



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Jhonnathan Preisner de Souza

Avaliação da viabilidade de uso do asfalto importado em blocos *Polymer Modified Bitumen* na produção de misturas asfálticas a quente

Florianópolis
2024

Jhonnathan Preisner de Souza

Avaliação da viabilidade de uso do asfalto importado em blocos *Polymer Modified Bitumen* na produção de misturas asfálticas a quente

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Liseane Padilha Thives, Dr^ª.

Florianópolis

2024.

Ficha de identificação da obra

Souza, Jhonnathan Preisner de

Avaliação da viabilidade de uso do asfalto importado em blocos Polymer Modified Bitumen na produção de misturas asfálticas a quente / Jhonnathan Preisner de Souza ; orientador, Liseane Padilha Thives, 2024.

113 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Asfalto Importado. 3. Asfaltos Modificados. 4. Misturas Asfálticas. 5. Reologia do Asfalto. I. Thives, Liseane Padilha. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Jhonnathan Preisner de Souza

Avaliação da viabilidade de uso do asfalto importado em blocos *Polymer Modified Bitumen* na produção de misturas asfálticas a quente

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 15 de fevereiro de 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Kamilla Vasconcelos Savasini, PhD.
Universidade de São Paulo

Prof. Gracieli Dienstmann, Dr^a.
Universidade Federal de Santa Catarina

Vivian Silveira dos Santos Bardini, Dr^a.
Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas

Prof. Luis Miguel Gutierrez Klinsky, Dr.
CCR S.A.

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Prof^a. Fernanda Fernandes Marchiori, Dr^a.
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof.^a Liseane Padilha Thives, Dr^a.
Orientadora

Florianópolis, 2024.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pela família maravilhosa que tenho, por estar sempre guiando meus caminhos, pensamentos e ajudando a fazer escolhas certas.

À minha orientadora desta dissertação, Prof.^a Liseane Padilha Thives, Dr.^a, pela motivação, confiança e incentivo para realizar essa pesquisa ao longo dessa jornada. Por ser minha referência na área de pavimentação e por todos os ensinamentos transmitidos a mim.

Ao meu grande amor, Natal José Bobato Neto, pelo carinho, amor, dedicação, companheirismo, felicidade e paciência. Obrigado por sempre estar ao meu lado e pela constante ajuda em todas as etapas deste trabalho, sem você não teria conseguido chegar ao final desta etapa.

À minha mãe, Marcileia Preisner, às minhas irmãs, Greyce e Laryssa, e aos meus sobrinhos, Melissa, Matteo e André, por sempre estarem presentes em todas as etapas da minha vida.

Aos meus amigos de mestrado e trabalho, Paulo Ricardo, Luis Miguel, Rodrigo, William, Edmilson e Barbara, pelos apoios constantes em todas as etapas do trabalho.

Ao grupo CCR pelo apoio e incentivo ao desenvolvimento da pesquisa, pela disponibilização do material e laboratório da pesquisa. À equipe do laboratório (Centro de Pesquisa Rodoviário) da CCR, Geraldo Pereira, Jorge, José Carlos, Geraldo Cleto, Danielson, Ronaldo e Isabelle, pelo auxílio na realização dos ensaios, pela amizade e pelo espírito de equipe.

Aos professores, coordenação e funcionários do PPGEC/UFSC, pela oportunidade de realizar esta pesquisa.

Aos professores Kamilla, Gracieli e Vivian, pelo apoio na avaliação da pesquisa.

RESUMO

A utilização de asfaltos modificados se intensificou nas últimas décadas devido ao desempenho satisfatório em condições de elevado e pesado tráfego e menor suscetibilidade térmica, observou-se um bom desempenho e aumento da vida útil dos pavimentos rodoviários. Nesse cenário, asfaltos modificados são utilizados de modo a melhorar o desempenho e, a caracterização destes materiais, por meio de ensaios reológicos se mostra necessária para melhor compreensão e previsão de comportamento em campo. Por outro lado, os asfaltos nacionais vêm sofrendo aumento de preço significativo, o que impacta nos custos das manutenções e implantações dos pavimentos no Brasil. Uma alternativa tem sido a importação de asfaltos em blocos sólidos. Para viabilizar o uso deste material são necessárias adequações nos processos de usinagem e armazenamento, além da necessidade de avaliação das propriedades do asfalto. Este trabalho tem como objetivo a avaliação reológica de asfaltos importados *Polymer Modified Bitumen* (PMB) comparativamente aos asfaltos modificados com SBS (CAP 60/85) e o asfalto borracha (AB8) através dos parâmetros de predição de desempenho quanto à fadiga e à deformação permanente. Além dos ensaios de caracterização, foi estabelecido o grau de desempenho (PG) em alta temperatura, de varredura linear de amplitude (LAS) e de fluência e recuperação sob múltipla tensão (MSCR). Adicionalmente, foi avaliado o desempenho mecânico de misturas asfálticas produzidas com os três asfaltos, por meio dos ensaios de módulo de resiliência, deformação permanente e de fadiga. Foi ainda avaliado o dano por umidade induzida. Como resultado, o asfalto PMB apresentou um PG de 82°C, enquanto que o CAP 60/85 obteve XC° e o AB*, Y°C. Relativamente aos parâmetros obtidos nos ensaios reológicos LAS e MSCR, sendo o N_f (número de ciclos até a falha) e a compliância não recuperável (J_{nr}), respectivamente, observou-se que o asfalto PMB apresentou tendência de melhor desempenho em relação aos outros asfaltos avaliados. A mistura produzida com o asfalto PMB apresentou um menor módulo de resiliência, mais elevada vida de fadiga e maior resistência à deformação permanente. Conclui-se que o asfalto importado apresenta viabilidade técnica de ser utilizado no Brasil para produção de misturas asfálticas. Ressalta-se a necessidade de contínua avaliação dos asfaltos importados e acompanhamento do desempenho em campo.

Palavras-chave: Comportamento reológico, *Polymer Modified Bitumen*, misturas asfálticas, asfaltos modificados.

ABSTRACT

The use of modified asphalts has intensified in recent decades due to their satisfactory performance under high and heavy traffic conditions and lower thermal susceptibility, resulting in improved performance and increased lifespan of road pavements. In this scenario, modified asphalts are utilized to enhance performance, and the characterization of these materials through rheological tests is necessary for a better understanding and prediction of field behavior. On the other hand, Brazilian asphalts have experienced a significant price increase, impacting the costs of maintenance and implementation of pavements. An alternative has been the importation of solid asphalt blocks. To enable the use of this material, adjustments in the asphalt plant and storage process are necessary, along with the evaluation of asphalt properties. This study aims to evaluate the rheological properties of imported Polymer Modified Bitumen (PMB) compared to Brazilian SBS modified asphalt (CAP 60/85) and rubber asphalt (AB8) through performance prediction parameters for fatigue and permanent deformation. In addition to characterization tests, the high-temperature performance grade (PG) was assessed, and linear amplitude sweep (LAS) tests and multiple stress creep and recovery (MSCR) tests were carried out. Additionally, the mechanical performance of asphalt mixtures produced with the three asphalts was evaluated through resilient modulus, permanent deformation, and fatigue tests. Moisture-induced damage was also assessed. As a result, PMB asphalt exhibited a PG of 82°C, while CAP 60/85 obtained X°C and AB8, Y°C. Regarding the parameters obtained in LAS and MSCR rheological tests, the number of cycles to failure (Nf) and non-recoverable compliance (Jnr), respectively, showed that PMB asphalt tended to perform better than the other evaluated asphalts. The mixture produced with PMB asphalt had a lower resilient modulus, a higher fatigue life, and a greater resistance to permanent deformation. It is concluded that imported asphalt shows technical feasibility for use in Brazil for the production of asphalt mixtures. Continuous evaluation of imported asphalts and monitoring of field performance are emphasized.

Keywords: Rheological behavior, Polymer Modified Bitumen, asphalt mixtures, modified asphalts.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Graus de temperatura PG da especificação SUPERPAVE..... | 25 |
| Figura 2. SBS – blocos componentes..... | 35 |
| Figura 3. Morfologia de asfaltos modificados com SBS..... | 37 |
| Figura 4. Esquema de produção do asfalto com borracha, via processo úmido..... | 41 |
| Figura 5. Resultados de MSCR para diferentes classes de temperaturas em $J_{nr3,2}$ kPa. | 43 |
| Figura 6. Resultado de MSCR para diferentes classes de temperaturas em $J_{nr3,2}$ kPa..... | 43 |
| Figura 7. Fadiga dos asfaltos: (a) Critérios de falha para os asfaltos; (b) Dano por fadiga. | 44 |
| Figura 8. Configuração do ensaio de fadiga à flexão alternada em quatro pontos..... | 51 |
| Figura 9. Armazenamento dos asfaltos importados em blocos. | 53 |
| Figura 10. Embalagem e manuseio do bloco semissólido..... | 54 |
| Figura 11. Aquecimento do bloco semissólido. | 54 |
| Figura 12. "Melter", tubulações e tanque da usina de asfalto..... | 55 |
| Figura 13. Fluxograma da Etapa 1..... | 56 |
| Figura 14. Reômetro modelo DHR-1. | 58 |
| Figura 15. Fluxograma da Etapa 2..... | 60 |
| Figura 16. Valor de J_{nr} para a tensão de 0,1kPa. | 69 |
| Figura 17. Valor de J_{nr} para a tensão de 3,2kPa. | 69 |
| Figura 18. Recuperação durante um ciclo do ensaio, ciclo 11, 0,1kPa, 76°C. | 70 |
| Figura 19. Resultado LAS, Curva de fadiga..... | 71 |
| Figura 20. Composição granulométrica da mistura..... | 75 |
| Figura 21. Resistência à Tração por Compressão Diametral..... | 77 |
| Figura 22. Resistência à tração dos corpos de prova condicionados e não condicionados para avaliação do dano por umidade induzida. | 78 |
| Figura 23. Resistência Retida à Tração por umidade induzida das misturas asfálticas..... | 78 |
| Figura 24. Módulo de resiliência das misturas asfálticas. | 79 |
| Figura 25. <i>Flow Number</i> das misturas asfálticas..... | 81 |
| Figura 26. Curvas de fadiga das misturas..... | 82 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1. Resoluções ANP de regulamentação dos asfaltos. | 21 |
| Tabela 2. Resumo dos ensaios da especificação SUPERPAVE..... | 24 |
| Tabela 3. Limites do $J_{nr3,2}$ e $J_{nr,diff}$, em relação ao tráfego..... | 30 |
| Tabela 4. Resultados de ensaios MSCR de asfaltos modificados com SBS. | 44 |
| Tabela 5. FN para diferentes volumes de tráfego..... | 50 |
| Tabela 6. Especificação o asfalto importado <i>Polymer Modified Bitumen</i> (PMB)..... | 52 |
| Tabela 7. Ensaios de caracterização. | 57 |
| Tabela 8. Ensaio para determinação do PG..... | 58 |
| Tabela 9. Normas das propriedades dos agregados para misturas asfálticas..... | 60 |
| Tabela 10. Ensaios usados na dosagem. | 61 |
| Tabela 11. Ensaio de dano por umidade induzida. | 61 |
| Tabela 12. Ensaios de desempenho. | 62 |
| Tabela 13. Resultados de caracterização dos asfaltos. | 63 |
| Tabela 14. Parâmetros reológicos G^* e (δ) | 64 |
| Tabela 15. Parâmetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ | 65 |
| Tabela 16. PG contínuo dos asfaltos. | 66 |
| Tabela 17. Resultados do ensaio MSCR. | 67 |
| Tabela 18. Resultados LAS. | 71 |
| Tabela 19. Ordenamento dos asfaltos..... | 72 |
| Tabela 20. Granulometria dos agregados. | 73 |
| Tabela 21. Caracterização dos agregados..... | 74 |
| Tabela 22. Adesividade dos agregados..... | 74 |
| Tabela 23. Especificação particular da CCR. | 75 |
| Tabela 24. Parâmetros determinados na dosagem Marshall..... | 76 |
| Tabela 25. Relação MR/RT para as misturas asfálticas. | 80 |
| Tabela 26. <i>Flow Number</i> das misturas asfálticas. | 80 |
| Tabela 27. Parâmetros obtidos para os modelos de fadiga determinados no ensaio de flexão à deformação controlada..... | 81 |
| Tabela 28. Constantes obtidas na regressão linear. | 82 |
| Tabela 29. Fadiga das misturas asfálticas..... | 82 |
| Tabela 30. Resumo dos parâmetros dos asfaltos modificados. | 83 |
| Tabela A1. Especificação do Cimento Asfáltico do Petróleo. | 111 |
| Tabela A2. Especificação asfalto modificado com polímero elastomérico..... | 113 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------|---|
| AASHTO | <i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ADOT | Departamento de Transporte do Arizona |
| AB8 | Asfalto Borracha |
| AMP | Asfalto Modificado por Polímero |
| ANP | Agência Nacional do Petróleo |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| BBR | <i>Bending Beam Rheometer</i> |
| BR | Rodovia Nacional |
| CAP | Cimento Asfáltico de Petróleo |
| CAP 60/85 | Cimento Asfáltico de Petróleo com polímero SBS |
| CCR | Companhia de Concessões Rodoviárias |
| CNT | Confederação Nacional de Transporte |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| DTT | <i>Direct Tensile Tester</i> |
| DNER | Departamento Nacional de Estradas de Rodagem |
| DNIT | Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes |
| DSR | <i>Dynamic Shear Rheometer</i> |
| DUI | Dano por Umidade Induzida |
| EAP | Emulsão Asfáltica de Petróleo |
| EN | <i>European Standard</i> |
| EPDM | Monômeros de Etileno Propileno Dieno |
| ESAL | <i>Equivalent Single Axle Load</i> |
| EVA | Etileno-Vinil Acetato |
| FFL | Fator de Fadiga do Ligante |
| FHWA | <i>Federal Highway Administration</i> |
| FN | <i>Flow Number</i> |
| GTR | Borracha Moída de Pneus |
| FGV | Fundação Getúlio Vargas |
| GPL | Gases Liquefeitos de Petróleo |
| HDPE | Polietileno de Alta Densidade |
| HIMA | <i>Highly Modified Asphalt</i> |

| | |
|-----------|--|
| HPMP | <i>High Modified Polymer Binder</i> |
| IBRE | Instituto Brasileiro de Economia |
| IMC | Índice de Condição de Manutenção |
| INCC-M | Materiais e Equipamentos |
| IPA-MEP | Materiais e Componentes |
| LAS | <i>Linear Amplitude Sweep</i> |
| LDPE | Polietileno de Baixa Densidade |
| MFEL | Mecânica da Fratura Elástico-Linear |
| MR | Módulo de Resiliência |
| MSCR | <i>Multiple Stress Creep and Recovery</i> |
| NBR | Norma Brasileira |
| PAV | <i>Pressurized Aging Vessel</i> |
| PG | <i>Performance Grade</i> |
| PMB | <i>Polymer Modified Bitumen</i> |
| RRT | Resistência à Tração Retida |
| RT | Resistência à Tração |
| RTFO | <i>Rolling Thin-Film Oven</i> |
| RTFOT | <i>Rolling Thin-Film Oven Test – RTFO</i> |
| SIS | Estireno-isopreno-estireno |
| SBR | Copolímeros Aleatórios de Estireno-Butadieno |
| SBS | <i>Styrene Butadiene Styrene</i> |
| SINDIVAPA | Sindicato das Empresas de Transporte de Carga do Vale do Paraíba e Litoral Norte |
| SUPERPAVE | <i>Superior Performing Asphalt Pavements</i> |
| SHRP | <i>Strategic Highway Research Program</i> |
| TLAFlex | Asfalto Modificado com Asfalto Natural |
| TMN | Tamanho Médio Nominal |
| TPG | <i>Grading Temperatures</i> |
| USACE | <i>United States Army Cprs of Engineers</i> |
| UTI | <i>Useful Temperature Interval</i> |
| VAM | Volume de Vazios nos Agregados Minerais |
| VCA | Vazios Cheios de Asfalto |
| VCB | Vazios Cheios com Betume |
| VECD | <i>Viscoelastic Continuum Damage</i> |
| Vv | Volume de Vazios |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------|---|
| % | Por Cento |
| ° | Graus |
| > | Maior |
| ≥ | Maior Igual |
| < | Menor |
| ≤ | Menor Igual |
| +/- | Mais ou Menos |
| °C | Graus Celsius |
| $ G_0^* $ | Módulo de cisalhamento dinâmico inicial |
| dm^3 | Decímetro Cúbico |
| E | Tráfego extra pesado |
| EH | Extremamente Alto |
| g | Gramas |
| G^* | Módulo Complexo |
| G' | Módulo de Armazenamento |
| G'' | Módulo de perda |
| h | Hora |
| H | Tráfego pesado |
| Hz | Hertz |
| J_{nr} | Parcela de deformação não recuperável |
| $J_{nr,diff.}$ | Diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis |
| kg | Quilograma |
| km | Quilômetros |
| kPa | Quilopascal |
| Log | Logaritmo na base 10 |
| mm | Milímetros |
| MPa | Megapascal |
| N | Vida de Fadiga Expressa em Número de Solicitações de Carga |
| N_f | Número de ciclos na ruptura |
| n° | Número |
| Pa | Pascal |
| R | Recuperação elástica |
| S | Tráfego Padrão |

| | |
|------------------|---|
| s | Segundos |
| sen | Seno |
| rpm | Rotação por Minuto |
| t | Tonelada |
| V | Muito Pesado |
| T | Temperatura |
| T _c | <i>Continuous Grading Temperature</i> |
| T ₁ | <i>Test Temperature 1</i> |
| T ₂ | <i>Test Temperature 2</i> |
| V | Tráfego Muito Pesado |
| δ | Ângulo de Fase |
| ϵ | deformação de tração controlada |
| ϵ_r | Deformação no Final do Ciclo de Recuperação |
| ϵ_{rec} | Deformação Recuperável |
| ϵ_x | Deformação de Tração no Diâmetro Horizontal |
| σ | Tensão de Tração Controlada |
| σ_x | Tensão Horizontal |
| σ_y | Tensão Vertical |
| μ | Coefficiente de Poisson |
| γ | Deformação Cisalhante Aplicada |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | OBJETIVO GERAL | 18 |
| 1.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 19 |
| 1.3 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 19 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 20 |
| 2.1 | ASFALTOS | 20 |
| 2.2 | ESPECIFICAÇÃO SUPERPAVE E ENSAIOS REOLÓGICOS | 22 |
| 2.2.1 | Especificação SUPERPAVE | 22 |
| 2.2.2 | Ensaio reológico posteriores à especificação SUPERPAVE | 27 |
| 2.3 | ASFALTOS MODIFICADOS | 33 |
| 2.3.1 | Asfaltos modificados com <i>SBS</i> | 34 |
| 2.3.2 | Asfalto Borracha | 38 |
| 2.4 | ESTUDOS REOLÓGICOS COM ASFALTOS MODIFICADOS POR SBS E BORRACHA | 42 |
| 2.5 | MISTURAS ASFÁLTICAS | 45 |
| 2.5.1 | Propriedades dos agregados nas misturas asfálticas..... | 46 |
| 2.5.2 | Dosagem das misturas asfálticas | 48 |
| 2.5.3 | Características mecânicas das misturas asfálticas | 49 |
| 3 | MATERIAIS E MÉTODO | 52 |
| 3.1 | MÉTODO PROPOSTO DE ARMAZENAMENTO E USO DO ASFALTO IMPORTADO | 52 |
| 3.2 | PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL | 56 |
| 3.2.1 | Etapa 1: Caracterização dos asfaltos..... | 56 |
| 3.2.2 | Etapa 2: Desempenho das misturas asfálticas..... | 60 |
| 4 | RESULTADOS | 63 |
| 4.1 | CARACTERIZAÇÃO DOS ASFALTOS..... | 63 |
| 4.1.1. | <i>Caracterização física</i> | 63 |
| 4.1.2. | <i>Caracterização reológica</i> | 64 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.1.3 | Resumo dos ensaios reológicos | 72 |
| 4.2 | MISTURAS ASFÁLTICAS | 73 |
| 4.2.1 | Caracterização dos agregados do estudo | 73 |
| 4.2.2 | Dosagem das misturas asfálticas | 75 |
| 4.2.3 | Avaliação do dano por umidade induzida | 77 |
| 4.2.4 | Propriedades mecânicas das misturas asfálticas | 79 |
| 4.2.5 | Resumo dos resultados | 83 |
| 5 | CONCLUSÃO | 85 |
| | REFERÊNCIAS | 87 |
| | ANEXO | 111 |

1 INTRODUÇÃO

Os pavimentos rodoviários são estruturas fundamentais para a infraestrutura de uma cidade e de um país e responsáveis pela mobilidade e segurança dos veículos em condições adequadas de conforto ao rolamento. No Brasil, os pavimentos flexíveis são os mais difundidos. No entanto, o dimensionamento dos pavimentos é uma tarefa complexa devido à utilização de materiais com características específicas, como o asfalto, e a variação de propriedades dos materiais das demais camadas componentes. Após a construção, os materiais da estrutura “atuam” em conjunto e devem resistir à atuação do tráfego e variações climáticas.

O asfalto é um dos principais componentes dos revestimentos de pavimentos flexíveis e possui características viscoelásticas, o que significa que apresenta comportamentos diferentes em relação à temperatura e ao tempo de carregamento (Fontes, 2009). As demais camadas, em geral constituídas por agregados, são compostas por materiais naturais ou artificiais e também apresentam diferentes características em função da origem.

Devido às diferentes propriedades dos materiais das camadas, especialmente quanto à rigidez, susceptibilidade térmica e resistência mecânica, é necessária uma adequada caracterização por meio de ensaios laboratoriais e estudos geotécnicos para assegurar a qualidade, e desempenho da estrutura.

As rodovias de um país, em adequadas condições de manutenção, são fundamentais para o seu desenvolvimento e progresso, sobretudo quando o sistema rodoviário é o principal modo de transporte. As rodovias promovem o transporte de pessoas e de mercadorias pelo território, contribuindo inclusive para o crescimento da exportação para países vizinhos (Baptista, 2006). Como consequência, a predominância do modo rodoviário impacta diretamente nos custos do transporte em rodovias, principalmente quando os pavimentos estão em condições inadequadas de trafegabilidade (Lepchak, 2014).

Ao longo dos anos, os investimentos e as políticas de transporte brasileiras têm priorizado o modo rodoviário, o qual é responsável por 65% da movimentação de cargas e de 95% dos passageiros. No entanto, a evolução da extensão da malha rodoviária pavimentada entre 2017 e 2023 foi inferior a 1% (CNT, 2023).

Apesar da dependência do modo rodoviário, sendo o Brasil um país com dimensões continentais e a malha viária com 1,7 milhões de quilômetros, apenas 12,4% é pavimentada, insuficiente frente à demanda. Em pesquisa conduzida pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) constatou-se que a instabilidade macroeconômica do Brasil nos últimos

anos tem prejudicado o crescimento da malha pavimentada do país, sendo o preço do asfalto um fator direto na viabilidade da pavimentação rodoviária (CNT, 2023).

Paralelamente, o Brasil também carece de investimentos em manutenção e reabilitação da malha viária pavimentada implantada conforme indicado pelo Índice de Condição de Manutenção (IMC) do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). De acordo com uma pesquisa da CNT realizada em 2023, na qual foi avaliada uma extensão de 110.333 quilômetros (rodovias estaduais e federais) e 55,5%% dos pavimentos apresentaram defeitos (CNT, 2023).

Martins (2014) afirmou que os defeitos precoces poderiam ser evitados a partir da seleção adequada dos materiais empregados, e da compreensão do comportamento do asfalto a ser usado na composição da mistura asfáltica, tendo em consideração o tráfego e a temperatura.

Considerando que a maior parcela dos pavimentos brasileiros é do tipo flexível e sendo o asfalto o componente que influencia o desempenho das misturas asfálticas (camadas de revestimento), torna-se essencial a avaliação e a compreensão de suas características.

No Brasil, os asfaltos são especificados por penetração e classificados por meio de ensaios, em sua maioria, empíricos. A predição de comportamento dos ensaios adotados na especificação não apresenta correlação satisfatória com o desempenho das misturas asfálticas em campo (Fontes, 2009). Desde a década de 1990, nos Estados Unidos da América, a partir do *Strategic Highway Research Program* (SHRP), os asfaltos são especificados por meio de ensaios que têm relação com os principais modos de ruptura em campo, como fadiga, deformação permanente e trincamento térmico. A classificação norte-americana foi agrupada no *Superior Performing Asphalt Pavements* (SUPERPAVE) (SHRP, 1994). Leite *et al.* (2011) acrescentaram que o SUPERPAVE está em constante atualização e por este motivo, novos ensaios têm sido desenvolvidos após sua implantação.

Uma das principais contribuições da especificação SUPERPAVE foi a introdução da caracterização reológica dos asfaltos. No Brasil, apesar de diversas universidades e centros de pesquisa realizarem a caracterização dos asfaltos com base na especificação SUPERPAVE, observa-se ainda, uma carência de estudos relativos aos ensaios reológicos (Oliveira, 2022).

Devido ao aumento e intensidade do tráfego pesado e variações climáticas, a vida útil de projeto de pavimentos com revestimentos em misturas asfálticas confeccionadas com asfaltos convencionais não tem sido atingida. Nas últimas décadas, uma alternativa para melhorar o desempenho tem sido o uso de asfaltos modificados, seja pela incorporação de

polímeros ou de borracha de pneus inservíveis, aquele que não serve para a rodagem (asfalto borracha) (Ahmedzade, Yilmaz, 2008).

Diversos autores comprovaram o desempenho superior de misturas asfálticas produzidas com asfaltos modificados, quanto à resistência à fadiga, deformação permanente e redução de trincamentos por origens térmicas em relação às confeccionadas com asfaltos convencionais (Moraes, Soares, Soares, 2009; Onofre *et al.*, 2013; Bohn *et al.*, 2020; Cui *et al.*, 2022).

No Brasil, nos últimos anos, os preços dos materiais de construção civil sofreram altas significativas, acima do que retrataram os índices inflacionários para o mesmo período. As taxas acumuladas em 12 meses atingiram valores históricos. O índice para os Materiais e Componentes para a Construção (IPA-MEP) foi de 36,88% enquanto que o de Materiais e Equipamentos para a Construção (INCC-M) obteve 29,45%. O aumento do preço dos insumos tem provocado no mercado a busca de inovação tecnológica com materiais mais competitivos para que os negócios se mantenham viáveis (FGV IBRE, 2022).

No setor da infraestrutura rodoviária, o custo do principal insumo para produção de misturas asfálticas, o asfalto, foi severamente afetado. Em abril de 2021, em média, o preço por tonelada do asfalto convencional no Brasil era de R\$ 2.889,91 (dois mil oitocentos e oitenta e nove reais e noventa e um centavos) e no mesmo mês, em 2022, de R\$ 4.557,19 (quatro mil, quinhentos e cinquenta e sete reais e dezenove centavos), representando um aumento de aproximadamente 57,7% (Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustível, 2022).

A oscilação macroeconômica no Brasil tem despertado o interesse dos investidores pelo emprego dos asfaltos importados devido aos custos menores, facilidades no transporte e estocagem quando comparado ao produto nacional, além da possibilidade de desabastecimento do país (Sindicato das Empresas de Transporte de Cargas do Vale do Paraíba e Litoral Norte, 2022). No entanto, diferentemente dos asfaltos produzidos em território nacional, os importados são enviados ao país em estado semissólido, representando um desafio no desenvolvimento de um processo de uso deste material.

Segundo a empresa fornecedora *Keystone Group Latin America* (2021), os asfaltos no estado semissólido a temperatura ambiente, também foram importados por outros países sul americanos, como por exemplo, na Bolívia, Argentina e Paraguai. Uma das aplicações foi realizada na construção de trechos do Corredor Bioceânico, no qual foi utilizado o asfalto de origem russa.

No Brasil, algumas concessionárias rodoviárias iniciaram a importação de asfaltos modificados, sendo um destes, de origem russa e modificado por SBS, com objetivo de

viabilizar economicamente e tecnicamente as soluções de engenharia na área da pavimentação.

O asfalto importado modificado com polímero SBS, é comercializado em blocos no estado semissólido, de modo a facilitar o transporte via marítima em navios e, posteriormente, por rodovias em veículos comerciais de carga. O transporte dos asfaltos normalmente comercializados no Brasil é feito por caminhões tanque. O armazenamento dos asfaltos importados pode ser feito em pátios e em coberturas como barracões ou lonas plásticas na temperatura ambiente, e necessitam de tratamento térmico para uso nas usinas de asfalto.

Atualmente, o estado de manutenção das rodovias brasileiras não é adequado e são necessários volumosos investimentos para melhoria. Diante desta situação, a importação de asfalto por algumas empresas concessionárias de rodovias do Brasil é uma opção para obter pavimentos mais duráveis e econômicos.

A aferição do desempenho em campo de novos materiais demanda uma observação e quantificação da evolução do desempenho ao longo dos anos. Com a utilização do asfalto importado no Brasil a avaliação de suas características se faz necessária, uma vez que, em geral, o produto não é acompanhado de relatório com as suas propriedades físicas e reológicas para verificação de enquadramento em especificação e, a faixa de teor de polímero adicionado e o asfalto base não são declarados pelo fabricante. Outra questão é relativa ao processo de aquecimento para mudança do material importado do estado semissólido para o estado líquido, cujo controle inadequado pode influenciar negativamente as suas propriedades.

Por outro lado, a introdução de novos materiais que possam contribuir para o desempenho dos pavimentos é sempre benéfica. Porém, é necessária uma avaliação cautelosa, por meio de ensaios de laboratório e seguida pela observação de desempenho em campo. Neste sentido, a introdução de novos asfaltos no país carece de investigações aprofundadas e criteriosas.

1.1 OBJETIVO GERAL

Prever o desempenho à fadiga e à deformação permanente do asfalto importado *Polymer Modified Bitumen* e avaliação do comportamento mecânico da mistura asfáltica produzida com esse asfalto

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Propor uma metodologia de armazenamento de asfaltos importados no estado semissólido e posterior aplicação em uso na usina de asfalto;
2. Contribuir para o estado da arte de asfaltos modificados com SBS por meio da avaliação de parâmetros reológicos do *Polymer Modified Bitumen*;
3. Realizar um comparativo dos parâmetros reológicos do *Polymer Modified Bitumen* e asfaltos modificados comumente empregados no Brasil, sendo o asfalto borracha (AB8) e com polímero SBS (POLIFLEX 60/85-E);
4. Aferir a caracterização mecânica por meio dos ensaios mecânicos de módulo de resiliência, fadiga e deformação permanente em misturas asfálticas produzidas com *Polymer Modified Bitumen*, comparativamente às misturas com SBS e asfalto borracha.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos cujos conteúdos são a seguir descritos.

O Capítulo 1, Introdução, apresenta uma contextualização do tema, bem como os objetivos, justificativa e estrutura do trabalho.

No Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, é apresentado o estado da arte relacionado aos temas essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 3, Materiais e Métodos, consta a metodologia adotada para alcançar os objetivos propostos.

No Capítulo 4, Resultados dos ensaios, são apresentadas as análises dos resultados do trabalho.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões principais e recomendações para trabalhos futuros.

Nas Referências constam as referências bibliográficas consultadas e que serviram de base para elaboração do estudo proposto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão de literatura acerca dos asfaltos utilizados no Brasil, com base em conceitos, definições, especificações vigentes e produção de convencionais e modificados (SBS e borracha). O capítulo engloba ainda as características do asfalto importado (*Polymer Modified Bitumen*), além de métodos e especificações vigentes para caracterização reológica do *Superior Performing Asphalt Pavements* (SUPERPAVE). Por fim, apresentados os resultados e análises de estudos realizados por outros autores com foco na temática do trabalho.

