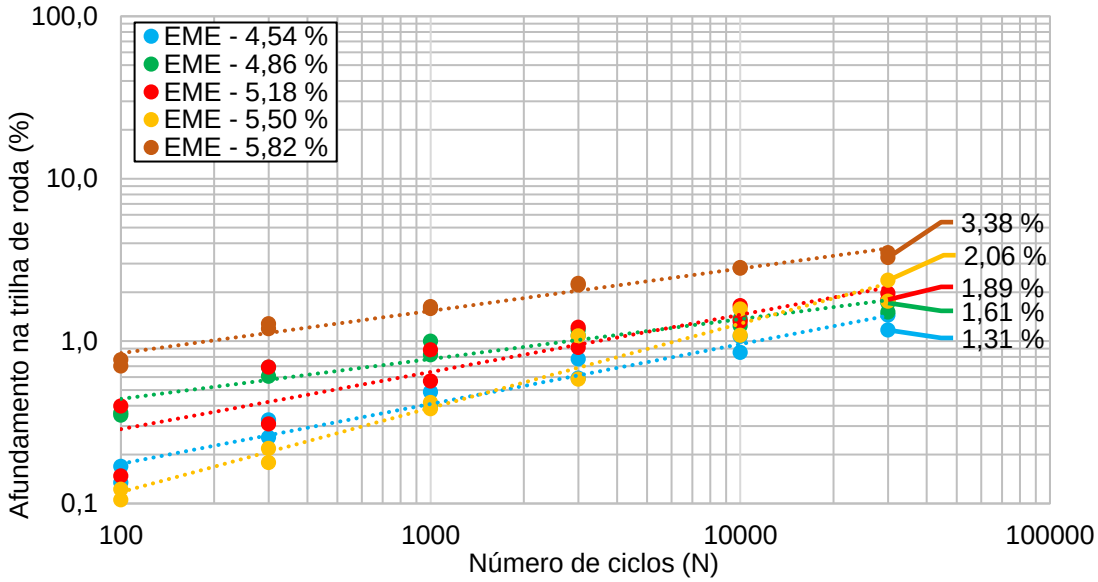


Figura 3.11 – Evolução do afundamento da trilha de roda das misturas asfálticas EME formuladas

Fonte: LDTPav (2022)

Observando os resultados obtidos, tem-se que todas as formulações propostas nesta pesquisa se enquadram nas classes 4 e 2 das misturas asfálticas *Grave-Bitume* (GB 4) e *Enrobé à Module Élevé* (EME 2), pois apresentaram valores inferiores aos limites máximos de 10,0 % e 7,5 % correspondentes ao afundamento na trilha de roda após 30.000 ciclos a 60 ºC (vide o Anexo A do RP 031 - Metodologia de Formulação de Misturas Asfálticas – Método Francês.

De acordo com Barra *et al*. (2010), as misturas asfálticas a partir da classe 3 devem ser formuladas preferencialmente para aplicação em condições de solicitação adversas e intensas, como tráfego canalizado, elevada solicitação, zonas de interseção e rotatórias, por exemplo, bem como em regiões com clima relacionado a temperaturas constantemente elevadas.

Portanto, no caso das misturas asfálticas *Grave-Bitume* (GB), a classe 4 é a mais nobre entre todas da categoria e a que melhor se conforma à realidade brasileira, pois as estruturas de pavimento, notadamente as camadas betuminosas, estão constantemente submetidas a severos níveis de carga por eixo e clima com temperaturas predominantemente elevadas, requerendo maior rigor em seus procedimentos conceptivos e avaliativos.

No caso das misturas asfálticas EME, tem-se uma particularidade, pois há apenas duas classes previstas: 1 e 2. Neste contexto, a última é considerada a formulação mais nobre de toda a metodologia francesa de formulação, em razão dos elevados requisitos técnicos para que se atinja os seus limites mínimos de desempenho (vide o Anexo A do RP 031 - Metodologia de Formulação de Misturas Asfálticas – Método Francês, estando adequada, portanto, ao mesmo âmbito de utilização relacionado às condições de tráfego e clima descritas para a GB.

