



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

**Maurício Tonial**

**DESENVOLVIMENTO DE MISTURA ASFÁLTICA MODIFICADA  
COM O USO DE LÁTEX DE BORRACHA NATURAL E AVALIAÇÃO  
DO SEU COMPORTAMENTO MECÂNICO E REOLÓGICO**

FLORIANÓPOLIS

2023

Maurício Tonial

**DESENVOLVIMENTO DE MISTURA ASFÁLTICA MODIFICADA  
COM O USO DE LÁTEX DE BORRACHA NATURAL E AVALIAÇÃO  
DO SEU COMPORTAMENTO MECÂNICO E REOLÓGICO**

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.

Orientador: Prof. Dr. João Victor Staub de Melo.

Florianópolis

2023

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

Tonial, Maurício

Desenvolvimento de Mistura Asfáltica Modificada com o  
Uso de Látex de Borracha Natural e Avaliação do seu  
Comportamento Mecânico e Reológico / Maurício Tonial ;  
orientador, João Victor Staub de Melo, 2023.

137 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Látex de Borracha Natural. 3.  
Ligante Asfáltico. 4. Deformação Permanente. 5. Resistência  
à Fadiga. I. Melo, João Victor Staub de. II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil. III. Título.

Maurício Tonial

**Desenvolvimento de Mistura Asfáltica Modificada com o Uso de Látex de Borracha Natural e Avaliação do seu Comportamento Mecânico e Reológico**

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

Prof. Dr. Lélío Antônio Teixeira Brito – PPGCI/UFRGS

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul*

Prof. Dr. Breno Salgado Barra – PPGEC/UFSC

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina*

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<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fernanda Fernandes Marchiori  
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Dr. João Victor Staub de Melo  
Orientador

Florianópolis, 2023.

Aos meus pais, Álvaro e Marli, por acreditar na busca de meus sonhos e partilhar de minhas realizações.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela existência e por me conduzir nesta minha caminhada.

À minha família, pelo amor e pelos ensinamentos demonstrados.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Victor Staub de Melo, pelos valiosos ensinamentos e conselhos, tornando esse período muito proveitoso.

A todos os professores, pelas aulas ministradas e pelos conhecimentos transmitidos, que, de alguma forma, fizeram parte para que este momento fosse possível.

Aos futuros mestres e doutores do Laboratório de Pavimentação (LABPAV), Alexandre, Juliano, Jaqueline, Hedelvan e Rafael, pelo auxílio durante a realização dos ensaios laboratoriais.

Aos professores Dr. Lélío Antônio Teixeira Brito e Dr. Breno Salgado Barra que fazem parte da banca avaliadora, os quais, com suas observações e sugestões, puderam engradecer a minha pesquisa e o meu conhecimento.

Ao Laboratório de Pavimentação (LABPAV) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), pela disponibilização dos equipamentos e pelo fornecimento de parte dos materiais necessários para a realização dos ensaios da minha pesquisa.

Ao Laboratório de Nanotecnologia (NANOTEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), pela realização do ensaio de difratometria de raios X (DRX).

Ao Laboratório de Controle e Processos de Polimerização (LCP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), pela realização do ensaio de termogravimetria e derivada de massa (TGA/DTG).

Ao Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), pela realização do ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Ao Laboratório Multiusuário de Estudos em Biologia (LAMEB) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), pela realização do ensaio de micrografia de fluorescência.

À Central de Análises do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos (EQA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), pelo apoio nos ensaios de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

Ao Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica (LAMMEN) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), pelo apoio nos ensaios de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

Ao Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav) do *campus* de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), especialmente aos professores Dr. Breno Salgado Barra e Dr. Yader Alfonso Guerrero Pérez, pelo corte das placas de mistura asfáltica para o ensaio do módulo dinâmico e resistência à fadiga.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC), pela oportunidade de realização do mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo incentivo à pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Aos meus colegas de trabalho, pela colaboração e amizade durante todo este período de mestrado.

Muito obrigado!

*Voarei*, disse a lagarta.  
Todos riram. Exceto as borboletas.  
Autor desconhecido.



## RESUMO

A inserção de látex de borracha natural no ligante asfáltico tem potencial para ser um biomodificador eficaz no desempenho mecânico e reológico das misturas asfálticas. Nesse viés, este estudo buscou desenvolver uma mistura asfáltica densa modificada com látex de borracha natural, com propriedades reológicas e mecânicas superiores a uma matriz convencional formulada a partir de ligante asfáltico 50/70. Para isso, foram produzidos e investigados compósitos asfálticos com 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 15% de látex incorporados em peso no ligante base. As propriedades empíricas, mecânicas e reológicas do ligante de referência e dos compósitos foram determinadas nesta pesquisa. O teor de 12% de látex adicionado no ligante asfáltico 50/70 foi considerado como ideal, com base em parâmetros reológicos, principalmente, considerando os resultados do ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR). Por conseguinte, uma mistura asfáltica modificada com o compósito asfalto-látex (12% de látex) foi produzida e comparada com uma mistura de referência, em relação ao desempenho mecânico e reológico. Como resultados, constatou-se que o látex melhorou as propriedades gerais da matriz asfáltica, tanto para o ligante quanto para a mistura. A nível de ligante, os parâmetros reológicos indicaram que a adição de látex repercutiu em um ligante menos susceptível ao acúmulo de deformações irreversíveis em altas temperaturas e mais tolerante aos danos por fadiga em temperaturas intermediárias. Por fim, a nível de mistura asfáltica, a matriz produzida com asfalto-látex (12% de látex) apresentou comportamento superior à deformação permanente comparativamente a matriz convencional, houve redução de aproximadamente 42% no afundamento em trilha de roda com a adição do látex de borracha natural. Por fim, a incorporação do látex não prejudicou a resistência à fadiga da mistura asfáltica, melhorando ligeiramente o comportamento do material. Conclui-se que a incorporação de 12% de látex no ligante asfáltico 50/70 e, conseqüentemente, na mistura asfáltica, melhorou efetivamente o desempenho mecânico e reológico do material, sendo este o teor de incorporação indicado para o ligante asfáltico base com classificação 50/70. Recomenda-se, para pesquisas futuras, avaliar a mistura asfáltica desenvolvida em segmentos experimentais de campo, visando observar o seu desempenho na camada de rolamento do pavimento sob ação do tráfego e das condições climática.

**Palavras-chave:** Látex de Borracha Natural. Ligante Asfáltico. Modificação. Reologia. Mistura Asfáltica. Desempenho Mecânico. Deformação Permanente. Resistência à Fadiga.

## ABSTRACT

The insertion of natural rubber latex in the asphalt binder has the potential to be an effective biomodifier in the mechanical and rheological performance of asphalt mixtures. In this context, this study sought to develop a dense asphalt mixture modified with natural rubber latex, with rheological and mechanical properties superior to a conventional matrix formulated from a 50/70 asphalt binder. For this, asphalt composites with 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% and 15% of latex incorporated by weight in the base binder were produced and investigated. The empirical, mechanical and rheological properties of the reference binder and the composites were determined in this research. The content of 12% latex added to the 50/70 asphalt binder was considered ideal, based on rheological parameters, mainly considering the results of the Multiple Stress Creep and Recovery Test (MSCR). Therefore, an asphalt mix modified with the asphalt-latex composite (12% latex) was produced and was compared with a reference mix, regarding mechanical and rheological performance. As a result, it was found that the latex improved the general properties of the asphalt matrix, both for the binder and for the mixture. At the binder level, the rheological parameters indicated that the addition of latex resulted in a binder less susceptible to the accumulation of irreversible deformations at high temperatures and more tolerant to fatigue damage at intermediate temperatures. Finally, in terms of asphalt mix, the matrix produced with asphalt-latex (12% latex) showed a superior behavior in permanent deformation compared to the conventional matrix, there was a reduction of approximately 42% in sinking in wheel tracks with the addition of natural rubber latex. Finally, the incorporation of latex did not affect the fatigue strength of the asphalt mixture, slightly improving the behavior of the material. It is concluded that the incorporation of 12% of latex in the 50/70 asphalt binder and, consequently, in the asphalt mixture, effectively improved the mechanical and rheological performance of the material, being this the incorporation content indicated for the base asphalt binder with classification 50/70. It is recommended for future research to evaluate the asphalt mix developed in experimental field segments, aiming to observe its performance in the pavement's running layer under the action of traffic and climatic conditions.

**Keywords:** Natural Rubber Latex. Asphalt Binder. Modification. Rheology. Asphalt Mixtures. Mechanical Performance. Permanent Deformation. Fatigue Resistance.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Módulo de cisalhamento dinâmico ( $ G^* $ ) em diferentes temperaturas para os teores de 0%, 2%, 4% e 8% de PET adicionado ao ligante asfáltico.....	32
Figura 2.2: Ângulo de fase ( $\delta$ ) em diferentes temperaturas para os teores de 0%, 2%, 4% e 8% de PET adicionado ao ligante asfáltico.....	32
Figura 2.3: Estrutura química da molécula poli(1,4-cis-isopreno) na forma de látex de borracha natural extraído da <i>Hevea brasiliensis</i> .....	33
Figura 2.4: Viscosidade do ligante asfáltico 60/70 de referência e modificado com diferentes porcentagens de látex em duas temperaturas de teste.....	37
Figura 2.5: Análise do (a) módulo de cisalhamento dinâmico ( $ G^* $ ) e do (b) ângulo de fase ( $\delta$ ) do ligante asfáltico 60/70 de referência, de alto desempenho e modificado com 5% de teor de látex, em diferentes temperaturas, a uma frequência de ensaio igual a 1,59 Hz. ....	39
Figura 2.6: $ G^* /\text{sen } \delta$ versus temperatura para o ligante asfáltico 60/70 de referência, de alto desempenho e o modificado com adição de 5% de látex, nas condições virgem e envelhecida (RTFOT).....	40
Figura 2.7: Resultados para (a) $J_{nr}$ e (b) %R para ligantes asfálticos modificados com diferentes teores de látex, na condição virgem, a uma temperatura de 60 °C. ....	41
Figura 2.8: $ G^*  \text{ sen } \delta$ versus temperatura para o ligante asfáltico 60/70 de referência e o modificado com adição de 3%, 5% e 7% de látex, na condição envelhecida (RTFOT), em diferentes temperaturas de ensaio.....	42
Figura 2.9: Micrografia eletrônica de varredura do (a) látex de borracha natural, (b) ligante asfáltico 60/70 de referência e ligante asfáltico modificado com adição de (c) 3%, (d) 7% e (e) 12% de látex de borracha natural. ....	44
Figura 2.10: Espectroscopia de infravermelho (transmitância versus número de onda) do (a) ligante asfáltico 60/70 de referência, (b) ligante de alto desempenho e (c) ligante asfáltico modificado com 5% de látex. ....	45
Figura 2.11: Deformação versus tempo para as misturas asfálticas modificadas com teores de 0%, 2%, 4% e 6% de látex de borracha natural. ....	48
Figura 2.12: Resultados da fadiga através do número de ciclos até a falha para as misturas asfálticas de referência e modificadas com 3%, 6%, 9% e 12% de borracha natural epoxidada. ....	49
Figura 3.1: Programa experimental da pesquisa dividido em 5 etapas principais.....	50

Figura 3.2: Estrutura da primeira etapa do programa experimental.....	51
Figura 3.3: Estrutura da segunda etapa do programa experimental. ....	55
Figura 3.4: Luvas de látex (a) separadas, (b) lavadas e (c) picotadas manualmente.....	56
Figura 3.5: Hélice do misturador mecânico de alto cisalhamento utilizado na pesquisa. ....	57
Figura 3.6: Estrutura da terceira etapa do programa experimental.....	60
Figura 3.7: (a) Cilindro metálico rígido envolto com a fita de PTFE, (b) camada de silicone acético e (c-d) cilindros de vidro característicos do ensaio RTFOT adaptados. ....	62
Figura 3.8: Estrutura da quarta etapa do programa experimental.....	68
Figura 3.9: Curva granulométrica da combinação dos agregados utilizados na pesquisa. ....	69
Figura 3.10: Estrutura da quinta etapa do programa experimental.....	71
Figura 3.11: Placas de mistura asfáltica para (a) ensaio da deformação permanente e (b) para o ensaio de módulo dinâmico e fadiga. ....	72
Figura 3.12: Pontos de leitura de deformações na placa de mistura asfáltica (cotas em cm)...	73
Figura 3.13: Plano de corte contendo a vista superior e lateral dos corpos de prova prismáticos sobre a placa de mistura asfáltica (cotas em cm).....	74
Figura 3.14: Corpos de prova prismáticos de mistura modificada com látex para os ensaios de módulo dinâmico e desempenho à fadiga.....	75
Figura 4.1: Espaço amostral do comprimento e da largura das luvas de látex picotadas.....	80
Figura 4.2: Micrografia de um fragmento de luva de látex (magnitude de 200x).....	80
Figura 4.3: Análise TGA/DTG da amostra de fragmentos de luva de látex em função da temperatura. ....	81
Figura 4.4: Difratoograma de raios X do látex proveniente de fragmentos de luvas comerciais. ....	82
Figura 4.5: Espectros na região de infravermelho para a amostra de fragmentos de luva de látex. ....	83
Figura 4.6: Micrografia de varredura do ligante asfáltico de referência e dos ligantes modificados com diferentes teores de látex (magnitude de 200x). ....	85
Figura 4.7: Difratoograma de raios X dos ligantes asfálticos de referência e modificados com diferentes teores de látex, através da curva intensidade do feixe <i>versus</i> $2\theta$ .....	86
Figura 4.8: Espectros na região de infravermelho para os ligantes asfálticos de referência e modificados com diferentes teores de látex.....	87
Figura 4.9: Micrografia de fluorescência para os ligantes asfálticos de referência e modificados com látex nos teores de 4%, 8% e 12%. ....	88

Figura 4.10: Variação de massa ocorrida após o ensaio de envelhecimento a curto prazo (RTFOT) para os ligantes asfálticos de referência e modificados nos diferentes teores de látex. ....	90
Figura 4.11: Viscosidade aparente dos ligantes asfálticos de referência e modificados com diferentes teores de látex (amostras virgens).....	92
Figura 4.12: <i>Continuous Grade</i> e classificação PG do ligante asfáltico de referência e dos modificados nos diferentes teores de látex (amostras virgens e envelhecidas no RTFOT). ....	93
Figura 4.13: Índice de envelhecimento (AI) dos ligantes asfálticos de referência e modificados em função da temperatura de análise.....	94
Figura 4.14: Parâmetros de (a) compliância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) e (b) percentual de recuperação (%R), a 3,2 kPa, em função dos diferentes teores de látex (resíduos RTFOT)....	95
Figura 4.15: Percentual de recuperação <i>versus</i> compliância não-recuperável a 3,2 kPa, para os ligantes de referência e modificados (resíduos RTFOT).....	96
Figura 4.16: Classificação dos ligantes asfálticos de referência e modificados quanto ao nível de tráfego conforme resultados de compliância não-recuperável obtidos nas temperaturas altas do PG (resíduos RTFOT). ....	98
Figura 4.17: (a) Parâmetro A e (b) parâmetro B dos ligantes asfálticos de referência e modificados nos diferentes teores de látex (resíduos RTFOT), considerando a planilha AASHTO TP-101-12-Modified – temperatura de 20 °C.....	99
Figura 4.18: (a) Parâmetro A e (b) parâmetro B dos ligantes asfálticos de referência e modificados nos diferentes teores de látex (resíduos RTFOT), considerando a planilha AASHTO T 391-20 – temperatura de 20 °C.. ....	99
Figura 4.19: Fator de fadiga do ligante (FFL) dos ligantes asfálticos de referência e modificados, ensaiados a 20 °C.....	101
Figura 4.20: Curvas isotérmicas para o ligante asfáltico de referência e modificado com 12% de látex (resíduos RTFOT).....	102
Figura 4.21: Curvas isócronas para o ligante asfáltico de referência e modificado com 12% de látex (resíduos RTFOT).....	103
Figura 4.22: Diagrama de espaço de Black para o ligante asfáltico de referência e modificado com 12% de látex (resíduos RTFOT).....	104
Figura 4.23: Plano Cole-Cole para o ligante asfáltico de referência e modificado com 12% de látex (resíduos RTFOT).....	105
Figura 4.24: Seleção do teor ótimo de látex a partir do ensaio MSCR (resíduos RTFOT)....	106

Figura 4.25: Valores de deformação permanente médio em função do número de ciclos para as placas de mistura asfáltica ensaiadas nas três classes de desempenho LCPC (misturas do tipo EB14-BBSG). .....	110
Figura 4.26: Curvas isotérmicas das misturas asfálticas de referência (SCHUSTER, 2020) e modificada (12% de látex), para as diferentes temperaturas ensaiadas.....	112
Figura 4.27: Curvas isócronas das misturas asfálticas de referência (SCHUSTER, 2020) e modificada (12% de látex), para as diferentes frequências ensaiadas.....	113
Figura 4.28: Diagrama de espaço de Black das misturas asfálticas de referência (SCHUSTER, 2020) e modificada (12% de látex).....	115
Figura 4.29: Planos Cole-Cole das misturas asfálticas de referência (SCHUSTER, 2020) e modificada (12% de látex).....	116
Figura 4.30: Curvas de fadiga plotadas pelo número de ciclos <i>versus</i> deformação das misturas asfálticas analisadas. ....	117
Figura 4.31: Fator de fadiga do ligante (FFL) e fator de fadiga da mistura (FFM) plotados em conjunto para a matriz asfáltica estudada. ....	119
Figura A.1: $ G^* /\sin \delta$ <i>versus</i> teor de incorporação de látex, na condição virgem, para as diferentes temperaturas de ensaio. ....	133
Figura A.2: $ G^* /\sin \delta$ <i>versus</i> teor de incorporação de látex, na condição envelhecida (RTFOT), para as diferentes temperaturas de ensaio.....	133

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Síntese de pesquisas que utilizaram polímeros como agente modificador em ligantes asfálticos. ....	30
Tabela 2.2: Resumo das propriedades do látex de borracha natural. ....	34
Tabela 2.3: Síntese bibliográfica do uso do látex de borracha natural como modificador das propriedades mecânicas e reológicas de ligantes asfálticos. ....	36
Tabela 2.4: Resumo das técnicas de caracterização da microestrutura. ....	43
Tabela 2.5: Síntese bibliográfica das misturas asfálticas modificadas com látex de borracha natural. ....	46
Tabela 3.1: Matriz fatorial de asfalto-látex (AL). ....	56
Tabela 3.2: Porcentagens de material passante para a série de peneiras ASTM. ....	69
Tabela 3.3: Parâmetros volumétricos da mistura asfáltica de referência, considerando o teor de ligante de projeto igual a 4,65%. ....	70
Tabela 3.4: Classe de mistura asfáltica em função do afundamento de trilha de roda. ....	74
Tabela 3.5: Condições de ensaio de módulo dinâmico e fadiga. ....	75
Tabela 4.1: Caracterização dos agregados minerais. ....	77
Tabela 4.2: Caracterização do ligante asfáltico 50/70. ....	78
Tabela 4.3: Composição das luvas de látex. ....	78
Tabela 4.4: Composição química média do látex de borracha natural. ....	79
Tabela 4.5: Composição química média do pó bioabsorvível de amido de milho. ....	79
Tabela 4.6: Diferença nos valores de ponto de amolecimento dos ligantes asfálticos após o ensaio de estabilidade ao armazenamento. ....	91
Tabela 4.7: Número de ciclos estimados da tolerância do material ao dano por fadiga (resíduos RTFOT). ....	100
Tabela 4.8: Variação percentual dos principais parâmetros referentes aos ligantes asfálticos de referência e modificado com 12% de látex. ....	107
Tabela 4.9: Volume de vazios das placas de mistura asfáltica de referência e modificada. ..	108
Tabela 4.10: Valores de deformação obtidos em cada ciclo para as placas de mistura asfáltica de referência (SCHUSTER, 2020) e modificada (12% de látex). ....	109
Tabela 4.11 Volume de vazios dos corpos de prova prismáticos utilizados para determinação do módulo dinâmico das misturas asfálticas estudadas. ....	111
Tabela 4.12: Suscetibilidade cinética das misturas asfálticas analisadas. ....	1122

Tabela 4.13: Perda no módulo dinâmico considerando uma amplitude de temperatura de 0 °C a 30 °C para ambas as misturas asfálticas analisadas. ....	114
Tabela 4.14: Resultados obtidos no ensaio de fadiga para as misturas asfálticas analisadas. ....	117
Tabela 4.15: Resultados dos modelos de fadiga para as misturas asfálticas analisadas. ....	118
Tabela B.1: Módulo de cisalhamento dinâmico (kPa) para os ligantes asfálticos de referência e modificado com 12% de látex em função das diferentes frequências e temperaturas de teste. ....	134
Tabela B.2: Variação do ângulo de fase para os ligantes asfálticos de referência e modificado com 12% de látex em função das diferentes frequências e temperaturas de ensaio. ....	134
Tabela B.3: Módulo de armazenamento cisalhante ( $ G'  $ ) e módulo de perda cisalhante ( $ G''  $ ), em kPa, para o ligante asfáltico de referência em função das diferentes frequências e temperaturas de ensaio. ....	135
Tabela B.4: Módulo de armazenamento cisalhante ( $ G'  $ ) e módulo de perda cisalhante ( $ G''  $ ), em kPa, para o ligante asfáltico modificado com 12% de látex em função das diferentes frequências e temperaturas de ensaio. ....	135
Tabela C.1: Comportamento das misturas asfálticas para o módulo dinâmico (MPa). ....	136
Tabela C.2: Variação do ângulo de fase nas diferentes frequências e temperaturas das misturas asfálticas analisadas. ....	136
Tabela C.3: Módulo de perda (E2) e módulo de armazenamento (E1) da mistura de referência nas diferentes frequências e temperaturas. ....	137
Tabela C.4: Módulo de perda (E2) e módulo de armazenamento (E1) da mistura modificada nas diferentes frequências e temperatura. ....	137



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i> – Associação Americana de Rodovias do Estado e Funcionários de Transporte
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFNOR	<i>Association Française de Normalisation</i> – Associação Francesa de Normalização
AI	<i>Aging Index</i> – Índice de Envelhecimento
AL	Asfalto-Látex
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> – Sociedade Americana de Ensaio e Materiais
BBSG	<i>Béton Bitumineux Semi-Grenus</i>
BS	<i>British Standard</i> – Norma Britânica
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CENPES	Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DRX	Difratometria de Raios X
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i> – Reômetro de Cisalhamento Dinâmico
DTG	Derivada da Termogravimetria
EN	<i>Europäische Norm</i> – Norma Europeia
EQA	Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da UFSC
EVA	Etileno-Acetato de Vinila
FFL	Fator de Fadiga do Ligante
FFM	Fator de Fadiga da Mistura
FTIR	<i>Fourier Transform Infrared Spectrometer</i> - Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
GTR	Borracha de Pneu
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i> – Misturas Asfálticas a Quente
ICDD	<i>International Centre for Diffraction Data</i> – Centro Internacional para Dados de Difração
LABPAV	Laboratório de Pavimentação da UFSC

LAMEB	Laboratório Multiusuário de Estudos em Biologia da UFSC
LAMMEN	Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica da UFRN
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i> – Varredura de Amplitude Linear
LAMP	Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira da UFPR
LCME	Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da UFSC
LCP	Laboratório de Controle e Processos de Polimerização da UFSC
LCPC	<i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i> – Laboratório Central de Pontes e Estradas
LDPE	Poliétileno de Baixa Densidade
LDTPav	Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação da UFSC
LLDPE	Poliétileno Linear de Baixa Densidade
MARC	<i>Modified Asphalt Research Center at University of Wisconsin</i> – Centro de Pesquisa de Asfalto Modificado da Universidade de Wisconsin
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MSCR	<i>Multiple Stress Creep and Recovery Test</i> – Fluência e Recuperação sob Tensão Múltipla
NANOTEC	Laboratório de Nanotecnologia da UFSC
NBR	Norma Técnica Brasileira
NRL	Látex de Borracha Natural
PA	Ponto de Amolecimento
PE	Poliétileno Reciclado
PEN	Penetração do Asfalto
PES	Poliéster
PET/wPET	Poliétileno Tereftalato
PG	<i>Performance Grade</i> – Grau de Desempenho
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PTFE	Politetrafluoroetileno
PU	Poliuretano
PVC	Policloreto de Vinila
RA	<i>Rock Asphalt</i>
REPAR	Refinaria Presidente Getúlio Vargas