2.1 ASFALTOS

Os asfaltos são materiais de origem fóssil compostos por hidrocarbonetos, solúveis em bissulfeto de carbono, possuem propriedades adesivas e em geral, de coloração preta. Dependendo da temperatura, podem se apresentar nos estados sólido, semissólido ou líquido viscoso (EN 12591, 2009). O asfalto é um material viscoelástico, o qual, em função da temperatura apresenta características elásticas, viscosas e viscoelásticas. Por meio da caracterização reológica é possível a distinção das componentes elásticas e viscosas (Negrao, 2006).

Bernucci, Motta, Ceratti, (2022) afirmaram que o asfalto, além de ser um dos principais insumos das misturas asfálticas, promove a ligação dos materiais e, em conjunto com os agregados pétreos, contribui para a durabilidade e resistência às intempéries. Ao asfalto convencional, pode-se incorporar polímeros e outros materiais para melhorar as características de desempenho.

Atualmente, os asfaltos utilizados em pavimentação são provenientes do petróleo, sendo a obtenção, refino, por destilação, semissopragem ou desasfaltação em refinarias. A separação dos produtos provenientes do petróleo ocorre por variação de temperatura e densidade dos materiais. Inicialmente são obtidos os materiais mais nobres (gás liquefeito de petróleo (GLP), gasolina, nafta, querosene, óleo diesel, óleos lubrificantes) e o resíduo é usado para a produção dos asfaltos (Hunter, Self, Read, 2015).

Devido ao tipo de processo de refino, o produto final (asfalto) apresenta características diversas. Assim, para emprego em pavimentação é necessária a caracterização, feita por meio de ensaios tradicionalmente empregados pelas refinarias. Alguns países produtores de petróleo pesado, como Brasil, Venezuela e Rússia, apresentam asfaltos com

diferentes características, sendo que cada país detém a sua própria especificação e classificações (Vestena, 2021).

No Brasil, os asfaltos convencionais são denominados de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e especificados por penetração (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2005). A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é o órgão brasileiro responsável pela regulamentação do material. A Tabela 1 apresenta a lista com a descrição sucinta das Resoluções da ANP relativas à regulamentação dos asfaltos no Brasil (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2022).

Tabela 1. Resoluções ANP de regulamentação dos asfaltos.

| Resolução ANP | Descrição |
|----------------------|--|
| Nº 2/2005 | Estabelece os requisitos para a atividade de distribuição de asfaltos. |
| Nº 3/2005 | Estabelece os requisitos necessários à autorização para o exercício da atividade de importação de asfaltos. |
| Nº 19/2005 | Estabelece as especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (Asfalto) |
| Nº 39/2008 | Estabelece a especificação dos cimentos asfálticos de petróleo modificados por borracha moída de pneus, designados como asfaltos borracha. |
| Nº 32/2010 | Estabelece as especificações dos cimentos asfálticos de petróleo modificados por polímeros elastoméricos. |
| Nº 897/2022 | Estabelece as regras de certificação de asfaltos importados. |

Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2022).

De acordo com a norma DNIT 095 (Brasil, 2006), os asfaltos adequados para uso em pavimentação são os seguintes: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200, classificados por penetração. No entanto, atualmente apenas o CAP 30/45 e o CAP 50/70 são utilizados para produção de misturas asfálticas. A Tabela A1 (Anexo A) apresenta a especificação brasileira dos asfaltos convencionais conforme a norma DNIT 095 (Brasil, 2006). Atualmente, a Petrobrás comercializa asfaltos de alta penetração, denominado CAP Pro AP (Cimento Asfáltico de Petróleo de Alta Penetração).

Na Europa, os asfaltos são especificados de acordo com a norma EN 12591 (EN, 2009), denominada *Bitumen and bituminous binders. Specifications for paving grade bitumens*, e assim como no Brasil, os mesmos são classificados por penetração. Conforme a dureza, os asfaltos de penetração 10-20 e 15-25 são classificados “duros”, os de penetração 50-70 e 70-100 como “semiduros” e de penetração 169-220, como “moles” (Mangiafico, 2014).

A classificação por penetração apresenta base empírica, cuja correlação com o desempenho em campo nem sempre é confirmada. Zeiada *et al.*, (2021) afirmaram que

ensaios empíricos não são capazes de medir propriedades fundamentais do asfalto e previsão de desempenho em campo.

2.2 ESPECIFICAÇÃO SUPERPAVE E ENSAIOS REOLÓGICOS

Neste item são apresentados os requisitos e os ensaios da especificação norte-americana *Superior Performing Asphalt Pavements* (SUPERPAVE) para os asfaltos.

2.2.1 Especificação SUPERPAVE

No início dos anos 1980, nos Estados Unidos da América e no âmbito do *Strategic Highway Research Program* (SHRP), foi desenvolvido o sistema *Superior Performing Asphalt Pavements* (SUPERPAVE) com proposição de novos ensaios e especificações para misturas e asfaltos. O SUPERPAVE abrange o projeto e análise de misturas asfálticas; especificação de asfalto e um sistema de previsão de desempenho que inclui banco de dados meteorológicos e modelos ambientais e de desempenho (*Federal Highway Administration*, 1996).

A especificação dos asfaltos foi estabelecida de forma a contemplar sua contribuição frente aos principais defeitos ocorrentes nos pavimentos com revestimento em concreto asfáltico, como a fadiga, deformação permanente e trincamento térmico (TxDOT, 2022), resultando em avanços significativos na predição de desempenho de misturas asfálticas, a partir da avaliação dos asfaltos. Uma das principais contribuições da especificação referente aos ensaios foi a introdução dos conceitos da reologia para classificação dos asfaltos. O comportamento reológico refere-se ao estudo das propriedades de fluxo e deformação de materiais, como a viscosidade, a elasticidade e a plasticidade (Fontes, 2009).

Na especificação de asfaltos (SUPERPAVE) foram introduzidos ensaios reológicos realizados em reômetros de cisalhamento dinâmico (DSR - *Dynamic Shear Rheometer*). Conglin *et al.* (2018) destacaram que a inclusão dos ensaios reológicos na especificação SUPERPAVE permitiu o estabelecimento de parâmetros de controle e predição mais precisos em relação aos empíricos como penetração e viscosidade.

Os ensaios permitem a determinação das propriedades viscoelásticas dos asfaltos, por meio da medição do módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e do ângulo de fase (δ). Essas propriedades são fundamentais para entender e prever o comportamento do asfalto sob diferentes condições de temperatura e carregamento, e são diretamente relacionadas à fadiga

e à deformação permanente das misturas asfálticas (ASTM, 2021). A especificação SUPERPAVE está estabelecida nas normas ASTM D6373 (2023) e AASHTO M 320 (2023). A especificação SUPERPAVE (Tabela A2 do Anexo A) incluiu uma série de ensaios reológicos para avaliação do asfalto sob diferentes condições de temperatura e envelhecimento.

Para avaliar o efeito do envelhecimento em curto prazo, que simula o envelhecimento do asfalto durante o processo de usinagem e aplicação em campo, o ensaio é realizado no equipamento *Rolling Thin-Film Oven* (RTFO), denominado de efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. O ensaio é padronizado pelas normas ASTM D2872 (2022) e ABNT NBR 15235 (2009). Durante o ensaio, uma fina película de asfalto é exposta a temperatura de 163°C, durante 85 minutos.

Para simular o envelhecimento de longo prazo, é utilizado o equipamento vaso de envelhecimento sob pressão (PAV - *Pressurized Aging Vessel*), cujo ensaio segue a norma ASTM D6521 (2022). Durante o ensaio, o asfalto é submetido a alta temperatura (90°C, 100°C ou 110°C) e uma pressão de 2,1 MPa durante 20 horas para simular o envelhecimento durante a vida em serviço.

Para avaliar o desempenho do asfalto à baixas temperaturas, a especificação SUPERPAVE estabeleceu os ensaios de reômetro de fluência em viga (BBR - *Bending Beam Rheometer*) e de tração direta (DTT - *Direct Tensile Tester*), cujas normas são ASTM D6648 (2016) e ASTM D6723 (2012), respectivamente. O BBR mede a rigidez do asfalto em baixas temperaturas, permitindo avaliar sua capacidade de resistir à deformação por fluência. O DTT mede a resistência à tração da mistura asfáltica em baixas temperaturas, avaliando sua capacidade de resistir a trincas e rupturas (ASTM, 2021). Tendo em conta a prevalência de altas temperaturas do Brasil e a não ocorrência frequente de trincamento térmico, neste estudo não serão realizados ensaios em temperaturas baixas, como o BBR e DTT.

Além desses ensaios, a viscosidade aparente do asfalto é controlada e medida por viscosímetro rotacional. A viscosidade é uma propriedade importante, pois está relacionada à capacidade de um material em fluir e se deformar sob diferentes condições de temperatura e carregamento (Oliveira, 2022). O controle da viscosidade em função da temperatura é importante para assegurar o bombeamento do asfalto, mistura com os agregados na usina e trabalhabilidade em campo.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos ensaios da especificação SUPERPAVE, indicando a finalidade de cada ensaio e sua relação com o desempenho da mistura asfáltica em campo. Esses ensaios permitem avaliar e controlar as propriedades do asfalto de acordo com a especificação, de modo que a mistura asfáltica obtenha qualidade e,

consequentemente, desempenho dos pavimentos em diferentes condições de temperatura e envelhecimento (NCHRP, 2017).

Tabela 2. Resumo dos ensaios da especificação SUPERPAVE.

| Equipamento | Finalidade | Parâmetro de desempenho |
|-------------------------|--|--|
| RTFO | Simula o envelhecimento do asfalto durante o processo de produção e construção | Resistência ao envelhecimento e rigidez durante a construção |
| PAV | Simula o envelhecimento do asfalto durante a vida de serviço | Resistência ao envelhecimento em campo |
| Viscosímetro Rotacional | Mede as propriedades do asfalto para altas e intermediárias temperaturas de construção | Facilidade de manuseio e bombeamento |
| DSR | Mede as propriedades do asfalto em temperaturas intermediárias e elevadas de serviço. | Resistência à deformação permanente e fadiga |
| BBR | Mede as propriedades do asfalto a baixas temperaturas de serviço | Resistência ao trincamento térmico |
| DTT | Mede as propriedades do asfalto a baixas temperaturas de serviço | Resistência ao trincamento térmico |

RTFO – forno de película delgada rotacional; PAV- vaso de envelhecimento sob pressão; DSR – reômetro de cisalhamento dinâmico; BBR – reômetro fluência em viga; DTT – prensa de tração direta.

Fonte: Baseado em NCHRP (2017).

Na especificação SUPERPAVE, os asfaltos são classificados de acordo com o grau de desempenho, PG XX-YY (*Performance Grade*) em alta (XX, °C) e baixa (YY, °C) temperatura, representado por uma combinação de dois números (ASTM 2023; AASHTO, 2023). A classificação é baseada nas temperaturas máxima e mínima da região em que o pavimento será implantado. Os dois primeiros algarismos (XX) representam a temperatura máxima em que o asfalto deve ser capaz de suportar sem sofrer danos estruturais. Os dois segundos algarismos (-YY) representam a temperatura mínima em que o asfalto deve ser capaz de manter suas propriedades adequadas para o desempenho do pavimento. Os graus de temperatura são estabelecidos em incrementos de 6°C, conforme ilustrado na Figura 1. Essa classificação é importante para garantir que os asfaltos sejam selecionados de acordo com as condições climáticas da região em que o pavimento será implantado (ASTM, 2021).

Figura 1. Graus de temperatura PG da especificação SUPERPAVE.

| | | Especificação de baixa temperatura (°C) | | | | | | |
|--|--------------|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Especificação de alta temperatura (°C) | PG 82 | -10 | -16 | -22 | -28 | -34 | | |
| | PG 76 | -10 | -16 | -22 | -28 | -34 | | |
| | PG 70 | -10 | -16 | -22 | -28 | -34 | -40 | |
| | PG 64 | -10 | -16 | -22 | -28 | -34 | -40 | |
| | PG 58 | | -16 | -22 | -28 | -34 | -40 | |
| | PG 52 | -10 | -16 | -22 | -28 | -34 | -40 | -46 |
| | PG 46 | | | | | -34 | -40 | -46 |

Fonte: Baseado em ASTM (2021).

De forma a compensar o tráfego e a velocidade, ou seja, a frequência das cargas aplicadas ao pavimento, a especificação SUPERPAVE faz considerações em relação ao PG a ser adotado. Em situações de baixa velocidade ou baixa frequência, a especificação recomenda que o grau a alta temperatura seja elevado de um a dois graus PG (de 6°C a 12°C). Para determinar o aumento necessário no grau quente, é utilizado o parâmetro número de eixos equivalentes ao eixo padrão (ESAL - *Equivalent Single Axle Load*). Quando o volume de tráfego expresso pelo ESAL excede 10^6 , é recomendado o aumento de um grau PG no grau quente, ou seja, um acréscimo de 6°C e quando o ESAL é superior a 10^7 , é considerado o aumento de dois graus PG no grau quente, ou seja, um acréscimo de 12°C.

Além das temperaturas críticas, um parâmetro adicional denominado de o grau UTI (*Useful Temperature Interval*), representa o intervalo de temperatura no qual o asfalto atende às especificações técnicas estabelecidas. O UTI é obtido pela soma dos valores de alta temperatura e baixa temperatura da especificação. Quanto mais elevado for o valor do UTI, maior será o intervalo de temperaturas no qual o asfalto é capaz de atender às especificações. O grau UTI tem sido utilizado como um parâmetro auxiliar em asfaltos modificados e em asfaltos reciclados (Chen, 2018).

O PG estabelece o intervalo da especificação na qual o asfalto está enquadrado. Por outro lado, é necessária a verificação das temperaturas atendidas pelo asfalto, denominado de PG contínuo, cujo procedimento de cálculo é estabelecido na norma ASTM D7643 (ASTM, 2022).

A norma ASTM D7643 (ASTM, 2022) define conceitos e termos específicos para o cálculo do PG contínuo, como as temperaturas de classificação contínua (T_c), o grau contínuo (*continuous grade*), as temperaturas de classificação PG (TPG), as temperaturas de teste (T_1 e T_2) e os requisitos de especificação (*specification requirements*), conceitos e termos utilizados nesse cálculo são:

- *Continuous grading temperatures* (T_c) ou temperatura de classificação contínua: Temperaturas de classificação contínua, que são divididas em alta, intermediária e baixa temperatura, de acordo com os requisitos especificados na norma;
- *Continuous grade*: Grau definido pela alta e baixa temperatura na classificação contínua. Essa classificação contínua é utilizada para determinar em qual faixa de temperatura o asfalto enquadra;
- *PG grading temperatures* (TPG): Temperaturas listadas na especificação ASTM D6373 (ASTM, 2022), que são usadas para designar o grau PG do asfalto. Essas temperaturas são utilizadas como referência para a classificação do asfalto;
- *Test temperatures* (T_1 e T_2): Duas temperaturas de classificação PG, com um grau independente, em que T_2 é maior que T_1 . Essas temperaturas são utilizadas para verificar se as propriedades do asfalto atendem aos requisitos da especificação;
- *Specification requirements*: São os valores limites especificados na especificação SUPERPAVE, que são utilizados para designar o grau PG do asfalto. Esses valores limites são utilizados para verificar se o asfalto atende às temperaturas especificadas.

As temperaturas críticas são calculadas por meio das equações contidas na norma, que fornecem informações sobre o comportamento térmico desses materiais.

2.2.1.1 *Parâmetros reológicos SUPERPAVE*

Por meio de ensaios no DSR são determinadas as propriedades reológicas dos asfaltos, sendo, o módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e o ângulo de fase (δ) para o cálculo dos parâmetros de predição à fadiga e à deformação permanente. Os ensaios para estabelecimento dos parâmetros seguem as normas ASTM D7175 (ASTM, 2015) e AASHTO T315 (AASHTO, 2022). Os parâmetros reológicos de previsão de desempenho estabelecidos na especificação SUPERPAVE são os parâmetros limites de predição de desempenho à deformação permanente ($|G^*|/\text{sen}\delta$) e à fadiga ($|G^*|\cdot\text{sen}\delta$), conforme preconizado na norma AASHTO M320 (AASHTO, 2022).

Quanto à deformação permanente, os ensaios são conduzidos no DSR na temperatura elevada de projeto e o parâmetro $|G^*|/\text{sen}\delta$ deve ser superior a 1,0 kPa em amostras virgens e a 2,2 kPa em amostras envelhecidas em curto prazo (*Rolling Thin Film Oven* – RTFO), (AASHTO, 2022).

O parâmetro de fadiga, é avaliado na temperatura intermediária e envelhecida pós RTFO + PAV. A especificação SUPERPAVE limita o valor máximo de $|G^*|_{sen\delta}$ em 5.000 kPa (AASHTO, 2022).

2.2.2 Ensaios reológicos posteriores ao programa SHRP

Os parâmetros reológicos da especificação SUPERPAVE $|G^*|_{sen\delta}$ (deformação permanente) e $|G^*|_{sen\delta}$ (fadiga), foram estabelecidos há mais de 30 anos. Estudos posteriores revelaram uma fraca correlação entre as características do asfalto e o comportamento mecânico das misturas em campo, especialmente quando asfaltos modificados foram utilizados (Zeida *et al.*, 2021).

Deacon *et al.* (1997) avaliaram o desempenho mecânico de diferentes misturas asfálticas e mediram os parâmetros reológicos SUPERPAVE dos asfaltos para obter uma possível correlação quanto ao comportamento à fadiga e à deformação permanente. Os resultados mostraram que, apesar de haver uma correlação estatística entre os parâmetros, a mesma não foi adequada para prever com precisão o comportamento mecânico das misturas. De acordo com o estudo, para similares parâmetros SUPERPAVE, as misturas resultaram em comportamentos diferentes quanto ao desempenho mecânico à fadiga e à deformação permanente.

Bahia *et al.* (2001) e Tsai e Monismith (2005) mostraram que os parâmetros SUPERPAVE não eram capazes de aferir a contribuição dos asfaltos modificados no desempenho das misturas asfálticas. Os autores consideraram que devido à estrutura molecular mais complexa dos asfaltos modificados devido à adição de polímeros, a correlação entre as propriedades físicas do asfalto e o comportamento mecânico nas misturas asfálticas fica dificultada. Além disso, outros fatores, como a granulometria dos agregados, a temperatura de compactação e a taxa de carregamento, também influenciam o comportamento mecânico das misturas asfálticas e não podem ser mensurados em nível do asfalto isoladamente. Outros autores também evidenciaram que os parâmetros de predição SUPERPAVE nem sempre confirmaram o desempenho obtido pelas misturas asfálticas, especialmente as modificadas (Fontes, 2009; Ameri, Jelodar, Moniri, 2015).

Oliveira *et al.* (2020) investigaram a influência de fatores como temperatura e taxa de carregamento, no comportamento à fadiga e à deformação permanente das misturas asfálticas, no entanto os parâmetros SUPERPAVE medidos para o asfalto não foram capazes de prever de forma fidedigna a influência dos parâmetros $|G^*|_{sen\delta}$ e $|G^*|_{sen\delta}$.

O parâmetro $|G^*|/\text{sen}\delta$, utilizado no método SUPERPAVE para prever o desempenho à deformação permanente, foi estabelecido com base na teoria da energia dissipada. No entanto, Yao *et al.* (2023) complementaram que a parte viscosa da energia dissipada durante o carregamento no DSR não pode ser efetivamente avaliada. Especialmente em condições de alta temperatura e carregamento unidirecional intermitente causado pelo tráfego dos veículos, a elasticidade atrasada se recupera instantaneamente e a parte viscosa não pode ser separada. Portanto, o parâmetro $|G^*|/\text{sen}\delta$ não se mostrou adequado para avaliar a estabilidade de alta temperatura de um asfalto modificado.

Diante das incertezas relativas aos parâmetros da especificação SUPERPAVE e com o avanço das técnicas, novos ensaios reológicos foram desenvolvidos para preencher essa lacuna e fornecer uma avaliação mais precisa do desempenho das misturas a partir da avaliação do asfalto (Tomé, 2014).

Quanto à deformação permanente foram desenvolvidos os ensaios de fluência e recuperação sob múltipla tensão (MSCR – *Multiple Stress Creep Recovery*) e de varredura e amplitude linear (LAS – *Linear Amplitude Sweep*) para predição de desempenho quanto à fadiga, respectivamente, ambos realizados no DSR (Martins, 2014).

O MSCR avalia a deformação não recuperada através da resposta elástica do asfalto e a mudança dessa resposta elástica quando submetido a ciclos de tensão cisalhante. (AASHTO, 2023). O LAS é um ensaio acelerado de predição do comportamento à fadiga, consiste em caracterizar a resposta viscoelástica do material e o dano na amostra de asfalto com uma varredura oscilatória com amplitude crescente (Martins, 2014).

Com base nos resultados dos ensaios LAS e MSCR é possível estabelecer correlações entre as propriedades viscoelásticas medidas e o comportamento à fadiga e à deformação permanente das misturas asfálticas, respectivamente. Essas correlações permitem prever o desempenho das misturas modificadas em condições de fadiga e deformação permanente, auxiliando na seleção dos melhores modificadores e dosagens para cada aplicação. São fundamentais para aferir a efetiva contribuição dos modificadores na predição do comportamento à fadiga e à deformação permanente das misturas asfálticas (Bardini, 2013).

2.2.2.1 *Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)*

De forma a aferir a efetiva contribuição do asfalto na resistência à deformação permanente, em especial os modificados, foi desenvolvido o ensaio de fluência e recuperação sob múltipla tensão (MSCR) pela *Federal Highway Administration* (FHWA).

O ensaio permite a mensuração da resposta elástica do asfalto e a mudança dessa resposta em dois diferentes níveis de tensão enquanto submetido a ciclos de tensão cisalhante e intervalo para a recuperação da deformação sofrida. A deformação não recuperada se mostra como um indicador adequado da resistência do asfalto a deformação permanente (AASHTO, 2023).

O MSCR pode ser considerado um ensaio adequado para avaliar previsão da resistência à deformação permanente dos asfaltos, obtendo uma correlação com misturas asfálticas tanto em condições de laboratório quanto em pistas experimentais (Liu *et al.*, 2021; Zeiada *et al.*, 2021). A partir dos parâmetros obtidos no MSCR, foi introduzida a seleção do tipo de asfalto a ser usado tendo em conta quatro níveis de tráfego (padrão, pesado, muito pesado e extremamente *pesado*) (Anderson, D'Angelo, Walker, 2010; *Asphalt Institute*, 2010a; *Asphalt Institute*, 2010b).

O ensaio segue as normas AASHTO MP19 (2010) e ASTM D7405 (2020). No Brasil, desde 2020, o DNIT especificou o método de ensaio MSCR por meio da norma DNIT 423 (2020) (Brasil, 2020). Recomenda-se a realização do ensaio a temperatura máxima do pavimento, correspondente ao grau de desempenho (PG) máximo da especificação SUPERPAVE. As diretrizes do ensaio são estabelecidas pela norma ASTM D7175 (ASTM, 2015), para tal, utiliza-se a geometria de placas paralelas de 25 mm de diâmetro, com espaçamento entre as placas (*gap*) de 1 mm (ASTM, 2021).

O ensaio MSCR é realizado no DSR, em amostras envelhecidas em curto prazo, com a aplicação de ciclos de carregamento de um segundo e um período de repouso de nove segundos. No início, é aplicada uma tensão constante de 100 Pa por 20 ciclos, seguida de uma tensão de 3.200 Pa por mais 10 ciclos. A cada ciclo, é medida a compliância não recuperável (J_{nr}), que representa a deformação plástica do material, e o percentual de recuperação elástica (R). Esses dois parâmetros são indicadores de previsão de desempenho em relação à deformação permanente e também qualificam os asfaltos de acordo com a elasticidade (alta ou baixa) (AASHTO, 2023).

O percentual de recuperação é calculado pela relação entre a deformação recuperável (ϵ_{rec}) e a deformação total do asfalto, em porcentagem. A compliância não-recuperável (J_{nr}) é obtida pela relação entre a deformação não-recuperável (ϵ_{10}) e a tensão aplicada. Essa medida é expressa como o inverso da unidade de tensão, normalmente expressa em Pa^{-1} ou kPa^{-1} (AASHTO, 2023).

Estudos (D'Angelo *et al.*, 2007; D'Angelo, Dongré, 2009; Dreesen, Planche, Gardel, 2009) comprovaram a obtenção de correlações entre os resultados do MSCR e a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas ensaiadas em campo ou em

laboratório, com coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,70. Atualmente, o parâmetro J_{nr} (compliance não-recuperável) é definido como o novo indicador da suscetibilidade do asfalto à deformação permanente (Brasil, 2020).

Para a comparação dos dois níveis de carregamento, o parâmetro $J_{nr-diff}$ é adotado para identificação da sensibilidade dos asfaltos às alterações de carregamento, sendo calculado de acordo com a Equação (1) (ASTM, 2020). Valores elevados para esse parâmetro indicam uma maior suscetibilidade do asfalto à deformação permanente em situações como elevações bruscas de temperatura e carregamentos muito elevados não previstos em projeto (Asphalt Institute, 2020).

$$J_{nr-diff}(\%) = \frac{J_{nr_{3,2}} - J_{nr_{0,1}}}{J_{nr_{0,1}}} \times 100 \quad (1)$$

Em que: $J_{nr_{3,2}}$ e $J_{nr_{0,1}}$ são a parcela da compliance não recuperável para os carregamentos de 3200 Pa e 100 Pa, respectivamente. $J_{nr-diff}$: diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis (%).

As condições relativas ao tráfego são apresentadas na Tabela 3, que estabelece os limites do $J_{nr_{3,2}}$ e $J_{nr-diff}$ em relação ao tráfego (AASHTO, 2022).

Tabela 3. Limites do $J_{nr_{3,2}}$ e $J_{nr-diff}$, em relação ao tráfego.

| Parâmetros | Limites $J_{nr_{3,2}}$ (kPa^{-1}) | PG MSCR | Tráfego ESAL (milhões) |
|--|--|----------------------------|---------------------------|
| $J_{nr_{3,2}}$ (kPa^{-1}) $J_{nr-diff} < 75\%*$ | $\leq 4,5$ | S - (Tráfego padrão) | < 10 |
| | $\leq 2,0$ | H - (Tráfego pesado) | 10 a 30 |
| | $\leq 1,0$ | V - (Tráfego muito pesado) | > 30 |
| | $\leq 0,5*$ | E - (Tráfego extra pesado) | > 30 e carga estática |

Legenda: $J_{nr_{3,2}}$ – compliance não recuperável para a tensão de 3,2 kPa; $J_{nr-diff}$ – diferença de J_{nr} entre as tensões aplicadas; * $J_{nr_{3,2}} < 0,5$ desconsiderar o parâmetro $J_{nr-diff} < 75\%$.

Fonte: AASHTO (2022).

2.2.2.2 Linear Amplitude Sweep (LAS)

O ensaio *Linear Amplitude Sweep* (LAS) objetiva a predição de resistência à fadiga do asfalto, sendo considerado um ensaio acelerado de predição do comportamento à fadiga. A fadiga é um fenômeno que ocorre quando um material é submetido a cargas repetidas abaixo de sua resistência máxima. Com o tempo, a repetição de cargas conduz à falha do material, mesmo que a carga aplicada seja inferior à sua resistência máxima. O ensaio de LAS consiste em aplicar uma carga cíclica ao material, aumentando gradualmente sua amplitude até que ocorra a falha, em duas etapas, sendo que na primeira busca-se caracterizar

a resposta viscoelástica do material e na segunda, uma varredura oscilatória com amplitude crescente é aplicada, gerando dano na amostra de asfalto (Martins, 2014; Wng *et al.*, 2022).

O método de análise baseia-se na teoria da mecânica do dano contínuo viscoelástico (*Viscoelastic Continuum Damage – VECD*), cuja teoria considera a hipótese de continuidade da amostra, ou seja, que o material é homogêneo e contínuo (Garcia *et. al.*, 2020). Hintz (2012) propôs uma alteração significativa no formato da aplicação da carga no ensaio LAS. Em vez de aplicar incrementos discretos de carga, passou-se a utilizar incrementos lineares. Essa modificação resultou em uma nova versão do ensaio, conhecida como ensaio LAS modificado. Para o ensaio LAS modificado, Nuñez (2013) propôs um novo índice de falha para asfaltos modificados baseado na mecânica da fratura elástico-linear (MFEL) (Nuñez, Leonel, Faxina, 2016).

O ensaio segue as normas AASHTO TP 101 (2014) e no Brasil, o DNIT especificou o método de ensaio LAS por meio da norma DNIT 439 (2022). Esse ensaio é realizado no DSR na temperatura intermediária de projeto, empregando a geometria de placas paralelas de 8 mm e ajuste de abertura entre as placas de 2 mm e pode ser conduzido em amostras envelhecidas em curto e/ou longo prazo após RTFO e PAV. No ensaio, aplicam-se carregamentos cíclicos em duas fases, sendo a primeira uma varredura de frequência (*frequency sweep*) entre 0,1 Hz até 30 Hz com amplitude constante de 0,1%, para determinar as propriedades reológicas na região de viscoelasticidade linear. Na segunda, uma varredura de amplitude de deformação (*amplitude sweep*) entre 0% e 30% de forma linear, com uma frequência constante de 10 Hz durante 300 s, sendo que cada intervalo é seguido por outro intervalo com uma amplitude de deformação maior, obtendo-se assim, a fadiga do material (AASHTO, 2014).

Kuchiishi *et al.* (2019) avaliaram o comportamento de fadiga de dois asfaltos, CAP 30/45 e HPMP (*High modified polymer binder*), em diferentes temperaturas de teste. Foi observado que em temperaturas muito baixas, o material apresentou alta rigidez e a tensão provocada na amostra foi maior que a adesão dos asfaltos às placas do reômetro, prejudicando as medições dos parâmetros reológicos. No entanto, nas temperaturas entre 15°C e 20°C, os parâmetros de fadiga foram adequadamente obtidos para ambos asfaltos. Os níveis de deformação propostos pela AASHTO T 391 (2020) para a ruptura dos materiais também foram considerados adequados, mesmo para o asfalto modificado por polímero e o CAP 30/45. Os pesquisadores destacaram a necessidade de estudar os níveis de deformação, a temperatura de ensaio e o procedimento de fadiga para asfaltos com alta elasticidade, a fim de melhor representar seu comportamento à fadiga. Além disso, o parâmetro de rigidez na avaliação do comportamento a fadiga é o módulo de cisalhamento dinâmico inicial $|G_0^*|$ sob

frequência de 10 Hz e deve estar entre 12 e 60 MPa para garantir resultados confiáveis e não apresentar problemas de perda de adesão ou fluxo durante o ensaio.

O modelo de fadiga é ajustado utilizando os parâmetros obtidos a partir dos ensaios reológicos, como a variação do módulo de armazenamento (G'), módulo de perda (G'') e o ângulo de fase (δ) em função da frequência e da amplitude de deformação. O princípio de dano contínuo viscoelástico considera que o material sofre danos progressivos ao longo do tempo devido aos carregamentos cíclicos. O dano é representado pela diminuição do módulo de armazenamento e pelo aumento da fase de perda. O modelo de fadiga busca descrever essa relação entre o dano acumulado e a vida de fadiga do asfalto (Johnson, 2010).

Martins (2014) utilizou a Equação (2) para calcular o Fator de Fadiga do Ligante (FFL) com base nos parâmetros obtidos no ensaio do LAS. Essa equação mostrou uma boa correlação com o desempenho à fadiga das misturas asfálticas avaliadas. Possebon (2021) também utilizou a mesma equação e explicou que a mesma representa o cálculo da área sob as curvas de fadiga no espaço log-log para o intervalo entre os dois níveis de deformação de 1,25% e 2,5%. A Equação 2 é adequada para descrever a avaliação da resistência à fadiga dos asfaltos e prever o desempenho das misturas asfálticas.

$$FFL = \frac{\log(N_{f1,25} \times N_{f2,5})}{2} \times \log\left(\frac{0,0250}{0,0125}\right) \quad (2)$$

Onde:

FFL é o fator de fadiga do ligante a 19 °C;

Log é o logaritmo na base 10;

$N_{f2,5}$ é o número de ciclos até a ruptura, calculado pela Equação (3) para uma deformação cisalhante de 2,5%.

$$N_f = A.(\gamma)^B \quad (3)$$

Onde:

A e B são os coeficientes experimentais;

N_f é o número de ciclos até a ruptura;

γ é a deformação cisalhante aplicada, expressa em porcentagem (%).