Assim como observado nos resultados referentes à habilidade de compactação com o uso da PCG, na seção 3.3, o efeito lubrificante do ligante betuminoso na interação com o arranjo granulométrico também é percebido com a diminuição da resistência à deformação permanente das misturas asfálticas. O aumento gradual do percentual de dosagem diminui a efetividade do intertravamento entre as partículas, acarretando na perda progressiva do atrito interno, diminuindo a resistência ao cisalhamento das formulações, provocando o aumento dos afundamentos na trilha de roda.

Reitera-se que o ensaio é realizado de forma bem mais rigorosa que as condições observadas em campo, ou seja, a uma frequência contínua muito lenta (1 Hz) e temperatura elevada de aplicação do carregamento (60 ºC). Ainda assim, todas as formulações apresentaram um excelente desempenho no que diz respeito à resistência à deformação permanente, conforme já demonstrado.

Para tanto, além de arranjos granulométricos bem distribuídos e intertravados, com boa habilidade de compactação (Figura 3.6 e Figura 3.7), a qualidade das matrizes betuminosas 60/85 E e HiMA contribuiu de forma decisiva aos bons resultados obtidos, pois, respectivamente, a incorporação de 4,0 % e 7,5 % das moléculas 1101 AT e D0243 do polímero SBS na composição do ligante base CAP 50/70 conferiu elevada resistência ao ponto de amolecimento anel e bola (65,4 ºC e 90 ºC) e forte recuperação elástica (90 % e 96 %) (Tabela 2.1 e Tabela 2.2) ao material, tornando as misturas asfálticas desenvolvidas pouco suscetíveis termicamente.

O fato que confirma a condição mencionada anteriormente é ilustrado na Figura 3.12 e na Figura 3.13, a partir de placas moldadas para as misturas asfálticas GB e EME com teores de ligante 4,86 % e 5,82 %, nesta ordem, correspondentes aos maiores utilizados em toda a campanha experimental em cada caso, comparando-as nos estágios antes e após a realização dos testes. Pode-se perceber que mesmo após serem submetidas a 30.000 ciclos de solicitação, as placas apresentam afundamento quase imperceptível nas trilhas de roda, confirmando o bom desempenho mecânico das misturas asfálticas formuladas.



(a) (b)

Figura 3.12 – Mistura asfáltica GB formulada com 4,86 % de ligante betuminoso: (a) antes e (b) após a execução do ensaio

Fonte: Rodrigues (2022)



(a) (b)

Figura 3.13 – Mistura asfáltica EME formulada com 5,82 % do ligante betuminoso: perfil (a) antes e (b) após a execução do ensaio

Fonte: LDTPav (2022)

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os resultados obtidos na primeira etapa da campanha experimental realizada, bem como as discussões técnicas apresentadas, conclui-se que, até o momento, foram alcançados integralmente os objetivos traçados para esta pesquisa, destacando-se o desenvolvimento da formulação, dos desempenhos reológicos e mecânicos, bem como de demonstração da viabilidade técnica referente ao uso das misturas asfálticas do tipo *Grave-Bitume* (GB) e *Enrobé à Module Élevé* (EME) de graduação 0/20 mm.

Para tanto, foram propostas adaptações para aplicação no Brasil de um projeto de referência executado em obra pública na cidade de Dakar, no Senegal, no caso das misturas asfálticas GB e uma formulação EME integralmente desenvolvida no LDTPav, ambas com base nos princípios conceptivos da metodologia francesa.

O método de Füller-Talbot demonstrou ser bastante efetivo quanto à formação de arranjos granulométricos com graduação densa, bem distribuídos proporcionalmente nas aberturas de peneiras selecionadas, com controle total dos percentuais fracionários, em razão do peneiramento individualizado das partículas granulares, preenchendo-se gradualmente os vazios formados pelos granulares de maiores dimensões.

Desta forma, evitou-se formular curvas granulométricas com trajetórias descontínuas e granulometrias comerciais heterogêneas que acarretam em sobreposições de frações de mesmo diâmetro, principalmente nas regiões mais finas. Estas situações são muito comuns nas concepções realizadas com a metodologia por tentativa, com o uso de faixas granulométricas, correntemente adotado no Brasil.