RPM	Rotações por Minuto
RTFOT	<i>Rolling Thin-Film Oven Test</i> – Ensaio de Determinação do Efeito do Calor e do Ar em uma Película Delgada Rotacional
SBM	Sul Brasileira de Mineração
SBR	Borracha-Estireno-Butadieno
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
SMA	<i>Stone Mastic Asphaltic</i>
S-VECD	<i>Simplified Viscoelastic Continuum Damage</i> – Dano Contínuo Viscoelástico
TG	Transição Vítrea
TGA	Termogravimetria
TPUA	Poliuretano Termoendurecível
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UGE	<i>Université Gustave Eiffel</i>
USP	<i>United States Pharmacopeia</i> – Farmacopeia dos Estados Unidos; Grau USP
ZGSB	Rejuvenescedor à Base de Óleo

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
%R	Porcentagem de Recuperação
°	Graus
°C	Graus Celsius
≈	Aproximadamente
μm	Micrômetro
με	Microdeformação
A	Ampère
Å	Ångström, 10 <sup>-10</sup> metros
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Cálcio
cm	Centímetro
cP	Centipoise
Cu Kα	Radiação do Difratorômetro de Raios X
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	Isopreno
g	Gramas
G <sub>mb</sub>	Densidade Específica Aparente
G*	Módulo de Cisalhamento Dinâmico
G'	Módulo de Armazenamento Cisalhante
G''	Módulo de Perda Cisalhante
H	Hidrogênio
Hz	Hertz
J	Joule
J <sub>nr</sub>	Complância Não-Recuperável
k	Quilo, 10 <sup>3</sup>
kV	Quilovolt
log	Logaritmo
m	Mili, 10 <sup>-3</sup>
M	Mega, 10 <sup>6</sup>
m <sup>3</sup>	Metros Cúbicos
min	Minutos
mm	Milímetro

N	Nitrogênio
Nº	Número
P	Poise
Pa	Pascal
R	Índice Reológico
s	Segundos
sen	Seno
W	Watts
$\gamma$	Amplitude de Deformação
$\delta$	Ângulo de Fase
$\varepsilon$	Deformação Específica de Tração
$\theta$	Ângulo de Difração de Bragg
$\lambda$	Comprimento de Onda da Radiação de Raios X
$\Delta M$	Varição de Massa

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	25
1.2 OBJETIVOS .....	27
<b>1.2.1 Objetivo Geral .....</b>	<b>27</b>
<b>1.2.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>27</b>
1.3 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA .....	28
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>29</b>
2.1 LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS COM POLÍMEROS .....	29
2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO LÁTEX DE BORRACHA NATURAL	33
2.3 INFLUÊNCIA DO LÁTEX DE BORRACHA NATURAL NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E REOLÓGICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO .....	35
2.4 TÉCNICAS PARA CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO ASFÁLTICO PRODUZIDO COM LÁTEX DE BORRACHA NATURAL .....	43
2.5 EFEITO DA ADIÇÃO DE LÁTEX SOBRE AS PROPRIEDADES DE MISTURAS ASFÁLTICAS .....	46
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>50</b>
3.1 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	51
<b>3.1.1 Agregados .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.2 Ligante Asfáltico 50/70.....</b>	<b>52</b>
<b>3.1.3 Luvas de Látex .....</b>	<b>53</b>
3.1.3.1 Análises Térmicas .....	54
3.1.3.2 Difratomia de Raios X (DRX) .....	54
3.1.3.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	54
3.2 ETAPA 2: PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO ASFALTO-LÁTEX .....	55
<b>3.2.1 Modificação da Matriz Asfáltica .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2.2 Caracterização dos Asfaltos-Látex Produzidos .....</b>	<b>57</b>
3.2.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	58

3.2.2.2 Difractometria de Raios X (DRX) .....	58
3.2.2.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	58
3.2.2.4 Micrografia de Fluorescência .....	59
3.3 ETAPA 3: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES EMPÍRICAS, MECÂNICAS E REOLÓGICAS DOS LIGANTES ASFÁLTICOS DE REFERÊNCIA E MODIFICADOS..	59
<b>3.3.1 Variação de Massa.....</b>	<b>61</b>
<b>3.3.2 Estabilidade ao Armazenamento .....</b>	<b>63</b>
<b>3.3.3 Viscosidade Aparente.....</b>	<b>63</b>
<b>3.3.4 Grau de Desempenho (PG) .....</b>	<b>63</b>
<b>3.3.5 Suscetibilidade do Ligante Asfáltico à Deformação Permanente .....</b>	<b>64</b>
<b>3.3.6 Tolerância do Ligante Asfáltico ao Dano por Fadiga .....</b>	<b>65</b>
<b>3.3.7 Comportamento Reológico em Temperaturas Intermediárias .....</b>	<b>67</b>
<b>3.3.8 Seleção do Teor Ótimo .....</b>	<b>67</b>
3.4 ETAPA 4: DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS.....	68
<b>3.4.1 Produção das Misturas Asfálticas.....</b>	<b>68</b>
<b>3.4.2 Considerações Acerca do Processo de Dosagem das Misturas Asfálticas .....</b>	<b>69</b>
3.5 ETAPA 5: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....	71
<b>3.5.1 Desempenho à Deformação Permanente das Misturas Asfálticas .....</b>	<b>72</b>
<b>3.5.2 Comportamento Reológico e Desempenho à Fadiga das Misturas Asfálticas .....</b>	<b>74</b>
<b>4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....</b>	<b>77</b>
4.1 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....	77
<b>4.1.1 Agregados.....</b>	<b>77</b>
<b>4.1.2 Ligante Asfáltico 50/70.....</b>	<b>78</b>
<b>4.1.3 Luvas de Látex.....</b>	<b>78</b>
4.1.3.1 Análises Térmicas .....	81
4.1.3.2 Difractometria de Raios X (DRX) .....	82
4.1.3.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	83
4.2 ETAPA 2: PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO ASFALTO-LÁTEX.....	84

<b>4.2.1 Caracterização dos Asfaltos-Látex Produzidos .....</b>	<b>84</b>
4.2.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....	84
4.2.1.2 Difratometria de Raios X (DRX) .....	86
4.2.1.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	87
4.2.1.4 Micrografia de Fluorescência .....	88
<b>4.3 ETAPA 3: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES EMPÍRICAS, MECÂNICAS E REOLÓGICAS DOS LIGANTES ASFÁLTICOS DE REFERÊNCIA E MODIFICADOS..</b>	<b>89</b>
<b>4.3.1 Variação de Massa.....</b>	<b>90</b>
<b>4.3.2 Estabilidade ao Armazenamento .....</b>	<b>91</b>
<b>4.3.3 Viscosidade Aparente .....</b>	<b>91</b>
<b>4.3.4 Grau de Desempenho (PG) .....</b>	<b>92</b>
<b>4.3.5 Suscetibilidade do Ligante Asfáltico à Deformação Permanente .....</b>	<b>94</b>
<b>4.3.6 Tolerância do Ligante Asfáltico ao Dano por Fadiga .....</b>	<b>98</b>
<b>4.3.7 Comportamento Reológico em Temperaturas Intermediárias .....</b>	<b>102</b>
<b>4.3.8 Seleção do Teor Ótimo .....</b>	<b>106</b>
<b>4.4 ETAPA 5: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....</b>	<b>108</b>
<b>4.4.1 Desempenho à Deformação Permanente das Misturas Asfálticas .....</b>	<b>108</b>
<b>4.4.2 Comportamento Reológico das Misturas Asfálticas.....</b>	<b>111</b>
<b>4.4.3 Resistência à Fadiga das Misturas Asfálticas.....</b>	<b>116</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>120</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>121</b>
<b>APÊNDICE A – COMPORTAMENTO DO PARÂMETRO <math> G^* /\text{sen } \delta</math>.....</b>	<b>133</b>
<b>APÊNDICE B – COMPORTAMENTO REOLÓGICO EM TEMPERATURAS INTERMEDIÁRIAS PARA OS LIGANTES ASFÁLTICOS DE REFERÊNCIA E MODIFICADO COM 12% DE LÁTEX.....</b>	<b>134</b>
<b>APÊNDICE C – COMPORTAMENTO REOLÓGICO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS .....</b>	<b>136</b>



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Uma das formas de prolongar a vida útil da camada de revestimento é o uso de misturas asfálticas modificadas (YILDIRIM, 2007), uma vez que os ligantes asfálticos convencionais atendem, atualmente, poucas das situações às quais a superfície de rolamento é submetida (FERNANDES, 2007). Além disso, com o aumento dos níveis de tráfego e com novos projetos de eixos mais pesados, bem como em condições climáticas adversas, o processo de deterioração da superfície é potencializado, o que leva a ocorrências de defeitos precoces na camada asfáltica (POOVANESHVARAN; HASAN; JAYA, 2020). Neste contexto, para melhorar o desempenho da camada de rolamento, vários modificadores são misturados com os ligantes asfálticos, como elastômeros, plastômeros, nanomateriais e materiais residuais (WEN *et al.*, 2017; MELO; TRICHÊS; ROSSO, 2018; BEHNOOD; GHAREHVERAN, 2019; NANJEGOWDA; BILIGIRI, 2020; CADORIN *et al.*, 2021; BROERING; MELO; MANFRO, 2022; MANFRO *et al.*, 2022; SCHUSTER; MELO; DEL CARPIO, 2023).

A adição de polímeros, cadeias de pequenas moléculas repetidas, melhora significativamente várias propriedades do ligante asfáltico, como elasticidade, ductilidade, coesão, rigidez e aderência, resultando em revestimentos asfálticos mais estáveis e rígidos em altas temperaturas e mais flexíveis em baixas temperaturas (AL-MANSOB *et al.*, 2014; KRISHNAPRIYA, 2015; YUAN *et al.*, 2017). Uma matriz asfáltica com modificação polimérica apresenta maior resistência à deformação permanente e a trincas térmicas, além de maior capacidade de suportar danos por fadiga (YILDIRIM, 2007; VICHITCHOLCHAI; PANMAI; NA-RANONG, 2012).

Todos os polímeros são passíveis de uso (BERNUCCI *et al.*, 2022). Diversos polímeros são utilizados como aditivos modificadores do ligante asfáltico, como estireno-butadieno-estireno (SBS), estireno-butadieno (SBR), etileno-acetato de vinila (EVA), poliestireno (PS), policloreto de vinila (PVC), polietileno (PE), polietileno de baixa densidade (LDPE), polietileno linear de baixa densidade (LLDPE), polipropileno (PP) e outros (BECKER; MÉNDEZ; RODRI, 2001; YILDIRIM, 2007; AIREY; MOHAMMED; FICHTER, 2008; AL-MANSOB *et al.*, 2017; YUAN *et al.*, 2017; BEHNOOD; GHAREHVERAN, 2019). A maioria deles são compostos químicos ou subprodutos da indústria de plásticos (JITSANGIAM *et al.*, 2021).

Os polímeros usados para melhorar o ligante asfáltico podem ser classificados em três grupos principais: (1) elastômeros termoplásticos, (2) plastômeros e (3) polímeros reativos (JITSANGIAM *et al.*, 2021). A borracha natural pode ser classificada como um elastômero natural com potencial para ser usado como um biomodificador eficaz no asfalto puro (WEN *et al.*, 2017).

A borracha natural é um biopolímero orgânico, geralmente extraída da seiva de algumas plantas para obter a forma de látex bruto leitoso com teor de água relativamente alto (WEN *et al.*, 2017; AL-SABAEI *et al.*, 2019; PEREZ *et al.*, 2019). Este “polímero verde”, de suspensão coloidal espessa, é derivado de fontes renováveis, o que o torna ecologicamente correto. Possui em sua complexa composição polímeros de hidrocarboneto, resinas, amido, bem como uma grande quantidade de proteínas e enzimas (HERNANDEZ; WILLIAMS; COCHRAN, 2014; ALBIAJAWI *et al.*, 2021; SIN; TUEEN, 2023).

O látex de borracha natural é um recurso sustentável e renovável e tem sido efetivamente utilizado ao longo de muitas décadas na fabricação de pneus e luvas, na construção civil e na pavimentação (IBRAHIM; DAIK; ABDULLAH, 2014; ALBIAJAWI *et al.*, 2021). Com uma crescente conscientização sobre questões ambientais e escassez de combustível no futuro, espera-se, sem dúvida, que o látex de borracha natural desempenhe um papel essencial na indústria de asfaltos modificados (SWETHA; RANI, 2014; POOVANESHVARAN; HASAN; JAYA, 2020; SURESH; PAL, 2021). Desde o primeiro uso do látex de borracha natural na pavimentação, diversos estudos buscam maximizar o seu uso, haja vista as melhorias das propriedades apresentadas pelo ligante modificado (SRIRING *et al.*, 2018; POOVANESHVARAN; HASAN; JAYA, 2020; KAMAL; HADITHON; BAKAR, 2020; JITSANGIAM *et al.*, 2021; SANI *et al.*, 2021; DONGWEI *et al.*, 2022 e outros).

Resultados de pesquisas anteriores mostraram que quanto maior o conteúdo de látex de borracha natural, melhores serão as propriedades gerais (reológicas e empíricas) do ligante modificado (AL-MANSOB *et al.*, 2014; SHAFII *et al.*, 2017; WEN *et al.*, 2017; ANSARI *et al.*, 2021). Como exemplo, tem-se a constatação do aumento do ponto de amolecimento, ductilidade, viscosidade e redução da suscetibilidade à temperatura (TEIXEIRA, 2018; KUMAR; JUNEJA, 2019; POOVANESHVARAN; HASAN; JAYA, 2020; JITSANGIAM *et al.*, 2021), além de melhoria das propriedades reológicas relacionadas ao módulo de cisalhamento dinâmico e ao ângulo de fase (ALI *et al.*, 2013; AL-KHATEEB; RAMADÃ, 2015; WEN *et al.*, 2017).

Na estrutura do pavimento, uma camada de rolamento com matriz asfáltica modificada por látex de borracha natural pode prolongar a vida útil e reduzir os custos de manutenção da

obra rodoviária. Fazendo-se uma comparação das propriedades de desempenho, as misturas asfálticas contendo ligante asfáltico com látex possuem melhores resistências à fadiga e à deformação permanente do que as misturas asfálticas convencionais (TUNTIWORAWIT; LAVANSIRI; PHROMSORN, 2005). As misturas asfálticas modificadas com látex apresentam maior módulo de rigidez, menor fluência, aumento da resistência à deformação permanente e melhora na elasticidade (ALI *et al.*, 2013; KRISHNAPRIYA, 2015), além de uma maior durabilidade devido a sua maior resistência ao dano por umidade (PAUL *et al.*, 2022).

Dado o contexto, o látex de borracha natural revela um grande potencial para melhorar o ligante asfáltico e, por consequência, as misturas asfálticas. Diante da falta de pesquisas que abordem a investigação completa do uso do látex em matriz asfáltica 50/70 brasileira, este trabalho busca avaliar os efeitos da incorporação do látex nas propriedades mecânicas e reológicas do ligante básico até no comportamento das misturas asfálticas quanto ao módulo dinâmico, à suscetibilidade à deformação permanente e à resistência à fadiga. E, por fim, recomendar um teor ótimo de látex para incorporação no ligante asfáltico 50/70 e na mistura asfáltica, o que possibilitará estudos de desempenho em segmentos experimentais de campo.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é desenvolver uma mistura asfáltica densa modificada com látex de borracha natural, com propriedades reológicas e mecânicas superiores a uma matriz convencional formulada com ligante asfáltico 50/70.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para desenvolvimento desta pesquisa são:

- Desenvolver um ligante asfáltico modificado com fragmentos de luvas de látex (asfalto-látex);
- Formular uma mistura asfáltica utilizando o asfalto-látex;
- Obter o comportamento reológico e mecânico da mistura asfáltica modificada com asfalto-látex comparativamente a uma mistura convencional.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa foi estruturada em cinco capítulos, conforme demonstrado a seguir:

**Capítulo 1 – Introdução:** este capítulo introduz o tema abordado por esta pesquisa, com a fixação do objetivo geral e específicos, além da organização da pesquisa.

**Capítulo 2 – Referencial Teórico:** este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o tema abordado neste trabalho. O capítulo divide-se em cinco subcapítulos que subsidiarão o desenvolvimento da pesquisa.

O **subcapítulo 2.1** mostra uma revisão de literatura dos principais polímeros que são utilizados como agente modificadores do ligante asfáltico.

O **subcapítulo 2.2** introduz o látex de borracha natural, apresentando suas propriedades físicas, químicas e demais características.

O **subcapítulo 2.3** aborda a influência do látex de borracha natural nas propriedades mecânicas e reológicas do ligante asfáltico.

O **subcapítulo 2.4** evidencia técnicas para caracterização da microestrutura do ligante asfáltico modificado com látex de borracha natural. Os ensaios abordados são a microscopia eletrônica de varredura (MEV), a difratometria de raios X (DRX) e a espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

O **subcapítulo 2.5** aborda a influência da adição do látex de borracha natural nas propriedades das misturas asfálticas, principalmente, para os parâmetros referentes à suscetibilidade à deformação permanente e à resistência à fadiga da mistura.

**Capítulo 3 – Metodologia:** neste tópico é demonstrado o procedimento experimental da pesquisa, dividido em cinco etapas, objetivando a investigação da adição de látex no ligante asfáltico 50/70 e a avaliação das propriedades empíricas, mecânicas e reológicas da mistura asfáltica modificada.

**Capítulo 4 – Análise e Discussão dos Resultados:** neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados do plano experimental, com base nos requisitos estabelecidos nas normativas e resoluções, além de pesquisas recentes sobre o assunto.

**Capítulo 5 – Conclusões:** este tópico exhibe os principais pontos e conclusões observados ao longo do estudo, respondendo ao objetivo geral e aos objetivos específicos traçados inicialmente. Além disso, traz recomendações para estudos futuros acerca da temática proposta.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS COM POLÍMEROS

O desenvolvimento de ligantes modificados para o aprimoramento das propriedades mecânicas e reológicas vem representando um desafio pertinente à construção, ao desempenho e à manutenção de um sistema de pavimento (NANJEGOWDA; BILIGIRI, 2020). A modificação dos ligantes asfálticos é geralmente realizada para melhorar uma ou mais propriedades básicas da matriz asfáltica, incluindo rigidez, elasticidade, fragilidade, estabilidade de armazenamento, durabilidade, resistência à fadiga, susceptibilidade à deformação permanente e resistência à oxidação e ao envelhecimento (BEHNOOD; GHAREHVERAN, 2019).

Os modificadores mais comuns são polímeros, adicionados em porcentagens que variam, aproximadamente, de 3% a 7% em peso de ligante asfáltico (YILDIRIM, 2007; KISHORE; GOTTALA, 2015), cuja modificação é geralmente realizada usando dispersão mecânica sob alta temperatura e condições de alto cisalhamento (JITSANGIAM *et al.*, 2021). Os polímeros, por exemplo, podem aumentar a viscosidade dos ligantes asfálticos em altas temperaturas e/ou a ductilidade deles em baixas temperaturas (BEHNOOD; GHAREHVERAN, 2019).

A escolha do polímero como modificador do ligante asfáltico depende de vários fatores, entre eles: o custo do modificador, o nível de tráfego da rodovia, as condições climáticas da região e o desempenho mecânico/reológico desejado (AL-KHATEEB; RAMADÃ, 2015). A composição química, estrutura interna dos ligantes, peso molecular, grau de ramificação, cristalinidade, concentração dos polímeros e a condição da mistura são fatores que podem afetar o comportamento do sistema polímero/asfalto (BECKER; MENDEZ; RODRIGUEZ, 2001; BEHNOOD; GHAREHVERAN, 2019).

Dois tipos de polímeros são frequentemente usados para modificação de ligantes destinados à pavimentação asfáltica: os elastoméricos e os plastoméricos. Os polímeros elastoméricos fornecem estabilidade em altas temperaturas e flexibilidade em baixas temperaturas, enquanto os polímeros plastoméricos formam, principalmente, uma estrutura resistente à deformação (PAUL *et al.*, 2022). Os elastômeros termoplásticos estão entre os polímeros mais utilizados em virtude de seus preços mais baixos (AL-SABAEI *et al.*, 2019).

Alguns tipos de polímeros têm sido usados para a modificação do ligante asfáltico: polietileno tereftalato, borracha de pneu, estireno-butadieno-estireno, borracha-estireno-

butadieno, poliuretano, poliuretano termoendurecível, borracha triturada, polietileno reciclado, entre outros (YILDIRIM, 2007; KARAHRODI *et al.*, 2017).

A Tabela 2.1 apresenta recentes pesquisas sobre o tema, destacando-se os resultados voltados para as propriedades mecânicas e reológicas do ligante asfáltico.

Tabela 2.1: Síntese de pesquisas que utilizaram polímeros como agente modificador em ligantes asfálticos.

<b>Autor</b>	<b>Classificação do Ligante Asfáltico</b>	<b>Polímero Modificador<sup>1</sup></b>	<b>Resultados</b>
Liang <i>et al.</i> (2015)	PEN <sup>2</sup> 80/100	1%, 3% e 5% de SBS <sup>3</sup> / 9% de CR <sup>4</sup>	Aumento da viscosidade.
			Melhor resistência à altas temperaturas.
			Maior rigidez.
Karahrodi <i>et al.</i> (2017)	PEN <sup>2</sup> 60/70	3%, 5% e 7% de wPET <sup>5</sup> /GTR <sup>6</sup>	Aumento da viscosidade.
			Melhor estabilidade ao armazenamento.
			Maior rigidez.
			Melhor resistência à altas temperaturas.
Jin <i>et al.</i> (2020)	PEN <sup>2</sup> 60/70	5% de PU <sup>7</sup> / 5% de RA <sup>8</sup>	Aumento da penetração, ductilidade, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional.
			Melhores resultados para as propriedades reológicas.
Mashaan <i>et al.</i> (2021)	C320 <sup>9</sup>	2%, 4%, 6% e 8% de PET <sup>5</sup>	Redução da suscetibilidade do ligante ao trincamento e a deformações em alta temperatura.
			Menor índice de envelhecimento, alta rigidez, melhor elasticidade.
			Elevação do parâmetro $ G^* /\text{sen } \delta$ , melhora na resistência ao envelhecimento e na durabilidade.
			Maior vida à fadiga (redução do parâmetro $ G^*  \text{sen } \delta$ ).
Che <i>et al.</i> (2022)	AH-90 <sup>10</sup>	5%, 6%, 7%, 8% e 9% de SBR <sup>11</sup> / 10% de ZGSB <sup>12</sup>	Aumento da viscosidade do asfalto envelhecido a curto prazo com o uso de 7% de SBR <sup>11</sup> .
			Melhores resultados à deformação em altas temperaturas utilizando o SBR <sup>11</sup> em relação ao ZGSB <sup>12</sup> .
Yang <i>et al.</i> (2022)	PEN <sup>2</sup> 60/80	5% de TPUA <sup>13</sup>	Aumento da viscosidade.
			Excelente resistência à deformação em alta temperatura e propriedades de recuperação elástica.
			Melhora das propriedades mecânicas com a incorporação de resina de poliuretano, gerando um ligante flexível.