No estudo conduzido por Sabouri, Mirzaiyan, Moniri, (2018), foram realizadas comparações entre os parâmetros de previsão de fadiga do asfalto com os parâmetros do ensaio LAS e SUPERPAVE, $|G^*|.sen(\delta)$. O desempenho previsto foi comparado com o

parâmetro de desempenho mecânico da mistura asfáltica obtido a partir do ensaio de flexão alternada em quatro pontos. Os resultados indicaram que os parâmetros do LAS apresentaram consistência com a resistência à fadiga da mistura asfáltica. Por outro lado, o parâmetro $|G^*|.sen(\delta)$ não foi capaz de prever o desempenho da mistura em relação à fadiga.

2.3 ASFALTOS MODIFICADOS

O uso de asfaltos modificados em pavimentação resultou, principalmente, da necessidade de promover a vida útil dos pavimentos não mais alcançada com o uso de asfaltos convencionais. Neste sentido, foi necessário o desenvolvimento de materiais com qualidade superior, menos suscetíveis ao aparecimento precoce de deformação permanente, trincamento térmico e por fadiga (Kim *et al.*, 2019). Graça, Cardoso, Cavalcante (2016) consideraram que com o aumento crescente do tráfego pesado e devido às temperaturas experimentadas pelos pavimentos em campo, os asfaltos convencionais não atendem mais os desempenhos mecânicos desejados e fez-se necessário a incorporação dos asfaltos modificados para que as estruturas de pavimentos atendam às expectativas de vida útil dos projetos, uma vez que conferem maior resistência à deformação permanente, maior resistência à fadiga, maior resistência ao envelhecimento e maior aderência aos agregados.

A introdução de asfaltos modificados forneceu às agências de transporte uma alternativa eficaz para projetar misturas asfálticas com superior desempenho mecânico em relação aos convencionais, com capacidade de aumentar a vida útil dos revestimentos asfálticos e manutenção de uma maior durabilidade em longo prazo (Habbouche *et al.*, 2018). No caso de asfaltos modificados, atenção especial deve ser dada em relação ao transporte e estocagem, uma vez que pode ocorrer a separação de fases (Blazejowski *et al.*, 2016).

Islam *et al.* (2022) acrescentaram que o aparecimento precoce de defeitos em pavimentos cujas misturas asfálticas foram produzidas com asfaltos convencionais demandou o uso de asfaltos modificados por polímeros para melhoraria das propriedades de desempenho mecânico. Outros autores salientaram que a elevação do ponto de amolecimento dos asfaltos modificados, tornando-os mais resistente a altas temperaturas e redução da possibilidade do aparecimento de deformações plásticas em climas quentes (Graça, Cardoso, Cavalcante, 2016).

Em geral, a modificação de asfaltos tem sido realizada pela adição de diferentes polímeros. De acordo com Billmeyer (1984), os polímeros são classificados pela origem como orgânicos, inorgânicos ou sintéticos. A estrutura molecular dos diversos tipos de

polímero é dependente das ligações químicas entre monômeros, as quais, ocorrem por meio de reação química, denominada de polimerização. Os asfaltos modificados são obtidos pela incorporação de polímeros em sua estrutura, cujo processo pode ser feito de maneira química ou mecânica.

Pode-se citar os seguintes exemplos de modificadores de asfalto: polietileno de baixa densidade (LDPE), polietileno de alta densidade, (HDPE), estireno-butadieno-estireno (SBS), etileno-vinil acetato (EVA), copolímeros aleatórios de estireno-butadieno (SBR), monômeros de etileno propileno dieno (EPDM), borracha moída de pneus e estireno-isopreno-estireno (SIS) (Kim *et al.*, 2019). A alteração proporcionada tem se mostrado eficaz na redução da susceptibilidade do asfalto às temperaturas extremas, tanto altas quanto baixas (Almeida *et al.*, 2018).

Ao modificar os asfaltos, é necessário entender como as alterações advindas afetam as propriedades reológicas. Por exemplo, a adição de borracha de pneus ao asfalto pode melhorar a resistência à fadiga e à deformação permanente, devido às propriedades elásticas da borracha. Já a adição de polímeros pode melhorar a coesão e a adesão do asfalto, aumentando sua resistência ao envelhecimento e à formação de trincas. Portanto, o conhecimento do comportamento reológico resultante dessas modificações é fundamental para avaliar o desempenho e as propriedades das misturas asfálticas obtidas com esses asfaltos modificados. A avaliação reológica permite uma melhor compreensão de como esses materiais podem ser utilizados de forma eficiente e sustentável na pavimentação (Graça, Cardoso, Cavalcante, 2016).

Neste estudo, dois modificadores de asfalto foram estudados, sendo, por polímero SBS e borracha moída de pneus inservíveis e a estes foi dado destaque.

2.3.1 Asfaltos modificados com SBS

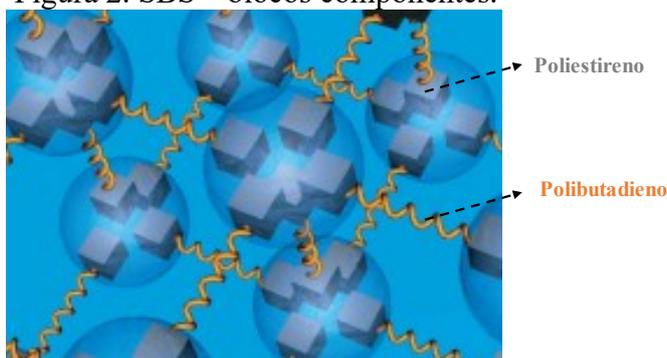
Dentre os materiais utilizados para a modificação dos asfaltos, os polímeros sintéticos se destacam, especialmente o polímero de estireno-butadieno-estireno (SBS). A adição desse polímero ao asfalto é realizada através de um processo de alto cisalhamento, o qual traz uma série de benefícios, como maior coesão, aumento da elasticidade e/ou flexibilidade, resistência ao envelhecimento e redução da susceptibilidade térmica. A maior coesão e flexibilidade proporcionadas pelo SBS conferem uma maior resistência às cargas e ao tráfego intenso, evitando deformações permanentes e prolongando a vida útil do pavimento (Cunha *et al.*, 2012; Dong *et al.*, 2014; Li *et al.*, 2022). O SBS é classificado como um elastômero, o qual, quando submetido a deformações inferiores à de ruptura, apresenta

resposta de recuperação elástica significativa (*Asphalt Institute* e Eurobitume, 2011). Em geral, a modificação é feita por percentuais de 2% a 3% em massa de SBS (Dressen, Planche, Gardel, 2011).

A principal desvantagem do emprego de um asfalto modificado é o custo e, para viabilizar a sua utilização, a compensação advém do acréscimo de vida útil do pavimento e consequente redução das atividades de manutenção e conservação (Lee, Park, 2006).

O estireno-butadieno-estireno (SBS) é uma classe de polímeros, e sua incorporação ao asfalto confere propriedades reológicas favoráveis. Os monômeros de estireno e butadieno estão dispostos em blocos de poliestireno e polibutadieno, cuja combinação confere suas propriedades. A distribuição é do tipo ordenada, ou seja, um bloco de poliestireno quimicamente combinado com um bloco de polibutadieno e outro de poliestireno. Conforme ilustrado na Figura 2, os blocos (poliestireno – cubos em cinza; polibutadieno – molas na cor laranja) existem como fases separadas, que não se misturam. No entanto, o polibutadieno, com característica de um plástico forte apresenta propriedades elástica, cujas fases se ligam as de poliestireno propiciando resistência, tenacidade e elasticidade. Quando o SBS é incorporado ao asfalto em elevadas temperaturas, os blocos de poliestireno se dissociam, permitindo que o asfalto modificado seja processado como um líquido. Após resfriamento, os blocos de poliestireno se associam novamente e formam uma rede elástica resistente, cujo processo é reversível (Schaur, Kumar, Ravindranath, 2017; Kraton, 2022).

Figura 2. SBS – blocos componentes.



Fonte: Adaptado de Katron (2022).

No Brasil, os asfaltos modificados com polímeros elastoméricos, como o SBS, são especificados de acordo com a norma DNIT 129-EM (2011) (Tabela A3 do ANEXO A), levando em consideração os parâmetros físicos de ponto de amolecimento e recuperação elástica.

Baaj, Di Benedetto, Chaverot (2005) analisaram as propriedades do polímero SBS em comparação com outros polímeros, e constataram que o SBS se destacou pela sua

capacidade de promover elasticidade ao asfalto modificado, mantendo as demais propriedades do material, permitindo que o material se deforme e se recupere após a aplicação de cargas. Além disso, a adição de teores entre 2% e 3% de SBS não altera a viscosidade do asfalto e preserva suas características mesmo após os processos de resfriamento e aquecimento, propriedade que garante a fluidez e a aderência do asfalto durante a aplicação (Stastna, Zanzotto, Vacin, 2003).

Singh *et al.* (2018) complementaram que o SBS é um dos polímeros mais bem-sucedidos na modificação do asfalto. Isso se deve à combinação das moléculas de estireno e butadieno, que proporciona ao asfalto modificado maior rigidez e excelentes características de recuperação elástica. Estas são propriedades desejadas no asfalto modificado, pois contribuem para a resistência do material às deformações permanentes. As excelentes características de recuperação elástica proporcionam a capacidade de se deformar sob a ação de cargas e, em seguida, retornar à sua forma original, sem sofrer danos ou deformações permanentes. A combinação de maior rigidez e excelentes características de recuperação elástica oferecida pelo SBS torna esse polímero uma escolha eficiente para a modificação do asfalto. Marcon (2018), ao comparar o asfalto modificado com SBS com o asfalto convencional, destacou melhores resultados quanto à recuperação elástica, propriedade fundamental para a resistência do pavimento ao dano por fadiga, causado pelas repetidas cargas aplicadas pelo tráfego.

Posteriormente, para possibilitar a introdução de maiores percentuais de SBS, foi desenvolvido o asfalto *Highly Modified Asphalt* (HiMA), de elevado custo e comumente empregado no caso de pavimentos submetidos a elevadas cargas e condições ambientais adversas. O HiMA também possibilita o dimensionamento de revestimentos com espessuras de camadas asfálticas mais delgadas, sendo indicado no caso de pavimento perpétuos que são dimensionados para durarem longos anos (Blazejowski *et al.*, 2016).

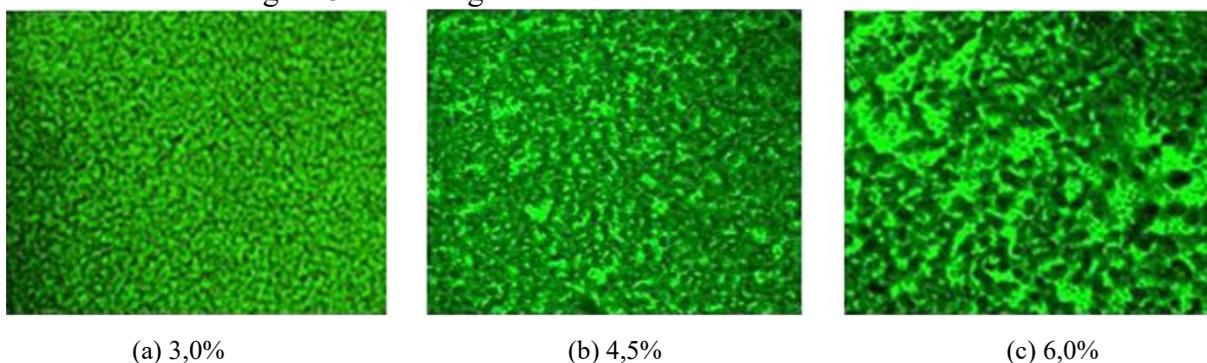
Alguns autores consideraram que, embora vários polímeros possam modificar o asfalto, o SBS é amplamente usado pelo desempenho em serviço em temperaturas elevadas, intermediárias e baixas (Kok, Yilmaz, 2009; Al-Hsdidy, Yi-Qiu, 2011; Zhang *et al.* 2014; Kumar *et al.*, 2020; Islam *et al.*, 2022). Marcon (2018) confirmou que o SBS apresenta um maior ponto de amolecimento em relação ao CAP 50/70, indicando uma tendência de maior resistência às tensões cisalhantes provenientes do tráfego.

As propriedades de desempenho das misturas asfálticas produzidas com asfalto modificado por SBS dependem do teor do polímero (Schaur, Unterberger, Lackner, 2017; Lin *et al.*, 2019; Kumar *et al.*, 2020; Islam *et al.*, 2022). Considerando uma elevada demanda de tráfego pesado (densidade e carga), ampla faixa de temperatura de serviço, fatores

ambientais adversos e necessidade de vida útil prolongada do pavimento, há necessidade de teores de SBS acima de 3% em peso (Liang *et al.*, 2015; Han *et al.*, 2018; Singh *et al.*, 2020; Islam *et al.*, 2022).

Islam *et al.* (2022) investigaram a morfologia dos asfaltos modificados com diferentes concentrações de SBS. Os pesquisadores incorporaram teores de 3,0%, 4,5% e 7,0% de SBS em três asfaltos convencionais e avaliaram a morfologia por meio de microscopia de fluorescência. A Figura 3 mostra a morfologia dos asfaltos modificados, com uma ampliação de 40 vezes. Os resultados indicaram que, com a adição de 3% de SBS, a fase malteno-polímero apresentou uma dispersão com interconexões fracas entre eles. Isso significa que os blocos de SBS estavam dispersos no asfalto, mas não havia uma rede interligada formada entre eles. Por outro lado, com a adição de 4,5% de SBS, a fase malteno-polímero tendeu a formar uma morfologia semelhante a uma rede interligada. Esta constatação indicou que os blocos de SBS estavam mais interconectados, formando uma estrutura em rede dentro do asfalto. Essa mesma morfologia em forma de rede interligada também foi observada com o teor de 7,0% de SBS, com uma maior concentração de SBS, a formação da rede interligada é ainda mais forte, indicando uma melhor estrutura elástica no asfalto modificado.

Figura 3. Morfologia de asfaltos modificados com SBS.



Fonte: Islam *et al.* (2022).

Apesar das vantagens atribuídas aos asfaltos modificados por SBS, estudos realizados por Singh *et al.* (2016, 2017, 2018, 2020) e Islam *et al.* (2022) demonstram alguns problemas quanto a estabilidade oxidativa e térmica inadequada. A estabilidade oxidativa se refere à capacidade do asfalto de resistir à degradação causada pela exposição aos agentes oxidantes presentes no ambiente.

Zhu, Amini, Goli (2014) destacaram alguns problemas relacionados à aplicação desses materiais, principalmente ao elevado custo. A adição de polímeros aos asfaltos aumenta consideravelmente o preço do material, o que pode inviabilizar sua utilização em

algumas obras de pavimentação, principalmente em regiões com recursos financeiros limitados. Os polímeros adicionados aos asfaltos podem causar separação de fases e sedimentação ao longo do tempo, o que afeta o desempenho.

De acordo com Wang e Yuzhen (2010), a estabilidade à estocagem de alguns asfaltos modificados por polímeros pode ser atribuída à baixa compatibilidade entre os asfaltos convencionais e seus respectivos modificadores. Essa falta de compatibilidade resulta em diferenças nas propriedades dos materiais, como densidade e peso molecular, o que acaba levando à separação de fases dos asfaltos modificados, onde os componentes se separam em diferentes camadas, ou se sedimentam ao longo do tempo.

2.3.2 Asfalto Borracha

Na década de 1960, o engenheiro Charles McDonald foi o pioneiro na modificação de asfaltos pela introdução de borracha de pneus triturada ao perceber que o uso de pneu poderia proporcionar um material elástico, em Phoenix no Estado norte-americano do Arizona. O processo foi patenteado e somente a partir do fim da década de 1980 o mundo pôde iniciar o desenvolvimento de processos semelhantes (Way, 2003).

Oda (2000) foi uma das percussoras no desenvolvimento de asfalto com borracha no Brasil, e afirmou que em relação ao convencional, o asfalto borracha tem a capacidade de retardar o trincamento térmico, melhorar a resistência à deformação permanente e fadiga.

O consumo dos pneus triturados em partículas e incorporados aos asfaltos tem demonstrado ganhos significativos ao longo da vida útil das estruturas de pavimento, além de ser uma excelente solução ambiental (Nunes, 2017).

A utilização do asfalto com borracha traz diversas vantagens significativas. Uma destas é a redução do envelhecimento do asfalto, através da presença de antioxidantes e carbono presentes na borracha dos pneus usados, que são incorporados ao asfalto, consequentemente gerando ganho de resistência ao envelhecimento e aumento da vida útil. Pode-se citar a melhoria da flexibilidade das misturas asfálticas, pelo fato de conter uma maior concentração de elastômeros presentes na borracha de pneus, o que torna as misturas mais flexíveis em comparação com as misturas asfálticas convencionais, dessa forma, aumentando a adesividade dos agregados com o asfalto e a capacidade de impermeabilização. Ainda, o aumento do ponto de amolecimento, e assim, consequentemente uma maior resistência ao acúmulo de deformação permanente nas trilhas de rodas. Também, a redução da susceptibilidade térmica das misturas asfálticas, que proporciona uma maior resistência às variações de temperatura, tanto em baixas quanto em

altas. Outras vantagens incluem a redução da emissão sonora que contribui a diminuir o ruído gerado pelo contato dos pneus com o pavimento (Oda, 2001; Pereira, 2010; Zatarin *et al.*, 2017).

No entanto, é importante destacar que a incorporação da borracha no asfalto tem algumas consequências. Uma delas é o aumento da viscosidade do asfalto, o que pode dificultar o processo de usinagem em compactação do asfalto modificado por polímero. A viscosidade mais elevada exige um maior esforço para a mistura e aplicação do material. Também requer uma temperatura mais alta durante o processo de usinagem e compactação. Isso ocorre devido à necessidade de aquecer a borracha para que ela se misture adequadamente ao asfalto (Rodríguez-Alloza *et al.*, 2014).

Dois tipos de borracha são obtidos a partir da trituração dos pneus rodoviários, as quais dependem do processo, sendo ambiente (na temperatura ambiente) e criogênica (moagem em temperaturas inferiores a 120°C) (Fontes, 2009). O tipo e o formato da borracha têm influência nas propriedades físicas do asfalto com adição de borracha. O processo criogênico reduz a superfície específica das partículas e conseqüentemente a viscosidade e o ponto de amolecimento em relação à borracha do tipo ambiente (Dantas Neto, 2004).

Com o Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis Implantado no final da década de 1990 no Brasil, os pneus receberam destinação regulamentada, sendo as principais, para a indústria de cimento, artefatos, e asfalto com adição de borracha. Outros países como os Estados Unidos da América e Portugal também haviam estabelecido previamente, programas para destinação ambientalmente adequada dos pneus inservíveis (Thives *et al.*, 2022). A preocupação com a preservação do meio ambiente tem se tornado cada vez mais urgente e o emprego da borracha de pneu moído, ou mesmo o pó de pneu, nas misturas asfálticas, tem se destacado como uma alternativa altamente viável para a prevenção da degradação ambiental (Souza, 2021).

A Resolução nº 301/2002, legislação estabelecidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) para regulamentar a responsabilidade dos fabricantes na destinação correta dos pneus, definiu essa responsabilidade, e posteriormente, a Resolução nº 416/2009 atualizou as exigências, demandando a destinação adequada de 100% dos pneus que entram no mercado de reposição. Essas medidas são importantes para reduzir os danos ambientais causados pelo descarte inadequado de pneus e promover a reciclagem e reutilização desses materiais. A incorporação de borracha, provenientes de pneus, nos asfaltos foi normatizada em 2009 pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), por meio da norma 111/2009, a qual estabelece as diretrizes e critérios

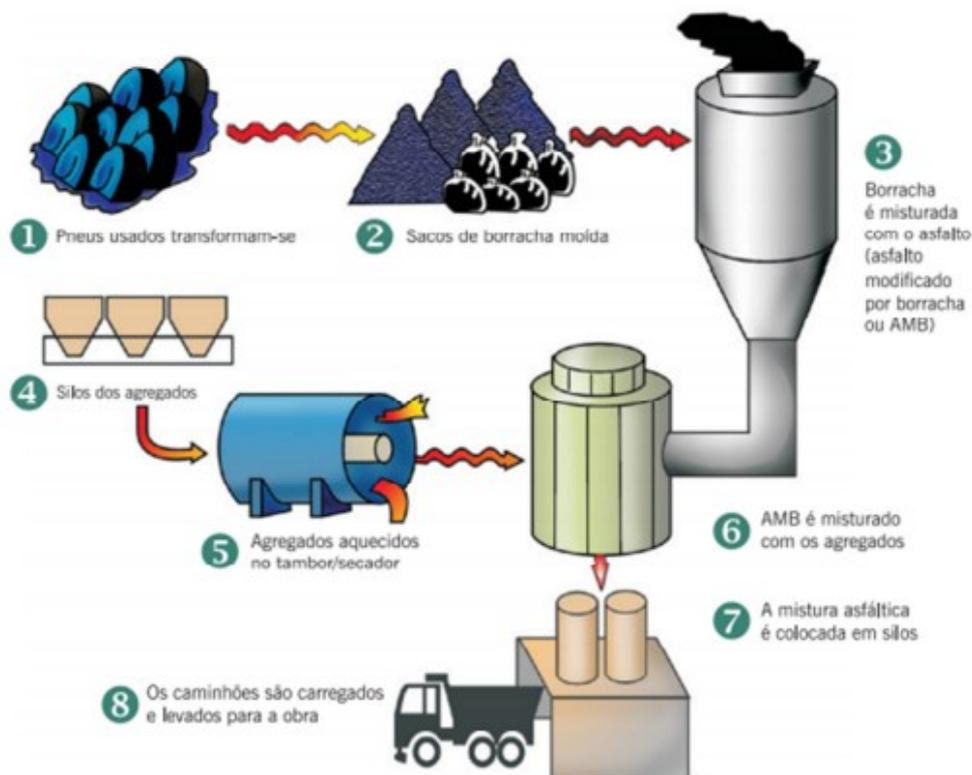
técnicos para a aplicação de pneus inservíveis na pavimentação no Brasil (Siqueira *et al.* 2021).

Uma das primeiras aplicações de misturas asfálticas com asfalto com borracha foi realizada em 2001 na rodovia BR-116 (Rio Grande do Sul) (Ceratti, 2011). Em 2013, mais de três mil quilômetros de rodovias com a tecnologia do asfalto com borracha foram pavimentados, com um consumo de aproximadamente seis milhões de pneus inservíveis.

A borracha pode ser incorporada às misturas asfálticas de duas formas, sendo estas, o processo seco (*dry process*) e o úmido (*wet process*). No processo seco, a borracha apresenta maior granulometria e não modifica o asfalto, de modo que as partículas de borracha são consideradas “agregados miúdos”. Por outro lado, no processo úmido (.

Figura 4), a borracha com granulometria fina é introduzida no asfalto em elevadas temperaturas, modificando-o. O processo úmido contempla dois sistemas, que dependem do tipo de incorporação. No sistema *continuous blend*, a borracha é introduzida nos tanques de asfalto da usina e neste local se processa a modificação. O uso do material deve ser feito até seis horas após a produção. No Brasil, o asfalto com borracha é produzido em distribuidoras de asfalto o em unidades industriais por meio de equipamentos especiais de alto cisalhamento, pelo sistema *terminal blend* ou *terminal blending* (Fontes, 2009).

Figura 4. Esquema de produção do asfalto com borracha, via processo úmido.



Fonte: Dantas Neto (2004).

Ziari, Amini, Golia (2020) complementaram que no sistema *continuous blend* a mistura (asfalto borracha), pela necessidade de constante agitação, é influenciada pela velocidade, tempo e temperatura (de mistura).

No Brasil, apenas o sistema *terminal blending* é usado para produção de asfalto borracha, que é especificado pela norma DNIT 111-EM (Brasil, 2009). Os tipos de asfalto borracha produzidos são o AB8 e o AB22 relativos à viscosidade aparente, entre 800 cP a 2.000 cP e 2.200 cP a 4.000 cP respectivamente (Tabela A4 do ANEXO A).

É importante considerar os diferentes sistemas de produção do asfalto com adição de borracha, pois eles podem influenciar na qualidade e estabilidade do produto final. Neste contexto, é necessário compreender as diferenças entre o sistema não estocável e o sistema estocável, a fim de garantir a eficácia e a durabilidade do asfalto borracha. No sistema não estocável, a produção do asfalto borracha ocorre na própria obra, utilizando um equipamento misturador e deve ser aplicado imediatamente após a produção, para evitar problemas de despolimerização e desvulcanização. No sistema estocável, a borracha de pneu é moída e incorporada aos asfaltos minutos antes da mistura com os agregados, utilizando um equipamento de agitação de baixo cisalhamento. Dessa forma, é possível obter um produto com granulometrias superiores e melhor viscosidade, sem ocorrer a despolimerização e

desvulcanização da borracha. Esse processo permite a produção de um asfalto borracha com maior estabilidade e homogeneidade. Além disso, a possibilidade de utilizar borracha moída com granulometrias superiores contribui para a melhoria das propriedades do asfalto (Ziari, Amini, Golia, 2020).

Embora os custos do asfalto com adição de borracha possam ser mais elevados que os asfaltos convencionais, é importante considerar o custo-benefício a longo prazo. Já que essa opção apresenta vantagens significativas em termos de qualidade e durabilidade a longo prazo devido à maior elasticidade e resistência do pavimento, tornando-o menos suscetível às deformações (Rodríguez-Alloza *et. al.*, 2014).

2.4 ESTUDOS REOLÓGICOS COM ASFALTOS MODIFICADOS POR SBS E BORRACHA

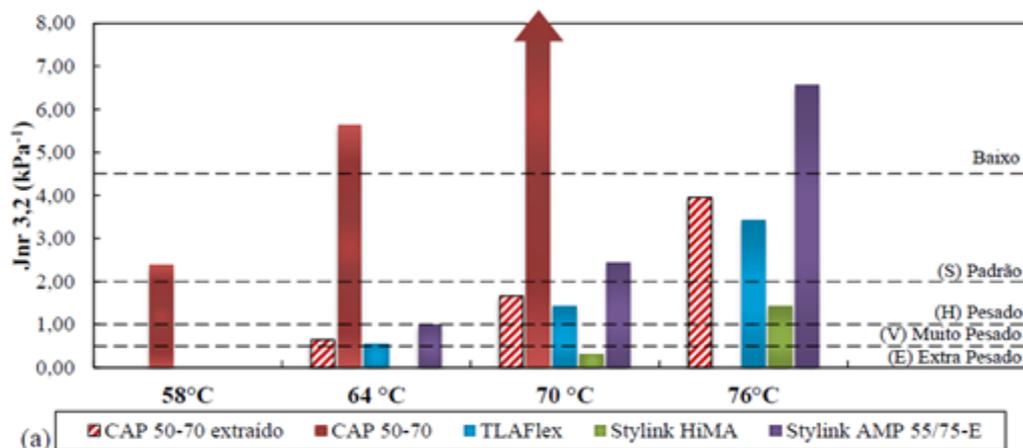
Neste item, são apresentados resultados de pesquisas realizadas com os asfaltos modificados, principalmente com SBS e borracha, com foco na reologia.

Camargo (2016) avaliou por meio do ensaio MSCR, os parâmetros de deformação permanente. No estudo, foram testados o asfalto convencional CAP 30/45, o asfalto modificado por SBS e o asfalto borracha. Como resultado, nas temperaturas de 58°C a 70°C o asfalto borracha apresentou melhor resposta com relação a deformação permanente, com valores inferiores a 4,0 kPa⁻¹ de compilância não recuperável (J_{nr}), e menor susceptibilidade à variação térmica.

Bessa *et al.* (2019) realizaram ensaios LAS em três asfaltos (convencional CAP 30/45, modificado por SBS e HiMA, cujos resultados de desempenho foram favoráveis aos modificados. Ensaio conduzidos por Osmani *et al.* (2019) obtiveram os mesmos resultados de desempenho superior quando compararam asfaltos convencionais, modificado por SBS e asfalto borracha.

Vestena (2021) avaliou os asfaltos CAP 50/70 (virgem e extraído de uma mistura existente), HIMA, TLAFlex (modificado com asfalto natural) e AMP 55/75-E, em quatro diferentes temperaturas 58, 64, 70 e 76°C, submetidos ao envelhecimento a curto prazo, no ensaio MSCR. Os resultados de J_{nr} em 3200 Pa mostraram que quanto maior o percentual de polímeros contido no asfalto, melhor foi o seu comportamento com relação a deformação permanente e, conseqüentemente, indicando a possibilidade de aplicação em níveis de tráfego mais elevados e em altas temperaturas (Figura 5).

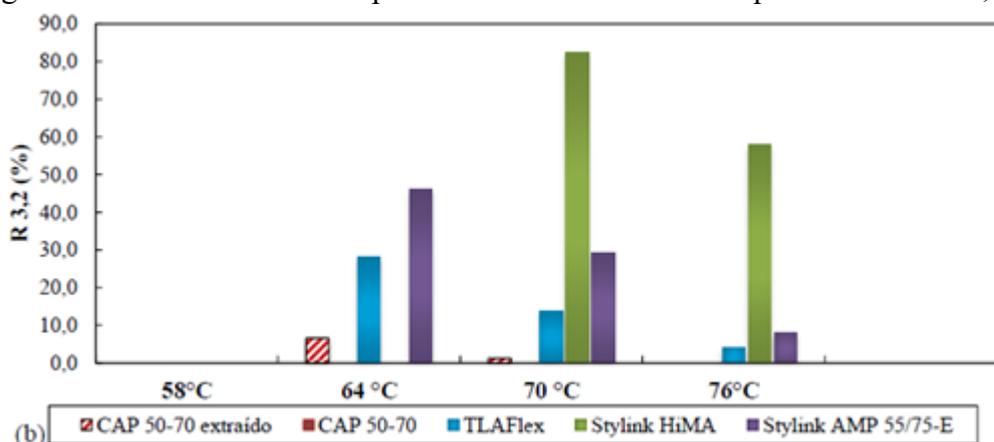
Figura 5. Resultados de MSCR para diferentes classes de temperaturas em J_{nr} 3,2 kPa.



Fonte: Vestena (2021).

Na mesma pesquisa, foi constatado, através do valor de $R_{3,2}$, parâmetro que identifica a taxa de recuperação dos asfaltos no ensaio de MSCR após ciclos de formação, o teor de polímero mais elevado conduziu a melhor recuperação elástica. Foi identificado um ganho significativo quando comparados os asfaltos com polímeros com os convencionais (Figura 6).

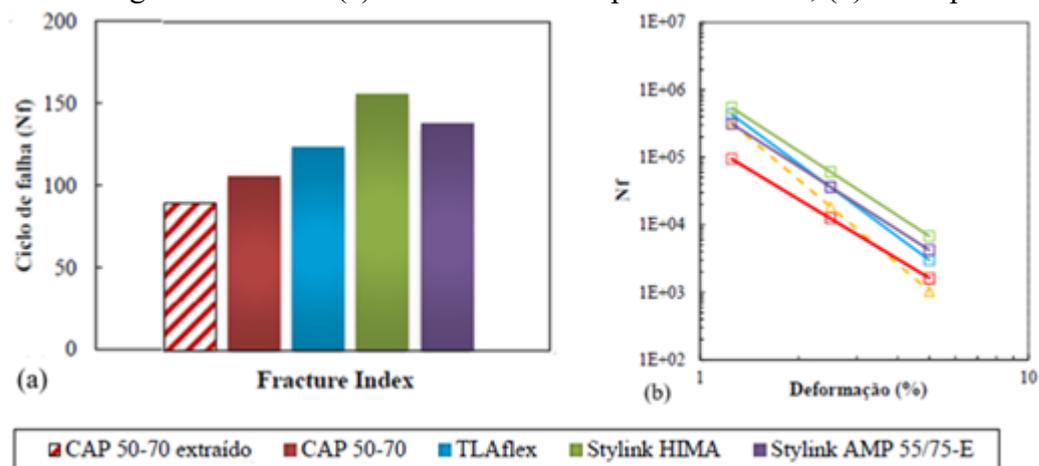
Figura 6. Resultado de MSCR para diferentes classes de temperaturas em J_{nr} 3,2 kPa



Fonte: Vestena (2021).