Estes aspectos, aliados à utilização de granulares com macrotextura subangular e microtextura rugosa, como as frações britadas de origem gnáissica utilizadas, permitiram dispor de um intertravamento adequado entre as partículas, garantindo boa estabilidade por atrito interno estrutural do arranjo granulométrico.

Como consequência, verificou-se uma forte compatibilidade dos arranjos granulométricos com as dosagens de ligante betuminoso selecionadas para teste, acarretando em uma habilidade de compactação apta à classe 4 de todas as misturas asfálticas testadas, isto é, a mais nobre entre as formulações *Grave-Bitume* (GB 4) previstas na metodologia francesa. No caso das misturas EME, houveram dosagens enquadradas nas classes 1 (4,54 %, 4,86 % e 5,18 %) e 2 (5,50 % e 5,82 %), ambas de elevado desempenho mecânico, sobretudo a última, considerada a mais nobre formulação da metodologia francesa.

Verificou-se, contudo, que o teor de ligante betuminoso possui efeito significativo na compacidade das misturas asfálticas, pois à medida que ocorreu o aumento da dosagem, foi potencializado o efeito lubrificante na interface dos granulares, diminuindo o intertravamento entre as partículas e, consequentemente, a resistência ao cisalhamento do arranjo granulométrico, reduzindo o volume de vazios do material.

No que diz respeito à ação deletéria da água, todas as formulações apresentaram resultados bem acima do limite mínimo r/R de 0,70. Neste contexto, destaca-se a incorporação de 2,0 % de cal hidratada CH-1 calcítica em substituição à parte do total de finos passantes pela abertura de peneira 0,075 mm. Este fator contribuiu de forma decisiva à ativação de um dipolo elétrico com o ligante betuminoso, permitindo atenuar a sua eletronegatividade e gerar boa afinidade elétrica com as frações gnáissicas britadas, também com predominância eletronegativa. Ainda, a formação do composto Naftanato de Cálcio atuou como uma blindagem ao ataque severo da forte tensão interfacial da água sobre o conjunto granular-ligante betuminoso.

Além disso, a composição de arranjos granulométricos com graduação densa bem distribuídos, aliado a matrizes betuminosas de elevada consistência, modificadas com 4,0 % (60/85 E; GB) e 7,5 % (HiMA; EME) das cadeias moleculares 1101 AT e D0254 do polímero SBS, resultou em uma estrutura interna com formação de vazios não comunicantes, bem como um mástique betuminoso com uma resistente película que envolve as partículas granulares. Como consequência, as formulações testadas apresentaram perdas muito pequenas de resistência, devido à concentração da ação da água ter ocorrido principalmente na região periférica das misturas asfálticas.

No que diz respeito à resistência à deformação permanente, todas as formulações também apresentaram resultados bem abaixo dos limites máximos de 10,0 % e 7,5 % exigidos para misturas asfálticas GB de classe 4 (GB 4) e EME para as classes 1 e 2, respectivamente, após a aplicação de 30.000 ciclos de solicitação a 60 ºC e frequência de 1 Hz.

Cabe esclarecer neste âmbito que, além de um arranjo granulométrico proporcionalmente bem distribuído e com forte intertravamento entre as partículas, a elevada resistência aos pontos de amolecimento (65,4 ºC e 90 ºC) e recuperação elástica (90 % e 96 %) das matrizes betuminosas utilizadas 60/85 E e HiMA, nesta ordem, tornaram as formulações pouco termossuscetíveis. Logo, como o ensaio é realizado a 60 ºC, as referidas matrizes apresentaram pouca fluência no domínio de sua componente viscosa, resultando em baixos níveis de afundamento na trilha de roda, conforme demonstrado.

Após análise conjunta dos resultados obtidos, foram escolhidos os teores de ligantes betuminosos de 4,54 % e 5,50 % como de trabalho, para as misturas GB e EME, respectivamente, em razão de não terem apresentado uma habilidade de compactação com

volume de vazios próximo do limite máximo normativo e nem muito reduzido, o que poderia causar problemas no comportamento mecânico da mistura asfáltica após a liberação para o tráfego – além de demonstrarem um excelente desempenho mecânico nos demais quesitos avaliados.