Autor	Classificação do Ligante Asfáltico	Polímero Modificador <sup>1</sup>	Resultados
Ma <i>et al.</i> (2022)	PG <sup>14</sup> 64-22 e PG <sup>14</sup> 76-22	4% de PE <sup>15</sup> e 8% de CR <sup>4</sup>	Os compósitos PE <sup>15</sup> /CR <sup>4</sup> aumentaram a resistência à deformação permanente e às trincas por fadiga em temperaturas altas e intermediárias.
			Melhores desempenhos reológicos.
			Melhor resistência ao envelhecimento.
Chen <i>et al.</i> (2023)	A0-90 <sup>16</sup>	1%, 2% e 3% de fibras de PES <sup>17</sup>	Aumento da penetração, ductilidade e ponto de amolecimento.
			Melhor resistência ao envelhecimento com o uso de 3% de fibras de PES <sup>17</sup> .
			Aumento das propriedades reológicas em alta temperatura.

<sup>1</sup> Em peso de ligante asfáltico; <sup>2</sup> Penetração do asfalto; <sup>3</sup> Borracha-estireno-butadieno-estireno; <sup>4</sup> Borracha de pneu triturada; <sup>5</sup> Polietileno tereftalato; <sup>6</sup> Borracha de pneu; <sup>7</sup> Poliuretano; <sup>8</sup> *Rock Asphalt*; <sup>9</sup> Ligante asfáltico com 500 cP a 135 °C; <sup>10</sup> Ligante asfáltico com 402 cP a 135 °C; <sup>11</sup> Borracha-estireno-butadieno; <sup>12</sup> Rejuvenescedor à base de óleo; <sup>13</sup> Poliuretano termoendurecível; <sup>14</sup> Grau de desempenho; <sup>15</sup> Polietileno reciclado; <sup>16</sup> Ligante asfáltico com ponto de amolecimento igual a 44,5 °C; <sup>17</sup> Poliéster.

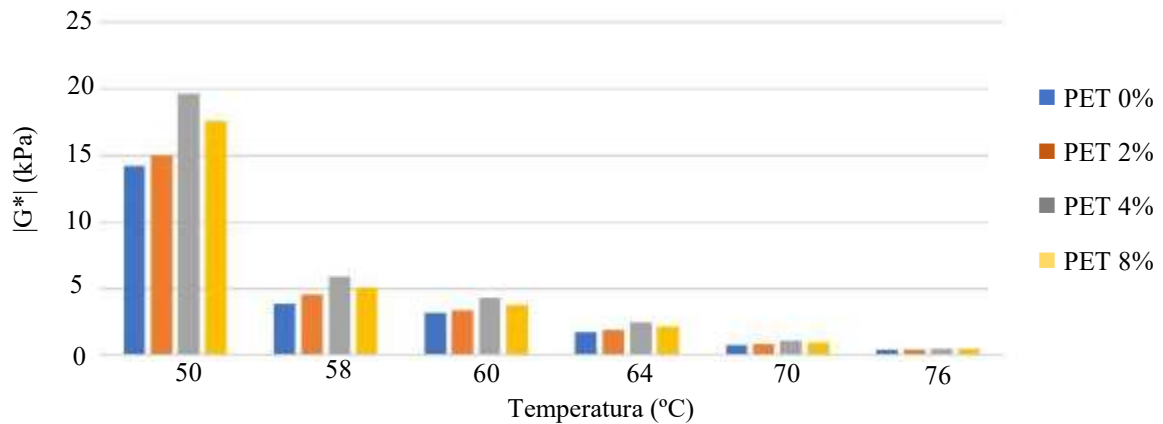
De acordo com a Tabela 2.1, muitos estudos comprovaram que o ligante asfáltico modificado com polímeros melhora as propriedades mecânicas e reológicas do ligante. Pesquisas como a de Al-Sabaei *et al.* (2019) destacam o aumento nas propriedades de rigidez, elasticidade e coesão do ligante asfáltico, estendendo, assim, a vida útil do revestimento.

Como complemento, Yaacob *et al.* (2016) analisaram as propriedades físicas e mecânicas do ligante asfáltico modificado com polímeros. A adição de 1%, 2%, 3%, 4% e 5%, em peso de ligante, de borracha-estireno-butadieno (SBR) aumentou significativamente o parâmetro da viscosidade do ligante em altas temperaturas, possibilitando a resistência a maiores esforços de compactação e melhores respostas à deformação permanente.

Estudos como o de Al-Khateeb e Ramadã (2015), Yaacob *et al.* (2016), Jin *et al.* (2020), Shan *et al.* (2020), Mashaan *et al.* (2021) e Ma *et al.* (2022) mostraram que os ligantes modificados com polímeros influenciam nas propriedades reológicas do material. Segundo os estudos, o valor do grau de desempenho (PG) pode ser melhorado pelo aumento do módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*$ ) e pela redução do ângulo de fase ( $\delta$ ).

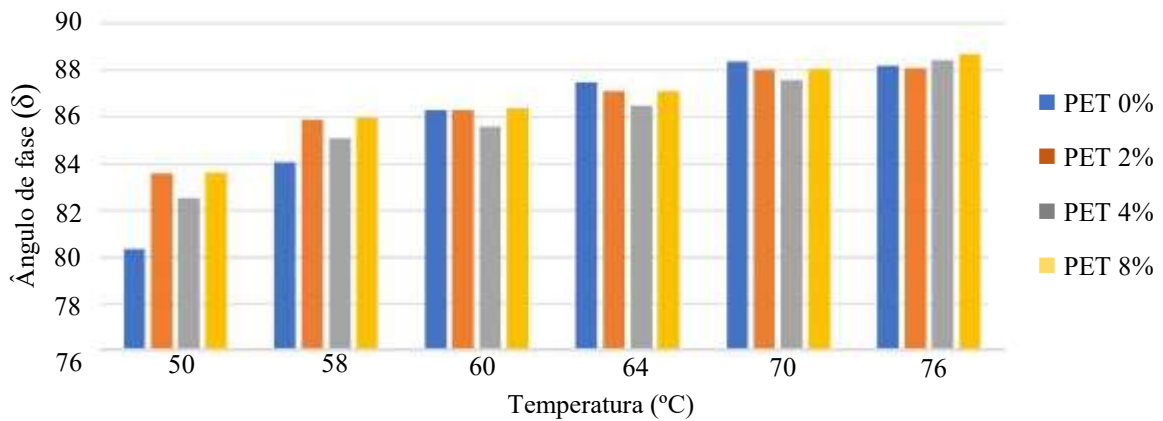
A Figura 2.1 e a Figura 2.2 exibem o efeito da adição de 2%, 4% e 8%, em peso de ligante, de resíduos de polietileno tereftalato (PET) adicionados ao ligante asfáltico, considerando os parâmetros de módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ), ensaiados em diferentes temperaturas.

Figura 2.1: Módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) em diferentes temperaturas para os teores de 0%, 2%, 4% e 8% de PET adicionado ao ligante asfáltico.



Fonte: Adaptado de Mashaan *et al.* (2021).

Figura 2.2: Ângulo de fase ( $\delta$ ) em diferentes temperaturas para os teores de 0%, 2%, 4% e 8% de PET adicionado ao ligante asfáltico.



Fonte: Adaptado de Mashaan *et al.* (2021).

Através da Figura 2.1 e da Figura 2.2, observa-se um aumento no módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) e uma pequena redução no ângulo de fase ( $\delta$ ), principalmente, pelo comportamento elástico que os polímeros imprimem no ligante asfáltico. O valor do parâmetro  $|G^*|$  foi melhor para o ligante modificado com 4% de teor de polietileno tereftalato (PET). Esse comportamento corrobora com as pesquisas levantadas por Airey, Mohammed e Fichter (2008) e Behnood e Gharehveran (2019).

Dentre os polímeros utilizados, a borracha é um elastômero termoplástico e tem a capacidade de melhorar as condições e o desempenho geral dos materiais asfálticos (AL-SABAEI *et al.*, 2019). O látex de borracha natural pode ser eficientemente adicionado ao ligante asfáltico, dada a sua alta estabilidade, excelente resistência à fadiga (AL-MANSOB *et al.*, 2014), entre outras características, conforme evidenciado nos itens a seguir.



## 2.2 PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO LÁTEX DE BORRACHA NATURAL

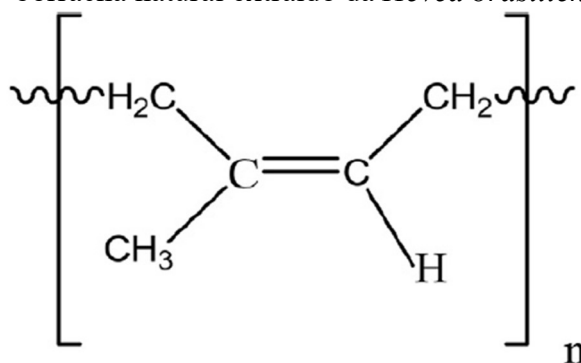
O látex de borracha natural (NRL) é um biopolímero, de origem natural, inofensivo, que pode ser facilmente encontrado na natureza (PEREZ *et al.*, 2019). Possui aparência branca e leitosa e é comumente obtido realizando-se cortes no tronco da seringueira *Hevea brasiliensis*, podendo ser encontrado também em árvores (*Parthenium argentatum*, *Taraxacum koksaghzy*), figueiras (*Ficus elástica*, *Ficus carica*), alfaces (*Lactuca serriola*, *Lactuca sativa*) e outras espécies arbustivas (*Euphorbia heterophylla*, *Euphorbia lactiflua*, *Euphorbia characias*) (HERNANDEZ; WILLIAMS; COCHRAN, 2014).

Este “polímero verde”, quando reticulado por vulcanização, adquire propriedades físicas de elasticidade e de flexibilidade, podendo ser usado para a modificação do asfalto (HERNANDEZ; WILLIAMS; COCHRAN, 2014; WEN *et al.*, 2017; TEIXEIRA, 2018).

Sua composição é muito dependente da fonte de extração. Normalmente, o látex de borracha natural é composto por 40% de borracha e 50% de água, além de outros componentes como proteína, resinas, minerais, amido e carboidratos (ANSARI *et al.*, 2021). Devido ao teor alto de água e à suscetibilidade a bactérias, o látex não pode ser utilizado na sua forma natural. Deste modo, um dos métodos mais comuns para a produção de látex com 60% ou mais de teor de borracha natural é a centrifugação. Nesse processo, a amônia é geralmente utilizada para prevenir o crescimento bacteriano (WEN *et al.*, 2017; AL-SABAEI *et al.*, 2019).

O látex é essencialmente uma dispersão de poli(1,4-cis-isopreno), compreendendo 99,9% das unidades estruturais formadas pela molécula 1,4-cis. Com alto peso molecular, o látex de borracha natural tem suas partículas variando em tamanho de 0,15  $\mu\text{m}$  a 3  $\mu\text{m}$  e fórmula química  $\text{C}_5\text{H}_8$  (ANSARI *et al.*, 2021). A Figura 2.3 mostra a estrutura química do poli(1,4-cis-isopreno) extraído da *Hevea brasiliensis*.

Figura 2.3: Estrutura química da molécula poli(1,4-cis-isopreno) na forma de látex de borracha natural extraído da *Hevea brasiliensis*.



Fonte: Ansari *et al.* (2021).

Consoante a Figura 2.3, devido à presença de uma ligação dupla em suas unidades repetidas, quase todos os produtos de látex apresentam redes tridimensionalmente estruturadas, que exibem uma elasticidade estável devido à sua alta relação de estiramento e resiliência (IKEDA *et al.*, 2018).

As longas moléculas do látex de borracha natural podem ser parcialmente cristalizadas quando esticadas ou após o resfriamento em baixas temperaturas e apresentam uma temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) de, normalmente,  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$ . A cristalização limita o movimento entre as cadeias moleculares vizinhas e resulta em um aumento substancial em histerese e força final. A transição vítrea é acompanhada por mudanças repentinas nas propriedades termodinâmicas, mecânicas e ópticas do material (TEIXEIRA, 2018; BEHNOOD; GHAREHVERAN, 2019; ANSARI *et al.*, 2021).

O látex de borracha natural possui propriedades físicas, químicas e mecânicas que são influenciadas pela sua estrutura química, sendo, deste modo, um polímero adequado para a modificação de ligantes asfálticos, devido a sua compatibilidade, adesividade e propriedades elásticas (IBRAHIM; DAIK; ABDULLAH, 2014; HERNANDEZ; WILLIAMS; COCHRAN, 2014; AL-SABAEI *et al.*, 2019).

O látex de borracha natural tem sido amplamente estudado e caracterizado ao longo dos anos. A Tabela 2.2 apresenta um resumo das propriedades do látex de borracha natural, documentadas em diferentes pesquisas.

Tabela 2.2: Resumo das propriedades do látex de borracha natural.

<b>Autor</b>	<b>Propriedades</b>
Becker, Méndez e Rodriguez (2001)	Elevada ductilidade; alta elasticidade sob cargas cíclicas; peso molecular alto, logo, deve ser parcialmente decomposto e homogeneizado mecanicamente.
Kishore e Gottala (2015)	Alta resistência à tração; capacidade de aderir a si mesmo e a outros materiais, facilitando a fabricação de outros produtos; excelentes propriedades dinâmicas com uma baixa histerese.
Azahar <i>et al.</i> (2016)	Alta resiliência e alta taxa de estiramento, o que torna o material tipicamente elástico; as propriedades viscoelásticas são devidas às suas características sólidas e líquidas combinadas.
Sriring <i>et al.</i> (2018)	Alta capacidade de deformação recuperável, elasticidade, resistência à tração, resistência ao trincamento e baixo acúmulo de calor.
Ansari <i>et al.</i> (2021)	Excelente resistência física; boa resistência à compressão; excelente resistência à água; boa flexibilidade a baixas temperaturas; boa resistência à oxidação; excelente resistência aos álcoois e aos solventes oxigenados.

De acordo com as propriedades demonstradas na Tabela 2.2, o látex de borracha natural possui uma grande aplicabilidade industrial, não somente para pneus, mas para a produção de colchões, tubos, balões de festa, artesanato e decoração, brinquedos, tintas, luvas cirúrgicas e não cirúrgicas, cateteres, preservativos, entre outros produtos (SWETHA; RANI, 2014; TEIXEIRA, 2018). Na área médica, destaca-se seu uso como suporte para regeneração de tecidos (CORREA, 2015).

Em suma, o látex de borracha natural é um polímero que tem como principais características a sua alta capacidade de deformação e elasticidade (VILLENA; MENDES; DALLEDONE, 2017). Apresenta também como benefícios maior resiliência e melhor resistência ao desgaste e ao impacto, que tornam o material com desempenho satisfatório para ser utilizado como agente modificador do ligante e da mistura asfáltica.

### 2.3 INFLUÊNCIA DO LÁTEX DE BORRACHA NATURAL NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E REOLÓGICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO

O conceito de uso de látex de borracha natural no ligante asfáltico começou na década de 1840, visando criar um ligante com propriedades superiores (YILDIRIM, 2007). As pequenas partículas de borracha se dissolvem com o aglutinante e melhoram significativamente o desempenho do ligante asfáltico (AZAHAR *et al.*, 2016; AL-SABAEI *et al.*, 2019).

Dada as suas propriedades elastoméricas, o látex de borracha natural tem alto potencial para melhorar o desempenho do revestimento a longo prazo (SHAFFIE *et al.*, 2015; SHAFII *et al.*, 2017; DONGWEI *et al.*, 2022). Em baixas temperaturas, o látex de borracha natural revela um comportamento elástico, o que ajuda a impedir a formação de fissuras, retendo a rigidez do asfalto (AL-SABAEI *et al.*, 2019).

A vantagem de se acrescentar o látex de borracha natural no ligante asfáltico está na redução da sensibilidade à temperatura, no melhoramento da recuperação elástica, no aumento da resistência ao escoamento, à oxidação e aos raios ultravioletas (SISWANTO, 2017). Conforme Jitsangiam *et al.* (2021), quanto maior o teor de látex, melhores serão os resultados para as propriedades gerais do ligante modificado, principalmente, para os valores de penetração e ponto de amolecimento.

A Tabela 2.3 apresenta uma síntese bibliográfica de pesquisas recentes que utilizaram o látex de borracha natural no ligante asfáltico em várias concentrações, considerando a avaliação das propriedades mecânicas e reológicas como discussão.

Tabela 2.3: Síntese bibliográfica do uso do látex de borracha natural como modificador das propriedades mecânicas e reológicas de ligantes asfálticos.

<b>Autor</b>	<b>Ligante Asfáltico</b>	<b>Teores (%)<sup>1</sup></b>	<b>Resultados</b>
Al-Mansob <i>et al.</i> (2014)	PEN <sup>2</sup> 80/100	3%, 6%, 9% e 12%	Redução da penetração.
			Aumento do ponto de amolecimento.
			Aumento da ductilidade.
			Aumento da viscosidade.
			Redução da suscetibilidade à temperatura.
			Elevações do parâmetro $ G^* $ (exceto para o teor de 12%) e redução de $\delta$ .
			Elevação do parâmetro $ G^* /\text{sen } \delta$ (exceto para o teor de 12%).
			Redução do parâmetro $ G^*  \text{ sen } \delta$ , indicando melhora no comportamento à fadiga.
Al-Khateeb e Ramadã (2015)	PEN <sup>2</sup> 60/70	2,5%, 5%, 7,25%, 10% e 15%	Melhora do grau de desempenho (PG) com teor de 15% de látex.
Shafii <i>et al.</i> (2017)	PEN <sup>2</sup> 80/100	1%, 2%, 3%, 5%, 7%, 9% e 12%	Aumento do ponto de amolecimento para os teores maiores que 3%.
			Redução da penetração para o teor ótimo de 9%. <sup>3</sup>
			Aumento da ductilidade.
			Redução da suscetibilidade à temperatura.
Wen <i>et al.</i> (2017)	PEN <sup>2</sup> 60/70	3%, 5% e 7%	Aumento da viscosidade.
			Redução da suscetibilidade à temperatura.
			Elevações do parâmetro $ G^* $ e redução de $\delta$ .
			Elevação do parâmetro $ G^* /\text{sen } \delta$ e redução do parâmetro $ G^*  \text{ sen } \delta$ .
			Melhora do grau de desempenho (PG).
			Melhora dos parâmetros relacionados à resistência à deformação permanente.
Villena, Mendes e Dalledone (2017)	PEN <sup>2</sup> 50/70	5%	Aumento do ponto de amolecimento.
			Aumento da recuperação elástica.
			Aumento da coesão e elasticidade.
			Aumento da viscosidade.
Kumar e Juneja (2019)	PEN <sup>2</sup> 60/70	1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 5,5%, 6% e 7%	Redução da penetração.
			Aumento do ponto de amolecimento.
			Aumento da viscosidade.
			Aumento da ductilidade até o teor de 5,5%.
Poovaneshvaran, Hasan e Jaya (2020)	PEN <sup>2</sup> 60/70	5% e 10%	Aumento do ponto de amolecimento.
			Aumento da rigidez do ligante asfáltico.
			Aumento da viscosidade.
			Redução da suscetibilidade à temperatura.
			Elevações do parâmetro $ G^* $ e redução de $\delta$ .
Kamal, Hadithon e Bakar (2020)	PEN <sup>2</sup> 60/70	5%	Redução da penetração.
			Aumento do ponto de amolecimento.
			Aumento da viscosidade.
			Elevações do parâmetro $ G^* $ e redução de $\delta$ .

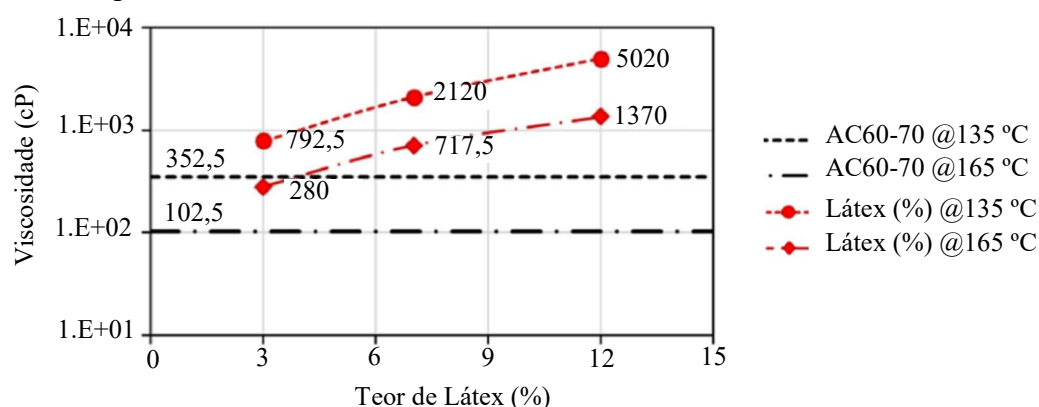
Autor	Ligante Asfáltico	Teores (%) <sup>1</sup>	Resultados
Jitsangiam <i>et al.</i> (2021)	PEN <sup>2</sup> 60/70	3%, 7% e 12%	Redução da penetração até o teor de 7%.
			Aumento do ponto de amolecimento.
			Aumento da viscosidade.
			Redução da ductilidade para o teor de 12%. <sup>4</sup>
			Elevações do parâmetro $ G^* $ e redução de $\delta$ .
			A adição de látex em concentrações superiores a 7% pode acarretar desempenho inferior do ligante.

<sup>1</sup> Em peso de ligante asfáltico; <sup>2</sup> Penetração do asfalto; <sup>3</sup> Não houve tendência dos resultados para os demais teores de látex; <sup>4</sup> Os valores exatos da ductilidade das amostras de 3% e 7% não puderam ser determinados devido à limitação do equipamento.

Em conformidade com a Tabela 2.3, verificou-se que as propriedades mecânicas e reológicas do ligante asfáltico são aprimoradas à medida que o látex é incorporado. Frente as pesquisas, observa-se que a modificação do ligante asfáltico nos diferentes teores de látex reduz o valor da penetração, melhora o ponto de amolecimento e a recuperação elástica do material.

A partir dos valores da viscosidade, tem-se que a resistência ao fluxo aumenta com o aumento do teor de látex inserido no ligante (KUMAR; JUNEJA, 2019). Sob este aspecto, Jitsangiam *et al.* (2021) observou os efeitos da incorporação do látex em relação ao parâmetro da viscosidade, analisando o comportamento do ligante asfáltico 60/70 de referência e dos ligantes modificados com 3%, 7% e 12% de látex, nas duas temperaturas de teste, 135 °C e 165 °C, conforme ilustrado pela Figura 2.4.

Figura 2.4: Viscosidade do ligante asfáltico 60/70 de referência e modificado com diferentes porcentagens de látex em duas temperaturas de teste.



Fonte: Adaptado de Jitsangiam *et al.* (2021).

De acordo com a Figura 2.4, verificou-se que a viscosidade do material aumenta com a elevação do teor de incorporação do látex nas duas temperaturas analisadas. Observa-se que este comportamento é mais proeminente quanto menor for a temperatura do ligante asfáltico.

Pesquisas como a de Villena, Mendes e Dalledone (2017) e de Kamal, Hadithon e Bakar (2020) corroboram com os resultados observados.

Sobre o assunto, Teixeira (2018) detectou que a adição de apenas 2% de látex não altera significativamente a viscosidade do ligante, o que pode caracterizar uma não interação entre o polímero e o ligante asfáltico 50/70. Em contrapartida, os teores de 4% e 6% apresentaram viscosidades próximas na temperatura de 150 °C, o que pode indicar que a característica de escoamento será semelhante independentemente da quantidade de látex adicionado. Para Jitsangiam *et al.* (2021), valores maiores que 7% de teor de látex de borracha natural podem reduzir o desempenho do ligante modificado e, conseqüentemente, afetar a trabalhabilidade da mistura de asfalto devido ao comportamento viscoso do aglutinante.

Os estudos de Al-Mansob *et al.* (2014) e Shafii *et al.* (2017) indicaram que a adição do látex diminui a suscetibilidade do ligante à temperatura. Em consequência, observa-se nas amostras uma melhor resistência à deformação permanente e à fadiga.