Quanto ao dano à fadiga pelo LAS (temperatura de 19°C), Vestena (2021) mostrou que a presença de polímero melhorou o desempenho quanto ao dano por fadiga, conforme a Figura 7(a). Ainda, em qualquer nível de deformação os asfaltos modificados apresentaram melhor desempenho quanto ao dano por fadiga em relação aos convencionais, conforme a Figura 7(b).

Figura 7. Fadiga dos asfaltos: (a) Critérios de falha para os asfaltos; (b) Dano por fadiga.



Fonte: Adaptado de Vestena (2021).

Liang *et al.* (2015) estudaram asfaltos modificados com diferentes composições e copolímeros de estireno-butadieno-estireno (SBS) e concluíram que a viscosidade foi elevada em função do percentual de polímero. Ainda, os autores afirmaram que os asfaltos modificados por SBS apresentaram pequena sensibilidade às variações de temperatura.

Yan *et al.* (2019) realizaram ensaios de envelhecimento com asfaltos modificados por SBS em várias temperaturas e tempos de duração e constataram que a degradação do polímero ocorreu na fase inicial do envelhecimento, resultando em uma parcela menos elástica. Complementaram os resultados do ensaio MSCR, que representam de forma precisa a resposta viscoelástica da matriz e do asfalto modificado em diferentes graus de envelhecimento. A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios MSCR (percentual de recuperação e J_{nr} nos dois níveis de tensão) de asfaltos modificados com SBS. Os asfaltos base foram classificados como PG 64-XX e, após a modificação, como PG 76-XX, indicando uma melhoria na resistência a defeitos associados à alta temperatura.

Tabela 4. Resultados de ensaios MSCR de asfaltos modificados com SBS.

| Fonte | % de SBS | R100 (%) | R3200 (%) | J_{nr100} (kPa-1) | $J_{nr 3200}$ (kPa-1) |
|--------------------------|----------|----------|-----------|---------------------|-----------------------|
| D'Angelo e Dongré (2009) | 4,0 | - | 37,0 | - | 2,40 |
| Domingos (2011) | 4,5 | 12,1 | 1,0 | 2,65 | 3,58 |
| Huang e Tang (2017) | 4,5 | 74,5 | 73,0 | 0,52 | 0,54 |
| Behnood e Olek (2017) | 4,0 | 45,0 | 12,0 | 2,00 | 3,60 |

Fonte: Autor (2024)

Hong *et al.* (2020) rejuvenesceram asfaltos com SBS envelhecidos a longo prazo com rejuvenescedores compostos contendo 77% de óleo aromático e 23% de polímero SBS. O polímero SBS foi usado para fins de modificação devido ao seu potencial para formar uma rede polimérica. Os resultados indicaram que o uso do composto rejuvenescedor aumentou o ponto de amolecimento e a ductilidade. O efeito de modificação do polímero do rejuvenescedor composto foi distinguido pelo platô região das curvas mestras do ângulo de fase. O óleo aromático melhorou o desempenho em baixas temperaturas, mas enfraqueceu o desempenho em altas temperaturas. A incorporação do polímero SBS foi um bom complemento para equilibrar o desempenho geral dos asfaltos rejuvenescidos.

Wang *et al.* (2022) afirmaram que o teor de polímero SBS tem um efeito direto no desempenho do asfalto modificado e conseqüentemente, no seu desempenho geral. As propriedades são medidas por ensaios de ponto de amolecimento, ductilidade e penetração, que podem não representar o desempenho prático do campo. Os autores avaliaram um asfalto modificado com SBS com base em ensaios MSCR e LAS, cujos resultados se mostraram melhores quanto ao desempenho à deformação permanente e à fadiga, respectivamente.

2.5 MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas podem ser usinadas a quente com asfaltos convencionais ou modificados e as usinadas a frio com o uso de emulsão asfáltica de petróleo (EAP). A maioria das misturas asfálticas brasileiras são de agregados minerais, de várias dimensões e formas, e com asfaltos que podem variar de acordo com o clima e o tráfego previstos para o local, com objetivo de obter misturas asfálticas com capacidade de garantir a estabilidade às deformações permanentes e resistência à fadiga. A seleção do tipo de misturas asfáltica para atendimento dos requisitos de projeto é possível através de um adequado projeto de dosagem e adequada escolha de materiais, com a possibilidade do uso de aditivos para melhorar as características físicas e mecânicas das misturas asfálticas (Bernucci *et al.*,2022).

A deformação permanente, um dos principais defeitos que ocorrem em pavimentos flexíveis, é mais comum em regiões com altas temperaturas, especialmente em rodovias com alto volume de tráfego pesado que trafegam em baixa velocidade Hajikarimi *et al.* (2015). Walubita *et al.* (2020) afirmaram que a resistência de uma mistura asfáltica à deformação permanente é influenciada por diversos fatores, como o tipo de agregado, granulometria, teor de asfalto, volume de vazios e, principalmente, pelas propriedades do asfalto.

2.5.1 Propriedades dos agregados nas misturas asfálticas

Masad *et al.* (2005) investigaram as características físicas dos agregados e relataram que a geometria desses materiais pode ser descrita com base em três propriedades independentes: forma, angularidade e textura. A forma refere-se às variações nas proporções da partícula. Cada agregado possui uma forma característica, que pode ser esférica, cúbica, alongada, entre outras. Essa propriedade é importante, pois afeta diretamente a resistência e a trabalhabilidade da mistura asfáltica. Agregados com formas mais arredondadas tendem a proporcionar uma melhor trabalhabilidade. A angularidade, dada pelas variações sobrepostas à forma, nos contornos da partícula, está relacionada à rugosidade da superfície do agregado. A textura é representada pelas irregularidades na superfície da partícula. Essas irregularidades podem ser causadas por processos naturais, como a erosão, ou por processos artificiais, como a britagem do agregado. A textura afeta principalmente a aderência entre o agregado e o asfalto.

A forma dos agregados minerais tem um impacto significativo em várias propriedades das misturas asfálticas, incluindo as resistências à deformação permanente e à fadiga. Está diretamente relacionada às proporções geométricas, como a angularidade, a textura e a distribuição dos tamanhos dos grãos. Uma forma adequada dos agregados pode contribuir para um melhor intertravamento entre as partículas, resultando em uma maior resistência à deformação permanente e à fadiga. Por outro lado, uma forma inadequada, como agregados lamelares ou arredondados, pode levar a uma menor resistência e maior suscetibilidade a esses tipos de falhas (Kim Y., Kim N., Khosla, 1992; Gouveia *et al.*, 2007).

Existem vários métodos de ensaio laboratoriais disponíveis e estabelecidos em normas para determinar a forma dos agregados, como o índice de forma, o índice de achatamento e o índice de textura. Também têm sido utilizadas técnicas mais avançadas, como a análise digital de imagem, que permite uma avaliação mais precisa e objetiva da forma dos agregados. Essa técnica utiliza algoritmos computacionais para analisar as imagens dos agregados e determinar suas características geométricas (Gonçalvez, Woods, 2010).

O travamento do esqueleto de agregados, para um certo teor de asfalto, desempenha um papel crucial na estabilidade da mistura asfáltica e na resistência aos afundamentos por deformação permanente. Uma mistura asfáltica com um esqueleto de agregados bem travado é capaz de suportar as cargas aplicadas sem sofrer deformações, garantindo a vida útil projetada (Leandro *et al.*, 2021).

A falta de interligação entre os agregados ou ligação insuficiente do asfalto com o agregado pode resultar em problemas como deformações e até mesmo desagregação no pavimento. Uma das formas de melhorar essa interligação é através da utilização de aditivos modificadores de adesão, que são adicionados ao asfalto. Esses aditivos ajudam a promover uma melhor aderência entre o asfalto e os agregados. Além disso, é importante realizar um controle adequado da granulometria dos agregados, garantindo que eles estejam bem distribuídos e com tamanhos adequados (Gao *et al*, 2018).

Os métodos Bailey e Faixa de Agregados Dominantes podem ser utilizados para determinar as composições granulométricas das misturas asfálticas. Cada método possui sua própria característica e objetivo. O método Bailey é baseado na distribuição granulométrica dos agregados, levando em consideração a porcentagem acumulada retida em cada peneira. A partir desses dados, é possível determinar a curva granulométrica da mistura asfáltica e verificar se ela atende aos requisitos estabelecidos. Já o método Faixa de Agregados Dominantes é utilizado para determinar a faixa granulométrica dos agregados que serão utilizados na mistura asfáltica. Essa faixa é definida a partir da porcentagem acumulada retida em cada peneira, levando em consideração os limites estabelecidos para cada tamanho de agregado, avalia a granulometria e a volumetria de misturas (Guimarães *et al*, 2022).

Quando agregados de maior Tamanho Máximo Nominal (TMN) são utilizados em uma mistura asfáltica, isso pode resultar em um aumento da textura superficial da matriz pétreas, relacionada à microtextura. A textura superficial da matriz pétreas é importante para a aderência entre os agregados e o asfalto. Quanto maior a textura superficial, maior será a área de contato entre os agregados e o asfalto, o que contribui para uma melhor adesão e, conseqüentemente, para uma maior resistência da mistura asfáltica. Agregados de maior TMN podem proporcionar uma maior rugosidade na superfície do pavimento, o que melhora a aderência dos pneus e a drenagem da água, reduzindo o risco de aquaplanagem (Araujo *et al*, 2021).

O desempenho dos pavimentos asfálticos depende das propriedades e proporções dos principais componentes constituintes do revestimento, que são os agregados, os asfaltos e o volume de vazios. Os agregados desempenham um papel fundamental, representando mais de 90% do volume total das misturas asfálticas, têm como função principal formar o esqueleto estrutural da mistura asfáltica, que é responsável por resistir ao movimento dos veículos. Esse esqueleto estrutural é formado pelas partículas de agregados de vários tamanhos, com características de forma, angularidade e textura adequadas (Gouveia, 2015).

De modo geral, as propriedades dos agregados influenciam diretamente e fortemente na deformação permanente de uma mistura e menos no trincamento por fadiga e nas trincas a baixa temperatura (Zanella, 2013).

2.5.2 Dosagem das misturas asfálticas

A dosagem de uma mistura asfáltica consiste na escolha de um teor "ótimo" (ou de projeto) de asfalto por meio de procedimentos experimentais. O processo de dosagem de uma mistura asfáltica envolve a determinação dos parâmetros volumétricos (Volume de vazios - V_v , vazios de ar nas misturas asfálticas compactadas; Volume de vazios nos agregados minerais - VAM, vazios de ar e asfalto efetivo na mistura asfáltica; Vazios cheios com betume – VCB, asfalto disponível e absorvido para a mistura; Relação betume vazios, dada pela razão asfalto efetivo/VAM) e do teor de asfalto de projeto. A dosagem é realizada por meio de experimentos laboratoriais, nos quais diferentes teores de asfalto são testados para avaliar o desempenho da mistura (Bernucci *et al.*, 2022).

Os métodos de dosagem Marshall e SUPERPAVE são amplamente utilizados, cada um com suas próprias diretrizes e critérios para determinar o teor de asfalto, no Brasil o método Marshall é o mais difundido (Graça, Cardoso, Cavalcante, 2016).

O método Marshall leva em consideração a distribuição granulométrica dos agregados e parâmetros volumétricos para estabelecer o teor de asfalto necessário para obter uma mistura com as propriedades desejadas (Guimarães *et al.*, 2022). No Brasil, o ensaio Marshall segue a normativa DNER-ME 043/95 (1995).

Segundo Bernucci *et al.* (2022), o método SUPERPAVE, utilizado nos Estados Unidos desde 1993, propõe uma abordagem diferente da dosagem Marshall. Uma das principais diferenças está na forma de compactação, feita por amassamento no SUPERPAVE e por impacto no Marshall. É importante ressaltar que, apesar da busca por uma maior densidade, é necessário manter um espaço mínimo de vazios para a incorporação do asfalto, garantindo durabilidade e prevenindo a exsudação.

Os asfaltos modificados possuem características não-Newtonianas e requerem atenção especial durante o processo de dosagem das misturas asfálticas para revestimento de pavimento rodoviário. É necessário considerar as propriedades reológicas específicas desses asfaltos modificados para garantir a obtenção de misturas com as propriedades desejadas. Essas propriedades reológicas influenciam a capacidade do asfalto de resistir às cargas e deformações impostas pelo tráfego, afetando a vida útil e o desempenho do pavimento (Graça, Cardoso, Cavalcante, 2016).

2.5.3 Características mecânicas das misturas asfálticas

Nos métodos de dimensionamento empírico-mecanicistas utilizam-se o cálculo das tensões e deformações impostas à estrutura de pavimento. Neste caso, deve-se obter a resistência à fadiga da mistura asfáltica, expressa por uma lei e controle do afundamento de trilhas de roda, ou seja, avaliação da resistência à deformação permanente. Além disso, as camadas do pavimento devem ser caracterizadas em termos de rigidez (módulo de resiliência). Dessa forma a caracterização mecânica das misturas asfálticas para obter um pavimento com a vida útil de projeto desejável é indispensável (Medina, Motta, 2005).

Com o objetivo de simular a realidade de campo referente à ação do tráfego, são realizados ensaios estáticos e/ou dinâmicos (de cargas repetidas). Por meio dos ensaios são determinados os parâmetros necessários (Cezar Junior, 2008). Os valores limites dos materiais estabelecidos podem ser associados à resistência dos materiais das camadas dos pavimentos rodoviários (Soares, 2020).

Um dos ensaios comumente usados no Brasil para medição da rigidez das misturas asfálticas é de módulo de resiliência (MR), estabelecido de acordo com a norma DNIT 135 (2018). O ensaio é realizado através de uma carga aplicada repetidamente no plano diametral vertical de um corpo de prova cilíndrico, para obter o deslocamento diametral recuperável na direção horizontal em uma certa temperatura (T). Os corpos de provas são moldados no compactador Marshall (ou giratório SUPERPAVE) com as dimensões de 100 mm de diâmetro e 63,5 mm de altura (DNIT, 2018). O MR é calculado pela Equação (4).

$$\epsilon_x = \frac{1}{MR} (\sigma_x - \mu \sigma_y) \quad (4)$$

Onde:

ϵ_x = deformação de tração no diâmetro horizontal;

σ_x = tensão horizontal;

σ_y = tensão vertical;

μ = coeficiente de Poisson;

MR = módulo de resiliência.

O ensaio de *Flow Number* (FN) em misturas asfálticas é normatizado no Brasil pela norma DNIT 184 (2018) para avaliar a resistência à deformação permanente das misturas asfálticas. O procedimento do ensaio, também denominado de *creep* dinâmico, consiste em

um carregamento cíclico por compressão axial com frequência 0,1 segundos e repouso de 0,9 segundos. Em geral o ensaio é realizado na temperatura de 60 °C. Os corpos de provas são moldados com as seguintes dimensões: 150 mm de diâmetro e 102 mm de altura (DNIT, 2018).

O DNIT (MeDiNa) considera os limites do FN em classes em função do tráfego, como mostra a Tabela 5, N_{USACE} se refere ao número N (número de eixos equivalentes ao eixo-padrão de 80 kN) adotado no Brasil.

Tabela 5. FN para diferentes volumes de tráfego.

| Classe | <i>Flow Number</i> (FN) | Volume de tráfego (número N_{USACE}) - condições normais | Volume de tráfego (número N_{USACE}) - condições severas |
|--------|-------------------------|---|---|
| 1 | FN < 100 | $N < 1 \times 10^6$ | Não recomendado |
| 2 | $100 \leq FN < 300$ | $1 \times 10^6 \leq FN < 1 \times 10^7$ | $N < 1 \times 10^6$ |
| 3 | $300 \leq FN < 750$ | $1 \times 10^7 \leq FN < 1 \times 10^8$ | $1 \times 10^6 \leq FN < 1 \times 10^7$ |
| 4 | $750 \leq FN < 2.000$ | $FN \geq 1 \times 10^8$ | $1 \times 10^7 \leq FN < 1 \times 10^8$ |
| 5 | $FN \geq 2.000$ | - | $FN \geq 1 \times 10^8$ |

Fonte: DNIT, 2020.

A fadiga é um fenômeno atribuído à repetição de cargas e ocorre por meio de ações mecânicas e/ou térmicas em uma estrutura sujeita a carregamento cíclico. A vida de fadiga de uma mistura asfáltica pode ser definida em termos de vida de fratura (N_f), número total de aplicação de uma carga para a fatura completa, ou vida de serviço (N_S), número total de aplicações de carga que reduza a rigidez inicial a um nível preestabelecido (Bernucci, 2022).

O ensaio geralmente empregado consiste em registrar o número de ciclos até atingir ruptura (convencionada) da amostra da mistura asfáltica e a análise pode ser realizada em função da deformação ou tensão de tração através das Equações (5) e (6):

$$N = a(\epsilon)^b \quad (5)$$

$$N = a(\sigma)^b \quad (6)$$

Onde:

N é a vida de fadiga expressa em número de solicitações de carga;

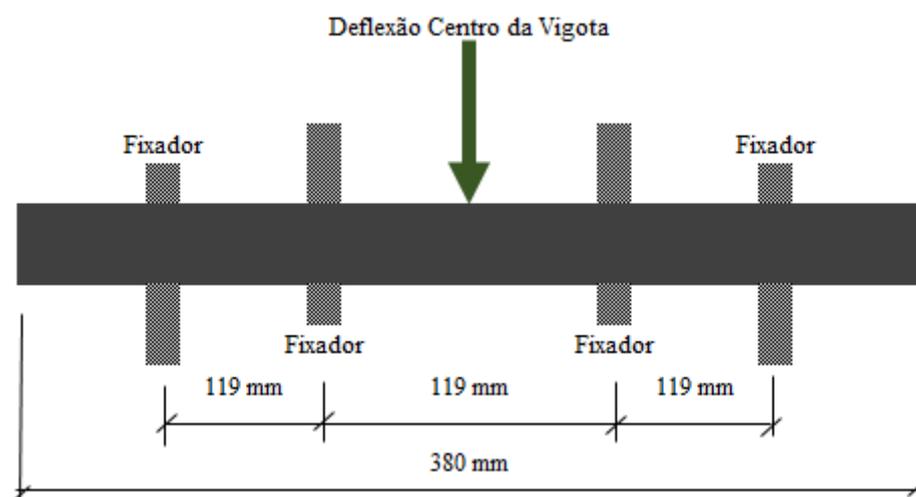
ϵ é a deformação de tração controlada;

σ é a tensão de tração controlada;

a e b são constantes determinada experimentalmente.

O ensaio de flexão em viga quatro pontos é normatizado nos Estados Unidos pelas normas AASHTO T-321 (2022) e ASTM D7460 (2010). O ensaio de flexão em viga de quatro pontos realizado através da norma AASHTO T-321 (2022), consiste em submeter o corpo de prova no formato prismático e apoiado em quatro pontos, a cargas verticais, provocando um estado de tração no corpo de prova, entre os dois apoios, representando o comportamento de campo em relação a fadiga das misturas asfálticas, conforme representado na Figura 8.

Figura 8. Configuração do ensaio de fadiga à flexão alternada em quatro pontos.



Fonte: Autor (2024).

Segundo a norma AASHTO T-321 (2022), a frequência de ensaio é 10 Hz, que é considerada adequada em representar a frequência de tráfego na velocidade de aproximadamente 72 km/h. A temperatura de ensaio, em geral é de 20°C a 25°C. O ensaio pode ser conduzido em modo de tensão controlada, cujo critério de ruptura (término do ensaio) é a ruptura total da amostra, ou em deformação controlada, no qual o critério é a redução de 50% da rigidez inicial (AASHTO, 2022).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho incluem os asfaltos *Polymer Modified Bitumen* (PMB), com polímero SBS (CAP 60/85) e com borracha (AB8) e, agregados e aditivos.

O método adotado para atingir os objetivos propostos envolveu a realização de ensaios tecnológicos que foram realizados no Laboratório do Centro de Pesquisas Rodoviárias – CCR Rodovias. Inicialmente foi descrito o método proposto para uso do asfalto importado em blocos. Posteriormente foi apresentado o método dos ensaios reológicos de avaliação dos asfaltos e de comportamento mecânico das misturas produzidas com os asfaltos estudados.

3.1 MÉTODO PROPOSTO DE ARMAZENAMENTO E VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DO ASFALTO IMPORTADO

O asfalto *Polymer Modified Bitumen*, modificado por SBS, é um material amplamente utilizado nas misturas asfálticas de estradas e rodovias na Rússia. A Distribuidora Gazprom, sediada em Ryazan, na Rússia forneceu o material e atestou a classificação conforme especificação SUPERPAVE (norma ASTM D6373, 2021), conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Especificação o asfalto importado *Polymer Modified Bitumen* (PMB).

| Dados | Descrição |
|--------------------|--|
| Produto | <i>Polymer Modified Bitumen</i> PG 76-28 |
| Data de fabricação | Março de 2020 |
| Peso líquido | 985 kg (+/- 10%) por bloco |
| Peso bruto | 1055 kg (+/- 10%) por bloco |
| País de origem | Rússia |
| Fabricante | <i>Gazpromneft Bitumen Materia.</i> |

Fonte: Adaptado Gazprom (2020).

De acordo com a empresa fornecedora, o asfalto foi classificado como PG 76-28, o que significa que este asfalto atenderia às exigências de temperatura máxima de 76°C e mínima de -28°C. Ressalta-se que o relatório dos ensaios que comprovam que o asfalto foi classificado como um PG 76-28 não acompanharam os lotes. Apesar da falta de resultados específicos de pesquisas relacionadas ao desempenho do asfalto importado *Polymer Modified Bitumen*, é importante destacar que a Rússia possui um vasto território e condições climáticas diversas, o que demanda a utilização de asfaltos de alta qualidade e desempenho.

Iliopolov *et al.* (2016) afirmaram que um dos problemas que ocorrem durante a construção dos pavimentos flexíveis na Rússia é a falta de estabilidade do asfalto em termos de desempenho, o que torna difícil alcançar a qualidade obtida nos pavimentos de outros países europeus. Nos últimos anos, pesquisas russas vêm tentando obter melhoria nos asfaltos por meio de modificações consideradas, de nova geração. Belyaev *et al.* (2021) complementam que a indústria rodoviária na Rússia está passando por uma transição conceitual para a nova geração de normativas e especificações.

Segundo a ANP N° 897 de 2022, os produtos asfálticos devem ser importados com certificado de qualidade emitido por um químico representando a distribuidora. O certificado deve conter: numeração sequencial anual, análises laboratoriais, órgão da classe e nome do profissional (ANP, 2022). No entanto, o asfalto importado foi adquirido anteriormente à Resolução ANP N° 897, sendo necessária a caracterização deste material para conhecimento de seu comportamento. A seguir estão descritas as fases do método proposto.

O asfalto *Polymer Modified Bitumen* foi importado em blocos e no estado semissólido. A primeira preocupação estava relacionada ao armazenamento do material antes da aplicação. O armazenamento do asfalto permite a estocagem em temperatura ambiente, porém, tem-se a necessidade de proteção às intempéries. Para isso, o asfalto em blocos semissólidos foi armazenado sob paletes no galpão (Figura 9a) ou pátio da empresa protegido por lonas plásticas (Figura 9b). O armazenamento constitui sendo a primeira fase do método. Observa-se, na Figura 9 que os blocos estavam embalados em papelão e plástico. Houve ainda o cuidado quanto ao empilhamento, máximo de dois blocos. Os blocos foram empilhados de forma organizada, evitando qualquer tipo de contato com o solo para evitar contaminações do produto e do meio ambiente.

Figura 9. Armazenamento dos asfaltos importados em blocos.



Fonte: Autor (2024).

A segunda fase consistiu na remoção manual da proteção de papelão e plástico (Figura 10a). Caso a embalagem tivesse sido danificada ou apresentasse vazamento de material (Figura 10b), o bloco não era utilizado, sendo descartado. Para o manuseio do bloco

semissólido foi desenvolvida uma garra metálica, acoplada e acionada por um equipamento hidráulico (Figura 10c).

Figura 10. Embalagem e manuseio do bloco semissólido.



(a) Proteção de papelão

(b) Bloco descartado

(c) Garra metálica.

Fonte: Autor (2024).

Outro desafio enfrentado e solucionado na terceira fase, foi realizar a mudança adequada do estado do asfalto, ou seja, a mudança de semissólido para líquido. Os blocos precisavam ser aquecidos de forma homogênea, evitando cortes nas peças (blocos). Foi projetado um “*Melter*” especial (Figura 11a) para o aquecimento do asfalto em blocos (Figura 11b). O aquecimento foi realizado através de serpentinas térmicas que envolvem as paredes internas do “*Melter*”, possuindo um sistema de controle de temperatura que permite ajustar e manter a temperatura desejada durante todo o processo de aquecimento.

Figura 11. Aquecimento do bloco semissólido.



(a) “*Melter*”

(b) Bloco de asfalto no “*melter*”

(c) Asfalto aquecido

Fonte: Autor (2024).

Recomenda-se não retirar completamente o asfalto em estado líquido do “*Melter*” antes de receber o próximo bloco de asfalto no estado semissólido. O asfalto residual atuará como uma fonte de calor para o novo bloco de asfalto, acelerando seu aquecimento e reduzindo a carga de trabalho das serpentinas. Isso resulta em economia de energia e redução dos custos de produção, pois menos energia é necessária para aquecer o novo bloco de asfalto.

Em seguida, na quarta fase, o asfalto (estado líquido) foi bombeado para os tanques da usina de asfalto com as temperaturas estabelecidas a partir do ensaio de viscosidade aparente. Após cada processo de aquecimento, foram coletadas amostras de asfalto e realizados testes para confirmar o enquadramento na especificação brasileira para asfaltos modificados.

A quantidade de asfalto processado no “*melter*”, com capacidade de aquecimento de 35 toneladas, variou de acordo com a produção necessária e o volume de aplicação de campo das misturas asfálticas, evitando o armazenamento prolongado do material e, conseqüentemente, o envelhecimento precoce. O tempo de aquecimento foi em média de 24 horas para 24 blocos. A Figura 12(a) mostra uma vista superior do “*melter*” e das tubulações que bombeiam o asfalto para o tanque da usina de asfalto (Figura 12b).

Figura 12. “*Melter*”, tubulações e tanque da usina de asfalto.



(a) “*Melter*” vista superior

(b) Tanque da usina de asfalto.

Fonte: Autor (2024).

A instalação da estrutura do “*melter*” na usina foi fundamental para garantir a qualidade e a eficiência do processo de produção de misturas asfálticas, além de ser mais econômico, pelo fato de eliminar o custo de transporte.

Para realizar a coleta das amostras de asfalto para ensaios recomenda-se que seja feita após o aquecimento completo do material, quando o asfalto estiver no estado líquido e homogêneo. Este procedimento é importante para garantir a representatividade das amostras e obter resultados precisos nos ensaios de caracterização do asfalto que será utilizado na produção de misturas asfálticas.

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental consistiu inicialmente na caracterização e avaliação das propriedades reológicas de uma amostra de asfaltos modificados, sendo dois asfaltos brasileiros, um asfalto modificado com polímero SBS (CAP 60/85) e um asfalto borracha (AB8) e, o importado *Polymer Modified Bitumen* (PMB). Após, foram produzidas amostras misturas asfálticas com os três asfaltos e avaliado o desempenho mecânico, por meio de ensaios de caracterização física e reológica dos asfaltos e ensaios de desempenho das misturas asfálticas produzidas, foi realizado um comparativo. As etapas do método são a seguir descritas.

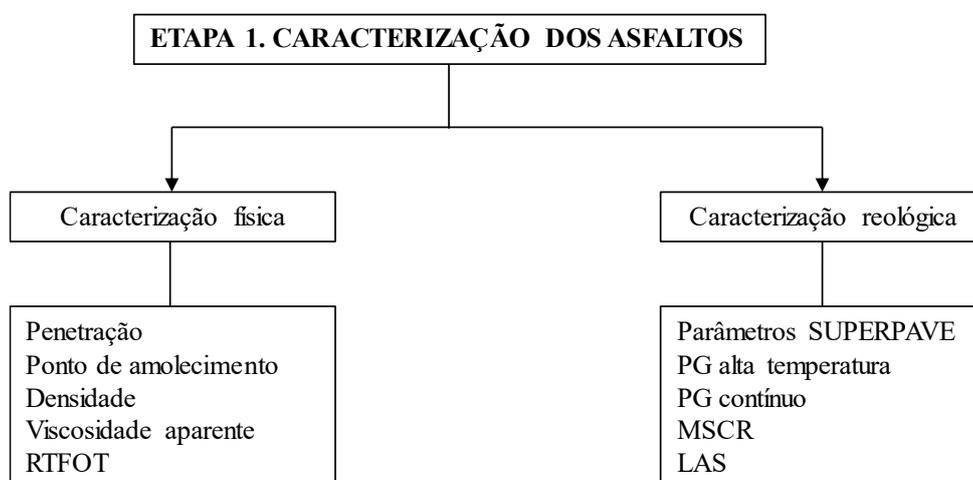
3.2.1 Etapa 1: Caracterização dos asfaltos

Os asfaltos avaliados foram o modificado com SBS 60/85 (DNIT 129, 2011) e com borracha AB8 (DNIT 112, 2009) e o importado *Polymer Modified Bitumen* (PMB). O valor exato de SBS não foi fornecido pelas distribuidoras, por ser informação confidencial do fabricante. A distribuidora indicou que o percentual de borracha (tipo ambiente) do AB8 é de 15% (CCB Asfaltos, 2020).

A

Figura 13 apresenta o fluxograma do programa experimental de caracterização dos asfaltos, que corresponde à Etapa 1 do método.

Figura 13. Fluxograma da Etapa 1.



Fonte: Autor (2024).

Inicialmente, foram realizados os ensaios de caracterização física para verificação de enquadramento na especificação nacional. Foram realizados os ensaios de penetração, ponto de amolecimento, densidade, viscosidade aparente e de envelhecimento de curto prazo (RTFOT). A Tabela 7 apresenta os ensaios e os métodos utilizados.

Tabela 7. Ensaios de caracterização.

| Ensaio | Descrição | Método |
|--|--|-----------------------|
| Penetração | Corresponde ao valor da penetração, em décimos de milímetros, de uma agulha padrão em condições específicas do ensaio: temperatura (25°C), carga (100 g) e tempo (5 s) | ABNT NBR 6576 (2007) |
| Densidade | Determina a massa específica e a densidade relativa do material betuminoso semissólido. | ABNT NBR 6296 (2012) |
| Ponto de amolecimento | Expressa a temperatura na qual asfalto amolece, avaliada por meio pelo deslocamento de uma esfera de aço padronizada posicionada sobre a amostra de asfalto aquecida em condições padronizadas, a qual atinge o fundo de um béquer de uma altura padrão, | ABNT NBR 6560 (2016) |
| Viscosidade Aparente | Medida da viscosidade aparente por viscosímetro rotacional em três diferentes temperaturas e na temperatura de especificação. Permite obter a curva viscosidade-temperatura para estabelecimento das temperaturas de serviço. | ABNT NBR 15529 (2007) |
| Recuperação Elástica | Determina o grau de elasticidade do asfalto usando equipamento específico de torção | NLT-329 (1991) |
| Envelhecimento em curto prazo (RTFOT) | Simula o envelhecimento relacionado à usinagem e compactação na pista. | ASTM D2872 (2022) |

Fonte: Autor (2024).