Ademais, sobretudo no que diz respeito às misturas asfálticas EME, é necessário garantir um teor de ligante betuminoso que assegure uma película robusta e resistente que envolva os granulares, permitindo obter módulo de rigidez e resistência à fadiga elevados nos níveis 3 e 4 subsequentes.

Portanto, verificou-se que todas as formulações desenvolvidas para esta pesquisa asseguram viabilidade técnica quanto à aplicação em estruturas de pavimento de concreto asfáltico para as condições brasileiras, considerando os níveis testados na primeira etapa da campanha experimental prevista.

Quanto aos resultados correspondentes aos níveis 3 e 4 subsequentes mencionados, os mesmos serão apresentados no RP 034 – Resultados da Campanha Experimental em Laboratório sobre o Comportamento Viscoelástico dos Materiais em Concreto Asfáltico – 2ª Parte.

APÊNDICE

Apêndice A – Módulo Dinâmico das Matrizes Betuminosas GB e EME

Tabela AP 1 – Resultados da análise reológica da matriz betuminosa 60/85 E (continua)

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

Tabela AP 1 – Resultados da análise reológica da matriz betuminosa 60/85 E (conclusão)

Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Ângulo de fase	Módulo de cisalhamento complexo	Módulo de armazenamento	Módulo de perda
		δ (°)	|G*| (kPa)	G' (kPa)	G'' (kPa)
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
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: Teixeira (2021)

Tabela AP 2 – Resultados da análise reológica da matriz betuminosa HiMA (continua)

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

Tabela AP 2 – Resultados da análise reológica da matriz betuminosa HiMA (conclusão)

Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	Ângulo de Fase	Módulo de Cisalhamento Complexo	Módulo de Armazenamento	Módulo de Perda
		δ (°)	|G*| (kPa)	G' (kPa)	G'' (kPa)
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
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: Teixeira (2021)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15184: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificações. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6560: Ligantes asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6576: Materiais asfálticos – Determinação da penetração. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15086: Materiais betuminosos – Determinação da recuperação elástica pelo ductilômetro de cimentos asfálticos modificados por polímeros elastoméricos ou borracha. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15184: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11341: Derivados de petróleo – Determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. 4 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. 18 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15166: Asfalto modificado – Ensaio de separação de fase. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6296: Produtos betuminosos semissólidos – Determinação da massa específica e densidade relativa. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 6 p.

AFNOR NF EN 13108-1. Mélanges Bitumineux – Spécifications des Matériaux, Partie 1: Enrobés bitumineux. Association Française de Normalisation (AFNOR). Paris, France, 2017.

AFNOR NF EN 13924. Bitumes et liants bitumineux: Spécifications des bitumes routiers de grade dur. Norme Européene, Association Française de Normalisation. Paris, France, 2006.

AFNOR NF EN 14770. Bitumes et liants bitumineux: Détermination du module complexe en cisaillement et de l'angle de phase à l'aide d'un rhéomètre à cisaillement dynamique (DSR). Paris, France, 2023.

ANDRADE, V. D. *et al*. Impacto da formulação de composições granulométricas nas propriedades mecânicas e funcionais de misturas asfálticas densas. Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, n. 4, p. e–12905, 2020.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP n° 32: Especificações do cimento asfáltico de petróleo modificados por polímeros elastoméricos, comercializado pelos diversos agentes econômicos em todo território nacional. Brasília: ANP, 2010. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/asfalto. Acesso em: 04 mar. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Resolução ANP n° 897: Especificações dos asfaltos e dos aditivos asfálticos de reciclagem para misturas à quente, e suas regras de comercialização em todo o território nacional. Brasília: ANP, 2022. Disponível em:https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/r-asfalto. Acesso em: 18 out. 2024.

CBB Asfaltos. Certificado de Análise – Poliflex HiMA. Ensaios de Caracterização do Ligante. Ligante Altamente Modificado por Polímero, 2019.

BARRA, B. *et al*. Temperature implications on rheological-mechanical behavior and design of high modulus dense asphalt mix. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 125, p. 135-144, out. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.037.