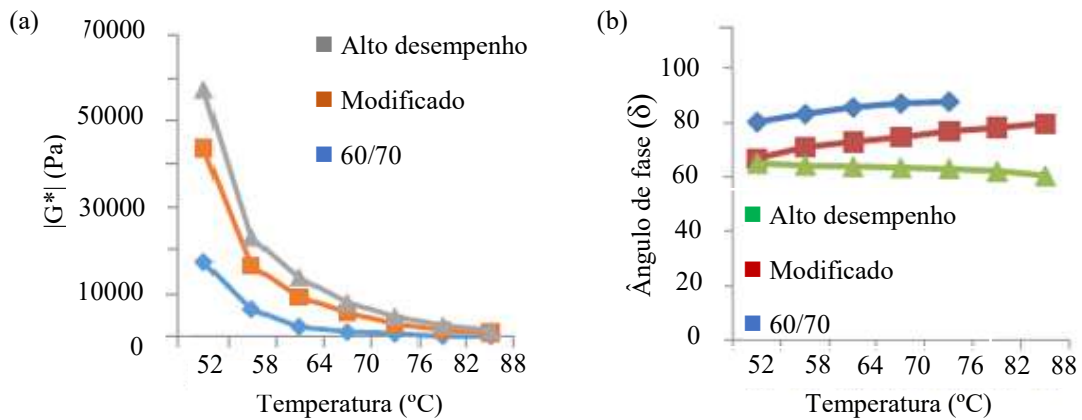
Para avaliar o melhor efeito da incorporação do látex nas propriedades do ligante, pesquisas recentes (AL-MANSOUB *et al.*, 2014; AL-KHATEEB; RAMADÃ, 2015; WEN *et al.*, 2017; POOVANESHVARAN; HASAN; JAYA, 2020; KAMAL; HADITHON; BAKAR, 2020; JITSANGIAM *et al.*, 2021, entre outras) estudaram as propriedades reológicas usando análises no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR).

O módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) e o ângulo de fase ( $\delta$ ) são os parâmetros fundamentais obtidos pelo teste de DSR. Pesquisas como de Becker, Méndez e Rodri (2001) e Wen *et al.* (2017) encontraram uma elevação do parâmetro  $|G^*|$  e uma redução de  $\delta$  para os ligantes asfálticos modificados com látex de borracha natural.

A obtenção de valores altos de  $|G^*|$  e baixos de  $\delta$  influenciam no desempenho das propriedades de deformação do ligante asfáltico (ALI; MASHAAN; KARIM, 2013; PARVEZ *et al.*, 2014). Em geral, um comportamento predominante viscoso é esperado quando o ângulo de fase se aproxima de 90°, enquanto um comportamento completamente elástico ocorre quando o valor do ângulo de fase é igual a 0° (KAMAL; HADITHON; BAKAR, 2020).

Nessa linha, Kamal, Hadithon e Bakar (2020) analisaram a influência do teor de 5% de látex no ligante asfáltico, em diferentes temperaturas, a uma frequência de ensaio igual a 1,59 Hz, e compararam com o ligante 60/70 de referência e com um ligante de alto desempenho, conforme resultados apresentados na Figura 2.5.

Figura 2.5: Análise do (a) módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) e do (b) ângulo de fase ( $\delta$ ) do ligante asfáltico 60/70 de referência, de alto desempenho e modificado com 5% de teor de látex, em diferentes temperaturas, a uma frequência de ensaio igual a 1,59 Hz.



Fonte: Adaptado de Kamal, Hadithon e Bakar (2020).

Segundo resultados indicados na Figura 2.5a, o  $|G^*|$  de todos os ligantes diminui à medida que a temperatura aumenta continuamente. Ao contrário do ligante no estado puro, o ligante modificado com 5% de látex mostra maior  $|G^*|$  mesmo em alta temperatura, o que reflete na resistência e na rigidez do material.

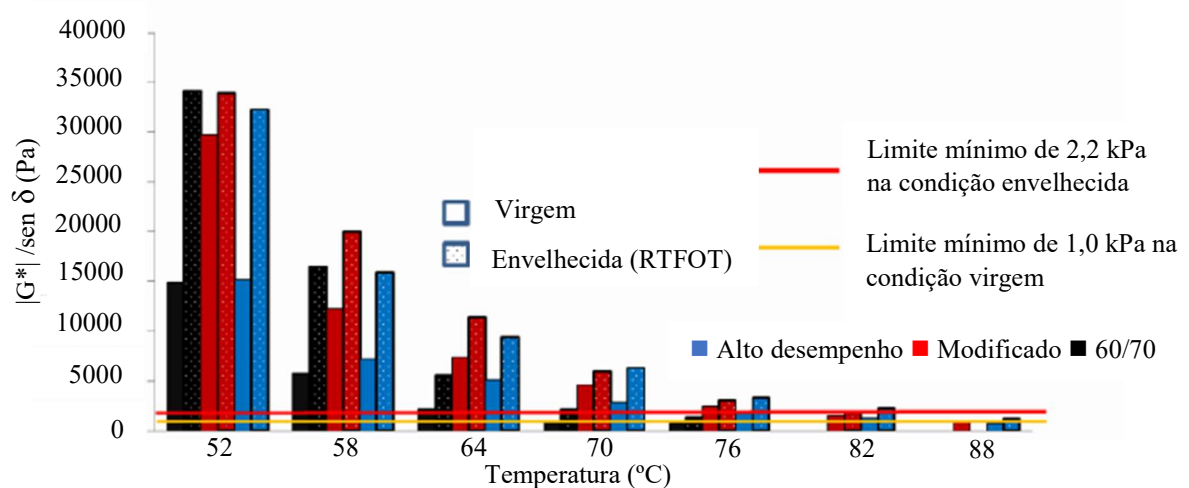
A Figura 2.5b mostra a influência no ângulo de fase do ligante modificado em relação a sua elasticidade em alta temperatura. Comparando-se os resultados, percebe-se que o ângulo de fase do ligante modificado com 5% de látex apresenta um aumento contínuo com a temperatura, indicando que a adição deste material melhora a resposta elástica se comparado com a amostra pura. Pesquisas como a de Wen *et al.* (2017) e de Kamal, Hadithon e Bakar (2020) apontam que o aumento da resposta elástica, em altas temperaturas, pode ser atribuído a extensas estruturas de rede que são formadas após a incorporação do látex na matriz asfáltica.

Considerando o efeito da adição do látex na classificação PG das matrizes asfálticas, é esperado que os valores de PG dos ligantes asfálticos cresçam com o aumento do teor de látex, especialmente em altas temperaturas de teste (AL-KHATEEB; RAMADÃ, 2015). A pesquisa de Wen *et al.* (2017) obteve, tanto para a condição virgem quanto para a condição envelhecida, um PG 64-XX para adição de 0% e 3% de látex e um PG 70-XX para 5% e 7% de látex de borracha natural. Segundo os autores, o uso de 5% ou mais de látex resulta em uma melhoria de 6 °C considerando o ensaio realizado em alta temperatura.

Quanto ao parâmetro  $|G^*|/\text{sen } \delta$ , a adição de látex de borracha natural pode aumentar a elasticidade e a rigidez da matriz (AL-MANSOB *et al.*, 2014; AL-KHATEEB; RAMADÃ, 2015; WEN *et al.*, 2017; POOVANESHVARAN; HASAN; JAYA, 2020). A Figura 2.6 destaca o comportamento do parâmetro  $|G^*|/\text{sen } \delta$  versus a temperatura para o ligante asfáltico 60/70

de referência, de alto desempenho e o modificado com adição de 5% de látex, nas condições virgem e envelhecida após RTFOT.

Figura 2.6:  $|G^*|/\text{sen } \delta$  versus temperatura para o ligante asfáltico 60/70 de referência, de alto desempenho e o modificado com adição de 5% de látex, nas condições virgem e envelhecida (RTFOT).



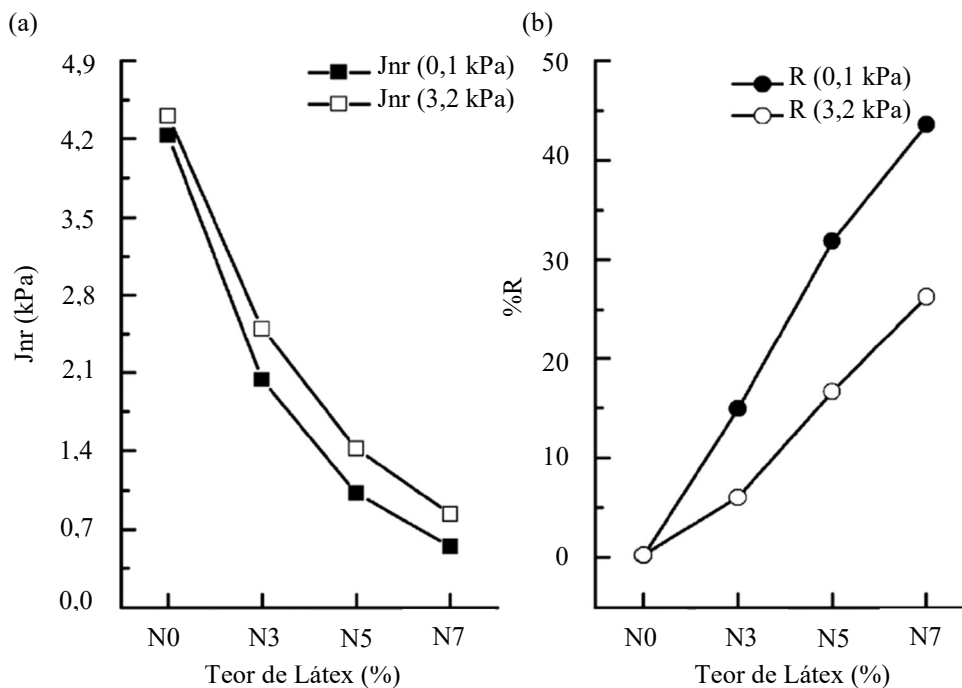
Fonte: Adaptado de Kamal, Hadithon e Bakar (2020).

A Figura 2.6 mostra o efeito da adição do látex no ligante virgem e envelhecido (RTFOT), em várias temperaturas, em comparação com o ligante asfáltico 60/70 de referência e com outro de alto desempenho. Para a condicionante, o ligante asfáltico de referência apresentou valores maiores do que 1,0 kPa e 2,2 kPa nas temperaturas de 52 °C, 58 °C e 64 °C de ensaio, enquanto que, para o ligante asfáltico com adição de 5% de látex de borracha natural, os valores foram superiores aos limites mínimos de 1,0 kPa e 2,2 kPa até 76 °C e 82 °C, respectivamente. Resultados semelhantes foram observados por Ali *et al.* (2013), onde se constatou que a adição de borracha natural aumentou o valor de  $|G^*|/\text{sen } \delta$ , indicando, assim, maior capacidade de resistência às deformações permanentes.

O ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR) indica que o uso do ligante asfáltico modificado com látex pode melhorar efetivamente a resistência à deformação permanente. Acerca do assunto, a Figura 2.7 ilustra o comportamento do ligante asfáltico modificado com adição de látex de borracha natural nas porcentagens de 3%, 5% e 7% levando-se em consideração os parâmetros de compliância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) e percentual de recuperação (%R), na condição virgem, a uma temperatura de ensaio igual a 60 °C, conforme pesquisado por Wen *et al.* (2017).



Figura 2.7: Resultados para (a)  $J_{nr}$  e (b) %R para ligantes asfálticos modificados com diferentes teores de látex, na condição virgem, a uma temperatura de 60 °C.



Fonte: Adaptado de Wen *et al.* (2017).

De acordo com a Figura 2.7a, considerando o comportamento do parâmetro  $J_{nr}$  obtido nas duas tensões de ensaio, é possível notar que os valores da compliância não-recuperável diminuem com o aumento do conteúdo de látex de borracha natural para a temperatura de ensaio igual a 60 °C. Infere-se, portanto, que o látex contribui para a redução do acúmulo de deformações não recuperáveis na matriz asfáltica.

Ainda, em consonância com a Figura 2.7b, verificou-se um aumento do percentual de recuperação (%R) conforme o aumento do teor de látex de borracha natural. Este resultado indica que a inserção de látex melhora a resistência à deformação e auxilia a recuperar o seu estado original após a deformação ocorrer.

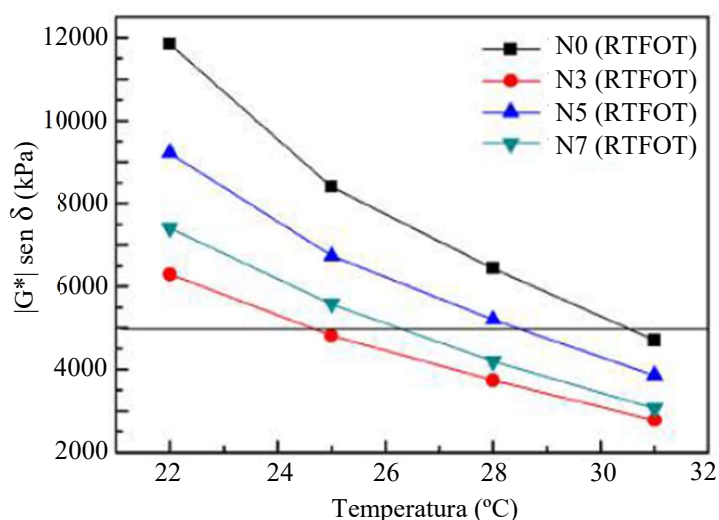
Outrossim, para a Figura 2.7, os valores de  $J_{nr(3,2)}$  são ligeiramente maiores que os valores de  $J_{nr(0,1)}$  da mesma forma que os valores  $R_{(0,1)}$  são maiores que os valores  $R_{(3,2)}$ ; a diferença entre eles aumenta gradualmente com o aumento do conteúdo de látex. Isso mostra que o estado de tensão interfere no comportamento dos ligantes asfálticos modificados, como observado por Wen *et al.* (2017).

O teste MSCR fornece informações sobre a resposta elástica do ligante asfáltico. Valores superiores de recuperação são geralmente associados a valores mais altos de recuperação elástica, além de estarem associados à capacidade de resistência à deformação

permanente do material (ANDERSON; D'ANGELO; BUKOWSKI, 2011; WANG *et al.*, 2015; WEN *et al.*, 2017).

Para o parâmetro da fadiga, valores baixos de módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) e ângulo de fase ( $\delta$ ) são desejáveis para controlar a fissuração dos ligantes asfálticos. A Figura 2.8 apresenta os resultados da pesquisa de Wen *et al.* (2017) para a fadiga do material, ilustrando o comportamento do ligante asfáltico modificado com adição de látex de borracha natural nas porcentagens de 3%, 5% e 7%, na condição envelhecida (RTFOT), a uma faixa de temperatura de 20 °C a 32 °C.

Figura 2.8:  $|G^*| \text{ sen } \delta$  versus temperatura para o ligante asfáltico 60/70 de referência e o modificado com adição de 3%, 5% e 7% de látex, na condição envelhecida (RTFOT), em diferentes temperaturas de ensaio.



Fonte: Adaptado de Wen *et al.* (2017).

Segundo a Figura 2.8, a adição de látex de borracha natural apresentou melhores respostas à fadiga em todos os teores e temperaturas investigados, visto que os valores do parâmetro  $|G^*| \text{ sen } \delta$  foram menores do que os do ligante base. Porém, conforme evidenciado por Wen *et al.* (2017) e por outros autores (AL-MANSOUB *et al.*, 2014; AL-KHATEEB; RAMADÃ, 2015), o parâmetro  $|G^*| \text{ sen } \delta$  apresenta limitações na predição do desempenho relacionados à fadiga dos ligantes asfálticos modificados. A ineficácia do parâmetro  $|G^*| \text{ sen } \delta$  ocorre pelo fato dos ensaios serem realizados na região de viscoelasticidade linear, para níveis baixos de deformação, enquanto que o fenômeno real ocorre na região de viscoelasticidade não-linear, sob grandes deformações (PAMPLONA; NUNES; FAXINA, 2014). Como alternativa, têm surgido outras técnicas de análise como o ensaio de varredura de amplitude linear (LAS), realizado no DSR, que correlaciona a vida de fadiga do ligante asfáltico com a carga aplicada.

## 2.4 TÉCNICAS PARA CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO ASFÁLTICO PRODUZIDO COM LÁTEX DE BORRACHA NATURAL

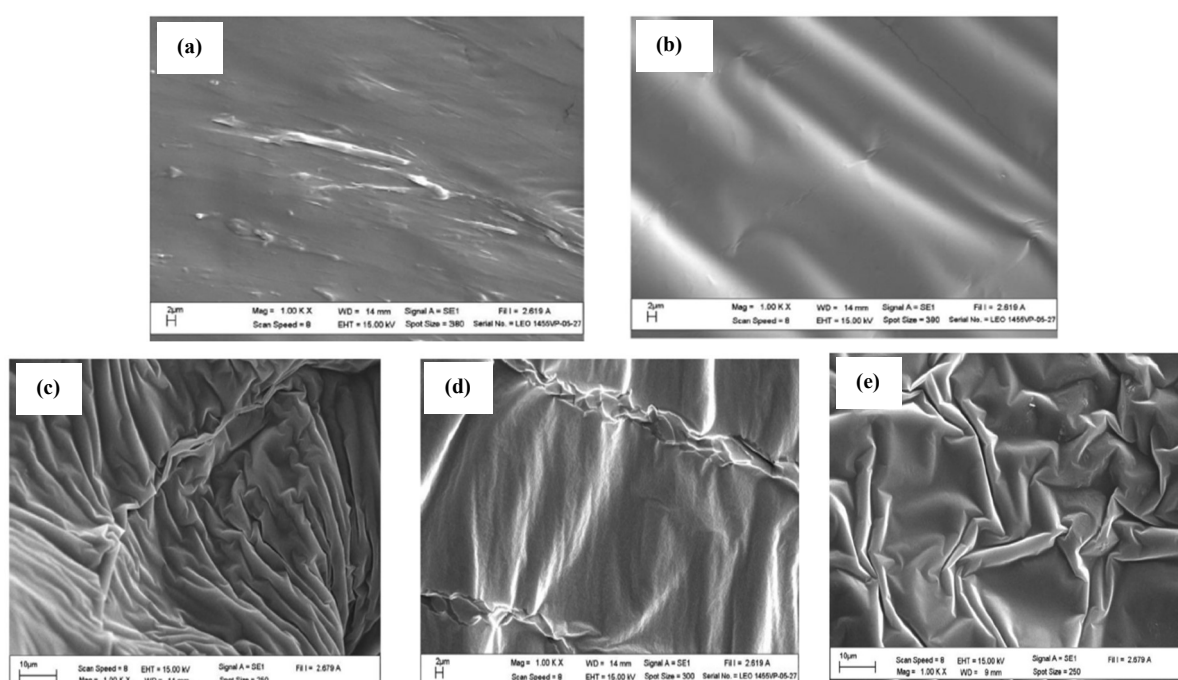
As mudanças na microestrutura do ligante asfáltico modificado com látex podem afetar as propriedades físicas, mecânicas e reológicas do material. Nesse sentido, diferentes técnicas são utilizadas para examinar a estrutura e a morfologia do compósito asfáltico produzido, como a microscopia eletrônica de varredura (MEV), difratometria de raios X (DRX) e espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). A Tabela 2.4 mostra um resumo dessas técnicas de caracterização, conforme documentado em diferentes pesquisas.

Tabela 2.4: Resumo das técnicas de caracterização da microestrutura.

<b>Técnica de Caracterização</b>	<b>Autores</b>	<b>Propriedades</b>
Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	Li <i>et al.</i> (2017), Jitsangiam <i>et al.</i> (2021)	Permite caracterizar as alterações morfológicas do material através do bombardeio de elétrons sobre a amostra e a captação dos elétrons refletidos ou irradiados para fora da amostra.
		O método é considerado uma importante ferramenta para identificar a morfologia dos compósitos e os mecanismos de falha do material.
Difratometria de raios X (DRX)	Siddiqui, Ali e Shirokoff (2002), Alqahtani (2017), Li <i>et al.</i> (2017)	Permite caracterizar as alterações estruturais da amostra, a partir de curvas DRX obtidas pelo difratômetro com radiação Cu K $\alpha$ (1,5418 Å).
		Permite investigar o grau de cristalinidade e amorfismo do material.
		O método de filme fino é o mais utilizado para essa técnica.
Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	Lamontagne <i>et al.</i> (2001), Li <i>et al.</i> (2017), Teixeira (2018), Amini e Hayati (2020)	Consiste na irradiação de raios infravermelhos (IR) em uma amostra, sendo que parte desses raios são absorvidos e parte são transmitidos. Os espectros resultantes indicam a absorção e a transição molecular, que determinam a estrutura molecular dos materiais.
		Permite identificar os compostos e ligações químicas encontrados nos materiais asfálticos, destacando-se os grupamentos alifáticos, aromáticos e heteroátomos.
		Através do espectro, é possível verificar a presença de compostos carbonílicos, podendo indicar possível envelhecimento do ligante.

As técnicas descritas na Tabela 2.4 trazem importantes resultados quanto à microestrutura do material. Referente ao ensaio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), a Figura 2.9 apresenta o comportamento do (a) látex de borracha natural e (b) do ligante asfáltico 60/70 de referência e as alterações morfológicas observadas após a adição de (c) 3%, (d) 7% e (e) 12% de látex de borracha natural no ligante asfáltico, conforme pesquisado por Jitsangiam *et al.* (2021).

Figura 2.9: Micrografia eletrônica de varredura do (a) látex de borracha natural, (b) ligante asfáltico 60/70 de referência e ligante asfáltico modificado com adição de (c) 3%, (d) 7% e (e) 12% de látex de borracha natural.



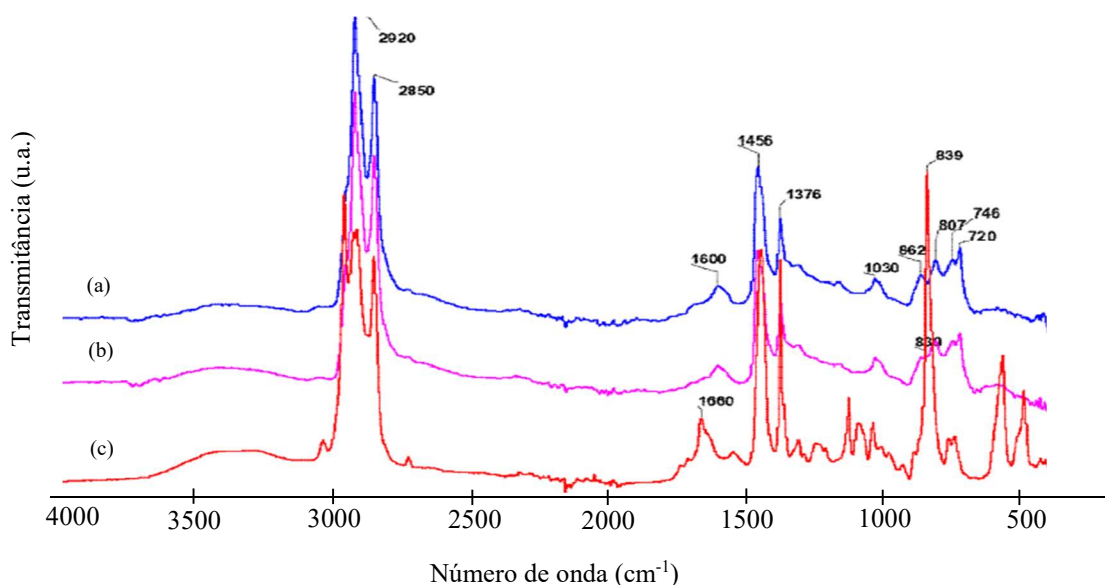
Fonte: Adaptado de Jitsangiam *et al.* (2021).

Considerando a Figura 2.9, o estudo de Jitsangiam *et al.* (2021) mostra que o ligante modificado com adição de 3% e de 12% de teor de látex de borracha natural apresenta padrões irregulares na textura da superfície, enquanto que, com a adição de 7% de teor, nota-se superfícies relativamente uniformes e lisas.