Na caracterização reológica, por meio da determinação do módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e do ângulo de fase (δ), foram estabelecidos os parâmetros da especificação SUPERPAVE e determinação do *Performance Grade* (PG) de alta temperatura. A predição de desempenho à fadiga e à deformação permanente foi avaliada por meio dos ensaios *Linear Amplitude Sweep* (LAS) (norma AASHTO T391, 2020) e *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR) (norma AASHTO T350, 2020), respectivamente. Todos os ensaios reológicos foram realizados em um reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) marca *TA Instruments* Modelo DHR-1 (Figura 14).

Figura 14. Reômetro modelo DHR-1.



Fonte: Autor (2024)

Performance Grade – PG

Os parâmetros reológicos módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e ângulo de fase (δ) foram estabelecidos conforme a norma ASTM D6373 (ASTM, 2021) na frequência de 10 Hz, em uma varredura de temperaturas, conforme apresenta a Tabela 8, para determinação dos parâmetros SUPERPAVE de deformação permanente ($|G^*|/\text{sen}\delta$) para determinação do grau alto do PG. O ensaio foi realizado com amostras moldadas na geometria de placas paralelas de 25 mm (*gap* de 1 mm).

Tabela 8. Ensaio para determinação do PG.

| Temperaturas | Temperatura (°C) |
|--------------|--------------------|
| Altas | 52, 58, 64, 70, 76 |

Fonte: Autor (2024).

Multiple Stress Creep Recovery – MSCR

A predição de comportamento à deformação permanente foi determinada no ensaio MSCR, conforme a norma AASTHO T 350 (2020) o ensaio foi realizado com uso de geometria de placas do ensaio de 25 mm, com *gap* de 1 mm.

Os resultados obtidos a partir do MSCR permitiram a obtenção do percentual de recuperação (%R) em todas as temperaturas testadas (56 °C até 76 °C), sendo utilizado para fornecer uma indicação da resposta elástica retardada do asfalto. Também da compliância não-recuperável (J_{nr}), que representa a deformação residual da amostra ensaiada após um

ciclo de carga e recuperação, dividido pela tensão aplicada ($J_{nr0,1}$ para 0,1 kPa, $J_{nr3,2}$ para 3,2 kPa). Quanto maior o seu valor, menos resistente à deformação permanente é o material. Foram calculadas as diferenças percentuais entre a compliância não-recuperável a 0,1 kPa e a 3,2 kPa ($J_{nr,diff}$).

Linear Amplitude Sweep – LAS

A avaliação da predição da fadiga foi avaliada pelo ensaio LAS, de acordo com a norma DNIT 439 (2022). A geometria adotada no ensaio foi de placas paralelas de 8 mm de diâmetro e *gap* de 2 mm. O ensaio foi conduzido na temperatura 19 °C, após o RTFOT, com um carregamento cisalhante oscilatório, com frequência de carregamento constante de 10 Hz. A temperatura de ensaio de 19°C foi escolhida por ser a adotada na norma brasileira DNIT 439 (2022).

A partir dos resultados, foram obtidos os coeficientes do modelo VECD (*Viscoelastic Continuum Damage*) para as amostras analisadas, conforme Equação (7):

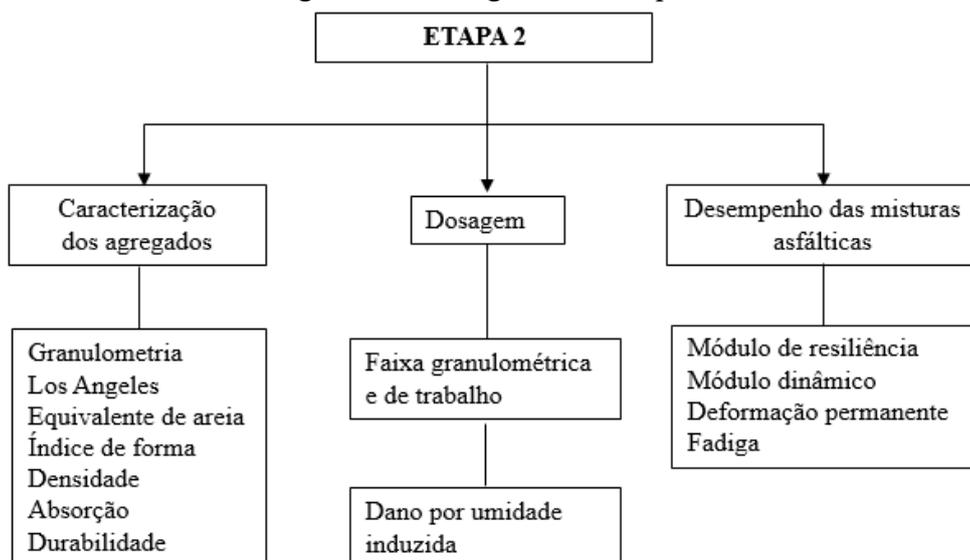
$$N_f = A(\gamma)^{-B} \quad (7)$$

Onde: N_f é o número de ciclos até a ruptura, A e B são os coeficientes da curva de fadiga para cada asfalto e γ é a deformação de cisalhamento aplicada. Os resultados obtidos a partir do LAS permitiram a obtenção do número de ciclos até a falha (N_f) e a curva de fadiga em diferentes níveis de deformação testada.

3.2.2 Etapa 2: Caracterização dos agregados, dosagem e desempenho das misturas asfálticas

A Figura 15 apresenta o fluxograma da Etapa 2, na qual foi realizada a caracterização dos agregados, dosagem e avaliação de desempenho das misturas asfálticas produzidas com os asfaltos estudados.

Figura 15. Fluxograma da Etapa 2.



Fonte: Autor (2024).

Caracterização dos agregados

A avaliação das propriedades dos agregados se faz necessária para a produção das misturas asfálticas, conforme a Tabela 9.

Tabela 9. Normas das propriedades dos agregados para misturas asfálticas.

| Propriedades | Especificação/ Norma | |
|--|---|--|
| Abrasão “Los Angeles” (%) | ABNT NBR 16974 (2022) | Agregados - Ensaios de resistência ao impacto e à abrasão <i>Los Angeles</i> . |
| Equivalente de areia (%) | ABNT NBR 12052 (1992) | Solo ou agregado miúdo - Determinação do equivalente de areia - Método de ensaio. |
| Índice de forma: cúbicas (relação) | ABNT NBR 7809 (2019) | Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. |
| Índice de forma: lamelares e alongadas (%) | ABNT NBR 7809 (2019) | Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. |
| Densidade real | ABNT NBR 16916 (2021) e ABNT NBR 16917 (2021) | Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. |
| Densidade aparente | ABNT NBR 16916 (2021) e ABNT NBR 16917 (2021) | Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. |
| Absorção (%) | ABNT NBR 16916 (2021) e ABNT NBR 16917 (2021) | Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. |
| Durabilidade dos Agregado (%) | AASHTO T-104 (1999) | <i>Standard Method of Test for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.</i> |

Fonte: Autor (2024).

Dosagem das Misturas Asfálticas

A dosagem foi realizada para obtenção dos parâmetros volumétricos e teor de asfalto de projetos. Foram testados quatro teores de asfalto por mistura. A Tabela 10 apresenta a descrição e os métodos dos ensaios usados na dosagem.

Tabela 10. Ensaios usados na dosagem.

| Ensaio | Descrição | Método |
|---------------------------------------|---|---|
| Faixa Granulométrica | Especificação particular utilizada no estudo para o projeto de dosagem da mistura asfáltica da faixa ENGEOLOG EGL 16-19 mm. | EN-000/00-0000.00-GER-A1-PV/ES-E-002- R11 (CCR, 2020) |
| Densidade da mistura asfáltica | Determina a densidade relativa máxima medida, e da massa específica máxima medida de misturas asfálticas não compactadas. | DNIT 427 (2020) |
| Teor ótimo e vazios de ar | Determina o teor ótimo em peso e de porcentagem de vazios de ar da dosagem asfáltica na mistura asfáltica. | DNIT 178 (2018) |
| VAM e VCA | Indica os vazios de agregado mineral (VAM) e os vazios cheios de asfalto (VCA) nas misturas asfálticas. | DNIT 178 (2018) |
| Estabilidade e Fluência | Determina a estabilidade e da fluência das misturas asfálticas, por meio da prensa Marshall. | DNER-ME043/95 (1995) |

Fonte: Autor (2024).

Adicionalmente, as misturas asfálticas foram submetidas ao ensaio de resistência a tração e o dano por umidade induzida (DUI) como mostra a Tabela 11.

Tabela 11. Ensaio de dano por umidade induzida.

| Ensaio | Descrição | Método |
|--|--|---------------------|
| Resistência a tração | Determina a resistência à tração da mistura asfáltica, por meio do ensaio de compressão diametral com carregamento estático crescente até a ruptura (monotônico). | DNIT 136 (2018) |
| Dano por umidade induzida (DUI) | Tem por finalidade, avaliar o dano causado pela umidade em uma mistura asfáltica compactada a partir da perda de uma característica mecânica, quando submetida a uma saturação específica e a ciclos térmicos. | AASHTO T-283 (2022) |

Fonte: Autor (2024).

A dosagem das misturas asfálticas pelo método Marshall foi realizada, para cada mistura, a partir da avaliação dos seguintes teores de asfalto de 4,5%, 5,0%, 5,5% e 6,0%. Estes teores foram selecionados por serem previamente definidos com base no histórico de projetos de misturas asfálticas com o uso dos mesmos agregados, composição granulométrica e asfaltos modificados na CCR (CCR, 2020).

Ensaio de desempenho das misturas asfálticas.

As propriedades mecânicas das misturas asfálticas foram avaliadas por meio dos ensaios de desempenho apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Ensaio de desempenho.

| Ensaio | Descrição | Método |
|---|--|---------------------|
| Módulo de resiliência (MR) | Parâmetro que relaciona a tensão aplicada e as deformações recuperáveis, ou seja, é um parâmetro elástico que avalia a rigidez do material. | ASTM D4123-82(1995) |
| Flow Number (FN) | Estimativa a resistência à deformação permanente de misturas asfálticas a partir do ensaio uniaxial de carga repetida, utilizando o parâmetro denominado Número de Fluxo ou <i>Flow Number</i> . | DNIT 184 (2018) |
| Ensaio de fadiga à flexão em quarto pontos | Determina o comportamento de misturas asfálticas quanto à fadiga sob um carregamento a deformação controlada. | AASHTO T-321 (2014) |

Fonte: Autor (2024).

A seguir os parâmetros de desempenho obtidos pelas as três misturas asfálticas foram comparadas para ordenamento.

3.2.3 Comparativo dos resultados

Foi realizado um comparativo de previsão de desempenho com ordenamento dos asfaltos a partir dos resultados dos ensaios reológicos. Foram usados os parâmetros penetração, densidade, ponto de amolecimento, recuperação elástica (%), viscosidade aparente, variação de massa, $|G^*|$ (módulo de cisalhamento dinâmico), δ (ângulo de fase), $|G^*|/\sin(\delta)$ (deformação permanente), PG em alta temperatura, PG contínuo, J_{nr} (compliância não recuperável) e N_f (número de ciclos até a falha. Após, o desempenho mecânico das misturas foi comparado e realizado o ordenamento. Os resultados de previsão de comportamento dos asfaltos foram comparados aos obtidos pelas misturas. Finalmente, foram feitas considerações acerca do uso do PMB.

4 RESULTADOS

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos em cada etapa do método, descritas no Capítulo 3. A nomenclatura adotada para os asfaltos avaliados foi a seguinte:

- Asfalto importado *Polymer Modified Bitumen*: PMB;
- Asfalto nacional modificado por polímero SBS: CAP 60/85;
- Asfalto nacional modificado com borracha: AB8.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS ASFALTOS

4.1.1 Caracterização física

A Tabela 13 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física dos asfaltos.

Tabela 13. Resultados de caracterização dos asfaltos.

| Parâmetros | Asfaltos | | |
|---|--------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| | PMB (importado) | CAP 60/85 | AB8 |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (0,1 mm) | 45,5 | 48,0 [40 - 70 ¹] | 49,5 [30 - 70 ²] |
| Densidade | 1,006 | 1,010 | 1,031 |
| Ponto de amolecimento (°C) | 82,3 | 71,3[≥ 60 ¹] | 59,5 [mín.55 ²] |
| Recuperação elástica (%) | 80 | 68 [≥ 60 ¹] | 78 [mín. 50 ²] |
| Viscosidade aparente ³ (cP) | | | |
| 135°C, 20 rpm, <i>spindle</i> 21 | 2.510 | 2.150 [máx. 3.000 ¹] | - |
| 150°C, 50 rpm, <i>spindle</i> 21 | 1.105 | 951 [máx. 2.000 ¹] | - |
| 177°C, 100 rpm, <i>spindle</i> 21 | 350 | 318 [máx. 1.000 ¹] | - |
| 175°C, 100 rpm, <i>spindle</i> 3 | - | - | 1.685 [800 – 2.000 ²] |
| RTFOT, 163°C, 85 min | | | |
| Varição em massa (%) | 0,6 | 0,4 [máx. 1,0] | 0,5 [máx. 1,0] |

Especificações: ¹Especificação – Tabela A3 (ANEXO A); ² Especificação – Tabela A4 (ANEXO A). ³Viscosímetro Brookfield.

Fonte: Autor (2024)

Os resultados dos ensaios de caracterização (Tabela 13) mostraram que os asfaltos brasileiros (CAP 60/85 e AB8) satisfizeram os limites estabelecidos pelas respectivas especificações e podem ser utilizados nas produções das misturas asfálticas. Considerando a especificação brasileira, o asfalto PMB se enquadrado na norma (DNIT 129, 2011). Dentre

os três asfaltos, o PMB apresentou uma maior rigidez, a partir do resultado de penetração. O ponto de amolecimento (ensaio empírico) do asfalto PMB foi mais elevado, indicando uma tendência de maior resistência à deformação permanente em relação aos demais.

Nas temperaturas avaliadas, a viscosidade aparente do asfalto PMB foi mais elevada que o CAP 60/85 (Ambos modificados por SBS), porém, nas temperaturas de produção da mistura asfáltica (acima de 170°C), os valores foram similares. Em alta temperatura, o asfalto AB8 obteve maior viscosidade.

No ensaio de envelhecimento em curto prazo (RTFOT) observou-se que quanto à perda de massa, todos os asfaltos atenderam às respectivas especificações. O asfalto PMB obteve a maior perda de massa, indicando maior suscetibilidade à perda de componentes voláteis durante a produção e compactação das misturas asfálticas em campo.

Com relação aos resultados de recuperação elástica, pôde-se observar que esta foi maior para os asfaltos PMB (80%) e AB8 (78%). Comparativamente, em relação ao asfalto CAP 60/85, a recuperação elástica do asfalto PMB foi cerca de 12% mais elevada.

4.4.2 Caracterização reológica

Parâmetro $|G^|/\text{sen } \delta$*

Os resultados dos ensaios reológicos conduzidos em elevadas temperaturas para obtenção das propriedades $|G^*|$ (módulo de cisalhamento dinâmico), e δ (ângulo de fase), são mostrados na Tabela 14, nas condições das amostras virgens e envelhecidas (pós RTFOT).

Tabela 14. Propriedades reológicas $|G^*|$ e (δ).

| Asfaltos | Temperatura (°C) | | | | | | | | | | | |
|-----------|------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| | 58 | | 64 | | 70 | | 76 | | 82 | | 88 | |
| | G^* (kPa) | δ (°) | G^* (kPa) | δ (°) | G^* (kPa) | δ (°) | G^* (kPa) | δ (°) | G^* (kPa) | δ (°) | G^* (kPa) | δ (°) |
| PMB | 6,69 | 50,9 | 4,18 | 50,9 | 2,66 | 51,5 | 1,71 | 52,36 | 1,15 | 53,8 | 0,78 | 55,8 |
| CAP 60/85 | 5,22 | 64,0 | 3,03 | 62,4 | 1,83 | 61,4 | 1,16 | 61,1 | 0,74 | 61,5 | 0,48 | 62,4 |
| AB8 | 5,23 | 68,8 | 2,97 | 70,7 | 1,74 | 72,9 | 1,00 | 74,8 | 0,61 | 76,8 | 0,38 | 79,1 |
| Após RTFO | | | | | | | | | | | | |
| PMB | 15,13 | 47,7 | 9,35 | 47,6 | 5,85 | 47,9 | 3,7 | 48,7 | 2,45 | 50,1 | 1,56 | 52,1 |
| CAP 60/85 | 9,02 | 63,3 | 5,02 | 61,5 | 2,98 | 60,5 | 1,84 | 60,1 | 1,13 | 60,4 | 0,72 | 61,2 |
| AB8 | 11,98 | 63,6 | 6,69 | 65,2 | 3,96 | 67,3 | 2,35 | 69,5 | 1,43 | 71,7 | 0,88 | 73,9 |

G^* - Módulo complexo de cisalhamento; δ - ângulo de fase.

Fonte: Autor (2024).

A análise dos resultados (Tabela 14) mostrou que para todos os asfaltos houve uma redução de $|G^*|$ com o aumento da temperatura de ensaio. Tanto na condição virgem quanto envelhecida, os maiores valores de $|G^*|$ foram obtidos pelo asfalto PMB. Quanto aos demais, não foi observada variação significativa quando os asfaltos são avaliados individualmente. Os maiores valores do ângulo de fase foram obtidos pelo asfalto AB8, indicando uma componente viscosa mais elevada na gama de temperaturas testadas.

A partir dos resultados da Tabela 14, foram calculados e verificados o atendimento do parâmetro de deformação permanente $G^*/\text{sen}(\delta)$ à especificação SUPERPAVE (ASTM D6373, 2021) mostrados na Tabela 15.

Tabela 15. Parâmetro $G^*/\text{sen}(\delta)$.

| Asfaltos | Temperatura (°C) | | | | | |
|--------------------------------|------------------|-------|------|-------------|-------------|------|
| | 58 | 64 | 70 | 76 | 82 | 88 |
| $G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa) | | | | | | |
| PMB | 8,62 | 5,39 | 3,40 | 2,16 | 1,42 | 0,94 |
| CAP 60/85 | 5,81 | 3,43 | 2,09 | 1,33 | 0,84 | 0,54 |
| AB8 | 5,61 | 3,15 | 1,82 | 1,04 | 0,63 | 0,39 |
| Após RTFO | | | | | | |
| PMB | 20,45 | 12,67 | 7,88 | 4,93 | 3,19 | 1,98 |
| CAP 60/85 | 10,10 | 5,70 | 3,43 | 2,21 | 1,30 | 0,82 |
| AB8 | 13,36 | 7,36 | 4,29 | 2,51 | 1,51 | 0,91 |

G^* - módulo complexo de cisalhamento; δ - ângulo de fase.

Fonte: Autor (2024).

A especificação SUPERPAVE estabelece como requisito de PG em alta temperatura que na condição virgem, o $G^*/\text{sen}(\delta)$ deve ser no mínimo, 1,0 kPa e, na condição envelhecida (RTFOT), no mínimo, 2,2 kPa. O atendimento da especificação (destaque em negrito na Tabela 15), para os asfaltos foi a seguinte:

- Na condição virgem, os asfaltos CAP 60/85 e AB8 atenderam a especificação na alta temperatura (PG) de 76°C, com os valores de 1,33 kPa e 1,04 kPa, respectivamente. A mesma temperatura foi atendida para estes asfaltos na condição de envelhecimento em curto prazo, sendo, 2,51 kPa para o asfalto AB8 e 2,21 kPa para o asfalto CAP 60/85;
- O asfalto PMB atendeu, os requisitos, nas duas condições para a temperatura de 82°C (em negrito na Tabela 15).

O fabricante do asfalto PMB classificou o PG em alta temperatura em 76°C (Tabela 6), mas o PG obtido no asfalto PMB do estudo foi de 82°C, um PG acima do informado pelo fabricante.

A partir dos resultados do $|G^*|/\text{sen}(\delta)$, nas temperaturas de atendimento aos requisitos e a próxima, de “falha”, foi calculado o PG contínuo (ou verdadeiro), em conformidade com a norma ASTM D7643 (2016), cujos resultados são representados na Tabela 16.

Tabela 16. PG contínuo dos asfaltos.

| Asfaltos | PG contínuo, condição virgem (°C) | PG contínuo, após RTFO (°C) |
|-----------|-----------------------------------|-----------------------------|
| PMB | 87,1 | 86,7 |
| CAP 60/85 | 77,8 | 76,3 |
| AB8 | 76,1 | 77,0 |

Fonte: Autor (2024).

De acordo com a Tabela 15 e a Tabela 16, pode-se afirmar que:

- O PG em alta temperatura do asfalto PMB foi de 82°C (Tabela 15), porém, este asfalto atenderia uma temperatura de até 86,7°C (Tabela 16);
- Os asfaltos CAP 60/85 e AB8, atenderam a especificação SUPERPAVE® e foram classificados como PG76-XX (Tabela 15), no entanto, o PG contínuo resultou em um PG76,3-XX e PG76,1-XX (Tabela 16), respectivamente.

Os resultados das Tabelas Tabela 14, Tabela 15 e Tabela 16 demonstram que o asfalto PMB obteria um melhor desempenho em relação aos demais. O asfalto PMB apresentou valores mais baixos de ângulo de fase, indicando maior elasticidade, com tendência a ter melhor comportamento em relação à deformação permanente e à fadiga. O asfalto AB8 apresentou um valor crescente de ângulo de fase em relação à temperatura inicial e às temperaturas mais elevadas, o que representa um maior componente viscoso.

Ensaio MSCR

No ensaio do MSCR (AASHTO T 350, 2018), foram usadas amostras envelhecidas em curto prazo no RTFOT. Neste ensaio, foram obtidos os parâmetros J_{nr} (compliance não recuperável) e de recuperação elástica (R em %). Os resultados deste ensaio para comparação entre os asfaltos foram os obtidos para o PG de alta temperatura. Entretanto, considerou-se importante realizar a avaliação numa gama de temperaturas, visto que no Brasil as temperaturas máximas de pavimentos variam entre 64 °C e 70 °C (DNIT, 2020). A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos nesse ensaio para os diferentes tipos de asfalto estudados, nas temperaturas variando de 58°C até 76°C a temperatura correspondente ao PG de altas

temperaturas dos asfaltos CAP 60/85 e AB8 para efeito comparativo. A Tabela 17 apresenta ainda os valores de $J_{nr\text{dif}}$.

Tabela 17. Resultados do ensaio MSCR.

| Asfaltos | PG | Temperatura (°C) | R _{0,1} (%) | J _{nr0,1} (kPa ⁻¹) | R _{3,2} (%) | J _{nr3,2} (kPa ⁻¹) | J _{nr\text{dif}}} (%) |
|-----------|----|------------------|----------------------|---|----------------------|---|--------------------------------|
| PMB | 82 | 58 | 94,9 | 0,0121 | 91,4 | 0,0215 | 77,3 |
| | | 64 | 94,8 | 0,0205 | 88,1 | 0,0364 | 77,9 |
| | | 70 | 92,8 | 0,0453 | 88,3 | 0,0720 | 59,0 |
| | | 76 | 88,7 | 0,115 | 80,6 | 0,1932 | 68,0 |
| CAP 60/85 | 76 | 58 | 86,0 | 0,0665 | 82,3 | 0,0824 | 24,0 |
| | | 64 | 84,2 | 0,1343 | 77,9 | 0,1514 | 12,8 |
| | | 70 | 80,0 | 0,2936 | 76,8 | 0,2971 | 1,2 |
| | | 76 | 73,6 | 0,6569 | 68,0 | 0,6579 | 0,2 |
| AB8 | 76 | 58 | 65,1 | 0,1541 | 45,4 | 0,2553 | 65,7 |
| | | 64 | 69,0 | 0,2533 | 26,7 | 0,6503 | 156,8 |
| | | 70 | 60,3 | 0,5922 | 16,0 | 1,5035 | 153,9 |
| | | 76 | 54,9 | 1,1673 | 6,8 | 3,1548 | 170,3 |

R_{0,1} - recuperação na tensão de 0,1 kPa; J_{nr0,1} - compliância não recuperável na tensão de 0,1 kPa;

R_{3,2} - recuperação na tensão de 3,2 kPa; J_{nr3,2} - compliância não recuperável na tensão de 3,2 kPa;

J_{nr\text{dif}}} - diferença percentual entre os diferentes níveis do J_{nr}.

Fonte: Autor (2024).

Os resultados da Tabela 17 mostraram que o asfalto PMB obteria um desempenho superior aos asfaltos CAP 60/85 e AB8. Pôde-se notar também que todos os asfaltos apresentaram valores elevados de recuperação em toda a gama de temperaturas. Porém, o asfalto PMB foi o que apresentou melhor desempenho com relação a recuperação elástica para os valores de R_{0,1} (88,7%) e R_{3,2} (80,6%) para temperatura de 76°C.

De acordo com os resultados de J_{nr3,2}, principal parâmetro avaliado (normas AASHTO T350, 2018; AASHTO M332, 2018), e de classificação dos asfaltos quanto à resistência deformação permanente, pode-se aferir, de acordo com a Tabela 17, que (valores destacados em negrito):

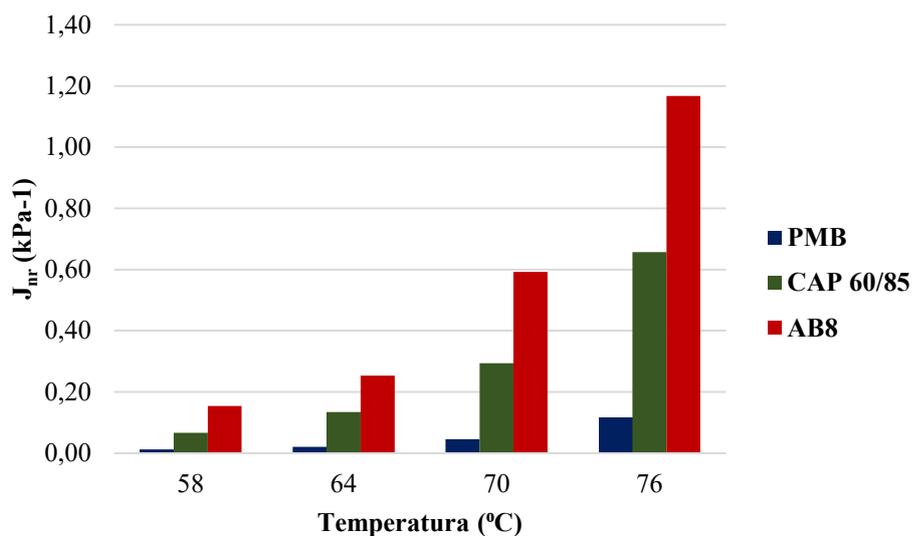
- O asfalto PMB (J_{nr3,2} de 0,1932 kPa⁻¹) obteve o melhor desempenho com menor valor de compliância não recuperável na temperatura de 76°C;
- O asfalto AB8 obteve valores de compliância não recuperável superiores aos medidos para os demais asfaltos e assim, uma maior tendência ao desenvolvimento de deformação permanente.

Os asfaltos apresentaram uma elevada recuperação, principalmente em temperaturas de até 70°C. No entanto, para valores mais elevados de temperatura o asfalto AB8 apresentou redução no resultado de recuperação. O asfalto AB8 quando próximo ao seu valor de grau de desempenho (76°C), obteve valores mais elevados de J_{nr} e redução dos valores de recuperação elástica. Em contrapartida, os asfaltos PMB e CAP 60/85 mantiveram um elevado percentual de recuperação elástica mesmo em altas temperaturas. Observou-se também, uma diferença dos asfaltos no parâmetro do $J_{nr\text{diff}}$, diferença entre os dois níveis de carregamento, onde o asfalto AB8 apresentou valores consideravelmente mais elevados do que os asfaltos PMB e CAP 60/85.

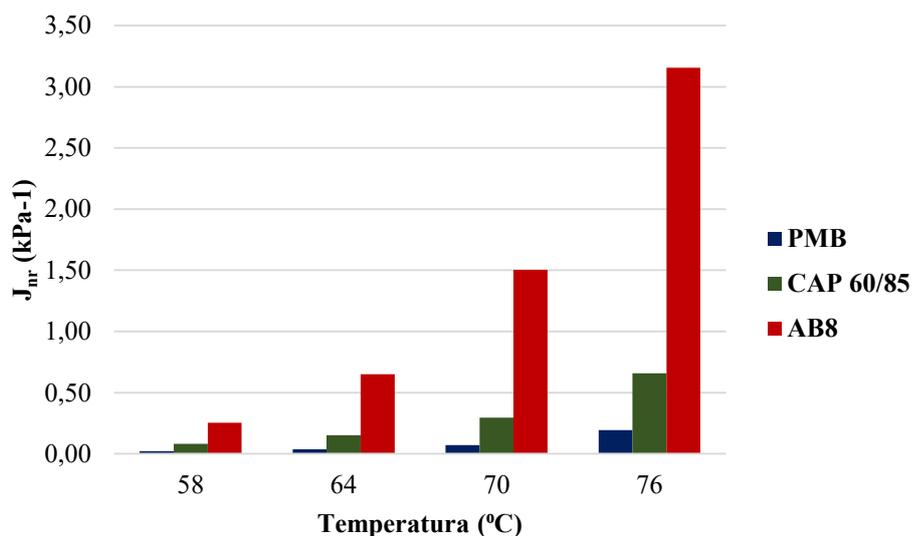
Considerando os valores obtidos de $J_{nr3,2}$ e de $J_{nr\text{diff}}$ (Tabela 17) e análise dos dados em conjunto, de modo a classificar quanto ao tráfego, de acordo com norma AASHTP M332 (2018), tem-se:

- O asfalto CAP 60/85 (PG 76-XX) poderia ser utilizado para altos volumes de tráfego na condição V (tráfego muito pesado), e o parâmetro do $J_{nr\text{diff}}$ ficou dentro do limite estabelecido;
- O asfalto AB8 (PG 76-XX) poderia ser utilizado para tráfego padrão na condição S. No entanto, o parâmetro $J_{nr\text{diff}}$ ultrapassou o limite máximo de 75%;
- O asfalto PMB poderia ser utilizado na condição de tráfego E (tráfego extrapesado) e ESAL (eixo simples padrão equivalente) superior a 30 milhões. O parâmetro $J_{nr3,2}$ apresentou valor abaixo de 0,5, o que representa um asfalto extremamente rígido. Nesse caso a perda de rigidez por cisalhamento com tensão aumentada é mínima e o requisito do limite máximo de 75% do $J_{nr\text{diff}}$ pode ser desprezado.

As Figura 16 e Figura 17 apresentam um comparativo de J_{nr} nas tensões de 0,1 kPa e 3,2 kPa obtidas para os asfaltos avaliados.

Figura 16. Valor de J_{nr} para a tensão de 0,1kPa.

Fonte: Autor (2024).

Figura 17. Valor de J_{nr} para a tensão de 3,2kPa.

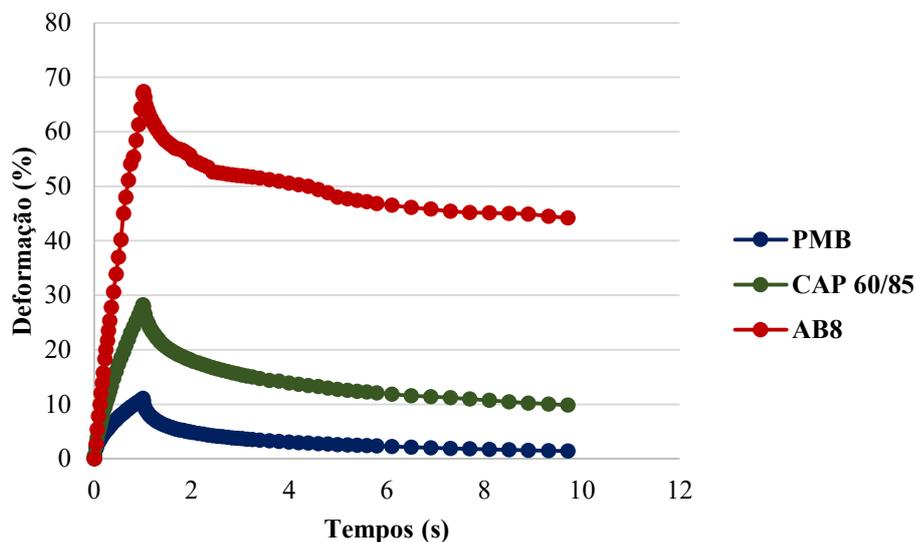
Fonte: Autor (2024).