BARRA, B. *et al*. Characterization of granite and limestone powders for use as fillers in bituminous mastics dosage. Anais da Academia Brasileira de Ciências, [s.l.], v. 86, n. 2, p. 995-1002, jun. 2014. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201420130165.

BARRA, B. *et al*. Diretrizes para a Formulação e Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas. Revista Pavimentação, v. 17, p. 38-58. 2010.

BARROS, L. M. de. Deformação permanente de misturas asfálticas: avaliação do desempenho conforme critério de Flow Number de misturas quentes e mornas. 2017. 179 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

BERNUCCI, L. B. *et al*. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 2. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS; ABEDRA, 2022. 750 p.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 031/2024 – ES: Pavimentação - Concreto asfáltico - Especificação de serviço. Brasília. Instituto de Pesquisa Rodoviária (IPR), 2024.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. DNIT 385/2026 – ES: Pavimentação – Concreto asfáltico com ligante modificado por polímeros elastoméricos. Brasília: Instituto de Pesquisa Rodoviária (IPR), 2026.

Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de pavimentação. 3.ed. Rio de Janeiro, 2006. 274p.

BRASIL. MINISTÉRIO DA INFRAESTRUTURA. Anuário Estatístico de Transportes: 2010 – 2018. Brasília: MINFRA, 2019. 53 p. Disponível em: https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/dados-de-transportes/bit/publicacoes-1/Anuario%20Estatistico%20de%20Transportes%20-%202010%20-%202018.pdf/view. Acesso em: 04 mar. 2024.

CAL CEM. Laudo técnico de cal hidratada. Cal Cem, Colombo, PR, 2021.

CASTAÑEDA, E. Contribution de Méthodes Non Destructives à l'Évaluation de l'Effet de l'Eau sur les Enrobés Bitumineux. 2004. Thèse (Docteur en Génie Civil) - Mecanique, Thermique Et Genie Civil, Université de Nantes, Nantes, 2004.

CHEN, M. *et al*. A review of phase structure of SBS modified asphalt: affecting factors, analytical methods, phase models and improvements. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 294, n. 1, p. 1-22, ago. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123610.

CLARA, E. Avaliação de misturas asfálticas densas com a incorporação de cinza de carvão mineral. 2020. 164 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia e Ciências Mecânicas, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

DAS, A. K.; SINGH, D. Investigation of rutting, fracture and thermal cracking behavior of asphalt mastic containing basalt and hydrated lime fillers. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 141, n. 1, p. 442-452, jun. 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.032.

EVALDT, F. de H. Avaliação do comportamento funcional de misturas asfálticas densas do tipo BBSG com a incorporação de fibra de sisal. 2023. 121 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia e Ciências Mecânicas, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2023.

FAGUNDES, P. M. Avaliação do comportamento funcional de misturas asfálticas do tipo BBDr e BBTM. 2020. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia e Ciências Mecânicas, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

GUIZZARDI, J. E. Desenvolvimento do projeto mecânico do carrossel de fadiga para avaliação de estruturas de pavimento rodoviário – Campus UFSC/Joinville. 2021. 252 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia e Ciências Mecânicas, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.

HUET, C. Étude par une Méthode d'Impédance du Comportement Viscoélastique des Matériaux Hydrocarbonés. Faculté des Sciences de Paris. 68 p. France, 1963.

IFSTTAR. Projèt d'une courbe granulométrique de l'enrobé Grave-Bitume (GB). Expertise Senegal Prestation 559. Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR). Dakar, Sénégal, 2012.

JITSANGIAM, P.; CHINDAPRASIRT, P.; NIKRAZ, H. An evaluation of the suitability of SUPERPAVE and Marshall asphalt mix designs as they relate to Thailand's climatic conditions. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 40, n. 1, p. 961-970, mar. 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.011.

KRATON. Block copolymer development. Presentation on HiMA slide pack. Kraton Performance Polymer Incorporated. USA, 2021.