Através da técnica de difratometria de raios X (DRX), Mina e Haque (2004) observaram, em suas amostras, que a estrutura cristalina do látex é muito semelhante à da molécula poli(1,4-cis-metilbutadieno). Nessa linha, Jitsangiam *et al.* (2021), em suas amostras contendo 3%, 7% e 12% de látex, encontraram estruturas minerais amorfas, sem nenhum pico acentuado em função da modificação da matriz asfáltica.

A pesquisa de Kamal, Hadithon e Bakar (2020) avaliou os compostos químicos encontrados no ligante asfáltico 60/70, no ligante de alto desempenho e no ligante modificado com 5% de látex, a partir da análise com espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Dessa forma, a Figura 2.10 indica o espectro de infravermelho dado pela transmitância em função do número de onda para esses materiais asfálticos.

Figura 2.10: Espectroscopia de infravermelho (transmitância *versus* número de onda) do (a) ligante asfáltico 60/70 de referência, (b) ligante de alto desempenho e (c) ligante asfáltico modificado com 5% de látex.



Fonte: Adaptado de Kamal, Hadithon e Bakar (2020).

Conforme a Figura 2.10, os espectros observados por Kamal, Hadithon e Bakar (2020) mostraram uma semelhança de comportamento entre o ligante asfáltico 60/70 de referência, o ligante de alto desempenho e o modificado com 5% teor de látex. É possível notar grandes picos entre  $2.850\text{ cm}^{-1}$  e  $2.920\text{ cm}^{-1}$ , devido ao alongamento das vibrações das cadeias asfálticas dos grupos C-H característicos de materiais asfálticos. Em comparação com o ligante asfáltico de referência, o ligante asfáltico modificado apresentou um novo pico em  $839\text{ cm}^{-1}$ , correspondendo a cadeia C=C (ligação de alcenos do tipo *cis*), comumente encontrado em materiais de alongamento (KAMAL; HADITHON; BAKAR, 2020). Além disso, é possível inferir que ocorre um aumento da rigidez da matriz asfáltica com o aumento dos índices de aderência das ligações C-H presentes nos ligantes asfálticos modificados com látex (SANI *et al.*, 2021). Resultados semelhantes também foram observados nas amostras ensaiadas por Masson, Pelletier e Collins (2001) e Teixeira (2018).

## 2.5 EFEITO DA ADIÇÃO DE LÁTEX SOBRE AS PROPRIEDADES DE MISTURAS ASFÁLTICAS

As misturas asfálticas modificadas com látex de borracha natural demonstram um aumento da resistência à deformação permanente e à fadiga (ANSARI *et al.*, 2021), resultando em um revestimento com maior vida útil e segurança (AL-SABAEI *et al.*, 2019).

A Tabela 2.5 resume os recentes estudos laboratoriais de misturas asfálticas modificadas com látex de borracha natural, considerando critérios como a suscetibilidade à deformação permanente, o comportamento reológico e a resistência à fadiga como discussão.

Tabela 2.5: Síntese bibliográfica das misturas asfálticas modificadas com látex de borracha natural.

<b>Autor</b>	<b>Plano Experimental</b>	<b>Conclusão</b>
Ali <i>et al.</i> (2013)	Misturas HMA <sup>1</sup> contendo ligante PEN <sup>2</sup> 80/100, látex nas proporções de 1%, 3% e 5% <sup>3</sup> e fuligem nas proporções de 10%, 15% e 20% <sup>3</sup> foram ensaiadas para avaliar a deformação permanente, segundo metodologia Superpave.	O aumento da quantidade de látex no ligante asfáltico resulta em melhor desempenho geral das misturas HMA.
		Maior módulo de rigidez.
		Menor fluência.
		Melhora na elasticidade.
Krishnapriya (2015)	Misturas de asfalto foram preparadas com ligante PEN <sup>2</sup> 60/70 e látex <sup>4</sup> nos teores de 4,5%, 5%, 5,5%, 6% e 6,5% <sup>3</sup> para avaliar a deformação permanente e resistência à fadiga da mistura asfáltica.	Conforme testes de desempenho, o teor ótimo da mistura é formado pelo ligante PEN <sup>2</sup> 60/70 com 5% de látex.
		Aumento da vida de fadiga da mistura asfáltica modificada.
		Aumento da resistência à deformação permanente da mistura asfáltica modificada.
Kishore e Gottala (2015)	Misturas de asfalto foram preparadas com ligante PEN <sup>2</sup> 60/70 e látex <sup>5</sup> nos teores de 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 5,5%, 6% e 7% <sup>3</sup> para determinar, após dosagem Marshall, as propriedades mecânicas.	A mistura modificada com 4% de látex obteve melhores resultados mecânicos.
Shaffie <i>et al.</i> (2016)	Misturas de granulometria densa e SMA <sup>6</sup> contendo ligante PEN <sup>2</sup> 80/100, PG <sup>7</sup> 76, 4% de nanopoliacrilato e látex nas proporções de 2%, 4% e 6% <sup>3</sup> foram ensaiadas para avaliar a deformação permanente.	Aumento da durabilidade para as misturas de granulometria densa e SMA <sup>6</sup> .
		Melhores resultados para a mistura contendo 4% de nanopoliacrilato e 4% de látex.

<b>Autor</b>	<b>Plano Experimental</b>	<b>Conclusão</b>
Siswanto (2017)	Quatro misturas de asfalto de graduação densa foram preparadas com ligante PEN <sup>2</sup> 60/70 de referência e látex <sup>5</sup> nos teores de 2%, 4% e 6% <sup>3</sup> para avaliar a deformação permanente da mistura asfáltica.	Aumento da resistência à deformação permanente da mistura asfáltica modificada.
		A mistura modificada com 6% de látex obteve melhores resultados mecânicos.
Al-Mansob <i>et al.</i> (2017)	Misturas asfálticas HMA <sup>1</sup> foram preparadas com ligante PEN <sup>2</sup> 80/100 de referência e borracha natural epoxidada nos teores de 3%, 6%, 9% e 12% <sup>3</sup> para avaliar o desempenho da mistura.	Diminuição do módulo de resiliência em baixas temperaturas.
		Aumento da resistência à deformação permanente da mistura asfáltica modificada.
		Aumento da vida de fadiga.
		A mistura modificada com 12% de látex obteve melhores resultados mecânicos.
Villena, Mendes e Dalledone (2017)	Misturas asfálticas foram preparadas com ligante asfáltico 50/70 e 5% <sup>3</sup> de látex reciclado de luvas para determinar, após dosagem Marshall, as propriedades mecânicas.	Maior resistência às deformações permanentes em campo pela mistura asfáltica modificada com 5% de látex, em temperaturas próximas a 60 °C.
Kumar e Juneja (2019)	Cinco misturas de asfalto foram preparadas com ligante PEN <sup>2</sup> 60/70 e látex nos teores de 3% e 4% <sup>3</sup> para avaliar a deformação permanente do pavimento.	A mistura asfáltica com 3% de látex apresenta melhor resistência à deformação permanente.

<sup>1</sup> Hot mix asphalt; <sup>2</sup> Penetração do asfalto; <sup>3</sup> Em peso de ligante asfáltico; <sup>4</sup> Látex com teor de borracha seca de 60%; <sup>5</sup> Balões de látex; <sup>6</sup> Stone Mastic Asphalt; <sup>7</sup> Grau de desempenho.

De acordo com a Tabela 2.5, destaca-se que o látex de borracha natural tem um excelente potencial para melhorar o desempenho das misturas asfálticas, visto que não apenas aumenta a resistência à deformação permanente, mas também otimiza a vida à fadiga.

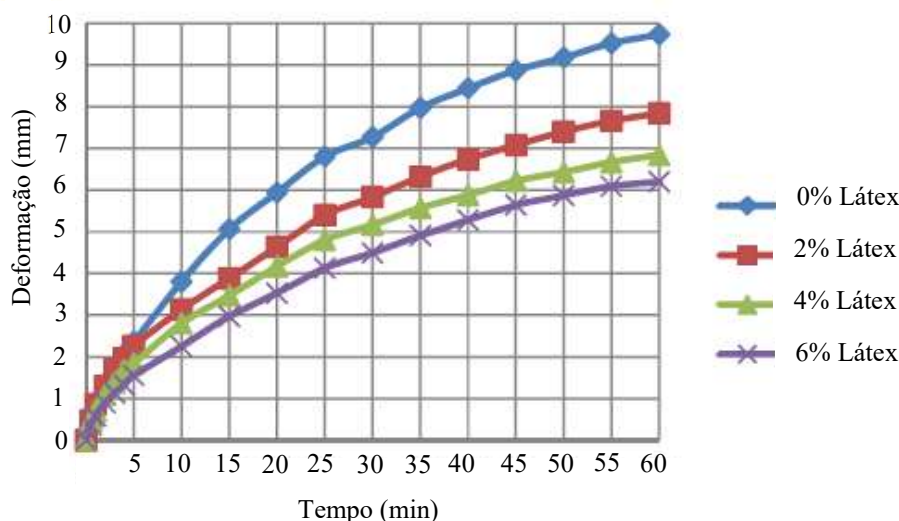
Em comparação com uma mistura convencional, a adição de látex melhora consideravelmente as propriedades de desempenho. O comportamento elastomérico do látex potencializa o desempenho do revestimento asfáltico a longo prazo, mantendo-o coeso e evitando o desenvolvimento de fissuras (ANSARI *et al.*, 2021).

Em uma perspectiva econômica, possibilitar a modificação da mistura asfáltica a partir da incorporação de materiais alternativos, permitirá reduzir a periodicidade nas intervenções de manutenção, restauração e reabilitação de pavimentos (SCHUSTER, 2020).

O estudo conduzido por Siswanto (2017) investigou o efeito do látex de borracha natural quanto à deformação da mistura asfáltica. A Figura 2.11 ilustra o comportamento da

deformação *versus* tempo para a mistura de referência contendo ligante asfáltico 60/70 e para as misturas modificadas com 2%, 4% e 6% de látex.

Figura 2.11: Deformação *versus* tempo para as misturas asfálticas modificadas com teores de 0%, 2%, 4% e 6% de látex de borracha natural.



Fonte: Adaptado de Siswanto (2017).

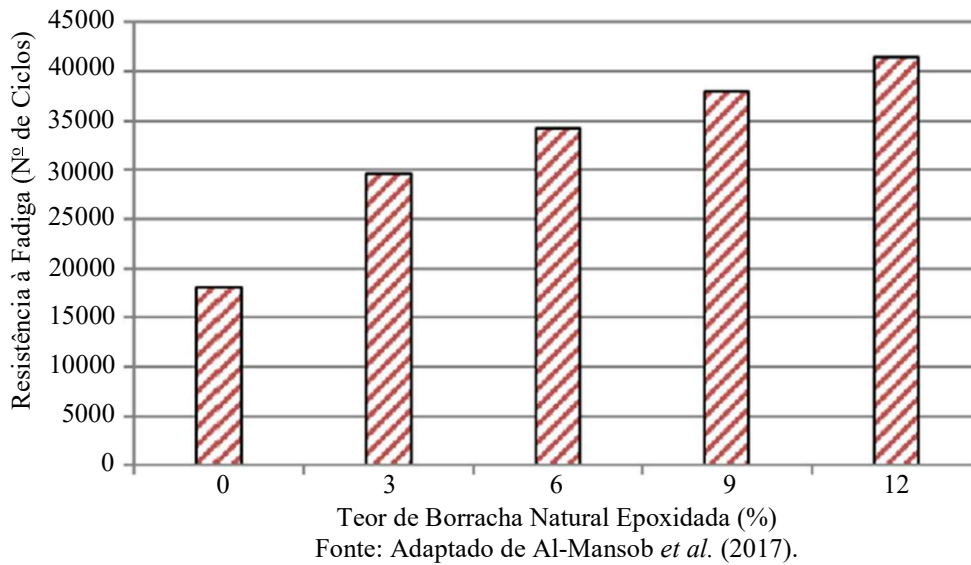
De acordo com a Figura 2.11, os resultados obtidos por Siswanto (2017) indicaram uma diminuição da taxa de deformação nas misturas asfálticas no momento em que a estabilidade dinâmica é aumentada. Logo, melhores resultados são encontrados para a amostra contendo 6% de teor de látex, tendo uma redução da deformação de praticamente 40% (de 10 mm para 6 mm, após 60 min de ensaio).

Ao analisar a deformação permanente, a pesquisa de Tuntiworawit, Lavansiri e Phromsorn (2005) comparou o desempenho da mistura asfáltica 60/70 de referência com as misturas modificadas com 1%, 3%, 5%, 7%, 9%, 11% e 13% de látex de borracha natural. Segundo os autores, quanto maior o teor de látex incorporado na mistura, melhores os resultados para a redução da suscetibilidade à deformação permanente. A mistura modificada com 13% de látex, por exemplo, apresentou desempenho quatro vezes melhor do que a mistura de referência.

Em relação à fadiga, após a adição de látex de borracha natural, pesquisas como a de Krishnapriya (2015) e Al-Mansob *et al.* (2017) observaram uma melhora na vida útil do material. Nesse sentido, a Figura 2.12 ilustra o comportamento de misturas asfálticas modificadas com 3%, 6%, 9% e 12% de borracha natural epoxidada em comparação com a mistura asfáltica 80/100 de referência através do número de ciclos até a falha (50% de seu valor inicial), conforme pesquisado por Al-Mansob *et al.* (2017).



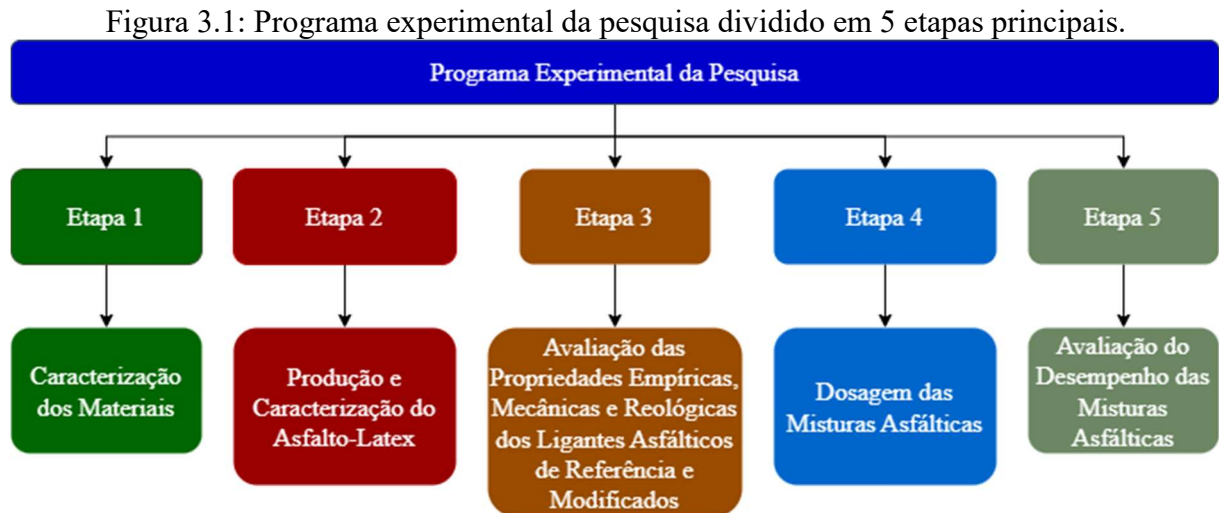
Figura 2.12: Resultados da fadiga através do número de ciclos até a falha para as misturas asfálticas de referência e modificadas com 3%, 6%, 9% e 12% de borracha natural epoxidada.



Através da Figura 2.12, percebe-se que a adição de borracha natural epoxidada melhorou a vida de fadiga da mistura, visto que a mistura de referência apresentou falha após 18.000 ciclos, enquanto a mistura modificada com 12% de borracha natural epoxidada falhou após 41.000 ciclos, aproximadamente. Tal fator também está correlacionado com o grau e o tipo de modificação da borracha, conforme documentado por Al-Mansob *et al.* (2017). Resultados semelhantes foram observados na pesquisa de Tuntiworawit, Lavansiri e Phromsorn (2005).

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo de metodologia são descritas as etapas do programa experimental para alcançar o objetivo do estudo, conforme indica a Figura 3.1.



Os procedimentos relacionados a cada etapa estão resumidamente descritos a seguir:

- **Etapa 1 – Caracterização dos Materiais:** nesta fase procedeu-se a caracterização física e química dos agregados, do ligante asfáltico 50/70 e do látex empregados na pesquisa.
- **Etapa 2 – Produção e Caracterização do Asfalto-Látex:** neste estágio foi realizada a incorporação de diferentes porcentagens de fragmentos de luvas de látex no ligante asfáltico e a posterior caracterização a partir de análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), difratometria de raios X (DRX), espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e micrografia de fluorescência.
- **Etapa 3 – Avaliação das Propriedades Empíricas, Mecânicas e Reológicas dos Ligantes Asfálticos de Referência e Modificados:** neste item foi conduzida a caracterização dos ligantes asfálticos de referência e modificados, com o objetivo de obter os parâmetros empíricos, mecânicos e reológicos de desempenho desses materiais. Para isso, realizou-se a avaliação da viscosidade aparente, das propriedades viscoelásticas em temperaturas altas e intermediárias, do grau de desempenho (PG), da fluência e da recuperação sob tensões múltiplas (MSCR), da

tolerância ao dano por fadiga (LAS), visando alcançar a porcentagem do teor ótimo do ligante asfáltico modificado para formulação de uma mistura asfáltica com látex.

- **Etapa 4 – Dosagem das Misturas Asfálticas:** nesta etapa foi definida a dosagem das misturas asfálticas de referência e modificada com látex (teor ótimo obtido na etapa anterior), em conformidade com o procedimento recomendado pela metodologia Superpave (anterior ao Superpave 5).
- **Etapa 5 – Avaliação do Desempenho das Misturas Asfálticas:** por fim, na última fase da pesquisa, foi investigado o desempenho das misturas formuladas quanto à suscetibilidade à deformação permanente, comportamento reológico e à resistência à fadiga. Para isso, foram produzidos placas e corpos de prova prismáticos das misturas asfálticas com as características dosadas na etapa precedente.

O método utilizado para atingir os objetivos de cada etapa está descrito detalhadamente a seguir.

### 3.1 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Na etapa 1 foi realizada a caracterização física e química dos agregados, do ligante asfáltico 50/70 e das luvas de látex, conforme indicado na Figura 3.2.

Figura 3.2: Estrutura da primeira etapa do programa experimental.



### 3.1.1 Agregados

Em relação aos agregados minerais, foram utilizados para a pesquisa, materiais britados de origem granítica cinza, fornecidos pela empresa Sul Brasileira de Mineração (SBM), localizada na cidade de Paulo Lopes/SC. A caracterização dos granulares foi realizada segundo as seguintes normas:

- a) Abrasão Los Angeles, conforme ASTM C 131 (ASTM, 2006);
- b) Absorção de agregado graúdo, conforme ASTM C 127 (ASTM, 2012);
- c) Adesividade de agregado graúdo a ligante betuminoso, conforme DNER ME 078 (DNER, 1994);
- d) Angularidade do agregado graúdo, conforme ASTM D 5821 (ASTM, 2013);
- e) Angularidade do agregado miúdo, conforme ASTM C 1252 (ASTM, 2006);
- f) Equivalente de areia, conforme AASHTO T 176 (AASHTO, 2008);
- g) Índice de forma, conforme ABNT NBR 6954 (ABNT, 1989);
- h) Massa específica aparente do agregado graúdo, conforme ASTM C 127 (ASTM, 2012);
- i) Massa específica real do agregado graúdo, conforme ASTM C 127 (ASTM, 2012);
- j) Massa específica real do agregado miúdo, conforme DNER ME 084 (DNER, 1995);
- k) Massa específica real do material pulverulento, conforme DNER ME 085 (DNER, 1994);
- l) Materiais deletérios, conforme AASHTO T 112 (AASHTO, 2012);
- m) Sanidade, conforme ASTM C 88 (ASTM, 2013).

### 3.1.2 Ligante Asfáltico 50/70

O ligante asfáltico empregado na pesquisa consiste em um material classificado como CAP 50/70, muito produzido nas refinarias brasileiras. Contudo, apresenta desempenho insatisfatório para compor misturas asfálticas destinadas a grande parte dos revestimentos nacionais, devido às características climáticas e de tráfego do país. Tais fatos justificam a sua escolha para utilização nesta investigação.

O ligante asfáltico 50/70 foi fornecido pela refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR)/Petrobras, localizada na cidade de Araucária/PR. Para sua caracterização, adotaram-se as seguintes normativas:

- a) Densidade, conforme ASTM D 70-17 (ASTM, 2017);
- b) Ponto de amolecimento, conforme ASTM D 36/D 36 M (ASTM, 2014);
- c) Penetração, conforme ASTM D 5/D 5 M (ASTM, 2013);
- d) Viscosidade aparente *Brookfield*, conforme ASTM D 4402/D 4402 M (ASTM, 2015);
- e) Índice de suscetibilidade térmica, conforme DNIT 095 EM (DNIT, 2006);
- f) Penetração retida, conforme ASTM D 5/D 5 M (ASTM, 2013);
- g) Aumento do ponto de amolecimento, conforme ASTM D 36/D 36 M (ASTM, 2014);
- h) Ductilidade, conforme ASTM D 113 (ASTM, 2017);
- i) Variação em porcentagem de massa, conforme ASTM D 2872 (ASTM, 2013);
- j) Ponto de fulgor, conforme ASTM D 92 (ASTM, 2017);
- k) Solubilidade em tricloroetileno, conforme ASTM D 2042 (ASTM, 2015).

### 3.1.3 Luvas de Látex

O látex de borracha natural foi selecionado para esta pesquisa por ser um biopolímero orgânico, derivado de fontes renováveis comumente encontradas na natureza (ANSARI *et al.*, 2021). Além disso, o material apresenta alta resiliência e elasticidade (AZAHAR *et al.*, 2016), possui boa adesão quando misturado com agregados (AL-MANSOB *et al.*, 2017) e possui a capacidade de melhoramento das propriedades mecânicas e reológicas do ligante asfáltico (JITSANGIAM *et al.*, 2021) e da mistura asfáltica (KRISHNAPRIYA, 2015). Nesse sentido, com uma crescente conscientização sobre questões ambientais, a incorporação das luvas de látex na matriz asfáltica se torna uma opção ecologicamente correta e sustentável, pois se trata de um material de um único uso que seria descartado em aterros (VILLENA; MENDES; DALLEDONE, 2017) ou incinerado (SWETHA; RANI, 2014), contribuindo diretamente para a poluição e degradação do meio ambiente.

Dessa forma, para este estudo, foram adicionados ao ligante asfáltico, fragmentos de luvas de látex, da marca *Descarpack – Efficiency in Disposables*, sendo específicas para procedimento não cirúrgico (DESCARPACK, 2023).

As informações sobre a composição da luva de látex foram obtidas junto ao fabricante e a composição química típica do látex de borracha natural e do pó bioabsorvível de amido de milho foram retiradas de pesquisas específicas. Ademais, após o processo de lavagem e corte das luvas, foi realizada a caracterização térmica, física e química do material a partir das análises de variação termogravimétrica (TGA) e derivada da massa (DTG), difratometria de

raios X (DRX) e espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), conforme metodologia descrita a seguir.

### 3.1.3.1 Análises Térmicas

A variação termogravimétrica (TGA) e a derivada da massa (DTG) fornecem informações sobre a natureza e a extensão da degradação do material em função do aumento da temperatura a partir de reações térmicas (endotérmicas ou exotérmicas) (ASTM E 2250, 2021).

As análises térmicas foram conduzidas com o objetivo de conhecer as alterações que o aquecimento pode provocar no látex, dado o fato que a incorporação dos fragmentos de luvas no ligante e, conseqüentemente, na mistura asfáltica ocorre em temperaturas elevadas (150 °C a 175 °C). Nesse sentido, a técnica permite estabelecer a faixa de temperatura em que o material adquire composição química, fixa, definida e constante, e a temperatura em que começa a se decompor e perder suas propriedades.