A partir da Figura 16 e da Figura 17 percebeu-se uma diferença na ordem de grandeza dos resultados de J_{nr} , onde o asfalto PMB apresentou um valor de compliância não recuperável menor para ambos os patamares de tensão, resultando em um material mais rígido e, por consequência, menos suscetível à deformação permanente.

Variações no comportamento de recuperação elástica dos asfaltos podem auxiliar na seleção para cada situação específica. A análise dos resultados do ensaio MSCR mostrou que em uma condição de alto volume de tráfego e de tráfego extrapesado, o selecionado seria o asfalto PMB.

Para a visualização gráfica do mecanismo de recuperação apresentado pelos diferentes asfaltos, a Figura 18 ilustram um dos ciclos de deformação e recuperação obtidos no ensaio MSCR.

Figura 18. Recuperação durante um ciclo do ensaio, ciclo 11, 0,1kPa, 76°C.



Fonte: Autor (2024).

A partir da Figura 18 foi possível observar uma recuperação ao longo dos 9 segundos de intervalo de recuperação para todos os asfaltos no estágio de tensão de 0,1 kPa e temperatura de 76°C. O asfalto AB8 apresentou uma deformação superior e a recuperação ficou inferior aos demais. Comparando o PMB com o CAP 60/85, o primeiro apresentou menor deformação e maior recuperação elástica. As diferenças no comportamento ($J_{nr\text{diff}}$) foram apresentados na Tabela 17, onde o asfalto AB8 apresentou valores elevados, enquanto o CAP 60/85, valores reduzidos desse parâmetro.

Ensaio LAS

No ensaio LAS, que prevê o comportamento dos asfaltos quanto ao fenômeno da fadiga, os asfaltos foram avaliados em condição de envelhecimento após o RTFOT na temperatura de 19 °C.

O parâmetro avaliado foi o N_f (número de ciclos até a falha) e foi apresentada a curva de fadiga. A Tabela 18 apresenta os resultados do ensaio LAS para os asfaltos nos diferentes níveis de deformação testados. A Figura 19 mostra as curvas de fadiga obtidas.

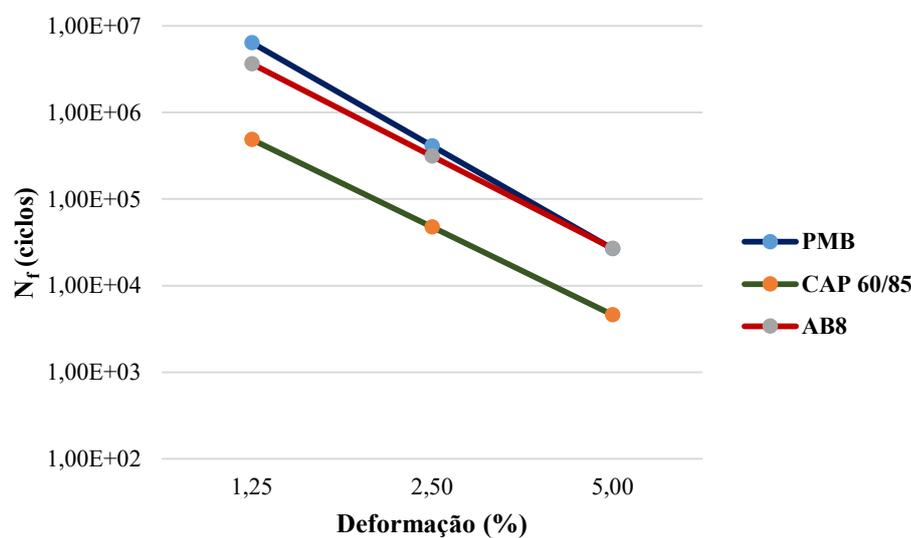
Tabela 18. Resultados do ensaio LAS.

| Asfaltos | Deformação (%) | Número de Ciclos (N_f) | α | A | B |
|-----------|----------------|----------------------------|----------|----------|-------|
| PMB | 1,25 | 6,36E+06 | 1,97 | 1,53E+07 | -3,95 |
| | 2,50 | 4,12E+05 | | | |
| | 5,00 | 2,67E+04 | | | |
| CAP 60/85 | 1,25 | 4,87E+05 | 1,68 | 1,03E+06 | -3,36 |
| | 2,50 | 4,74E+04 | | | |
| | 5,00 | 4,61E+03 | | | |
| AB8 | 1,25 | 3,65E+06 | 1,77 | 8,05E+06 | -3,54 |
| | 2,50 | 3,14E+05 | | | |
| | 5,00 | 2,70E+04 | | | |

α , A e B são coeficientes dependentes das características dos materiais.

Fonte: Autor (2024).

Figura 19. Resultado LAS, Curva de fadiga.



Fonte: Autor (2024).

De acordo com os resultados mostrados na Tabela 18 e na Figura 19, pode-se afirmar que:

- O asfalto CAP 60/85 apresentou resultados inferiores aos outros asfaltos em todos os níveis avaliados;
- O asfalto PMB e AB8 apresentaram resultados semelhantes e superiores ao asfalto CAP 60/85;

4.1.1 Resumo dos ensaios reológicos

A partir dos resultados apresentados, os asfaltos analisados foram ordenados de acordo com o parâmetro principal de cada ensaio. Com o objetivo de classificar os asfaltos em relação ao melhor desempenho, foram considerados o parâmetro do $G^*/\text{sen}(\delta)$ e o $J_{nr3,2}$ para a deformação permanente e o N_f para a fadiga, como mostrado na Tabela 19.

Tabela 19. Ordenamento dos asfaltos.

| Asfaltos | Parâmetro | Parâmetro | MSCR | MSCR | LAS |
|-----------|--|---|----------|----------------|-----|
| | SUPERPAVE® $G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa) virgem | SUPERPAVE® $G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa) pós RTFOT | R3,2 (%) | Jnr3,2 (kPa-1) | Nf |
| PMB | 1º | 1º | 1º | 1º | 1º |
| CAP 60/85 | 3º | 2 | 2º | 2º | 3º |
| AB8 | 2º | 3 | 3º | 3º | 2º |

G^* - módulo complexo de cisalhamento; δ - ângulo de fase; Jnr - compliância não recuperável; R - recuperação elástica; Nf - número de ciclos

Fonte: Autor (2024).

A partir dos resultados da Tabela 19, concluiu-se que o asfalto PMB apresentou resultados, em termos de desempenho, superiores aos asfaltos CAP 60/85 e AB8 para todos os parâmetros. O parâmetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ apresentou o menor valor para o asfalto AB8 na condição virgem e para o asfalto CAP 60/85 na condição envelhecida indicando uma suscetibilidade maior ao acúmulo de deformação permanente, enquanto que o $J_{nr3,2}$ mostrou que seria o asfalto AB8, por apresentar valores menores de J_{nr} . O parâmetro $R_{3,2}$ apresentou maiores valores para o asfalto PMB resultando em uma capacidade maior do asfalto em recuperar a deformação sofrida após a aplicação do carregamento, o que, reduz a tendência de deformação permanente.

As diferenças corroboram com os resultados da literatura e podem ser atribuídas pelo regime de deformação imposta pelos dois ensaios. Enquanto o ensaio do SUPERPAVE atua em uma região viscoelástica linear, o ensaio do MSCR segue em um regime viscoelástico não linear para definir o comportamento do asfalto, indicando, portanto, que o asfalto AB8 seria mais sucessível à deformação permanente em comparação com os asfaltos PMB e CAP 60/85.

O parâmetro de fadiga avaliado pelo N_f , indicou que o asfalto PMB é capaz de suportar maior número de ciclos de carregamento levando a uma vida de fadiga maior, seguido pelos asfaltos AB8 e PMB (Tabela 19).

4.2 MISTURAS ASFÁLTICAS

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos quanto ao desempenho mecânico das misturas asfálticas. As nomenclaturas adotadas para as misturas foram as seguintes:

- Misturas asfálticas com o asfalto importado *Polymer Modified Bitumen*: MPMB;
- Misturas asfálticas com o asfalto modificado por polímero SBS: M60/85;
- Misturas asfálticas com o asfalto modificado com borracha: MAB8.

4.2.1 Caracterização dos agregados

No estudo, foram utilizados os agregados brita 1 (TMN 19,00 mm), pedrisco (TMN 9,50 mm) e pó de pedra (TMN 4,75 mm). A granulometria dos agregados está apresentada na Tabela 20.

Tabela 20. Granulometria dos agregados.

| Peneira (pol./Nº) | Abertura (mm) | Passante (%) | | |
|----------------------|------------------|--------------|----------|-------------|
| | | Brita 1 | Pedrisco | Pó de pedra |
| 3/4" | 19,0 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |
| 5/8" | 16,0 | 82,30 | 100,00 | 100,00 |
| 1/2" | 12,5 | 42,80 | 100,00 | 100,00 |
| 3/8" | 9,5 | 7,40 | 95,00 | 100,00 |
| Nº 4 | 4,75 | 0,40 | 28,40 | 99,10 |
| Nº 10 | 2,0 | 0,30 | 5,50 | 63,40 |
| Nº 40 | 0,42 | 0,30 | 2,80 | 26,60 |
| Nº 80 | 0,18 | 0,30 | 2,50 | 18,00 |
| Nº 200 | 0,075 | 0,20 | 2,00 | 10,1% |

Fonte: Adaptado de Centro de Pesquisas Rodoviárias (CPR) grupo CCR, 2020.

Os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21. Caracterização dos agregados.

| Parâmetro | Agregados | | | Especificação/ Norma |
|---|-----------|---------------------|-------------|---|
| | Brita 1 | Pedrisco | Pó de pedra | |
| Massa específica real do agregado graúdo (g/cm ³) | 3,051 | | | ASTM C 127 (2015) |
| Massa específica aparente do agregado graúdo (g/cm ³) | 2,961 | | | ASTM C 127 (2015) |
| Massa específica real do agregado miúdo (g/cm ³) | | 3,04 | | DNER-ME 084 (1995) |
| Massa específica aparente do agregado miúdo (g/cm ³) | | 2,942 | | DNER-ME 084 (1995) |
| Massa específica real do material pulverulento (g/cm ³) | | | 3,033 | DNER-ME 085 (1994) |
| Massa específica aparente do material pulverulento (g/cm ³) | | | 2,942 | DNER-ME 085 (1994) |
| Absorção (%) | 1 | 1,1 | 1 | AASHTO T-84 (2022) e AASHTO T-85 (2022) |
| Abrasão “Los Angeles” (%) | 8,6 | 13,3 [< 40]* | - | ABNT NBR 16974 (2022) |
| Equivalente de areia (%) | - | - | 80,8 [>55]* | NBR 12052 (1992) |
| Índice de forma: cúbicas (relação) | 01:02 | 1:2,6 [índice 1:4]* | - | NBR 7809 (2019) |
| Índice de forma: lamelares e alongadas (%) | 0 | 1 [<10]* | - | NBR 7809 (2019) |
| Durabilidade dos Agregado (%) | 1,8 | 1,1 | - | AASHTO T-104 (1999) |

*Limites estabelecidos pelas normas.

Fonte: Autor (2024).

Os resultados dos ensaios de caracterização mostraram que os agregados se enquadraram nos limites exigidos pelas normas e especificações vigentes e são adequados para uso na produção de misturas asfálticas.

O ensaio de adesividade foi realizado com a brita 1, de acordo com a norma ABNT NBR 12583 (2017), e os resultados são apresentados na Tabela 22. Todos os asfaltos obtiveram resultados de adesividade considerados “satisfatórios”, indicando não ser necessária a adição de aditivos. Em campo, pode ocorrer variação no agregado, assim, para garantir a adesividade utilizou-se a cal hidratada. Da mesma forma, após a adição da cal, todos os asfaltos obtiveram resultados de adesividade considerados satisfatório.

Tabela 22. Adesividade dos agregados.

| Característica | Asfaltos modificados | | |
|----------------|----------------------|--------------|--------------|
| | PMB (importado) | CAP 60/85 | AB8 |
| SEM CAL | Satisfatório | Satisfatório | Satisfatório |
| 1,5% CAL CHI | Satisfatório | Satisfatório | Satisfatório |

Fonte: Autor (2024).

4.2.2 Dosagem das misturas asfálticas

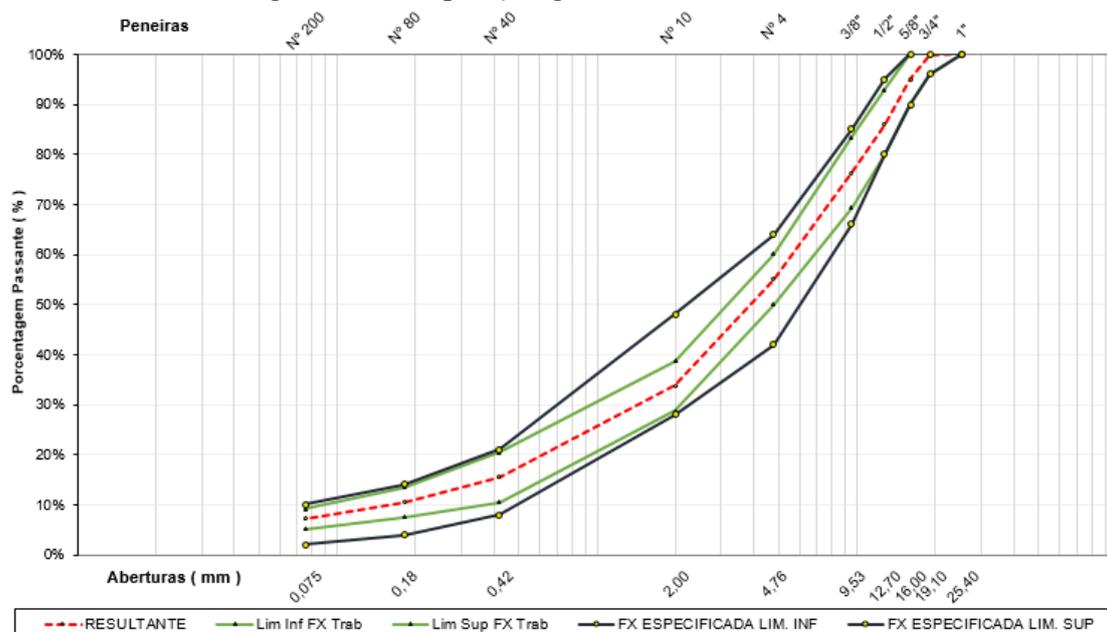
A dosagem seguiu o método Marshall, conforme a norma DNER-ME 043 (1995): Na composição das misturas asfálticas, foi utilizada a especificação granulométrica particular da CCR, EN-000/00-0000.00-GER-A1-PV/ES-E-002-R11 (CCR, 2020), cujo o tipo EGL 16-19 mm foi referência. A Tabela 23 apresenta os limites desta especificação e a curva granulométrica da mistura está ilustrada na Figura 20.

Tabela 23. Faixa granulométrica da especificação particular da CCR.

| Peneiras | | Faixa EGL 16-19 mm | |
|----------|-------|--------------------|------|
| ASTM | mm | Mín. | Máx. |
| 1 ½ | 38,1 | 100 | 100 |
| 1 | 25,4 | 100 | 100 |
| ¾ | 19,1 | 96 | 100 |
| 5/8 | 16 | 90 | 100 |
| 1/2 | 12,7 | 80 | 95 |
| 3/8 | 9,5 | 66 | 85 |
| Nº4 | 4,75 | 42 | 64 |
| Nº10 | 2 | 28 | 48 |
| Nº40 | 0,42 | 8 | 21 |
| Nº80 | 0,18 | 4 | 14 |
| Nº200 | 0,075 | 2 | 10 |

Fonte: Autor (2024).

Figura 20. Composição granulométrica da mistura.



Fonte: Autor (2024).

Por meio de procedimentos experimentais, o teor “ótimo” do asfalto foi definido, conforme a Tabela 24.

Para o cálculo de densidades utilizou-se as seguintes relações:

- Densidade efetiva: (Massa seca) / (Volume do sólido mais o volume do poro permeável à água não preenchido pelo asfalto - efetivo);
- Densidade aparente: (Massa seca) / (Volume do sólido mais o volume do poro permeável à água – aparente);

Foram preparados três corpos de prova com 4 diferentes teores de asfalto, obtendo assim 15 corpos de prova. Após a realização dos ensaios, os resultados foram relacionados para determinar o teor “ótimo” de asfalto (Tabela 24).

Tabela 24. Parâmetros determinados na dosagem Marshall.

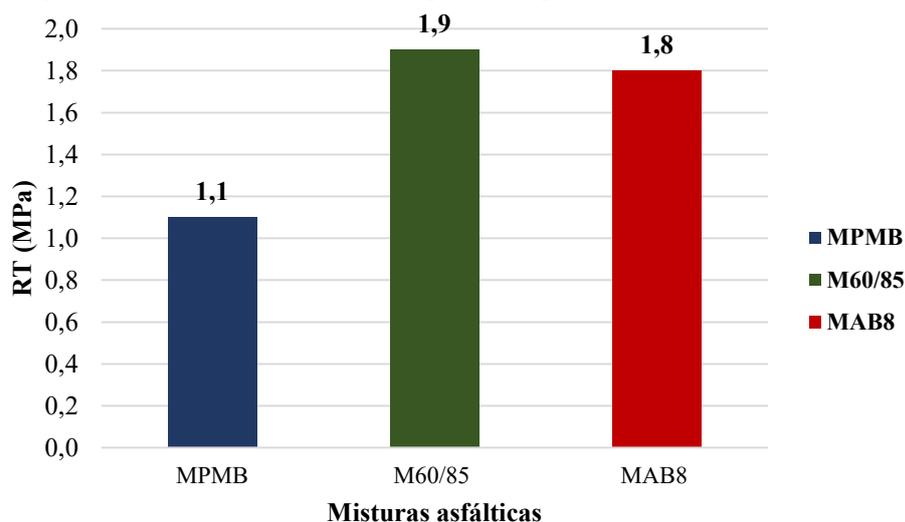
| Parâmetros | Asfaltos modificados | | |
|--|----------------------|--------|-------|
| | MPMB | M60/85 | MAB8 |
| Densidade efetiva | 2,965 | 2,941 | 2,992 |
| Densidade aparente | 2,591 | 2,566 | 2,569 |
| Massa específica máxima teórica (g/cm ³) | 2,722 | 2,699 | 2,7 |
| Teor de projeto (%) | 4,6 | 4,7 | 5,7 |
| Vazios de ar (%) | 4,8 | 4,9 | 4,8 |
| VAM (%) | 15,8 | 16,7 | 17,5 |
| VCA (%) | 69,6 | 70,7 | 72,3 |
| Estabilidade (kgf) | 1498 | 1269 | 1539 |
| Fluência (mm) | 3,0 | 4,2 | 3,5 |

VMA: Somatório dos volumes dos espaços existentes entre os agregados revestidos; VAM: Volume de vazios da mistura compactada.

Fonte: Autor (2024).

Após a definição do teor de projeto de asfalto e dos parâmetros volumétricos, foram moldados os corpos de prova para cada mistura estudada para realização do ensaio de resistência à tração por compressão diametral (DNIT 136, 2010), cujos resultados são apresentados na Figura 21.

Figura 21. Resistência à Tração por Compressão Diametral.



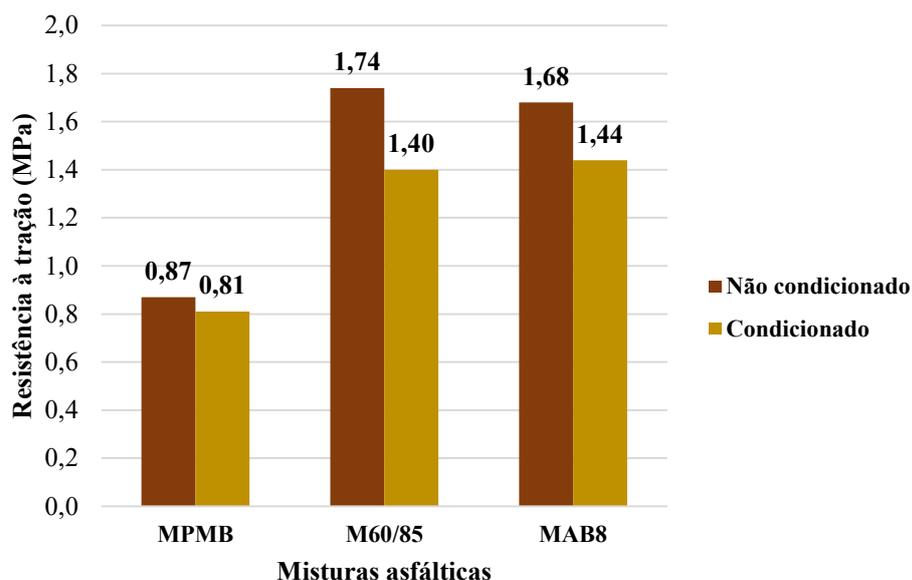
Fonte: Autor (2024).

Pode-se observar que a mistura asfáltica que apresentou a maior resistência à tração (1,9 MPa) foi produzida com o asfalto CAP 60/85, seguida pela mistura asfáltica com asfalto AB8 (1,8 MPa). A mistura asfáltica com o asfalto PMB apresentou a menor resistência à tração (1,1 MPa). Os resultados de todas as misturas, no entanto, foram superiores ao valor mínimo de 0,65 MPa especificados pela norma DNIT 031 (2006).

4.2.3 Avaliação do dano por umidade induzida

O dano por umidade caracteriza a sensibilidade da mistura asfáltica ao efeito deletério da água, o qual provoca a perda de adesão entre asfalto e agregado. Para realização do ensaio de Dano por Umidade Induzida (DUI), o qual seguiu a norma AASHTO T-283-22 (2022), é avaliada a razão de resistência à tração retida (RRT) entre os corpos de prova condicionados e não condicionados. A Figura 22 representa os resultados obtidos de resistência à tração por compressão diametral para os corpos de prova nas duas condições.

Figura 22. Resistência à tração dos corpos de prova condicionados e não condicionados para avaliação do dano por umidade induzida.

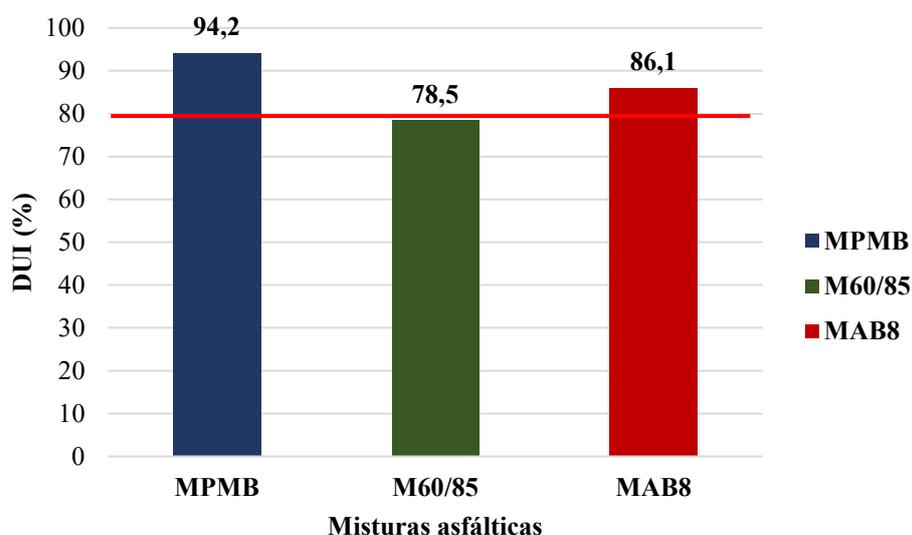


Fonte: Autor (2024).

Observa-se na Figura 22 que todas as misturas asfálticas apresentaram uma pequena variação na resistência à tração para ambas as situações consideradas, o que representa uma baixa sensibilidade das misturas asfálticas ao condicionamento em que foram submetidas.

A Figura 23 apresenta as razões de resistência à tração retida (RRT) obtidas para as três misturas asfálticas analisadas nesse estudo. A norma AASHTO T 283 (2022) estabelece que a RRT deve ser de no mínimo 80%, e a norma do DNIT 180 (2018) estabelece que a RRT deve ser de no mínimo 70%.

Figura 23. Resistência Retida à Tração por umidade induzida das misturas asfálticas.



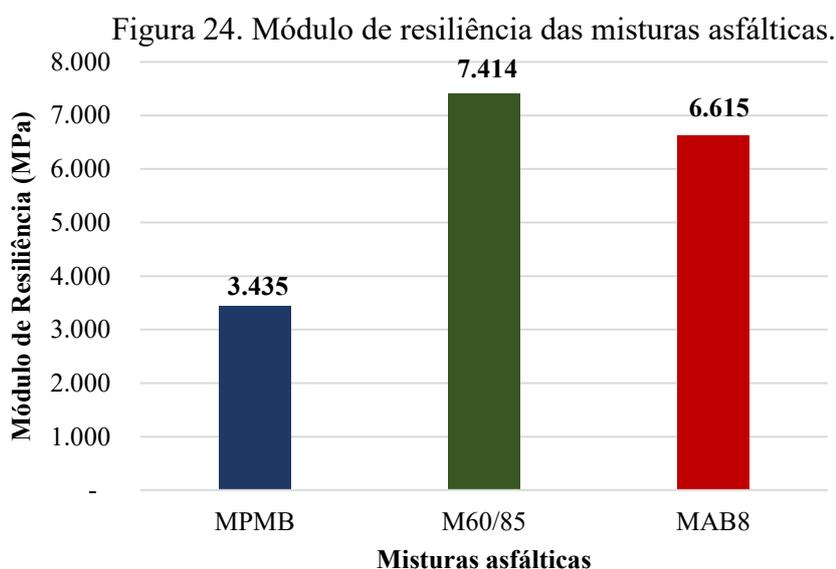
Fonte: Autor (2024).

De acordo com a Figura 23, as misturas asfálticas com o asfalto PMB e com o asfalto AB8 obtiveram valores dentro do limite da norma AASHTO T 283 (2022), que não é atendido pela mistura asfáltica com o CAP 60/85, mas foi atendido na norma do DNIT 180 (2018).

4.2.4 Parâmetros mecânicas das misturas asfálticas

Os ensaios de desempenho realizados no estudo foram os seguintes: Módulo de Resiliência (MR), *Flow Number* (FN) e resistência à fadiga.

Os resultados de Módulo de Resiliência (MR) (ASTM, 1995), são apresentados na Figura 24. Os ensaios foram conduzidos na temperatura de 25°C. Segundo Bernucci *et al.* (2022), os valores de MR das misturas asfálticas, em geral, se situam entre 2.000 MPa a 8.000 MPa para misturas asfálticas ensaiadas a 25°C.



Fonte: Autor (2024).

Observa-se na Figura 24 que a mistura produzida com o asfalto CAP 60/85 apresentou a maior rigidez (7.414 MPa), seguida da mistura com asfalto AB8 (6.615 MPa). A utilização do asfalto PMB reduziu significativamente a rigidez da mistura asfáltica, que obteve um MR de 3.435 MPa.

O menor valor do módulo também pode estar associado a uma maior flexibilidade. No entanto, é necessária a avaliação em termos de dimensionamento, complementada por ensaio de fadiga ou de energia de fratura.

Um indicador da vida de fadiga da mistura asfáltica é a relação entre o módulo de resiliência e a resistência à tração (MR/TR), relação entre rigidez e resistência. Menores

valores nessa relação podem ser um indicativo de maior vida de fadiga, com menor absorção de tensões que levam ao trincamento precoce, associada a alta resistência à tração, consequentemente maior resistência à fadiga (Bernucci *et al.*,2022). Os resultados de MR, RT e da relação MR/RT para as misturas asfálticas são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25. Relação MR/RT para as misturas asfálticas.

| Misturas asfálticas | Módulo de Resiliência - MR (MPa) | Resistência à Tração - RT (MPa) | Relação MR/RT |
|---------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------|
| MPMB | 3.435 | 1,1 | 3.123 |
| M60/85 | 7.414 | 1,9 | 3.902 |
| MAB8 | 6.615 | 1,8 | 3.675 |

Fonte: Autor (2024).

Com base na relação MR/RT (Tabela 25), a mistura asfáltica com o asfalto PMB tenderia a obter em campo uma maior vida de fadiga, por este valor ter sido menor, no comparativo entre as três misturas. A mistura asfáltica com o asfalto CAP 60/85 tenderia a ter uma menor vida de fadiga, similar à obtida pela mistura com o asfalto AB8. De acordo com Leite (2000) materiais com uma menor relação MR/RT permitem camadas asfálticas com espessuras menores para uma mesma vida de fadiga.

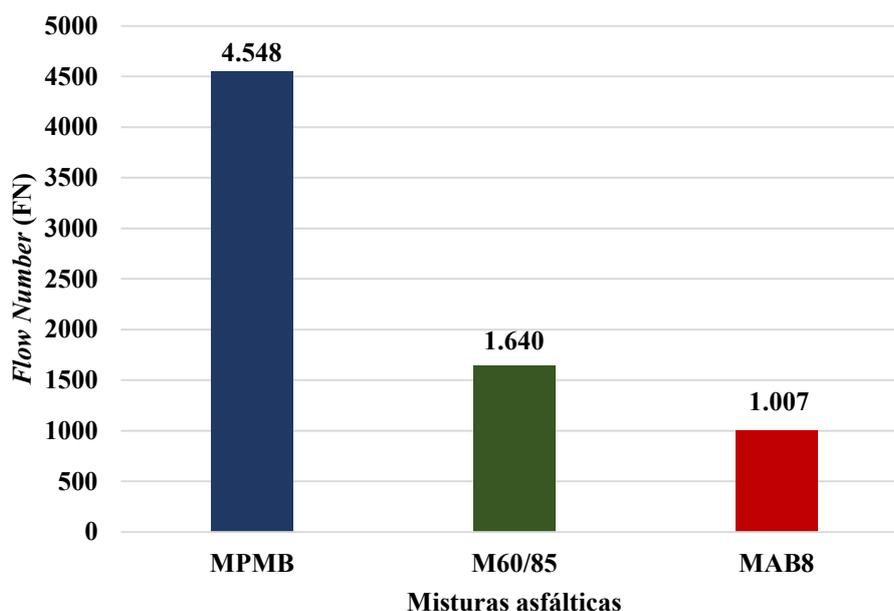
Por meio da determinação do *Flow Number*, pode-se avaliar o grau de deformação em função do tráfego, ou seja, caracterizar a deformação longitudinal do revestimento quando submetido ao tráfego de veículos. Quanto maior o número de ciclos menor a capacidade de ocorrer deformação permanente. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 26 e na Figura 25.

Tabela 26. *Flow Number* das misturas asfálticas.

| | MPMB | M60/85 | MAB8 |
|------------------------------|--------|--------|--------|
| Deformação ($\mu\epsilon$) | 26.155 | 18.529 | 22.345 |
| <i>Flow Number</i> (FN) | 4.548 | 1.640 | 1.007 |
| Teor de projeto (%) | 4,6 | 4,7 | 5,7 |

Fonte: Autor (2024).