KUENNEN, T. OKLAHOMA ANTICIPATES 1-40 PERFORMANCE GAIN WITH HIMA. Asphalt Pro, Fayette, v. 38, n. 1, p. 39-43, jul. 2012. Mensal. Disponível em: https://www.pavementpreservation.org/wp-content/uploads/2012/10/Asphalt-Pro-Kraton-Low-Res21.pdf. Acesso em: 04 mar. 2024.

LDTPav. Campanha de ensaios laboratoriais. *In*: Documento preparatório da qualificação da dissertação de mestrado de Rafael Cristyan Fronza, em andamento. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Joinville, SC, 2022.

LEITE, L. F. M.; MENEZES, S.M.C. Efeito da composição química dos ligantes na resistência ao descolamento de misturas asfálticas. In: XVII Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, CD-ROM, Rio de Janeiro, 2003.

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

SENEGAL. Ministère de L'environnement et du Développement Durable. Les conditions climatiques actuelles du Sénégal. 2023. Disponível em: https://www.environnement.gouv.sn. Acesso em: 04 mar. 2024.

MIKOWSKI, A. *et al*. Methodology for error propagation analysis of the complex stiffness modulus of asphalt mixes. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 290, n. 1, p. 1-10, jul. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123156.

POLACZYK, P. *et al*. Evaluation of the hot mix asphalt compactability utilizing the impact compaction method. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 187, n. 1, p. 131-137, out. 2018. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.117.

RAHBAR-RASTEGAR, R. *et al*. Superpave 5: improving asphalt mixture performance. RILEM Bookseries, [s.l.], v. 27, n. 1, p. 1711-1717, 26 set. 2021. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-46455-4_217.

RODRIGUES, L. K. B. M. Estudo da formulação e avaliação do desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas do tipo grave-bitume. 2022. 147 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia e Ciências Mecânicas, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2022.

SANTANA, H. Considerações sobre os Nebulosos Conceitos e Definições de Filler em Misturas Asfálticas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO (RAPv), 29., 1995, Cuiabá. Anais [...]. Cuiabá: Associação Brasileira de Pavimentação (ABPv), 1995. v. 1.

SAYEGH, G. Contribution à l'étude des propriètés viscoélastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux. Thèse de Docteur Ingénieur. Faculté des Sciences de Paris. 206 p. Paris, France, 1965.

SCHOLTEN, E. J.; VONK, W.; KORENSTRA, J. Towards green pavements with novel class of SBS polymers for enhanced effectiveness in bitumen and pavement performance. In: Proceedings of Environmental Friendly Roads (ENVIROAD), 2009, Varsóvia. Proceedings [...]. Varsóvia: ENVIROAD, 2009. p. 1-12.

SENISE, S. *et al*. Thermomechanical and microstructural evaluation of hybrid rubberised bitumen containing a thermoplastic polymer. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 157, n. 1, p. 873-884, dez. 2017. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.126.

SILVA, A. C. L. da; FROTA, C. A. da. Análise teórico-experimental do módulo dinâmico de compósitos asfálticos com argila calcinada. Cerâmica, [s.l.], v. 62, n. 364, p. 392-399, dez. 2016. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132016623642117.

TAPKIN, S. Optimal polypropylene fiber amount determination by using gyratory compaction, static creep and Marshall stability and flow analyses. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 44, n. 1, p. 399-410, jul. 2013. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.060.

TARAKJI, G. A rationale for the development of an end-result design method for bituminous concrete. Construction and Building Materials, v. 6, Issue 4, 1992, p. 213-214, ISSN 0950-0618. https://doi.org/10.1016/0950-0618(92)90042-W.

TEIXEIRA, L. H. Avaliação do Comportamento Funcional de Misturas Asfálticas Drenantes do Tipo BBDR com Utilização de Matriz Betuminosa Altamente Modificada HIMA. 2021. 176 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia e Ciências Mecânicas, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021.

VALE, A. F. Método de uso de simuladores de tráfego linear móvel de pista para a determinação de comportamento e previsão de desempenho de pavimentos asfálticos. 2008. 306 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

XIAO, Y. *et al*. SBS morphology characteristics in asphalt binder and their relation with viscoelastic properties. Construction And Building Materials, [s.l.], v. 301, n. 1, p. 1-10, set. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124292.