Os ensaios de termogravimetria (TGA) e derivada de massa (DTG) foram realizados no Laboratório de Controle e Processos de Polimerização (LCP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), utilizando-se um analisador termogravimétrico modelo Netzsch STA 449 F3.

### 3.1.3.2 Difratomia de Raios X (DRX)

O látex foi examinado com a técnica de difratometria de raios X (DRX) com o objetivo de caracterizar o grau de cristalinidade e amorfismo.

Esta técnica foi realizada no Laboratório de Nanotecnologia (NANOTEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), utilizando-se um difratômetro de raios X, modelo Rigaku Miniflex II, potência de 35 kV, corrente de 15 mA, detector de iodato de sódio acoplado e com radiação Cu K $\alpha$  (1,5418 Å). As análises foram conduzidas com uma faixa de medição de 5° a 80° (2 $\theta$ ), com taxa de 0,025 °/s.

### 3.1.3.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

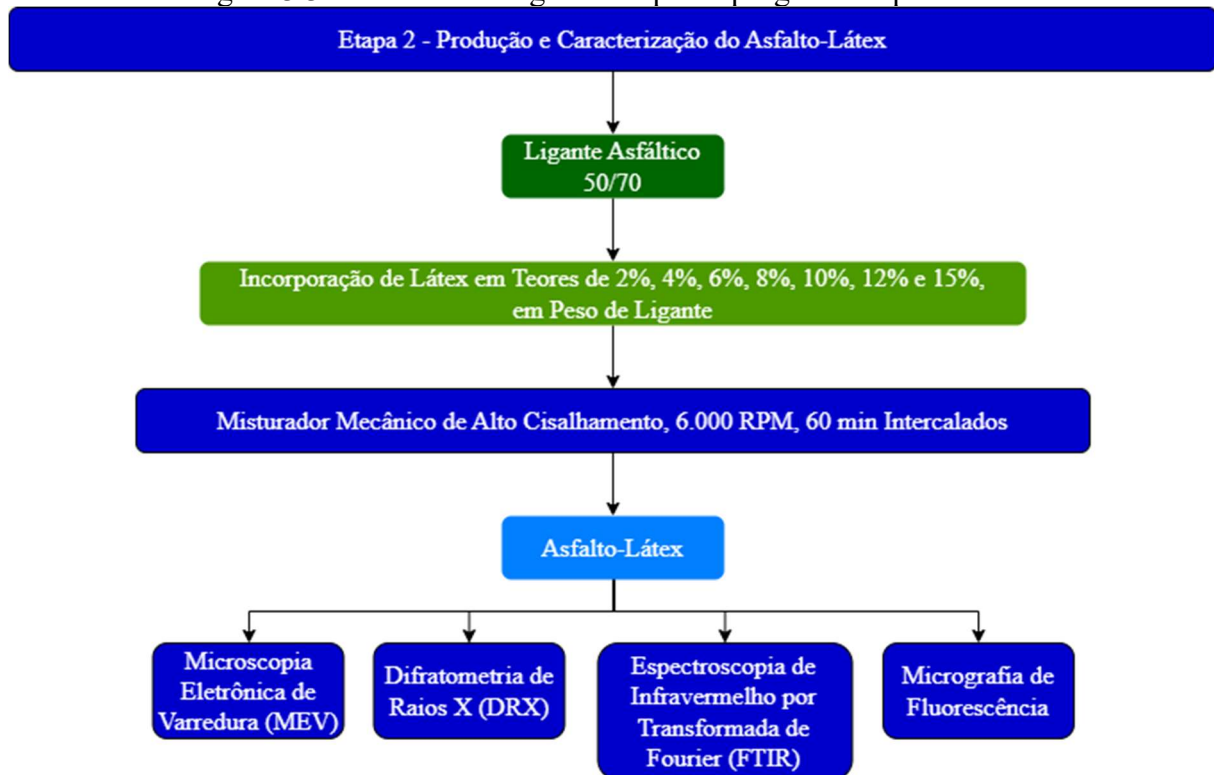
O principal objetivo do ensaio de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi determinar os grupos funcionais do látex, através da análise da transmitância *versus* número de onda (cm<sup>-1</sup>).

Essa análise foi realizada na Central de Análises do Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos (EQA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), com o uso de um espectrômetro modelo FT-IR Agilent Technologies Cary 660, operando no intervalo de  $400\text{ cm}^{-1}$  a  $4.000\text{ cm}^{-1}$ , com média de 16 scans por intervalo, sob uma amostra de látex.

### 3.2 ETAPA 2: PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO ASFALTO-LÁTEX

A etapa 2 consistiu na incorporação de distintos teores de fragmentos de luvas de látex no ligante asfáltico, conforme Figura 3.3. Esta fase compreendeu também a caracterização do ligante asfáltico modificado quanto às alterações morfológicas, estruturais e químicas em relação ao ligante de referência.

Figura 3.3: Estrutura da segunda etapa do programa experimental.



#### 3.2.1 Modificação da Matriz Asfáltica

O látex foi incorporado ao ligante asfáltico 50/70 nas porcentagens de 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 15%, em relação ao peso do ligante, segundo observado em pesquisas sobre o assunto (MALITHONG; THONGPIN, 2010; VICHITCOLCHAI;

PANMAI; NA-RANONG, 2012; AL-MANSOB *et al.*, 2014; SHAFII *et al.*, 2017; WEN *et al.*, 2017; SISWANTO, 2017; RAGAB *et al.*, 2017; TEIXEIRA, 2018; KAMAL; HADITHON; BAKAR, 2020; JITSANGIAM, *et al.*, 2021).

Desta forma, foram produzidos os seguintes asfaltos-látex (AL), apresentados conforme a Tabela 3.1.

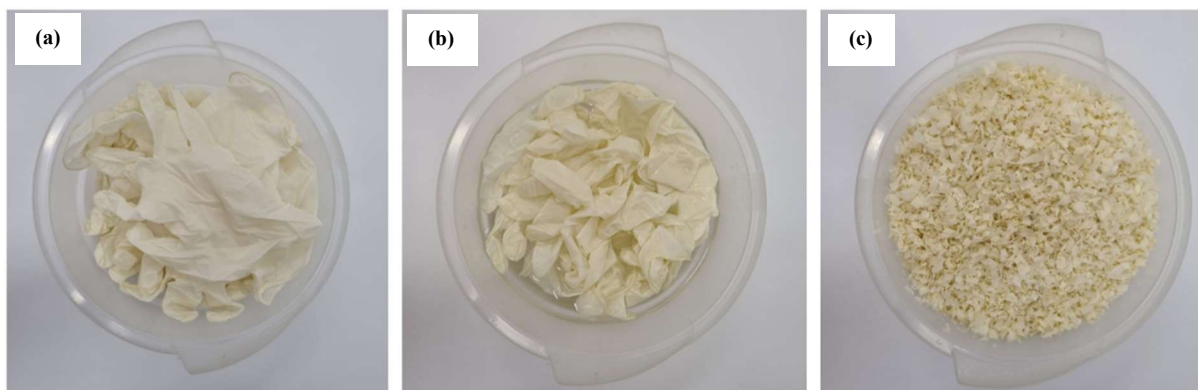
Tabela 3.1: Matriz fatorial de asfalto-látex (AL).

Material	Incorporação (% Peso de Ligante)	Nomenclatura do Ligante Asfáltico Modificado (Asfalto-Látex)
Fragmentos de luvas de látex de borracha natural	2%	AL-2%
	4%	AL-4%
	6%	AL-6%
	8%	AL-8%
	10%	AL-10%
	12%	AL-12%
	15%	AL-15%

Quanto à preparação do material, inicialmente, as luvas de látex foram examinadas para verificar a existência de alguma imperfeição ou sujidade nas amostras. Em seguida, o material foi lavado com água para remoção do pó bioabsorvível de amido de milho presente no interior das luvas. Logo após, as luvas de látex foram estendidas individualmente em superfície lisa para serem secas em temperatura ambiente. Por fim, o material foi picotado manualmente, de maneira irregular, com o auxílio de uma tesoura, obedecendo tamanhos de 1 mm a 20 mm de comprimento e de 1 mm a 15 mm de largura para facilitar a incorporação no ligante. Tal sistemática de preparação é semelhante a estudada por Kishore e Gottala (2015) e Albiajawi *et al.* (2021).

A Figura 3.4 ilustra a sequência de preparação do material, sendo as luvas de látex (a) separadas, (b) lavadas e (c) picotadas nos tamanhos indicados.

Figura 3.4: Luvas de látex (a) separadas, (b) lavadas e (c) picotadas manualmente.

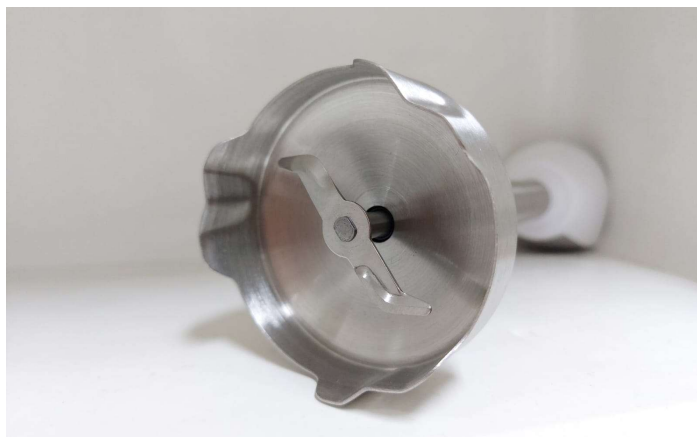




Como complemento, utilizou-se o *software* GIMP<sup>®</sup>, de código aberto, para estimar o tamanho médio dos fragmentos de luvas de látex que foram utilizadas na modificação do ligante. Uma amostra contendo 400 fragmentos de luva de látex foi posta em papel milimetrado e, com a escala conhecida, cotou-se o comprimento e a largura do material. Procedimento semelhante foi realizado pela pesquisa de Schuster (2020) para fibras de lã de aço.

O processo de modificação envolveu a incorporação dos fragmentos de luvas de látex, fracionados em relação ao peso do ligante, na matriz asfáltica. O ligante asfáltico 50/70 foi aquecido em um recipiente metálico a uma temperatura variando de 150 °C a 160 °C, com viscosidade entre 147 cP e 298 cP. Os fragmentos de luvas de látex foram adicionados à matriz asfáltica e pré-misturados manualmente por 15 minutos. Em seguida, com o uso de um misturador mecânico de alto cisalhamento com hélice (Figura 3.5), modelo *Mixer 700 Philco*, com potência de 700 W, o material foi agitado a uma velocidade de 6.000 RPM durante 60 minutos, com intervalos de 1 minuto de repouso, até se obter uma homogeneidade do ligante asfáltico modificado. A energia por unidade de volume aplicada neste procedimento foi equivalente a 606,8 J/m<sup>3</sup>.

Figura 3.5: Hélice do misturador mecânico de alto cisalhamento utilizado na pesquisa.



### 3.2.2 Caracterização dos Asfaltos-Látex Produzidos

Após a incorporação dos fragmentos de luvas de látex no ligante nas proporções de 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 15%, em peso do ligante, os ligantes modificados foram caracterizados em função da sua morfologia, estrutura polimérica e composição química. Para isso, foram realizados os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), difratometria de raios X (DRX), espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e micrografia de fluorescência, conforme procedimentos detalhados nos tópicos a seguir.

### 3.2.2.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A caracterização da morfologia dos ligantes asfálticos de referência e dos modificados com látex foi realizada a partir da técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV), que permitiu avaliar aspectos de forma, textura e característica superficial do material.

Os ensaios foram conduzidos nos ligantes asfálticos de referência e modificados em todos os teores, considerando a condição virgem. As amostras foram preparadas com uma geometria aproximada de 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura.

Após o preparo das amostras em *stubs* metálicos cobertos por uma fita de ouro, foi utilizado um microscópio de varredura convencional com filamento de tungstênio, modelo JEOL JSM-6390LV, com voltagem de aceleração de 10 kV, para caracterizar a morfologia da superfície. Essas análises foram realizadas no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

### 3.2.2.2 Difratometria de Raios X (DRX)

A técnica de difratometria de raios X (DRX) foi utilizada para caracterizar a estrutura polimérica após a incorporação das luvas de látex na matriz asfáltica investigada.

Os ensaios foram realizados nos ligantes asfálticos de referência e modificados em todos os teores, considerando a condição virgem. As amostras foram preparadas com uma geometria aproximada de 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura.

Esta técnica foi realizada no Laboratório de Nanotecnologia (NANOTEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), utilizando-se um difratômetro de raios X, modelo Rigaku Miniflex II, potência de 35 kV, corrente de 15 mA, detector de iodato de sódio acoplado e com radiação  $\text{Cu K}\alpha$  (1,5418 Å). As análises foram conduzidas com uma faixa de medição de 5° a 80° (2 $\theta$ ), com taxa de 0,025 °/s.

### 3.2.2.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A técnica de espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi conduzida com o intuito de analisar as composições químicas e ligações geradas ou destruídas durante o processo da modificação asfáltica.

Os ensaios foram realizados nos ligantes asfálticos de referência e modificados em todos os teores, considerando a condição virgem. As amostras foram preparadas com uma geometria aproximada de 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura.

Essas análises foram realizadas no Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica (LAMMEN) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), com o uso de um espectrômetro modelo FT-IR VERTEX 70, operando no intervalo de  $400\text{ cm}^{-1}$  a  $4.000\text{ cm}^{-1}$ , com média de 16 scans por intervalo, sob uma amostra de ligante asfáltico.

#### 3.2.2.4 Micrografia de Fluorescência

A geração de micrografias de fluorescência teve como objetivo investigar se os ligantes asfálticos de referência e modificados emitem luz quando submetido às condições de fluorescência, sendo possível obter um indicativo sobre o predomínio de fases no material asfáltico após a incorporação de látex.

Os ensaios foram realizados no ligante asfáltico de referência e modificados nos teores de 4%, 8% e 12%, em peso de ligante, considerando a condição virgem. A ausência dos demais teores ocorreu pela indisponibilidade do equipamento no período proposto para este ensaio.

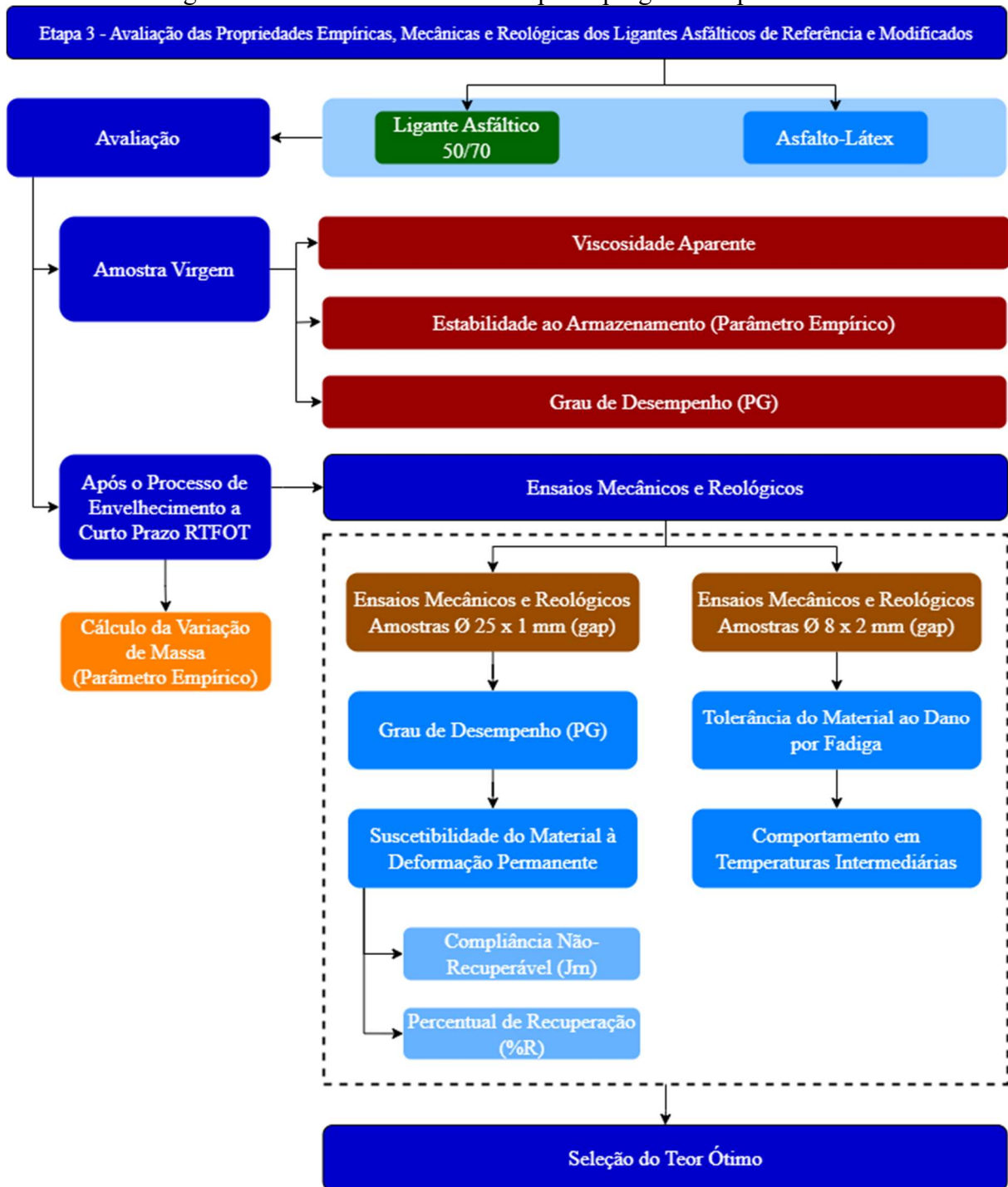
As amostras foram preparadas adicionando-se em uma lâmina de vidro uma pequena quantidade de ligante asfáltico, de forma que o material permanecesse no centro da lâmina com diâmetro aproximado de 1,5 cm. Na sequência, uma lamínula de vidro foi posta em cima do ligante asfáltico, vedando a amostra. Após 24 horas de repouso, as lâminas foram levadas ao microscópio com focal a laser para serem analisadas quanto às imagens reproduzidas.

As análises foram realizadas no Laboratório Multiusuário de Estudos em Biologia (LAMEB) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), utilizando-se um microscópio vertical, modelo BX41 Olympus, com ampliação de 10 vezes.

### 3.3 ETAPA 3: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES EMPÍRICAS, MECÂNICAS E REOLÓGICAS DOS LIGANTES ASFÁLTICOS DE REFERÊNCIA E MODIFICADOS

Nesta etapa analisou-se o comportamento das propriedades empíricas, mecânicas e reológicas dos ligantes asfálticos de referência e modificados com látex, conforme a estrutura demonstrada pela Figura 3.6.

Figura 3.6: Estrutura da terceira etapa do programa experimental.



O objetivo final desta etapa foi selecionar um teor ótimo de látex para a modificação do ligante asfáltico e, conseqüentemente, para a formulação da mistura asfáltica. Foram realizados ensaios tradicionais da especificação brasileira e ensaios reológicos para verificar a influência da adição do látex nas propriedades do ligante asfáltico base.

Neste sentido, para os ligantes asfálticos de referência e modificados com látex, esta etapa compreendeu, para amostras virgens, a avaliação da viscosidade aparente *Brookfield*,

além da estabilidade ao armazenamento (parâmetro empírico) e da determinação do grau de desempenho (PG).

O cálculo da variação de massa (parâmetro empírico) do ligante asfáltico de referência e modificados com látex foi realizado após o processo de envelhecimento a curto prazo utilizando-se a estufa de filme rotativo (RTFOT).

A fase de avaliação mecânica e reológica, após o RTFOT, foi executada a partir de ensaios para determinar o grau de desempenho (PG), a suscetibilidade do material à deformação permanente, a tolerância do material ao dano por fadiga e o comportamento reológico em temperaturas intermediárias.

Os próximos tópicos descrevem a metodologia para cada fase de avaliação.

### 3.3.1 Variação de Massa

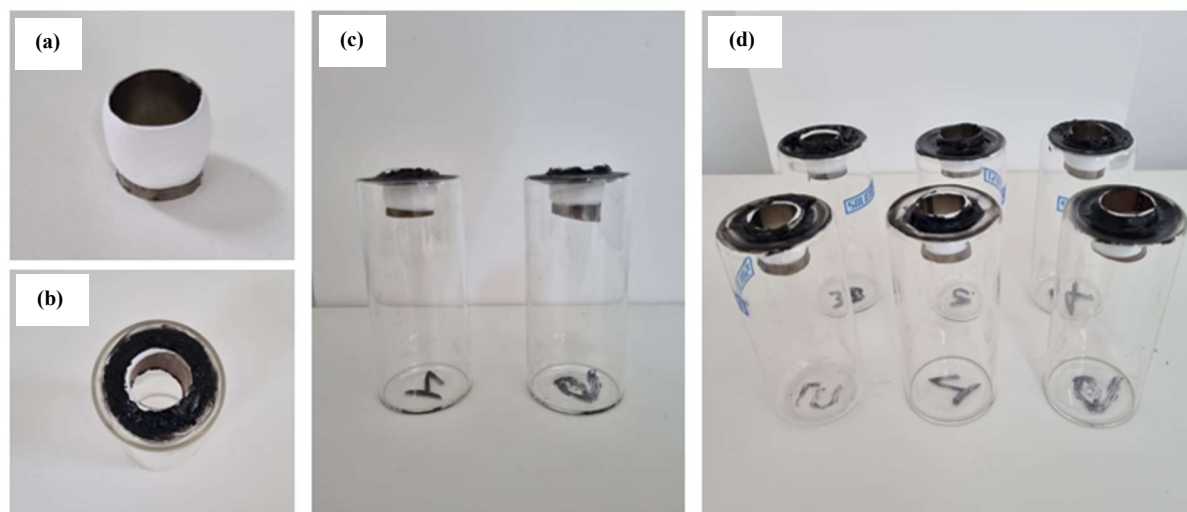
O *Rolling Thin-Film Oven* (RTFOT) foi adotado para a simulação do envelhecimento a curto prazo de ligantes asfálticos. Como todo material, o ligante pode sofrer alterações em suas características mecânicas, químicas e microestruturais, na presença de oxigênio, água, calor e intempéries; que resulta no aumento da sua viscosidade e na redução da sua flexibilidade, tornando a camada asfáltica mais quebradiça e propensa a trincamentos, desgaste e desagregação (LU; TALON; REDELIUS, 2008; HOU *et al.*, 2018). O RTFOT é referenciado pela AASHTO T 240 (AASHTO, 2022).

Para a obtenção do ligante envelhecido dessa pesquisa, foi necessário adaptar os cilindros de vidro do tipo *vessel* utilizados no RTFOT. Esta adaptação teve o objetivo de evitar a saída do ligante asfáltico pelo efeito de Weissenberg durante a execução do ensaio. O efeito de Weissenberg é comum em fluidos viscosos e ocorre devido ao surgimento de tensões normais mediante a rotação do fluido (MARTINS, 2016), o que dificulta a obtenção do ligante envelhecido e inviabiliza a medição da variação de massa.

Dessa forma, foi inserido na boca do cilindro de vidro um tubo metálico rígido, de 27 mm de espessura, envolto em uma camada de fita de politetrafluoroetileno (PTFE), de  $\pm 3$  mm, para garantir que a estrutura acoplada fique firme durante o ensaio. Por fim, no topo do cilindro, foi adicionada uma camada de silicone acético resistente a altas temperaturas (até 265 °C).

A Figura 3.7 ilustra a adaptação descrita anteriormente, evidenciando (a) o cilindro metálico rígido envolto com a fita de PTFE, (b) a camada de silicone acético e (c-d) os cilindros de vidro característicos do ensaio RTFOT adaptados.

Figura 3.7: (a) Cilindro metálico rígido envolto com a fita de PTFE, (b) camada de silicone acético e (c-d) cilindros de vidro característicos do ensaio RTFOT adaptados.