O resultado de FN para a mistura asfáltica com o asfalto PMB foi superior às demais, o que indicou que esta mistura obteria uma maior capacidade de suportar o tráfego sem deformações. De acordo com Medina *et al.* (2015), o tipo de asfalto tem influência na deformação permanente. Os resultados apresentados corroboram com a literatura, visto que, o asfalto PMB apresentou maior viscosidade em relação aos outros, conforme apresentado na Tabela 13.

Figura 25. *Flow Number* das misturas asfálticas.

Fonte: Autor (2024).

Nota-se na Figura 25 uma influência do teor de asfalto das misturas nos valores de FN, teores menores de asfalto tem menor tendência à deformação permanente, a mistura asfáltica MPMB obteve o menor teor de asfalto, o que favoreceu a ter maior resistência à deformação permanente. Esta influência do teor de asfalto é corroborado por Almeida Junior *et al.* (2018), que ao avaliar a influência do teor de asfalto nas misturas asfálticas, os autores concluíram que maiores teores de asfalto têm maior tendência de deformação permanente nas misturas asfálticas.

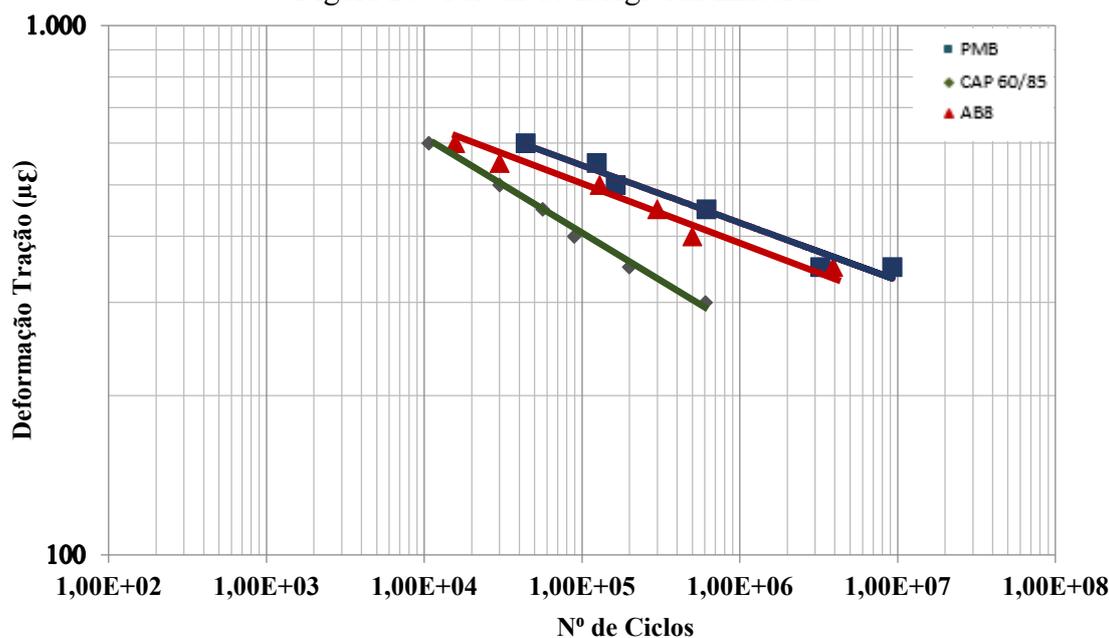
Para avaliar a resistência à fadiga, conforme a norma AASHTO T-321 (2014) foi usado o ensaio à flexão em quatro pontos. Os parâmetros obtidos da Equação (5) gerado em função da deformação de tração são representados na Tabela 27. A Figura 26 mostra as curvas de fadiga das três misturas asfálticas MPMB, M60/85 e MAB8.

Tabela 27. Parâmetros obtidos para os modelos de fadiga determinados no ensaio de flexão à deformação controlada.

| Misturas asfálticas | a | B | R2 |
|---------------------|----------|------------|------|
| MPMB | 2,15E+29 | -8,884616 | 0,97 |
| M60/85 | 5,85E+19 | -5,669735 | 0,99 |
| MAB8 | 8,51E+30 | -9,6006522 | 0,97 |

Fonte: Autor (2024).

Figura 26. Curvas de fadiga das misturas.



Fonte: Autor (2024).

A Tabela 28 mostra as constantes a e b obtidas na regressão linear dos pares N e ϵ_t mostrados na Figura 26.

Tabela 28. Constantes obtidas na regressão linear.

| Misturas asfálticas | a | b | R^2 |
|---------------------|----------|-----------|-------|
| PMB | 5,85E+19 | -5,669735 | 0,99 |
| CAP 60/85 | 8,51E+19 | -5,669735 | 0,99 |
| AB8 | 8,51E+30 | -9,606522 | 0,97 |

Fonte: Autor (2024).

A Tabela 29 mostra os resultados obtidos no ensaio de fadiga obtido, sendo a mistura asfáltica MPMB apresentou uma maior vida de fadiga em relação às misturas asfálticas MAB8 e M60/85.

Tabela 29. Fadiga das misturas asfálticas.

| Deformação de Tração | Misturas asfálticas | | |
|----------------------|---------------------|----------|----------|
| | MPMB | M60/85 | MAB8 |
| N | 7,81E+11 | 1,42E+10 | 5,20E+11 |

Fonte: Autor (2024).

Os resultados de desempenho à fadiga, associados à relação módulo de resiliência/resistência à tração (MR/RT), indicaram que esta relação se mostrou adequada para avaliar a vida de fadiga das misturas asfálticas estudadas.

4.2.5 Resumo dos resultados

A partir dos resultados apresentados, os asfaltos analisados foram comparados na Tabela 30.

Tabela 30. Resumo dos parâmetros dos asfaltos modificados.

| Parâmetro | Asfaltos modificados | | |
|--|----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| | PMB | CAP 60/85 | AB8 |
| Caracterização dos asfaltos | | | |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) (0,1 mm) | 45,5 | 48,0 [40 - 70 ¹] | 49,5 [30 - 70 ²] |
| Densidade | 1,006 | 1,01 | 1,031 |
| Ponto de amolecimento (°C) | 82,3 | 71,3[≥ 60 ¹] | 59,5 [mín.55 ²] |
| Recuperação elástica (%) | 80 | 68 [≥ 60 ¹] | 78 [mín. 50 ²] |
| Viscosidade aparente ³ (cP) | | | |
| 135°C, 20 rpm, <i>spindle</i> 21 | 2.510 | 2.150 [máx. 3.000 ¹] | - |
| 150°C, 50 rpm, <i>spindle</i> 21 | 1.105 | 951 [máx. 2.000 ¹] | - |
| 177°C, 100 rpm, <i>spindle</i> 21 | 350 | 318 [máx. 1.000 ¹] | - |
| 175°C, 100 rpm, <i>spindle</i> 3 | - | - | 1.685 [800 – 2.000 ²] |
| RTFOT, 163°C, 85 min | | | |
| Varição em massa (%) | 0,6 | 0,4 [máx. 1,0] | 0,5 [máx. 1,0] |
| PG contínuo condição virgem C | 87,1 | 77,8 | 76,1 |
| PG contínuo, pós RTOFOT C | 86,7 | 76,3 | 77,0 |
| Recuperação elástica R(%) (ordenamento) ⁴ | 1 | 3 | 2 |
| PG G*/sen(δ) (ordenamento) ⁴ | 1 | 3 | 2 |
| MSCR Jnr3,2(ordenamento) ⁴ | 1 | 2 | 3 |
| LAS Nf (ordenamento) ⁴ | 1 | 3 | 2 |
| Desempenho das misturas asfálticas | | | |
| Densidade efetiva | 2,965 | 2,941 | 2,992 |
| Densidade aparente | 2,591 | 2,566 | 2,569 |
| Densidade máxima teórica | 2,722 | 2,699 | 2,7 |
| Teor ótimo (%) | 4,6 | 4,7 | 5,7 |
| Vazios de ar (%) | 4,8 | 4,9 | 4,8 |
| VAM (%) | 15,8 | 16,7 | 17,5 |
| VCA (%) | 69,6 | 70,7 | 72,3 |
| Estabilidade (kgf) | 1498 | 1269 | 1539 |
| Fluência (mm) | 3 | 4,2 | 3,5 |
| Resistência à Tração (MPa) | 1,1 | 1,9 | 1,8 |
| Umidade induzida não condicionada (MPa) | 0,87 | 1,74 | 1,68 |
| Umidade induzida condicionada (MPa) | 0,81 | 1,4 | 1,44 |
| Resistência Retida à Tração (%) | 94,2 | 78,5 | 86,1 |
| Módulo de Resiliência (MPa) | 3435 | 7414 | 6615 |
| Relação MR/RT | 3123 | 3902 | 3675 |
| Flow Number (FN) | 4548 | 1640 | 1007 |
| Deformação N=10 ⁶ (μΕ) | 423 | 323 | 394 |
| Ciclos (μΕ) | 7,81E+11 | 1,42E+10 | 5,21E+11 |

Especificações: ¹Especificação – Tabela A3 (ANEXO); ² Especificação – Tabela A4 (ANEXO).

³Viscosímetro Brookfield. ⁴Ordenamento conforme apresentado na Tabela 19.

Fonte: Autor (2024).

A partir dos resultados da Tabela 30, concluiu-se que todos os asfaltos ficaram dentro das especificações brasileiras. Em negrito os parâmetros referente ao ponto de amolecimento, recuperação elástica, $|G^*|/\text{sen}(\delta)$, $J_{nr3,2}$, Nf. Relação MR/RT, *Flow Number*, Deformação $N=10^6$ ($\mu\epsilon$), Ciclos ($\mu\epsilon$) do asfalto PMB que apresentou resultados, em termos de desempenho, superiores aos asfaltos CAP 60/85 e AB8 para todos os parâmetros.

Conclui-se que a mistura asfáltica com o asfalto PMB apresentou um menor módulo de resiliência, uma tendência de maior vida de fadiga e maior resistência à deformação permanente. Os resultados das misturas asfálticas concretizam os resultados do asfaltos PMB em relação a predição de $|G^*|/\text{sen}(\delta)$, MSCR e LAS. De modo geral, pôde-se verificar que o asfalto importado PMB apresenta viabilidade de ser utilizado no Brasil em misturas asfálticas.

5 CONCLUSÃO

A previsão do desempenho através de ensaios reológicos três asfaltos diferentes: Asfalto importado *Polymer Modified Bitumen* (PMB), Asfalto com SBS (CAP 60/85) e Asfalto borracha (AB8). O estudo também teve como objetivo avaliar o desempenho das misturas asfálticas produzidas com esses três asfaltos.

Primeiramente, pelas bibliografias consultadas confirmou-se a hipótese de que a adoção de asfaltos modificados com polímero em misturas asfálticas é uma técnica atual e comprovada para estruturas de pavimento submetidas a tráfego pesado e intenso, tendo sido aplicada em diversos países, tanto em implantação de trechos novos quanto em trechos restaurados, ou seja, uma vasta extensão de rodovias novas e restauradas demonstram um bom desempenho quanto a vida útil do pavimento.

As características apresentadas tornam o asfalto importado PMB uma opção promissora para a melhoria da infraestrutura viária no Brasil que pode trazer benefícios significativos para a qualidade e durabilidade das estradas e pavimentos do país.

Para o adequado comportamento do asfalto importado PMB são requeridos, cuidados no armazenamento sobre paletes em galpões ou protegido por lonas plásticas. Atentar para as etapas no processo de aquecimento para que as amostras do asfalto importado PMB seja coletado no estado líquido para análise.

A alternativa com o asfalto importado PMB pode ser uma alternativa viável a ser aplicada em rodovias de tráfegos elevados em substituição aos asfaltos modificados nacionais, visto que em relação ao ensaio ponto de amolecimento (PA) o asfalto PMB apresenta a melhor consistência. No ensaio de recuperação elástica por torção o asfalto PMB também apresenta o melhor desempenho, mostrando maior capacidade de se recuperar a sua forma original após sofrer carregamento.

Para regiões com temperaturas elevadas a utilização do asfalto PMB apresentou ser a melhor alternativa, visto que, o *Performance Grade* (PG) apresenta melhor capacidade de resistência ao pavimento em comparação aos asfaltos CAP 60/85 e AB8. Após *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFO), o comportamento dos asfaltos foi similar. No entanto, entende-se que misturas asfálticas estudadas nessa pesquisa constituídas com o asfalto PMB demonstraram uma alternativa de sucesso aos asfaltos nacionais.

A resistência à fadiga e deformação permanente do asfalto PMB fortalece a importância desse asfalto em regiões com tráfego intenso, onde os pavimentos estão constantemente sujeitos a cargas pesadas, reduzindo a necessidade de manutenção constante.

O teor de projeto do asfalto foi determinado pelo método Marshall e todas as misturas asfálticas atenderam satisfatoriamente aos critérios considerados para a determinação do teor de projeto de asfalto. A mistura asfáltica com o asfalto PMB apresentou a menor resistência à tração, mas sem comprometimento de desempenho.

O desempenho das misturas asfálticas em seus respectivos teores de projeto de asfalto foi avaliado segundo as características de dano por umidade, módulo de resiliência, deformação permanente e vida de fadiga. A mistura asfáltica com asfalto PMB apresentou os melhores resultados.

Os módulos de resiliência obtidos foram maiores para misturas asfálticas com os asfaltos CAP 60/85 e AB8, mas todos os valores obtidos se enquadraram nas referências consultadas.

Em relação a deformação permanente, foi verificado um alto valor de FN para a mistura com asfalto PMB, confirmando o alto desempenho para esta mistura asfáltica. Também apresentou uma tendência de aumento da vida de fadiga.

Em resumo, o asfalto importado PMB apresenta características vantajosas que podem contribuir significativamente para a qualidade e durabilidade dos pavimentos no Brasil. A importação desse asfalto é um passo importante para aprimorar a infraestrutura viária do país e proporcionar aos usuários uma experiência de tráfego mais segura e confortável. Contudo, é preciso mais estudos no sentido de identificar melhor a efetiva contribuição do asfalto importado PMB no desempenho das misturas asfálticas.

Para trabalhos futuros, foram listadas as seguintes recomendações:

Os resultados reológicos e mecânicos do asfalto importado *Polymer Modified Bitumen* (PMB) são satisfatórios, entretanto recomenda-se:

- Testar e avaliar diferentes tipos de granulometrias nas misturas asfálticas com o asfalto PMB;
- Avaliação do comportamento das misturas asfálticas utilizando o asfalto PMB em trechos experimentais com monitoramentos periódicos dos parâmetros de desempenho do pavimento e o efeito do envelhecimento do asfalto importado;
- Avaliação do comportamento das misturas asfálticas utilizando o asfalto PMB a longo prazo em trechos experimentais.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6560. Produtos Betuminosos Semissólidos – Determinação da Massa Específica e Densidade Relativa, 2012.

ABNT NBR 6560. Asfaltos- Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola, 2016.

ABNT NBR 6576. Materiais asfálticos - Determinação da penetração, 2007.

ABNT NBR 7809. Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio, 2019.

ABNT NBR 12052. Solo ou agregado miúdo - Determinação do equivalente de areia - Método de ensaio, 1992.

ABNT NBR 15184. Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional, 2004.

ABNT NBR 15235. Materiais asfálticos. Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional, 2009.

ABNT NBR 15529. Asfalto Borracha - Propriedades reológicas de materiais não newtonianos por viscosímetro rotacional, 2007.

ABNT NBR 16974. Agregados – Ensaio de resistência ao impacto e à abrasão *Los Angeles*, 2022.

ABNT NBR 16916. Agregado miúdo –Determinação da densidade e da absorção de água, 2021.

ABNT NBR 16917. Agregado graúdo –Determinação da densidade e da absorção de água, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCMBUSTÍVEIS, ANP. Resolução ANP nº19, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCMBUSTÍVEIS, ANP, <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos.>, 2022

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCMBUSTÍVEIS, ANP. <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.>, 2022

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS E BIOCMBUSTÍVEIS, ANP. Dispõe sobre as especificações dos asfaltose dos aditivos asfálticos de reciclagem para misturas à quente, e suas regras de comercialização em todo o território nacional. Resolução ANP N°897, 2022.

AHMEDZADE, P.; YILMAZ, M.. *Effect of polyester resin additive on the properties of asphalt binders and mixtures. Construction and Building Materials.*, 2008

AIREY, G. D.; MOHAMMED, M. H.; FICHTER, C.. *Rheological characteristics of synthetic road binders*, 2008.

ALMEIDA JR, P. O.; BOEIRA, F. D.; SPECHT, L. P.; CERVO, T. C.; PEREIRA, D. S.; CENTOFANTE, R.; BARBOZA JR, V. S.; SILVA, C. F. C.. Avaliação laboratorial do tipo e teor de asfalto e da granulometria na deformação permanente de misturas asfálticas. Transportes (Rio de Janeiro), Vol.26, 2018.

AL-HADIDY, A. I.; YI-QIU T.. *Effect of styrene-butadiene-styrene on the properties of asphalt and stone-matrix-asphalt mixture. J. Mater. Civ. Eng.* 23, 2011

AMERI, M.; JELODAR, Y. A. K.; MONIRI, A.. *Relationship between elastic 33 recovery and linear amplitude sweep as asphalt binder fatigue tests. Journal of Applied 34 Environmental and Biological Sciences*, Vol. 5, p. 7-10, 2015.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION

OFFICIALS. (AASHTO) MP19 – Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 2010.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (AASHTO) R 35-22. Standard Practice for Superpave Volumetric Design for Asphalt Mixtures, Edition, 2022.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (AASHTO) TP 84-22. Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate AASHTO Designation:. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2022.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (AASHTO) TP 85-22. Standard Method of Test for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate AASHTO Designation:. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2022.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (AASHTO) TP 101-14. Standard Method of Test for Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep AASHTO Designation:. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2014.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (AASHTO) TP 104-99. Standard Method of Test for Soundness of Aggregate by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate. AASHTO Designation:. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 1999.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (AASHTO) T 245-97 (2008). Standard Method of Test for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatu. AASHTO Designation, 2008.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION

OFFICIALS. (AASHTO) TP 283-22. Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage. AASHTO Designation: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2022.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (AASHTO) M 320-21. *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Washington, D. C. 2021.*

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (AASHTO) T 321-22. *Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Asphalt Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending. Edition, 2022*

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (AASHTO) T 323-22. *Standard Specification for Superpave Volumetric Mix. AASHTO Designation, 2022.*

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (AASHTO) M 332-21. *Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. 2021.*

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. (AASHTO) T 342-22. *Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). AASHTO Designation, 2022.*

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS
AASHTO. T 350-18 (2018): *Standard method of test for multiple stress creep recovery (MSCR) test of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR).* p. 7, 2014.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS
(AASHTO) T 391-20 (2020). *Standard method of test for estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep.* 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). C127-15: *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Agregate,* 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D2872-22: *Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)*, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D4123-82: *Standard Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures*. Withdrawn, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D6521-22: *Standard Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)*, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D6648-08: *Standard Standard Test Method for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)*, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D6723-12: *Standard Test Method for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT)*. Withdrawn, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D 6373-21A. *Standard Specification for Performance-Grade Asphalt Binder*, West Conshohocken, PA, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D7175-15: *Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). D7460-10: *Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of Compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending*. Withdrawn, 2010.

ANDERSON, M.; J.; D'ANGELO; WALKER, D.. MSCR: *Better Tool for Characterizing High Temperature Performance Properties*. *Asphalt – the Magazine of the Asphalt Institute*, v. 25, n. 2, p. 15-23, 2010.

ARAUJO, V. M. C.; MAIA, R. S.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; MAIA, A. O.; RODRIGUES, C. B.. Avaliação das relações entre propriedades de forma de agregados, compactação, parâmetros do esqueleto mineral e textura de revestimentos asfálticos aeroportuários a partir do Processamento Digital de Imagens (PDI). Transportes (Rio de Janeiro). Vol.29, 2021.

ASPHALT INSTITUTE & EUROBITUME. The bitumen industry - A global perspective: Production, chemistry, use, specification and occupational exposure (IS-230) (2nd ed.). Lexington, KY: Asphalt Institute Inc. and European Bitumen Association-Eurobitume, 2011.

BAAJ, H.; DI BENEDETTO, H.; CHAVEROT, P.. *Effect of binder characteristics on fatigue of asphalt pavement using an intrinsic damage approach, Road Materials and Pavement Design*, Vol. 6, Issue 2, 2005.

BAHIA, H. U.; Zeng, D. I.; Khatri, H.; Zhai, M. A.. Anderson, R. M. *Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design*. NCHRP Report 459. Washington D.C., National Cooperative Highway Research Program, 2001.

BAPTISTA, A. M. C.. Misturas Betuminosas Recicladas a Quente em Central Contribuição para o seu estudo e aplicação. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil Especialidade de Urbanismo, Ordenamento do Território e Transportes). Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra. Portugal, Coimbra, 2006.

BARDINI, V. S. S.. Influência do Fíler Mineral ns Propriedades de Misturas Densas. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

BASTOS, J. B. S.; SORAES, J. B.; NASCIMENTO, L.A.H.. Critérios para os resultados do ensaio uniaxial de carga repetida de misturas asfálticas em laboratório a partir do desempenho em campo. Transportes, 2017.

BEHNOOD, A.; OLEK, J.. *Rheological properties of asphalt binders modified with styrene-butadiene-styrene (SBS), ground tire rubber (GTR), or polyphosphoric acid (PPA). Construction and Building Materials*, p. 464-478. Volume 151, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.115>., 2017.

BELYAEV, P. S.; FROLOV, V. A.; BELYAEV, V. P.; VAREPO, L. G.; BEZZATEEVA, E. G.. *Petroleum bitumen and polymer-bitumen binders: Current state and Russian specifics*. Review. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2412, No. 1, p. 060001). AIP Publishing LLC. 2021

BERNUCCI L.L.B.; MOTTA L.M.G.; CERATTI e FONSECA J.B.. *Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro: Petrobras: ABED A, 2022.

BESSA, I. S.; VASCONCELOS, K. L.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; BERNUCCI, L. L. B., *Fatigue resistance of asphalt binders and the correlation with asphalt mixture behaviour, Road Materials and Pavement Design*, DOI: 10.1080/14680629.2019.1633741. 2019.

BILLMEYER, I. W.. *Polymers and Polymerization*. 35ª Edição *Willey-Interscience*, EUA, 1984.

BLAZEJOWSKI, K.; WOJCIK-WISNIEWSKA, M.; PECIAKOWSKI, H.; OLSZACKI, J. *The performance of highly modified binders for heavy duty asphalt pavements*. In: *6th Transport Research Arena April 18-21, Transportation Research Procedia* 14, 2016.

BOHN, K. A. A.; SPECHT, L. P.; BRODANI, C.; CORREA, B. M.; PINHEIRO, G. S.; EIDT, K. G.; BARBOZA JUNIOR, V. dos S.; BOEIRAA, F. D.; PEREIRA, D. S.. *Avaliação de misturas asfálticas recicladas mornas com uso de asfaltos convencional e modificado por polímero*. *Transportes*, 28, 2020.

BRASIL. Norma dos Asfaltos https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-material-em/dnit_095_2006_em.pdf, 2006

BRASIL. *Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de material*. NORMA DNIT 111/2009, 2009

BRASIL. Norma DNIT Cimento asfáltico modificado por polímero SBS – Especificação de material. NORMA DNIT 129/2010, 2010.

BRASIL. Indicador de qualidade das rodovias federais (ICM). Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) Brasília, DF, Brasil. <https://www.gov.br/dnit/pt-br/>. , 2019.

BRASIL. Norma MSCR. https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-e/dnit_423_2020_me.pdf., 2020.

CAMARGO, F. F.. *Field and laboratory performance evaluation of a field-blended rubber asphalt. Tese de Doutorado*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2016.

CCR, NORMA ENGELOG - Especificação Particular para Execução de Cimento Asfáltico – CA, 2020.

ÇELIK, O. N.; ATIS, C. D.. *Compactibility of hot bituminous mixtures made with crumb rubber-modified binders. Construction and Building Materials*, 2007.

CERATTI, J. A. P.; Reis R. M. M.. Manual de dosagem de concreto asfáltico. Rio de Janeiro: Instituto Pavimentar. 152p., 2011.

CEZAR JUNIOR, T.. Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas. Dissertação Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

CHEN C.. *Rheological performance evaluation os asphalt modified with bio-based polymers*. <https://lib.dr.i> Chen, J.-S.; Huang, L.-S. Developing an aging model to 101 evaluate engineering properties of asphalt paving binders. *Materials and Structures*, Vol. 33, 559-565, 2000. astate.edu/etd/14787., 2015

CNT. Pesquisas Confederação Nacional do transporte (CNT) de Rodovias 2023. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2023. <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/conteudo>., 2023.

CONGLIN CHEN, JOSEPH H. PODOLSKY, R. CHRISTOPHER WILLIAMS & ERIC W. COCHRAN: *Rheological properties and effects of aging on acrylated epoxidised soybean oil monomer-modified asphalt binder, Road Materials and Pavement Design, DOI: 10.1080/14680629.2018.1491883.*, 2018.

CUI, S.; GUO, N.; WANG, L.; YOU, Z.; TAN, Y.; GUI, Z.; LUO, X.; CHEN, Z. *Effect of Freeze–Thaw cycles on the pavement performance of SBS modified and composite crumb rubber modified asphalt mixtures. Constr. Build. Mater.* 342, 127799. [https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127799.](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127799), 2022.

CUNHA, T. M. F.; CORREIA, J. C.; FROTA, C. A.; CHAAR, S. M.; COUCEIRO, P. R. C.. Efeito Da Adição De Material Vegetal (fibra Da Castanha De Cutia) E Polímero (SBS) Nas Propriedades Do Asfalto (CAP 50/70). *Polímeros, Ciência E Tecnologia* 22.4, 2012.

D'ANGELO, J.; R. KLUTTZ; R. DONGRÉ; K. STEPHENS E. Z.. *Revision of the Superpave High Temperature Binder Specification: The Multiple Stress Creep Recovery Test. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 76, 2007.

D' ANGELO, J.; DONGRÉ, R.. *Practical Use of Multiple Stress Creep and Recovery Test: Characterization of Styrene-Butadiene-Styrene Dispersion and Other Additives in Polymer-Modified Asphalt Binders. Transportation Research Record*, n. 2126, 2009.

D'ANTONA, D. M. G.; FROTA, C. A.. Estudo de misturas asfálticas com asfalto modificado pelo polímero EVA para pavimentos urbanos de Manaus – AM. *Polímeros*, Vol.21 (1), p.13-1, 2011

DANTAS NETO, S. A.. Avaliação das Propriedades dos Asfaltos e das Misturas Asfálticas Modificados com Borracha Granulada de Pneus Usados. Dissertação de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

DEACON, J. A.; HARVEY, J. T.; TAYEBALI, A.; e MONISMITH, C. L.. *Influence of binder loss modulus on the fatigue performance of asphalt concrete pavements. J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 66, 633–668, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADA E RODAGEM. DNER-ME 043/1995. Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Método de Ensaio, 1995.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT 031/2006 - EM. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT 095/2006 - EM. Especificação de Material. Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT 111/2009 - EM. Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “*Terminal Blending*” - Especificação de material. Rio de Janeiro, 2009.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT 112/2009 - ES. Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico com asfalto borracha, via úmida, do tipo “*Terminal Blending*” - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2009.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT 129/2011 - EM. modificado por polímero elastomérico - Especificação de material. Rio de Janeiro, 2011.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT 136/2010 - ME. Pavimentos asfáltica – Misturas asfálticas Determinação da resistência à tração por compressão diametral - Método de ensaio - Especificação de material, 2010.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT 178/2018 - PRO. Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para ensaios mecânicos usando o compactador giratório SUPERPAVE ou o Marshall – Procedimento, 2018.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT 423/2020 - EM. Pavimentação – Misturas asfálticas – Fluência e recuperação de asfaltodeterminados sob tensões múltiplas (MSCR) – Método de ensaio. Brasília, 2020.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT 427/2020 - EM. Pavimentação – Asfalto – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas - Método de ensaio. Brasília, 2020.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE. DNIT 439/2022 - EM. Pavimentação –Ligante asfáltico– Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos esando varredura de amplitude linear (LAS – *Linear Amplitude Sweep*) – Método de ensaio. Brasília, 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 043/1995. - ME. Misturas betuminosas a quente – Ensaio Marshall - Método de ensaio – Norma rodoviária, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 084/1995 - ME. Agregado miúdo – Determinação da densidade real – Norma rodoviária, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 085/1994 - ME. Mterial finamente pulverizado – Determinação da massa específica – Norma rodoviária, 1994.

DRESSEN, S.; PLANCHE J. P.; GARDEL V.. *A New Performance Relat-ed Test Method for Rutting Prediction: MSCRT. In:Loizos, A.; M. L. Partl; P. Scarpas e I. L. Al-Qadi (eds.)Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials. London, United Kingdom, 2009.*

DRESSEN, S.; PONSARDIN, M.; PLANCHE, J. P.; DUMONT, A. G.; PITTET, M.. Durability study: Field aging of conventional and cross-linked polymer modified bitumens, LJMU (Liverpool John Moores University) conference, 2011.

DOMINGOS, M. D. I.. Caracterização do Comportamento Fluência-Recuperação de Asfaltos Asfálticos Modificados Virgens e En-velhecidos. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Transportes. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidademde São Paulo, São Carlos, 2011.

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L.. Ensaio MSCR segundo as normas ASTM D7405-10ª e AASHTO T350-14: Um estudo de caso envolvendo asfalto-asfalto-borracha. Em: Anais do XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Ouro Preto, MG, 2015.

DONG, F.. *Influence of SBS and asphalt on SBS dispersion and the performance of modified asphalt*. *Construction and Building Materials*, v. 62, p. 1– 7, 2014.

EN 12591:2009. EUROPEAN STANDARD. *Bitumen and bituminous binders - Specifications for paving grade bitumen*. Setembro – 2009.

FHWA. *The Superpave System: New Tools for Designing and Building More Durable Asphalt Pavements*. Report FHWA-SA-96-010. FHWA, U.S. Department of Transportation, 1996

FGV, IBRE. Instituto brasileiro de economia. Relatório de Produção de Índices de Preços – Grupo de Itens Específicos. Relatório N°5750. Abril 2021. https://portalibre.fgv.br/?utm_source=portal-fgv&utm_medium=menu-indices&utm_campaign=portal-fgv-menu-indices, 2021.

FONTES, L. P.. *Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos*. Universidade do Minho, Portugal: tese de Doutorado, 2009.

GAO, J.; WANG, H.; BU, Y.; YOU, Z.; HASAN, M. R. M.; IRFAN, M.. *Effects of coarse aggregate angularity on the microstructure of asphalt mixture*. *Construction & building materials*. Vol.183, p.472-484., 2018.

GARCIA, D. C.; FAXINA, A. L.; LEONEL, E. D.. *Aplicação de parâmetro de resistência à fadiga para asfalto baseado na mecânica da fratura elástico-linear*. *Transportes*, V.20, 2020.

GRAÇA, D. C. S.; CARDOSO, G.; CAVALCANTE, E. H.. *Dosagem de mistura asfáltica com CAP 50/70 modificado com borra de petróleo*. *Scientia plena*, Vol.12, 2016.

GONÇALVES, F. P.. Estudo experimental do desempenho de pavimentos Flexíveis a partir de instrumentação e ensaios acelerados. 395f. Tese de Doutorado. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

GONZALEZ, R. C; WOODS, R. E.. Processamento Digital de Imagens. Pearson-3ª edição, São Paulo, 2010.

GOUVEIA, L. T.; FERNANDES JUNIOR, J. L.; SOARES. B.. Influência da energia de compactação no comportamento volumétrico e mecânico de misturas asfálticas. TRANSPORTES, v. 15, n. 1, p. 34-41, 2007.

GUIMARÃES, D. D'A.; MOTTA, L. M. G.; SILVAS, B. A.; FRITZEN, M. A.; CASTRO, C. E. N.. A influência da composição granulométrica segundo as metodologias Bailey, FAD e Marshall no desempenho à deformação permanente de misturas asfálticas. Matéria. Vol.27, 2022.