Posteriormente, foi colocada uma amostra de cada ligante dentro do cilindro de vidro adaptado, de dimensões padronizadas, e, em seguida, foi acionado o sistema giratório dentro da estufa. Após 85 minutos a 163 °C, foi medida a variação de massa que cada ligante sofreu decorrente do efeito do envelhecimento através da Equação 3.1.

$$\Delta M = \frac{(M_{inicial} - M_{final})}{M_{inicial}} \times 100 \quad (3.1)$$

Sendo:

$\Delta M$  = variação de massa (%);

$M_{inicial}$  = massa antes do ensaio RTFOT (g), em estado virgem;

$M_{final}$  = massa após o ensaio RTFOT (g), em estado envelhecido.

De acordo com a AASHTO M 320 (AASHTO, 2022), a variação máxima admitida por norma é igual a 1,00% para ligantes asfálticos poliméricos. Além disso, para a Resolução nº 897 da Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2022), a variação máxima é de 0,5% em massa para o CAP 50/70.

Os ensaios foram realizados para o ligante asfáltico de referência e para todos os ligantes asfálticos modificados com látex, no Laboratório de Pavimentação (LABPAV) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), utilizando-se uma estufa de filme fino rotativo modelo *James Cox and Sons* CS 325-B.

### 3.3.2 Estabilidade ao Armazenamento

Este ensaio visou determinar a tendência do látex de se separar do ligante asfáltico, sob condições de armazenamento estático aquecido. Os valores médios para a diferença entre os pontos de amolecimento devem ficar abaixo do limite máximo de 5 °C, de acordo com as normas vigentes (EN 13399, 2017; ASTM D 7173, 2020) e pela Resolução nº 32 da Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2010).

O ensaio foi realizado para o ligante asfáltico de referência e para o modificado no teor ótimo de látex (definido na etapa 3 do programa experimental). O procedimento foi conduzido no Laboratório de Pavimentação (LABPAV) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

### 3.3.3 Viscosidade Aparente

O ensaio da viscosidade aparente foi realizado em um viscosímetro rotacional *Brookfield*, utilizando o procedimento definido pela norma ASTM D 4402/D 4402M (ASTM, 2023) e NBR 15184 (ABNT, 2021).

Dessa forma, foram adicionados 8 g ( $\pm 1$  g) de ligante asfáltico ao tubo de ensaio, selecionando-se o *spindle 21* para monitorar a viscosidade rotacional nas seguintes temperaturas, 135 °C (20 RPM), 150 °C (50 RPM) e 177 °C (100 RPM).

O ensaio foi realizado para o ligante asfáltico de referência e para todos os ligantes asfálticos modificados com látex, no Laboratório de Pavimentação (LABPAV) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

### 3.3.4 Grau de Desempenho (PG)

Para a caracterização do grau de desempenho (PG – *Performance Grade*) foram preparadas amostras de 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura (*gap* – distância entre as placas do reômetro). Os ensaios foram realizados no ligante asfáltico de referência e modificados em todos os teores, em condições virgens e após o envelhecimento a curto prazo na estufa RTFOT, em duplicatas, conforme norma ASTM D 7175 (ASTM, 2015).

Nesse ensaio, a determinação do PG foi definida por meio de uma varredura de temperatura na faixa de 58 °C a 88 °C, com variações de 6 °C em 6 °C, a uma frequência de

10 rad/s e amplitude de deformação de 12% para as amostras no estado virgem e amplitude de deformação de 10% para as amostras envelhecidas a curto prazo (RTFOT).

Nesta etapa foi avaliado também o Índice de Envelhecimento (AI – *Aging Index*), que utiliza o parâmetro  $|G^*|/sen \delta$  obtido no teste. Este índice foi calculado com o intuito de avaliar o comportamento dos ligantes asfálticos de referência e os modificados, seguindo o cálculo apresentado na Equação 3.2.

$$AI = \frac{|G^*|/sen \delta_{\text{pós-RTFOT}}}{|G^*|/sen \delta_{\text{pré-RTFOT}}} \quad (3.2)$$

Sendo:

AI = índice de envelhecimento (adimensional);

$|G^*|/sen \delta_{\text{pós-RTFOT}}$  = parâmetro  $|G^*|/sen \delta$  após envelhecimento de curto prazo (kPa);

$|G^*|/sen \delta_{\text{pré-RTFOT}}$  = parâmetro  $|G^*|/sen \delta$  antes do envelhecimento de curto prazo (kPa).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação (LABPAV) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), utilizando-se um reômetro híbrido da *TA Instruments*, modelo *Discovery HR-2*.

### 3.3.5 Suscetibilidade do Ligante Asfáltico à Deformação Permanente

O ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR – *Multiple Stress Creep Recovery*) foi usado para avaliar a recuperação do ligante (%R) e a compliância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) e, conseqüentemente, a resistência à deformação permanente em altas temperaturas (ANDERSON; D'ANGELO; BUKOWSKI, 2011).

Para o ensaio de MSCR, foram preparadas amostras de 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura (*gap*). Os ensaios foram realizados no ligante asfáltico de referência e modificados em todos os teores investigados, na condição de envelhecimento a curto prazo na estufa RTFOT, em duplicatas, conforme as normas ASTM D 7405 (ASTM, 2020) e AASHTO T 350 (AASHTO, 2019).

O ensaio de MSCR possibilita a obtenção de dois parâmetros principais relacionados à suscetibilidade da matriz asfáltica à deformação permanente: a compliância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) e o percentual de recuperação (%R). O primeiro parâmetro analisa à deformação



permanente sob tensão controlada enquanto o segundo analisa à recuperação do material sob tensão controlada. Ambos os parâmetros foram analisados considerando a tensão de ensaio de 3,2 kPa.

Ainda, de acordo com a AASHTO M 332 (AASHTO, 2022), utilizando-se os valores de compliância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) na tensão de 3,2 kPa obtido nas temperaturas altas do PG, foi possível classificar os ligantes asfálticos de referência e modificados com base no nível de tráfego: padrão (S – *Standard*), pesado (H – *Heavy*), muito pesado (V – *Very Heavy*) e extremamente pesado (E – *Extreme*).

Por fim, as curvas de percentual de recuperação (%R) *versus* compliância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) a 3,2 kPa foram plotadas em conjunto com a curva MSCR obtida pelas normas AASHTO R 92 (AASHTO, 2018) e AASHTO T 350 (AASHTO, 2019) para verificar o efeito do látex no grau de elasticidade da matriz asfáltica.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação (LABPAV) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), utilizando-se um reômetro híbrido da *TA Instruments*, modelo *Discovery HR-2*.

### 3.3.6 Tolerância do Ligante Asfáltico ao Dano por Fadiga

Os ensaios de varredura de amplitude linear (LAS – *Linear Amplitude Sweep*) possibilitaram a determinação da tolerância do material ao dano por fadiga. A execução do ensaio ocorreu em consonância com a norma AASHTO T 391 (AASHTO, 2020)<sup>1</sup>.

Para isso, foram preparadas amostras de 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura (*gap*). Os ensaios foram realizados no ligante asfáltico de referência e modificados em todos os teores estudados, na condição de envelhecimento a curto prazo na estufa RTFOT, em duplicatas, na temperatura de 20 °C. O critério de ruptura adotado correspondeu a redução de 35% do valor de  $|G^*| \sin \delta$ .

Para a interpretação dos resultados do ensaio de LAS, foi utilizada as premissas do princípio do dano contínuo viscoelástico (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage – S-VECD*) e dois procedimentos de cálculo: um conforme a planilha “*Linear Amplitude Sweep Analysis Template (AASHTO TP-101-12-Modified) Version 1.52*” e outro segundo a planilha “*Linear Amplitude Sweep Analysis Template (AASHTO T 391-20) Version 1.57*”, ambas

---

<sup>1</sup> Esta norma foi utilizada para a execução do teste. Entretanto, foi realizada uma adaptação: aplicação de deformação em rampa linear.

planilhas de cálculo desenvolvidas pelo MARC (*Modified Asphalt Research Center at University of Wisconsin – Madison, USA – <https://uwmarc.wisc.edu/>*).

Desta forma, os resultados do ensaio de LAS possibilitaram a determinação dos parâmetros A e B da curva de tolerância ao dano por fadiga. Esta curva permite estimar a ruptura por fadiga do ligante asfáltico, em função da deformação de cisalhamento aplicada, estando representada pela Equação 3.3.

$$N_f = A \times (\gamma)^B \quad (3.3)$$

Sendo:

$N_f$  = número de ciclos até a ruptura;

A e B = parâmetros da curva de fadiga;

$\gamma$  = deformação cisalhante aplicada (%).

Por fim, a partir da curva de fadiga, foi determinado o fator de fadiga do ligante (FFL). O FFL foi calculado a partir da área sob a curva de fadiga entre as deformações de 1,25% e 2,5%, conforme Equação 3.4 (DNIT 439, 2022).

$$\text{FFL} = \frac{\log(N_{f1,25} \times N_{f2,5})}{2} \times \log \frac{0,0250}{0,0125} \quad (3.4)$$

Sendo:

FFL = fator de fadiga do ligante a 20 °C;

Log = logaritmo na base 10;

$N_{f1,25}$  = número de ciclos até a ruptura, calculado pela Equação 3.3, para uma deformação cisalhante de 1,25%;

$N_{f2,5}$  = número de ciclos até a ruptura, calculado pela Equação 3.3, para uma deformação cisalhante de 2,5%.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação (LABPAV) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), utilizando-se um reômetro híbrido da *TA Instruments*, modelo *Discovery HR-2*.

### 3.3.7 Comportamento Reológico em Temperaturas Intermediárias

Os ensaios no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) possibilitaram a obtenção do comportamento reológico em temperaturas intermediárias (módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase).

Para isso, foram preparadas amostras de 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura (*gap*). Os ensaios foram realizados para o ligante asfáltico de referência e para o modificado no teor ótimo de látex (definido na etapa 3 do programa experimental), na condição de envelhecimento a curto prazo na estufa RTFOT, em apenas um corpo de prova.

As varreduras de frequências foram conduzidas em uma faixa exponencial, variando de 0,1 Hz a 30 Hz, nas temperaturas de 35 °C, 30 °C, 25 °C, 20 °C, 15 °C, 10 °C e 5 °C. Para evitar danos nas amostras, foram utilizadas uma amplitude de deformação de 1% para as temperaturas acima de 15 °C e uma amplitude de deformação de 0,1% para as temperaturas de 5 °C e 10 °C.

Por fim, os resultados obtidos possibilitaram a construção de curvas complementares (isotérmicas, isócronas, espaço de Black e plano Cole-Cole) para a verificação dos parâmetros referentes ao módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) e ao ângulo de fase ( $\delta$ ).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação (LABPAV) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), utilizando-se um reômetro híbrido da *TA Instruments*, modelo *Discovery HR-2*.

### 3.3.8 Seleção do Teor Ótimo

A seleção do teor ótimo de látex para a modificação do ligante e, conseqüentemente, da mistura asfáltica foi determinada com base no ensaio de MSCR em resíduos RTFOT.

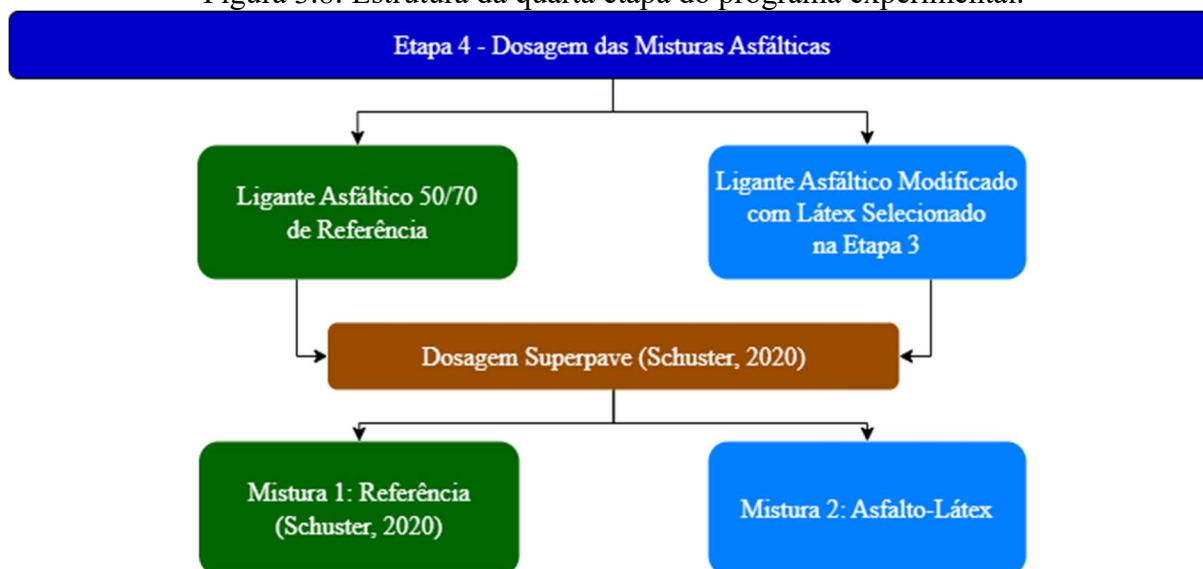
Para isso, foram analisadas as curvas de percentual de recuperação (%R) *versus* a compliância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) a 3,2 kPa em função da porcentagem de látex incorporado, considerando duas temperaturas de ensaio (64 °C e 70 °C). Onde, os pares ordenados ( $J_{nr3,2}$ , %R<sub>3,2</sub>) foram plotados em conjunto com a curva MSCR, que delimita as regiões de alta e baixa elasticidade segundo as normas AASHTO R 92 (AASHTO, 2018) e AASHTO T 350 (AASHTO, 2019).

Nesse contexto, buscou-se o teor ótimo de látex na zona de alta elasticidade para a produção da mistura asfáltica modificada. Finalmente, este critério de seleção é justificado detalhadamente na seção 4.3.8.

### 3.4 ETAPA 4: DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

A etapa 4 consistiu na formulação das misturas asfálticas de referência e modificada com látex (teor obtido na etapa anterior), conforme esquematiza a Figura 3.8.

Figura 3.8: Estrutura da quarta etapa do programa experimental.



#### 3.4.1 Produção das Misturas Asfálticas

A produção das misturas asfálticas seguiu as especificações contidas na normativa AASHTO R 30 (AASHTO, 2002).

A curva granulométrica de agregados que foi utilizada nesta pesquisa faz parte de um estudo desenvolvido pelo Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES)/Petrobras para um trecho experimental localizado entre os quilômetros 409 e 437 da Rodovia BR 101-Sul, em Araranguá/SC.

Esta curva granulométrica foi utilizada por Melo (2014) em sua tese de doutorado intitulada “Desenvolvimento e Estudo do Comportamento Reológico e Desempenho Mecânico de Concretos Asfálticos Modificados com Nanocompósitos” e está em conformidade com os critérios Superpave para um diâmetro nominal máximo de 19,1 mm de agregado.

A composição granulométrica foi formulada a partir da combinação dos agregados, seguindo a proporção de 43% de brita 3/4”, 15,50% de pedriscos e 41,50% de pó de pedra. A curva granulométrica da mistura de agregados está representada na Figura 3.9, estando suas proporções sintetizadas na Tabela 3.2, conforme o percentual de material passante para a série de peneiras ASTM.

Figura 3.9: Curva granulométrica da combinação dos agregados utilizados na pesquisa.

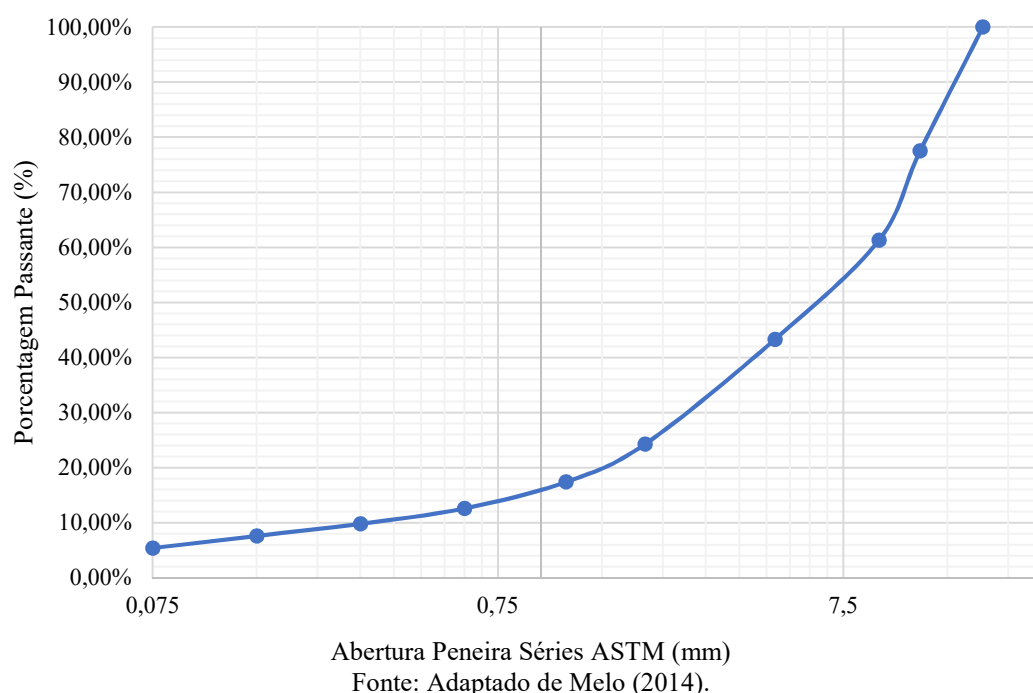


Tabela 3.2: Porcentagens de material passante para a série de peneiras ASTM.

<b>Peneiras Série ASTM</b>	<b>% Passante</b>
3/4"	100,00
1/2"	77,50
3/8"	61,30
Nº 4	43,30
Nº 10	24,30
Nº 16	17,40
Nº 30	12,60
Nº 50	9,80
Nº 100	7,60
Nº 200	5,40

Fonte: Melo (2014).

Para a preparação das misturas, os agregados foram fracionados em peneiras para garantir maior precisão no arranjo granulométrico. Todas as misturas foram preparadas em um misturador mecânico com prévio aquecimento dos materiais em estufa.

### 3.4.2 Considerações Acerca do Processo de Dosagem das Misturas Asfálticas

Destaca-se que, para esta pesquisa, foi adotado o estudo de dosagem de Schuster (2020), desenvolvido em sua dissertação de mestrado intitulada “Avaliação da Contribuição da Lã de Aço Associada ao Nanotubo de Carbono na Reparação de Danos em Misturas Asfálticas

Submetidas ao Aquecimento por Micro-ondas”. Schuster (2020) realizou o processo de dosagem no Laboratório de Pavimentação Professor Armando Martins Pereira (LAMP) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), seguindo a metodologia Superpave, anterior ao Superpave 5.

Ressalta-se que o ligante asfáltico 50/70, os agregados e a granulometria utilizados por Schuster (2020) são iguais aos utilizado pela presente pesquisa, possibilitando, assim, o aproveitamento dos dados (teor ótimo de ligante asfáltico).

Neste sentido, a dosagem da mistura asfáltica realizada por Schuster (2020) obedeceu às especificações contidas nas normativas da AASHTO M 323 (AASHTO, 2013) e AASHTO R 35 (AASHTO, 2012), onde os corpos de prova foram moldados no compactador giratório Superpave com diâmetro de 150 mm e altura de 115 mm ( $\pm 10$  mm), fixando-se os seguintes parâmetros: ângulo de compactação de  $1,25^\circ$ , pressão de compactação de 0,6 MPa e velocidade de giro de 30 RPM. Para o processo, foram adotados  $N_{inicial}$  de 9 giros,  $N_{projeto}$  de 125 giros e  $N_{máximo}$  de 205 giros, considerando um alto volume de tráfego. Onde, como resultado, foi obtido um teor ótimo de ligante asfáltico para o arranjo granulométrico de 4,65%, resultando nos parâmetros volumétricos apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Parâmetros volumétricos da mistura asfáltica de referência, considerando o teor de ligante de projeto igual a 4,65%.

<b>Requisitos</b>	<b>Limites Superpave</b>	<b>Resultado da Dosagem</b>
Volume de vazios (%)	4	4,02
Relação betume-vazios (%)	65 – 75	70,32
Vazios do agregado mineral (%)	$\geq 13$	13,56
$G_{mb}$ (g/cm <sup>3</sup> )	-	2,381
% $G_{mm}$ @ $N_{projeto}$	= 96	95,98

Fonte: Schuster (2020).

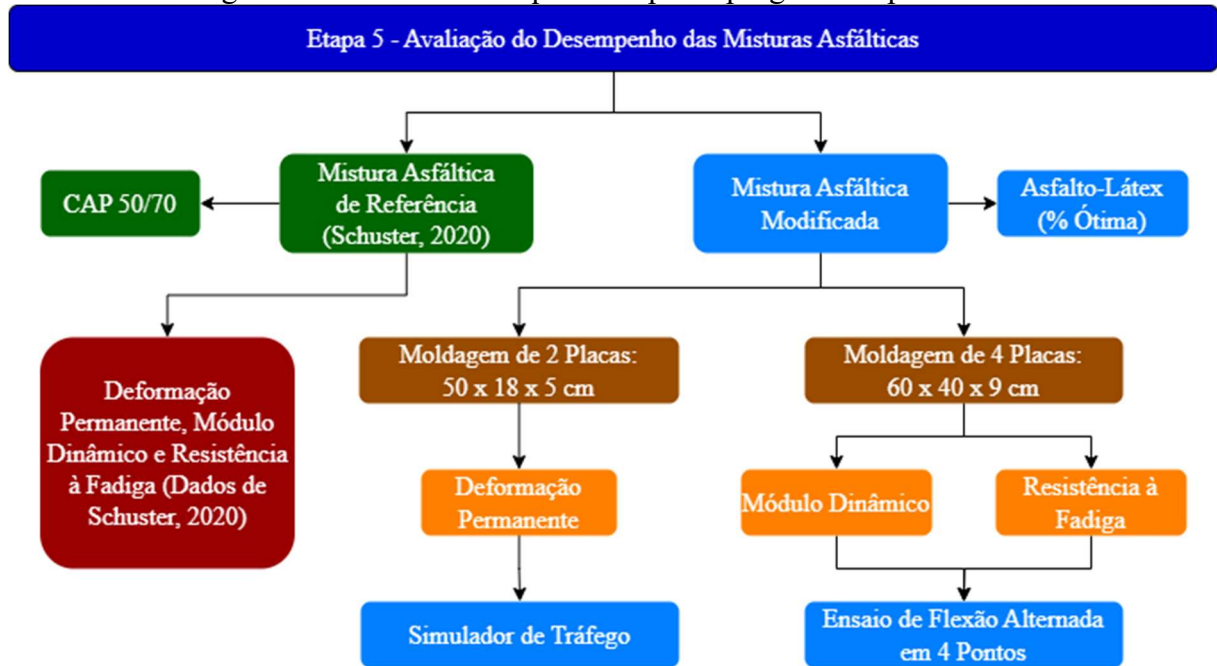
Por fim, para esta pesquisa, o teor de 4,65% foi selecionado como teor de projeto tanto para a produção da mistura asfáltica de referência quanto para a mistura asfáltica modificada com látex (teor ótimo de látex determinado na etapa 3).

A produção da mistura asfáltica modificada com látex foi realizada no Laboratório de Pavimentação (LABPAV) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), sendo adotada, em função da viscosidade aparente, a temperatura de usinagem do ligante asfáltico e do agregado, respectivamente, de 165 °C e 175 °C, e a temperatura de compactação da mistura igual a 150 °C.

### 3.5 ETAPA 5: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Esta fase consistiu em investigar o desempenho das misturas formuladas na etapa 4 quanto à suscetibilidade à deformação permanente, comportamento reológico e à resistência à fadiga. O resumo das atividades para a realização dos ensaios está demonstrado na Figura 3.10.

Figura 3.10: Estrutura da quinta etapa do programa experimental.