HABBOUCHE J.; HAJJ E.Y.; SEBAALY P.E.; PIRATHEEPAN M.. *A critical review of high polymer-modified asphalt binders and mixtures*. 2018.

HAJIKARIMI, P.; RAHI, M.; NEJAD, F. M.. *Comparing Different Rutting Specification Parameters Using High Temperature Characteristics of Rubber-Modified Asphalt Binders. Road Materials and Pavement Design*, v. 16, n. 4, p. 751-766. doi: 10.1080/14680629.2015.1063533., 2015.

HAN, M.; LI J.; MUHAMMAD Y.; YIN Y.; YANG J.; YANG S.; DUAN, S.. *Studies on the secondary modification of SBS modified asphalt by the application of octadecyl amine grafted graphene nanoplatelets as modifier. Diamond Relat. Mater.* 89 (Outubro): 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2018.08.011>., 2018.

HARVEY, J. T., TSAI, B. W.. Effects of asphalt content and air void content on mix fatigue and stiffness. Transportation Research Record 1543. Washington D.C., USA, 1996.

Hintz, C.. *Understanding mechanisms leading to asphalt binder fatigue*. Tese de doutorado. The University of Wisconsin, Madison, 2012.

HONG, W.; MO, L.; PAN, C.; RIARA, M.; WEI, M.; ZHANG, J.. *Investigation of rejuvenation and modification of aged asphalt binders by using aromatic oil-SBS polymer blend. Construction and Building Materials*, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117154>. 2020.

HOSSAIN, Z.; GHOSH, D.; ZAMAN, M.; HOBSON, K.. *Use of the Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test Method to Characterize PolymerModified Asphalt Binders. Journal of Testing and Evaluation*. Vol. 44, N. 1, 2016.

HUANG W.; LIN P.; TANG N.; HU J.; XIAO F.. *Effect of crumb rubber degradation on components distribution and rheological properties of Terminal Blend rubberized asphalt binder. Construction and Building Materials*, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.229. 2017.

HUNTER, R. N.; SELF, A.; READ, P. J.. *The Shell Bitumen Handbook. Fifth Edition*, 2015.

ILIOPOLOV, S. K.; UGLOVA, E. V.; GOLYUBIN, K. D.. *Determination of Suitable Binder Grade According to the Superpave Mix Design Method for Southern Russia. In Materials Science Forum (Vol. 870, pp. 293-297). Trans Tech Publications Ltd., 2016.*

ISLAM, S.; SINGH, S.K.; RANSINCHUNG, R.N., RAVINDRANATH, S.S. *Performance Deterioration of SBS-Modified Asphalt Mix: Impact of Elevated Storage Temperature and SBS Concentration of Modified Binder. J. Mater. Civ. Eng., 34(3): 04021475. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0004092>., 2022.*

JOHNSON, C. M.. *Estimating asphalt binder fatigue resistance using an accelerated test method. Tese (doutorado). Univer-sity of Wisconsin, Madison, 2010.*

KENNEDY, T. W.; HUBER, G. A.; HARRIGAN, E. T.; COMINSKY, R. J.; HUGHES, C. S.; VON QUINTUS, H.; MOULTHROP, J. S.. *Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program. Washington, DC, USA: Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1994.*

Keystone Group Latin America. *Rotermanni tn 14, Tallinn. <https://keystonegroup.eu/>, 2021*

KRATON. *ASPHALT BINDER MODIFICATION 101 SERIES*

https://kraton.com/products/pdf/TechPaper_AspphaltModification.pdf, 2022.

KIM, Y. R.; KHOSLA, N. P.; KIM, N.. *Effect of temperature and mixture variables on fatigue life predicted by diametral fatigue testing. Transportation Research Record 1317.* Washington D.C., USA, 1991.

KIM, Y.R.; N. KIM e KHOSLA N. P.. *Effects of Aggregate Type and Gradation on Fatigue and Permanent Deformation of Asphalt Concrete. Em Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance. American Society for Testing and Materials (ASTM), Philadelphia, 1992.*

KIM H.H.; MAZUMDER M.; LEE M.S.; LEE S.J.. *Evaluation of high-performance asphalt binders modified with SBS, SIS, and GTR. Advances in Civil Engineering.* DOI: 10.1155/2019/2035954., 2019.

KOK, B.; M. YILMAZ., *The effects of using lime and styrene-butadiene-styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt. Construction and Building Materials.* 23 (5): 1999–2006. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.019>., 2009.

KUMAR, Y.; SINGH S.; OBEROI D.; KUMAR P.; MOHANTY P.; RAVINDRANATH S.. *Effect of molecular structure and concentration of styrene-butadiene polymer on upper service temperature rheological properties of modified binders. Construction and Building Materials.* 249 (Julho): 118790. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118790>., 2020.

KUCHIISHI, K.; BARBOSA C. J.; BESSA, I.; VASCONCELOS, K.; BERNUCCI, L.. *Effect of temperature on the fatigue behavior of asphalt binder. Applied Rheology.* 29. 30-40. 10.1515/arh-2019-0004., 2019.

LEANDRO, R. P.; SAVASINI, K. V.; BERNUCCI, L. L. B.; CASTELO BRANCO, V. T. F.. *Influência das propriedades de forma da fração graúda do agregado no controle da deformação permanente de misturas asfálticas densas. Transportes,* 29(2), 2395, 2021.

LEE, J. H.; PARK, H. M.. *Performance evaluation of high modulus Asphalt mixtures for long life asphalt pavements. Construction and Building Materials,* 2006.

LEITE, L.F.M.. Estudo de Preparo e Caracterização de Asfalto Modificados por Polímero. Dissertação de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1999.

LEITE, L.F.M.; MOTTA, L. M. G.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B.. *Mechanical behavior of asphalt rubber mixes prepared in laboratory. Asphalt Rubber. Rhe Pavement Material of the 21st Century – Proceedings*. Portugal, 2000.

LEITE, L. F. M.; NASCIMENTO, L. A. H.; CHACUR, M.; MARTINS, A. T.; ROCHA, S. M. N.; FIGUEIREDO, U. S.. Emprego de asfaltosduros em rodovias de alto volume de tráfego. 7º CBR&C, Foz do Iguaçu, 2011.

LEPCHAK, A.. Avaliação da Eficiência das Atividades Logística Utilizando a Análise Envoltória de Dados (DEA). Dissertação (Mestrado em Contabilidade). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, 2014.

LIANG, M., LIANG P.; FAN W., QIAN C.; XIN X.; SHI J.; NAN G.. *Thermo-rheological behavior and compatibility of modified asphalt with various styrene-butadiene structures in SBS copolymers. Mater. Des.* 88: 177–185. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.002>., 2015.

LIMA, C. S.. Caracterização de Asfaltos Modificados com Borracha de Pneu e Aditivo. (Mestrado em Engenharia de Transporte da Universidade Federal do Ceará). Universidade Federal do Ceará. Ceará, Fortaleza, 2008.

LIN, P., C.; YAN, W.; HUANG, Y.; LI, L.; ZHOU, N.; TANG, F.; XIAO, F.; ZHANG, Q. L.. *Rheological, chemical, and aging characteristics of high content polymer modified asphalt. Construction and Building Materials.* 207 (Maio): 616–629. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.086>., 2019.

LIU H.; ZEIADA W.; GHAZI G.; AL-KHATEEB; SHANABLEH A.; SAMARAI M.. *Use of the multiple stress creep recovery (MSCR) test to characterize the rutting potential of asphalt binders: A literature review. Construction and Building Materials.* <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121320>. 2021.

MARTINS, A. T. Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para asfaltos asfálticos. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2014.

MANGIAFICO, S. *Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends*. Dissertação de Doutorado. École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE) de l'Université de Lyon (UdL), Vaulx-ex-Velin, 2014.

MARCOM, M. F.. Estudo e comparação do desempenho mecânico e reológico entre concretos asfálticos modificados por polímero SBS, borracha moída de pneu e nanomateriais. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2016.

MARCON. M. F. Estudo e comparação do desempenho mecânico e reológico entre concretos asfálticos modificados por polímero sbs, Borracha moída de pneu e nanomateriais. Universidade Federal de Santa Catarina, dissertação de mestrado, 2018.

MARTINS, A. T.; LEITE, L. F. M.; CRAVO, M. C.; NASCIMENTO, L. A. H.. Fluência e Relaxação sob Múltipla Tensão: Novo Teste para Avaliar Resistência à Deformação Permanente. Anais da 16ª RPU – 58 Transportes v. 21, n. 1, Belo Horizonte. 2009

MARTINS, A. T. Contribuição para a validação do ensaio de resistência ao dano por fadiga para ligantes asfálticos. Dissertação de mestrado apresentado na COPPE UFRJ para obtenção de mestre em engenharia, 2014.

MASAD, E.; AL-ROUSAN T.; BUTTON J.; LITTLE D.; TUTUMLUER E.. *Test Methods for Characterizing Aggregate Shape, Texture and Angularity*. NCHRP Final Report. Transportation Research Board, National Research Council, 2005.

MAZZONI, L. N.; TAKAHASHI, M. M.; VASCONCELOS, K. L.; BERNUCCI, L.. Avaliação da influência do envelhecimento e da temperatura nas características viscoelásticas de asfaltos asfálticos. Transportes (Rio de Janeiro), Vol.28 (1), p.135-146, 2020.

MEDINA, J.; MOTTA, L.M.G.. *Mecânicas dos Pavimentos*, Rio de Janeiro. Editora Interciência, 2015.

MOHAMED, A. A.. *Rheological properties of crumb-rubber modified bitumen containing antioxidant. The Arabian Journal for Science and Engineering. Dhahran*, v. 34, n. 1B, p. 3-12, 2008.

MONEA, R. M. J.. *Estudo de viabilidade de incorporação de borracha moída de pneus em asfaltos para impermeabilização na construção civil. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP). São Paulo, 2006.*

MORAES B. R.; SORAES A; S.; SOARES, J. B.. *Análise da susceptibilidade térmica de asfaltos através da energia de ativação de fluxo. Transportes*, 17(1). <https://doi.org/10.14295/transportes.v17i1.75>, 2009.

MORILHA, A. J.. *Estudo Sobre a Ação de Modificadores no Envelhecimento dos Asfaltos nas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2004.*

NCHRP. *Relationship Between Chemical Makeup of Binders and Engineering Performance*. 2017.

NEGRÃO, D. P.. *Estudo de asfaltos modificados por polímero do tipo RET para aplicações em pavimentos. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo (USP), 2006.*

NLT-329/91. *Recupetación elática por torsión de betunes asfálticos modificados.*, 1991.

NUNES, L. C.. *Fadiga de Misturas Asfálticas Descontínuas com Asfalto-Borracha de 4ª Geração. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.*

NUÑEZ, J. Y. M.. *Caracterização à fadiga de asfaltos modificados envelhecidos a curto e longo prazo. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.*

NUÑEZ, J. Y. M.; LEONEL, E. D.; FAXINA, A. L.. *Fatigue characteristics of modified asphalt binders using fracture mechanics. Engineering Fracture Mechanics*, V. 154, 2016

ODA, S.. Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Asfalto Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação. Dissertação de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2000.

ODA, S.; FERNANDES JR, J. L.. Borracha De Pneus Como Modificador De Cimentos Asfálticos Para Uso Em Obras De Pavimentação. *Acta Scientiarum. Technology* 23, 2001.

OLIVEIRA, Y.M.M.; THIVES, L.P.; CARLESSO, G.C.; SILVA, A.M.. Avaliação da predição do desempenho de misturas asfálticas por meio da caracterização reológicas dos asfaltos asfálticos. *Braz. J. of Develop.*, Curitiba, v. 6, n.4,p.17417-17435 apr. 2020. DOI:10.34117/bjdvn4-058., 2020.

OLIVEIRA, Y. M. M.. Reologia de asfaltos asfálticos e suas variações frente À incorporação de polímeros e ao envelhecimento Simplificado com RTFO. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Santa Catarina, 2022.

ONOFRE, F. C.; CASTELO BRANCO, V. T. F.; SOARES, J. B.; FAXINA, A. L.. Avaliação do Efeito de Asfaltos Modificados na Resistência à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Densas. *Transportes*, 21(3), 14–21. <https://doi.org/10.4237/transportes.v21i3.685>., 2013.

OSMARI, P. H.; LEITE, L. F. M.; ARAGÃO, F. T. S.; CRAVO, M. C. C.; DANTAS, L. N.; MACEDO, T. F.. *Cracking resistance evaluation of asphalt binders subjected to diferente laboratory and field aging conditions, Road Materials and Pavement Design*, DOI: 10.1080/14680629.2019.1618530. 2019.

PAMPLONA, T. F.; NUÑEZ, J. Y. M.; FAXINA, A. L.. Desenvolvimentos recentes em ensaios de fadiga em asfaltos asfálticos. *Transportes*, v. 22, n. 3, 2014.

PEREIRA, A. H. P.. Caracterização acústica de pavimentos rodoviários e influência na emissão sonora. Dissertação de Mestrado. Porto: Universidade do Porto, 2010.

REIS, R.M.. Revestimento Asfáltico Tipo SMA para Alto Desempenho em Vias de Tráfego Pesado. Dissertação de Mestrado, EPUSP, São Paulo, SP., 2002.

RELATIONSHIP BETWEEN CHEMICAL MAKEUP OF BINDERS AND ENGINEERING PERFORMANCE. National Academies of Sciences, Esngineering, and Medicine, 2017.

RODRIJGUEZ-ALLOZA, A. M.; GALLEGO, J. PEJREZ, I.; BONATI, A.; GIULIANI, F.. *High and low temperature properties of crumb rub-ber modified binders containing warm mx asphalt additives. Journal Construction and Building Materials 53 – p. 460-466, 2014.*

SABOURI, M.; MIRZAIYAN, D.; MONIRI, A.. Eficácia do teste de ligante asfáltico Linear Amplitude Sweep (LAS) na prvisão do desempenho de fadiga de misturas asfálticas. *Construção e Materiais de Construção. Volume 171, 2018.*

SANTOS, C. R. G.. Avaliação das influências do tipo de ligante e do volume de vazios na vida de fadiga de algumas misturas asfálticas. Dissertação de mestrado, Universidade de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2005.

SINGH S.K.; KUMAR, Y.; RAVINDRANATH, S.S.. *Thermal degradation of SBS in bitumen during storage: influence of temperature, SBS concentration, polymer type and base bitumen. Polym Degrad Stab;147:64–75, 2018.*

SCHAUR, A.; UNTERBERGER, S.; LACKNER, R.. *Impact of molecular structure of SBS on thermo-mechanical properties of polymer modified bitumen. Eur. Polym. J. 96 (Novembro): 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.09.017>., 2017.*

SHRPA. SHRP-A-404. *Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes. Whashington, D.C., EUA: Strategic Highway Research Program, National Research Council - Asphalt Research Program, 1994.*

SHUAICHENG, G.; QINGLI, D.; RUIZHE, S.; XIAO, S.; CHAO, L.. *Evaluation of properties and performance of rubber-modified con-crete for recycling of waste scrap tire. J. Clean. Prod., 201 (48), 681-689. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.046>., 2017.*

SILVA, L. S.; FORTE, M. M. C.; SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A.. Polímeros como modificadores asfálticos. Transportes. Rio de Janeiro, v. 10, n. 01, 2002.

SINDIVAPA, 2022. Concessões vão exigir importação de asfalto Sindicato das Empresas de Transporte de Cargas do Vale do Paraíba e Litorais Norte. Disponível em: < <http://www.sindivapa.com.br/rodovias/concessoes-vaio-exigir-importacao-de-asfalto/1940.html>). Acesso em 10/09/2022.

SINGH, B.; P. KUMAR.. *Effect of polymer modification on the ageing properties of asphalt binders: Chemical and morphological investigation. Construction and Building Materials*. 205: 633–641, 2016.

SINGH, B.; SABOO N.; KUMAR P.. *Use of Fourier transform infrared spectroscopy to study ageing characteristics of asphalt binders. Petroleum Science and Technology*. 35 (16): 1648–1654. <https://doi.org/10.1080/10916466.2017.1350710>., 2017.

SINGH, S.; KUMAR Y; RAVINDRANATH S.. *Thermal degradation of SBS in asphalt binder during storage: Influence of temperature, SBS concentration, polymer type and base asphalt binder. Polymer Degradation and Stability* 147 (Janeiro): 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.11.008>., 2018.

SINGH, S.; PANDEY A.; ISLAM S. S.; RANSINCHUNG G. D. R. N.; RAVINDRANATH S.. *Significance of frequency in quantifying the deterioration in the properties of SBS modified binders and rutting performance. Construction and Building Materials*. 262 (Janeiro): 120872. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120872>., 2020.

SIQUEIRA, C.T; BARBOSA, C.C; GERALDO, C.A; VITAL, R.B.N.. Utilização de asfalto-borracha na restauração da pavimentação da rodovia RJ-122. Revista Teccen. 14 (1): 28-32, 2021.

SOARES, J. B. Reflexões sobre um programa de pesquisa científica para a infraestrutura viária do Brasil. Transportes, v. 28, n. 5. DOI: <https://doi.org/10.14295/transportes v28i5.2174>., 2020

STASTNA, J.; ZANZOTTO, L.; VACIN, O. J.. *Viscosity function in polymer-modified asphalts*. *Journal of Colloid and Interface Science*, 22, 200-207. DOI: 10.1016/S0021-9797(02)00197-2, 2003.

THIVES, L.P.; PAIS, J.C.; PEREIRA, P.A.A.; PALHA, C.A.O.F.; TRICHÊS, G.. *Contribution of Asphalt Rubber Mixtures to Sustainable Pavements by Reducing Pavement Thickness*. *Materials*, 15, 8592. <https://doi.org/10.3390/ma15238592>., 2022.

TOMÉ, L. G. A.. Efeito da Adição de Nanoargilas e Nanocompósitos Argilas/SBS no Desempenho de Asfaltos Asfálticos. Tese de Doutorado em Engenharia Química do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Ceará, 2014.

TxDOT. <https://ftp.dot.state.tx.us/pub/txdot-info/cst/superpavebindspec.pdf>, 2022.

TSAI, B.; MONISMITH, C. L.. *Influence of asphalt binder properties on the fatigue performance of asphalt concrete pavements*. *J. Assoc. Asphalt Paving Technol.*, 74, 733–790, 2005.

VESTENA, P. M.. Segmento Experimentais na BR 116/RS Empregando TLAFLEX, HIMA e 55/75-E (SBS) Caracterização Avançada e Monitoramento. (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2021.

VIEIRA, P. A.. Biotratamento de Efluente Contaminado por Hidrocarbonetos de Petróleo. Dissertação de Doutorado em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, MG, 2008.

WALUBITA, L.F.; FUENTES, L.; PRAKOSO, A.; RICO PIANETA, L.M.; KOMBA, J.J.; NAIK, B.. *Correlating the HWTT laboratory test data to field rutting performance of in-service highway sections*. *Constr.Construir.Matéria*.236, 2020.

WANG, T.; YI, T.; YUZHEN, Z.. *The compatibility of SBS-modified asphalt*. *Petroleum science and technology*, v. 28, p.764-772, 2010

WANG S.; HUANG W.; LIU X.; LIN P.. *Influence of high content crumb rubber and different preparation methods on properties of asphalt under different aging conditions: Chemical properties, rheological properties, and fatigue performance. Construction and Building Materials*, doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126937., 2022.

WANG Y; YI H; LIANG P; CHAI C; YAN C; ZHOU S.. *Investigation on Preparation Method of SBS-Modified Asphalt Based on MSCR, LAS, and Fluorescence Microscopy. Applied Sciences*. 12(14):7304. <https://doi.org/10.3390/app12147304>., 2022.

WAY, G.B.. *OFGC Meets CRM: where the rubber meets the rubber: 15 Years of Durable Success. Asphalt Rubber. Proceedings*, Brasilia, Brazil, p. 49-63., 2003.

YAN, C.; HUANG, W.; LIN, P.; ZHANG, Y.; LV, Q.. *Chemical and rheological evolution of aging properties of high content SBS polymer modified asphalt. FUEL the science and technology of Fuel and Energy*. 417-426. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.022>, 2019.

YAO, Y.. *Micro- and nano-scale mechanisms of enzymatic treatment on the interfacial behaviors of sisal fiber reinforced bio-based epoxy resin. Industrial Crops And Products*, [S.L.], v. 194, p. 116319, abr. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116319>.

YILDIRIM, Y.. *Polymer modified asphalt binders. Construction and Building Materials*, v. 21, p. 66-72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.007>., 2007.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W.. *Principles of pavement design. John Wiley & Sons, Inc.* New York, Second Edition, 1975.

ZANELLA, L. C. H.. *Metodologia de Pesquisa*. 3. ed. atual. Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração, p 49, 50, 2013.

ZATARIN, A. P. M.; SILVA, A. L. F.; ANEMAM, L. S.; BARROS, M. R.; CHRISOSTOMO, W.. *Viabilidade da pavimentação com asfalto-borracha. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 5, n. 2, p. 649-674., 2017

ZHANG, Q.; WANG T.; FAN, W.; YING, Y.. *Evaluation of the properties of bitumen modified by SBS copolymers with different styrenebutadienestructure*. J. Appl. Polym. Sci. 131 (Jun): 1–7. <https://doi.org/10.1002/app.40398>., 2014.

ZEIADA, W.; LIU, H.; EZZAT, H.; AL- KHATEEB, G. G.; SHANE, U. B.; SHANABLEH, A.; SAMARAI, M.. *Review of the Superpave performance grading system and recent developments in the performance-based test methods for asphalt binder characterization*. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126063., 2021.

ZIARI, H.; AMINI, A.; GOLI, A.. *Investigation of blending conditions effect on GTR dissolution and rheological properties of rubberized binders*. *Construction and Building Materials*, v.242, pg.117828 . DOI. doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117828., 2020.

ZHU, J.; BIRGISSON, B.; KRINGOS, N.. *Polymer modification of bitumen: advances and challenges*. *European polymer journal*, v. 54, p. 18-38, 2014.

ANEXO

Tabelas

Tabela A1. Especificação do Cimento Asfáltico do Petróleo.

| Características | Unidade | Limites | | | | Métodos | | |
|---|---------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|--------------|-------|--------------|
| | | ASFALTO 30/45 | ASFALTO 50/70 | ASFALTO 85/100 | ASFALTO 150/200 | ABNT | ASTM | DNER |
| Penetração (100g, 5s, 25°C) | 0,1mm | 30-45 | 50-70 | 85-100 | 150-200 | NBR 6576 | D5 | ME 003/99 |
| Ponto de amolecimento, mín. | °C | 52 | 46 | 43 | 37 | NBR 6560 | D 36 | |
| Viscosidade Saybolt Furol a 135°C, mín | s | 192 | 141 | 110 | 80 | NBR 14950 | E 102 | ME 004/94 |
| a 150°C, mín | | 90 | 50 | 43 | 36 | | | |
| a 177°C | | 40-150 | 300-150 | 15-60 | 15-60 | | | |
| OU | | | | | | | | |
| Viscosidade aparente | cP | | | | | NBR 15184 | D4402 | |
| a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín. | | 374 | 274 | 214 | 155 | | | |
| a 150°C, SP 21, min | | 203 | 112 | 97 | 81 | | | |
| a 177°C, SP 21 | | 76-285 | 57-285 | 28-114 | 28-114 | | | |
| Índice de susceptibilidade térmica ¹ | | (1,5) a (+0,7) | (1,5) a (+0,7) | (1,5) a (+0,7) | (1,5) a (+0,7) | | | |
| Ponto de fulgor mín | °C | 235 | 235 | 235 | 235 | NBR 11341 | D 92 | ME 149/49 |
| Solubilidade em tricloro etileno, mín. | % Massa | 99,5 | 99,5 | 99,5 | 99,5 | NBR 14855 | D2042 | ME 153/94 |
| Ductilidade a 25°C, mín | cm | 60 | 60 | 100 | 100 | NBR 6293 | D113 | ME 163/98 |
| Efeito do Calor e do ar (RTFO) a 163°C, 85 min | | | | | | | D2872 | |
| Varição em massa, máx. ² | % Massa | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | | | |
| Ductilidade a 25°C, mín | cm | 10 | 20 | 50 | 50 | NBR 6293 | D113 | ME 163/98 |
| Aumento do ponto de amolecimento, máx | °C | 8 | 8 | 8 | 8 | NBR 6560 | D36 | |
| Penetração retida, mín. ³ | % | 60 | 55 | 55 | 50 | NBR 6576 | D5 | ME 003/99 |

Fonte: Adaptado de BRASIL (2006).

Observações da Tabela A1:

(1) O Índice de susceptibilidade térmica (IST) é obtido a partir da Equação:

$$IST = \frac{(500) (\log PEN) + (20) (T^{\circ}C) 1951}{120(50) (\log PEN) + (T^{\circ}C)}$$

Em que: (T°C) é o Ponto de amolecimento, PEN = penetração 25°C, 100g, 5s.

(2) A variação em massa, em porcentagem, é definida como: (M = (M inicial - M final) / M inicial x 100, onde: M inicial massa antes do ensaio RTFO M final massa após o ensaio RTFO.

(3) A Penetração retida é definida como: PEN_{retida} = (PEN_{final} / PEN_{inicial}) x 100, onde: PEN_{inicial} penetração antes do ensaio RTFO, PEN_{final} penetração após o ensaio RTFO.

Tabela A2. Especificação SUPERPAVE.

| PG | PG 46 | PG 52 | PG 58 | PG 64 | PG 70 | PG 76 | PG 82 |
|---|----------------------|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Temperatura média semanal máxima, °C | <46 | <52 | <58 | <64 | <70 | <76 | <82 |
| Temperatura mínima do dimensionamento do pavimento | > -34 >- 40 > -46 | >-10 >-16 >-22 >- 28 >-34 >-40 >-46 | >-16 >-22 >- 28 >-34 >-40 |
| Asfalto Original | | | | | | | |
| Ponto de Fulgor ASTM D92, °C | | | | 230 | | | |
| Viscosidade ASTM D4402: máx. 3 Pa.s, Temperatura do ensaio °C | | | | 135 | | | |
| DSR, ASTM D7175: G*/sen(δ), mín. 1kPa, prato 25mm, 1mm distância, 10 rad/s, Temperatura °C | 46 | 52 | 58 | 64 | 70 | 76 | 82 |
| RTFO ASTM D2872 | | | | | | | |
| Variação de massa, percentual máximo | | | | 1 | | | |
| DSR, ASTM D7175: G*.sen(δ), mín. 2,2kPa, prato 25mm, 1mm distância, 10 rad/s, Temperatura °C | 46 | 52 | 58 | 64 | 70 | 76 | 82 |
| PAV ASTM D6521 | | | | | | | |
| Temperatura máxima do PAV, °C | 90 | 90 | 100 | 100 | 100 (110) | 100 (110) | 100 (110) |
| DSR, ASTM D7175: G*.sen(δ), máx 5000kPa, prato 25mm, 1mm distância, 10 rad/s, Temperatura °C | 10 7 4 | 25 22 19 16 13 10 7 | 25 22 19 16 13 | 31 28 25 22 19 16 | 34 31 28 25 22 19 | 37 34 31 28 35 | 40 37 34 32 28 |
| BBR ASTM D6648, máx 300 MPa, m-valor; mín. 0,3, temperatura de ensaio aos 60s, °C | -24 -30 - 36 | 0 -6 -12 -18 -24 -30 -36 | -6 -12 -18 -24 -30 | 0 -6 -12 -18 - 24 -30 | 0 -6 -12 -18 - 24 | 0 -6 -12 - 18 -24 | 0 -6 -12 - 18 -24 |
| Tensão direta ASTM D6723, falha na deformação, mín. 1% temperatura do teste a 1mm/min °C | -24 -30 - 36 | 0 -6 -12 -18 -24 -30 -36 | -6 -12 -18 -24 -30 | 0 -6 -12 -18 - 24 -30 | 0 -6 -12 -18 - 24 | 0 -6 -12 - 18 -24 | 0 -6 -12 - 18 -24 |

Fonte: Adaptado de ASTM (2021).

Tabela A3. Especificação asfalto modificado com polímero elastomérico.

| Grau (Ponto de Amolecimento mín. / Recuperação Elástica mín.) Ensaio amostra original | Unidade | 55/75 | 60/85 | 65/90 | Método ABNT |
|--|---------|-------------------------|-------|-------|-------------|
| | | Limite da Especificação | | | |
| Penetração 25 °C, 5 s, 100 g | 0,1mm | 45-70 | 40-70 | 40-70 | NBR 6576 |
| Ponto de Amolecimento, mín. | °C | 55 | 60 | 65 | NBR 6560 |
| Ponto de Fulgor, mín. | °C | 235 | 235 | 235 | NBR 11341 |
| Viscosidade Brookfield a 135 °C, spindle 21, 20 rpm, máx. | cP | 3000 | 3000 | 3000 | NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 150 °C, spindle 21, 50 rpm, máx. | cP | 2000 | 2000 | 2000 | NBR 15184 |
| Viscosidade Brookfield a 177 °C, spindle 21, 100 rpm, máx. | cP | 1000 | 1000 | 1000 | NBR 15184 |
| Ensaio de Separação de Fase, máx. | °C | 5 | 5 | 5 | NBR 15166 |
| Recuperação Elástica a 25 °C, 20 cm, mín. | % | 75 | 85 | 90 | NBR 15086 |
| Efeito do calor e do ar (RTFO) a 163°C, 85 min. | | | | | |
| Varição de massa, máx., (1) (2) | % | 1 | 1 | 1 | NBR 15235 |
| Aumento do PA, máx. (2) | °C | 7 | 7 | 7 | NBR 6560 |
| Redução do PA, máx. (2) | °C | 5 | 5 | 5 | NBR 6560 |
| Porcentagem de Penetração Original, mín. (2) | % | 60 | 60 | 60 | NBR 6576 |
| Porcentagem de Recuperação Elástica Original a 25°C, mín. (2) | % | 80 | 80 | 80 | NBR 15086 |

(1) A variação em massa, em porcentagem, é definida como: $\Delta M = [(M \text{ inicial} - M \text{ final}) / M \text{ inicial}] \times 100$ onde: M inicial – massa antes do ensaio RTFO M final – massa após o ensaio RTFO

(2) Ensaio realizado após teste RTFO

Fonte: Adaptado Brasil (2011)

Tabela A4. Especificação brasileira do asfalto modificado com borracha via processo *Terminal blend*.

| Características | Unidade | AsfaltoBorracha | | Método de ensaio |
|--|---------|-----------------|------------|------------------|
| | | Tipo AB 8 | Tipo AB 22 | |
| Penetração, 100 g, 5 s, 25°C | 0,1mm | 30-70 | 30-70 | DNER ME 003/99 |
| Ponto de Amolecimento ¹ , mín, °C | °C | 55 | 57 | DNER ME-247/94 |
| Viscosidade aparente ² , 175°C, 20 rpm, sp ³ 3 | cP | 800-2000 | 2200-4000 | NBR 15529 |
| Ponto de Fulgor, mín. | °C | 235 | 235 | DNER ME 148/94 |
| Recuperação Elástica Ductilômetro, 25°C, 10 cm, mín | % | 50 | 55 | NBR 15086:2006 |
| Estabilidade à estocagem, máx. | °C | 9 | 9 | DNER ME-384/99 |
| RTFO ⁴ a 163°C, 85 min | | | | |
| Varição de massa, máx. | % | 1 | 1 | NBR 15235:2006 |
| Varição do Ponto de Amolecimento, máx. | °C | 10 | 10 | DNER ME-247/94 |
| Porcentagem de Penetração Original, mín. | % | 55 | 55 | DNER ME 003/99 |
| Porcentagem da Recuperação Elástica Original, 25°C 10cm, mín. | % | 100 | 100 | NBR 15086:2006 |

¹Método anel e bola; ²Viscosímetro Brookfield, ³spindle; ⁴Ensaio em estufa de filme fino rotativo.

Fonte: Adaptado Brasil (2009).