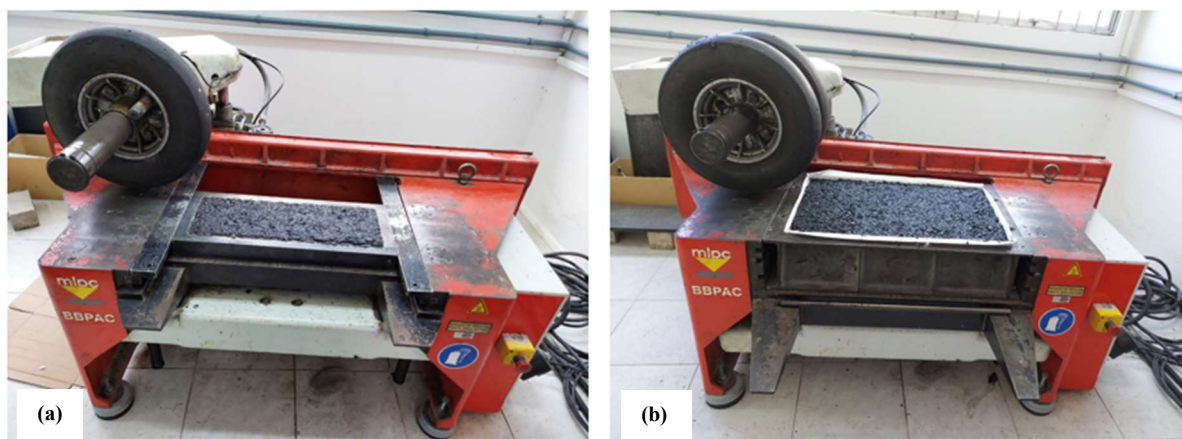
Para a mistura asfáltica de referência, foram utilizados os resultados de deformação permanente, módulo dinâmico e resistência à fadiga obtidos por Schuster (2020), visto a utilização do mesmo ligante asfáltico 50/70, agregados e granulometria.

Em relação à mistura asfáltica modificada com látex (teor ótimo de incorporação), foram moldadas placas utilizando a mesa compactadora *Université Gustave Eiffel* (UGE), conforme normativa AFNOR NF EN 12697-33 (AFNOR, 2022). Este equipamento teve o intuito de simular em laboratório o processo de compactação da mistura asfáltica em campo. A etapa de compactação das placas foi realizada no Laboratório de Pavimentação (LABPAV) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Logo, para a deformação permanente, foram moldadas placas de 18 cm de largura por 50 cm de comprimento e 5 cm de altura, totalizando 2 placas; para o módulo dinâmico e para a fadiga, foram moldadas placas de 40 cm de largura por 60 cm de comprimento e 9 cm de altura, totalizando 4 placas.

A Figura 3.11 apresenta: (a) placa de mistura asfáltica para o ensaio da deformação permanente e (b) placa para o ensaio de módulo dinâmico e de fadiga, após o processo de compactação utilizando-se a mesa compactadora e considerando as dimensões citadas anteriormente.

Figura 3.11: Placas de mistura asfáltica para (a) ensaio da deformação permanente e (b) para o ensaio de módulo dinâmico e fadiga.



### 3.5.1 Desempenho à Deformação Permanente das Misturas Asfálticas

A análise do desempenho das misturas asfálticas de referência e modificada com látex, quanto à formação de trilha de roda, foi realizada segundo a norma AFNOR NF EN 12697-22 (AFNOR, 2020). O procedimento de ensaio foi realizado no Laboratório de Pavimentação (LABPAV) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

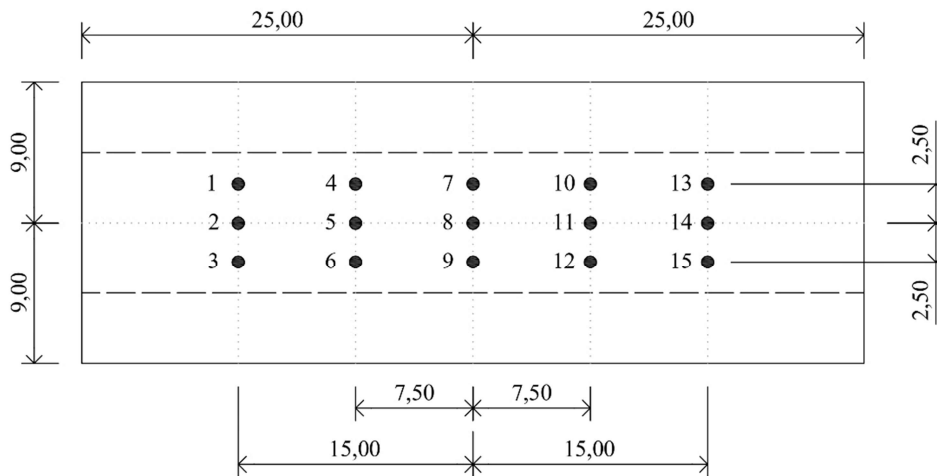
Previamente ao ensaio, as placas de mistura asfáltica modificada foram submetidas a 1.000 ciclos, sob temperatura entre 15 °C a 25 °C, para acomodar a placa no molde do equipamento. Na sequência, as placas foram acondicionadas a 60 °C por 12 horas antes do início do ensaio.

O ensaio foi realizado pelo equipamento de deformação permanente francês *Orniéreur*, sendo feitas leituras em pontos pré-definidos da superfície da placa antes do início do carregamento. Este procedimento serviu como parâmetro para verificar o desenvolvimento das trilhas de roda.

As medidas das deformações foram feitas em 15 pontos distintos (P1 a P15) da placa, sendo realizadas após 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos, conforme ilustra a Figura 3.12.



Figura 3.12: Pontos de leitura de deformações na placa de mistura asfáltica (cotas em cm).



Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Para os pontos P1 a P15, foi calculada a profundidade da deformação permanente para cada ciclo de interesse, conforme a Equação 3.5.

$$P_i = 100 \times \frac{\sum_j (m_{ij} - m_{0j})}{15 \times ES} \quad (3.5)$$

Sendo:

$P_i$  = porcentagem média de afundamento na superfície da placa no ciclo  $i$  (%);

$j$  = ponto no qual é realizada a leitura da deformação permanente (pontos P1 a P15);

$m_{ij}$  = medida da profundidade no ponto  $j$ , no ciclo  $i$ ;

$m_{0j}$  = medida da profundidade no ponto  $j$ , no ciclo  $0$ ;

$ES$  = espessura da placa.

Os valores da porcentagem média de afundamento na superfície da placa no ciclo ( $P_i$ ) foram plotados em uma curva, em escala logarítmica, da evolução da profundidade de afundamento *versus* o número de ciclos. Estes dados foram comparados com os resultados exibidos pela pesquisa de Schuster (2020) para a mistura asfáltica de referência.

Por fim, com base na Tabela 3.4, considerando os resultados do afundamento de trilha de roda ao final de 30.000 ciclos de carregamento, foi realizada a classificação das misturas asfálticas conforme três classes de desempenho estabelecidas pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC, 2007) para misturas asfálticas do tipo EB14-BBSG (*Béton Bitumineux Semi-Grenus*). Ressalta-se, que a composição granulométrica utilizada nesta pesquisa é semelhante àquelas utilizadas na formulação das matrizes do tipo EB14-BBSG.

Tabela 3.4: Classes de mistura asfáltica em função do afundamento de trilha de roda.

Classe de Mistura Asfáltica	Nº de Ciclos	Afundamento de Trilha de Roda (%)	
		Limite Inferior	Limite Superior
Classe 1	30.000	7,5	10,0
Classe 2		5,0	7,5
Classe 3		-	5,0

Fonte: LCPC (2007).

Segundo pesquisado por Barra *et al.* (2010) e por Andrade (2018), as misturas de classe 1 são destinadas à aplicação em regiões com temperatura ambiente em torno de 15 °C e com menores solicitações de tráfego; as misturas de classe 2 são aplicadas em regiões com maiores amplitudes térmicas (temperatura variando entre 5 °C e 30 °C); as misturas de classe 3 são aplicadas em regiões com temperaturas elevadas e com maiores solicitações de tráfego.

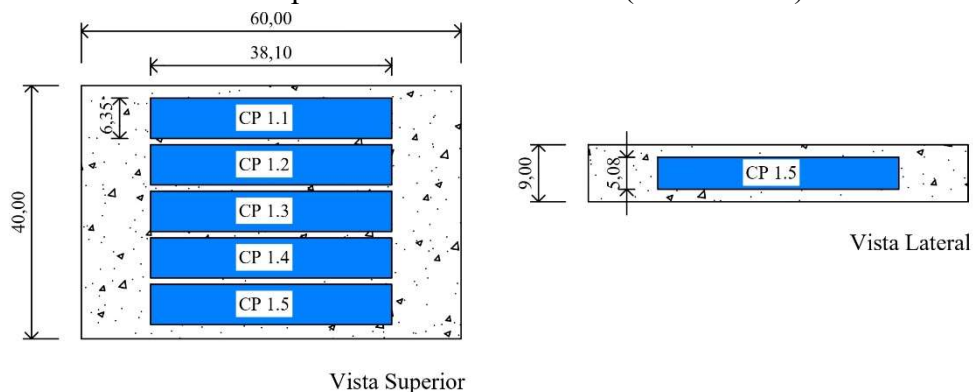
### 3.5.2 Comportamento Reológico e Desempenho à Fadiga das Misturas Asfálticas

Nesta etapa, após o processo de moldagem das placas de mistura asfáltica modificada com látex, nas dimensões de 60 x 40 x 9 cm, foram extraídos, com o auxílio de uma serra circular, 5 corpos de prova prismáticos, de dimensões de 5,08 x 6,35 x 38,1 cm, por placa.

A Figura 3.13 apresenta o plano de corte dos corpos de prova prismáticos sobre cada placa de mistura asfáltica, obtendo-se ao final deste processo 20 corpos de prova prismáticos, conforme Figura 3.14, para serem utilizados nos ensaios subsequentes.

O corte das placas de mistura asfáltica modificada com látex foi realizado no Laboratório de Desenvolvimento e Tecnologia em Pavimentação (LDTPav), no *campus* de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Figura 3.13: Plano de corte contendo a vista superior e lateral dos corpos de prova prismáticos sobre a placa de mistura asfáltica (cotas em cm).



Vista Superior

Vista Lateral

Fonte: Adaptado de Melo (2014).

Figura 3.14: Corpos de prova prismáticos de mistura modificada com látex para os ensaios de módulo dinâmico e desempenho à fadiga.



Na sequência, com a obtenção dos corpos de prova, os ensaios de módulo dinâmico e desempenho à fadiga foram realizados, respectivamente, conforme as partes 26 e 24 da norma EN 12697 (EN, 2004), utilizando-se o equipamento australiano “*Pneumatic 4 Point Bending Apparatus*”, ou fadiga a 4 pontos, fabricado pela empresa IPC Global®. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentação (LABPAV) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Para esta pesquisa, foram adotados parâmetros similares aos utilizados por Melo (2014) para a determinação do módulo dinâmico e da resistência à fadiga da mistura asfáltica modificada, conforme a Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Condições de ensaio de módulo dinâmico e fadiga.

<b>Módulo Dinâmico</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Condição de Ensaio</b>
Tipo de carregamento	Sinusoidal contínuo
Deformação	Controlada (50 $\mu\text{m}/\text{m}$ )
Varredura de temperaturas	0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C e 30 °C
Varredura de frequências	0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz
<b>Fadiga</b>	
<b>Parâmetro</b>	<b>Condição de Ensaio</b>
Deformação	Controlada
Critério de ruptura	50% do valor de $ E^* $ inicial (lido no 100º ciclo)
Temperatura de ensaio	20 °C
Frequência de ensaio	10 Hz
Níveis de deformação pretendidos	* Entre 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ e 190 $\mu\text{m}/\text{m}$

Fonte: Melo (2014); \* Autor (2023).

A partir dos ensaios de caracterização reológica do material asfáltico foi possível obter e analisar as curvas de representação do módulo dinâmico e ângulo de fase: isócronas, isotérmicas, espaço de Black e plano Cole-Cole.

Para o ensaio de resistência à fadiga, como resposta, foi obtida uma equação característica da fadiga do material, de acordo com a Equação 3.6.

$$N = a \times \varepsilon^b \quad (3.6)$$

Sendo:

$N$  = nº de aplicações da sollicitação até a redução de 50% do módulo dinâmico inicial;

$\varepsilon$  = deformação específica de tração (microdeformação);

$a$  e  $b$  = constantes.

Estes dados foram comparados com os resultados apresentados pela pesquisa de Schuster (2020) para a mistura asfáltica de referência.

Por fim, como parâmetro adicional para avaliar o desempenho das misturas asfálticas de referência e modificada, foi determinado o fator de fadiga da mistura (FFM). O FFM foi calculado a partir da área sob a curva de fadiga no intervalo de deformações entre 50  $\mu$  e 150  $\mu$ , conforme Equação 3.7.

$$FFM = 0,2 [\log(N_{50}) + \log(N_{150})] \quad (3.7)$$

Sendo:

FFM = fator de fadiga da mistura;

Log = logaritmo na base 10;

$N_{50}$  = nº de carga para a deformação específica de 50  $\mu$ , calculado pela Equação 3.6;

$N_{150}$  = nº de carga para a deformação específica de 150  $\mu$ , calculado pela Equação 3.6.

O valor do fator de fadiga da mistura (FFM) foi comparado com o fator de fadiga do ligante (FFL), calculado no item 3.3.6 desta seção, para verificar a influência do látex no ligante asfáltico e, conseqüentemente, na mistura asfáltica quanto ao desempenho à fadiga.

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A partir do programa experimental proposto no capítulo 3, são demonstrados e discutidos os resultados obtidos em cada etapa da pesquisa.

### 4.1 ETAPA 1: CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A etapa 1 objetivou caracterizar os agregados, o ligante asfáltico 50/70 e os fragmentos das luvas de látex utilizados na presente pesquisa, conforme os resultados que seguem.

#### 4.1.1 Agregados

Os agregados utilizados ao longo deste trabalho possuem origem granítica (granito cinza) e foram fornecidos pela empresa Sul Brasileira de Mineração (SBM), localizada na cidade de Paulo Lopes/SC.

Estes agregados são do mesmo local dos utilizados por Schuster (2020) em sua pesquisa, o que permite considerar os mesmos resultados da sua caracterização, os quais estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Caracterização dos agregados minerais.

Ensaio	Método de Ensaio	Limites <sup>1</sup>	Resultado
Abrasão Los Angeles	ASTM C 131	35-45% máx.	18,64%
Absorção de agregado graúdo	ASTM C 127	-	1,43%
Adesividade de agregado graúdo a ligante betuminoso	DNER ME 078	-	0,40% “dope”
Angularidade do agregado graúdo	ASTM D 5821	100%/100%	100%
Angularidade do agregado miúdo	ASTM C 1252	45% min.	52,36%
Equivalente de areia	AASHTO T 176	50% min.	71,95%
Índice de forma	ABNT NBR 6954	-	Cúbica
Massa específica aparente do agregado graúdo	ASTM C 127	-	2,592 g/cm <sup>3</sup>
Massa específica real do agregado graúdo	ASTM C 127	-	2,648 g/cm <sup>3</sup>
Massa específica real do agregado miúdo	DNER ME 084	-	2,674 g/cm <sup>3</sup>
Massa específica real do material pulverulento	DNER ME 085	-	2,803 g/cm <sup>3</sup>
Materiais deletérios	AASHTO T 112	0,2-10% máx.	0,00%
Sanidade	ASTM C 88	10-20% máx.	1,59%

<sup>1</sup> Os limites apresentados aplicam-se a materiais utilizados em camada de rolamento.

Fonte: Adaptado de Schuster (2020).

#### 4.1.2 Ligante Asfáltico 50/70

A caracterização das propriedades empíricas do ligante asfáltico 50/70 foi realizada pela refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR)/Petrobras, localizada na cidade de Araucária/PR, estando os resultados exibidos na Tabela 4.2 a seguir.

Tabela 4.2: Caracterização do ligante asfáltico 50/70.

Ensaio	Norma	Limites	Resultado
Densidade	ASTM D 70	-	1,004
Ponto de amolecimento	ASTM D 36	46 °C mín.	48,2 °C
Penetração – 100 g, 5 s, 25 °C	ASTM D 5	50-70 (10 <sup>-1</sup> mm)	58 (10 <sup>-1</sup> mm)
Viscosidade aparente <i>Brookfield</i> a 135 °C, <i>spindle</i> 21, 20 RPM a 150 °C, <i>spindle</i> 21, 50 RPM a 177 °C, <i>spindle</i> 21, 100 RPM	ASTM D 4402	274 cP mín. 112 cP mín. 57-285 cP	293 cP 151 cP 59 cP
Índice de suscetibilidade térmica	DNIT 095	-1,5 a 0,7	-1,3
<b>RTFOT</b>			
Penetração retida	ASTM D 5	55% mín.	63%
Aumento do ponto de amolecimento	ASTM D 36	8 °C máx.	3,6 °C
Ductilidade a 25 °C	ASTM D 113	20 cm	>100 cm
Variação em porcentagem de massa	ASTM D 2872	-0,5% a 0,5%	-0,257%
Ponto de fulgor	ASTM D 92	235 °C mín.	280 °C
Solubilidade em tricloroetileno	ASTM D 2042	99,5% mín.	99,9%

Fonte: Adaptado de REPAR (2017).

#### 4.1.3 Luvas de Látex

As luvas de látex que foram utilizadas pela pesquisa são da marca *Descarpack – Efficiency in Disposables* e possuem a espessura de aproximadamente 1,5 mm. Conforme ficha técnica disponibilizada pela fabricante, as luvas de látex possuem a composição apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Composição das luvas de látex.

Luva de Látex	Composição
Estrutura	100% borracha de látex natural
Superfície	Pó bioabsorvível de amido de milho

Fonte: Adaptado de *Descarpack* (2021).

Segundo Rippel (2005), a composição química média do látex de borracha natural é apresentada na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Composição química média do látex de borracha natural.

<b>Constituinte</b>	<b>% em Massa no Látex</b>
Borracha	25,0-45,0
Água	49,0-71,0
Proteína	1,00-1,80
Carboidratos	1,00-2,00
Aminoácidos, aminas, etc.	0,40-0,60
Inorgânicos	0,40-0,60
Lipídeos neutros	0,40-1,10
Lipídeos polares	0,50-0,60

Fonte: Rippel (2005).

As luvas de látex possuem em sua superfície pó bioabsorvível de amido de milho modificado, com grau de pureza igual a 99,9%, classificado com grau USP (*United States Pharmacopeia* – Farmacopeia dos Estados Unidos). Este pó tem como função facilitar o processo de colocação e retirada da luva de látex durante o seu manuseio.

Conforme Weber, Collares-Queiroz e Chang (2009), o amido de milho é um pó branco, fino, sem sabor e odor, com 1,5 g/cm<sup>3</sup> de densidade, com grânulos angulares ou arredondados com tamanho de 5 µm a 25 µm. Quanto à composição química, o amido é um polímero vegetal composto por 25% a 28% de amilose e 70% a 80% de amilopectina, além de fosfatos, proteínas e lipídeos em porcentagens menores. A Tabela 4.5 apresenta a composição química média do amido de milho, segundo documentado por pesquisas específicas sobre o assunto.

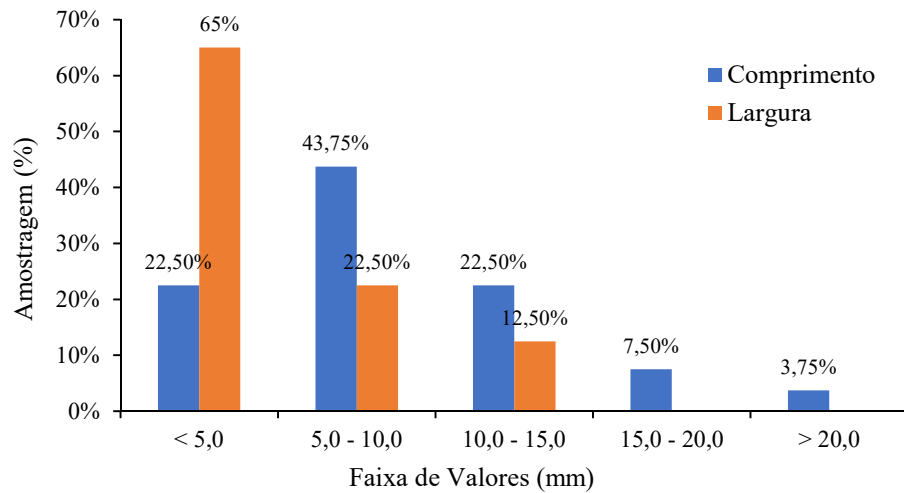
Tabela 4.5: Composição química média do pó bioabsorvível de amido de milho.

<b>Constituinte</b>	<b>% em Massa no Amido de Milho</b>
Amilose	25,0-28,0
Amilopectina	70,0-80,0
Fosfatos	0,02-0,05
Proteínas	0,04-0,35
Lipídeos	0,05-0,19

Fonte: Adaptado de Jobling (2004) e Weber, Collares-Queiroz e Chang (2009).

Conforme procedimento descrito no capítulo 3, as luvas de látex foram lavadas, secas e cortadas manualmente, com o auxílio de uma tesoura, buscando manter um padrão nos pedaços picotados. Com o auxílio do *software* de edição de imagens GIMP®, analisou-se estatisticamente o comprimento e a largura das luvas picotadas de uma amostra aleatoriamente selecionada, formada por 400 fragmentos, estando o espaço amostral exibido na Figura 4.1.

Figura 4.1: Espaço amostral do comprimento e da largura das luvas de látex picotadas.

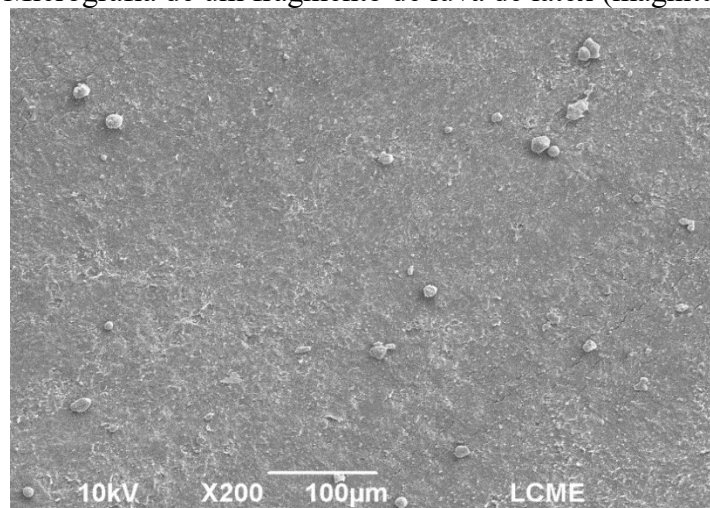


Conforme a Figura 4.1, percebe-se que o comprimento predominante dos fragmentos de luvas de látex está na faixa de 5 mm a 10 mm (43,75%). Na amostra analisada, a faixa de luvas picotadas com comprimento de 10 mm a 15 mm e a faixa inferior a 5 mm representam cada uma 22,50% do total da amostra. Já a faixa de 15 mm a 20 mm corresponde a 7,50%. Os pedaços maiores que 20 mm de comprimento correspondem a 3,75% do material analisado.

Ainda, de acordo com o gráfico apresentado na Figura 4.1, verifica-se que a largura predominante dos fragmentos de luvas de látex está na faixa inferior a 5 mm, representando 65% do total da amostra. A faixa de luvas picotadas com largura de 5 mm a 10 mm e a faixa de 10 mm a 15 mm correspondem, respectivamente, a 22,50% e 12,50% do material analisado. Não foram observados pedaços maiores que 15 mm de largura na pesquisa.

A Figura 4.2 apresenta uma micrografia feita para um fragmento de luva de látex obtido após o processo de lavagem e corte do material.

Figura 4.2: Micrografia de um fragmento de luva de látex (magnitude de 200x).





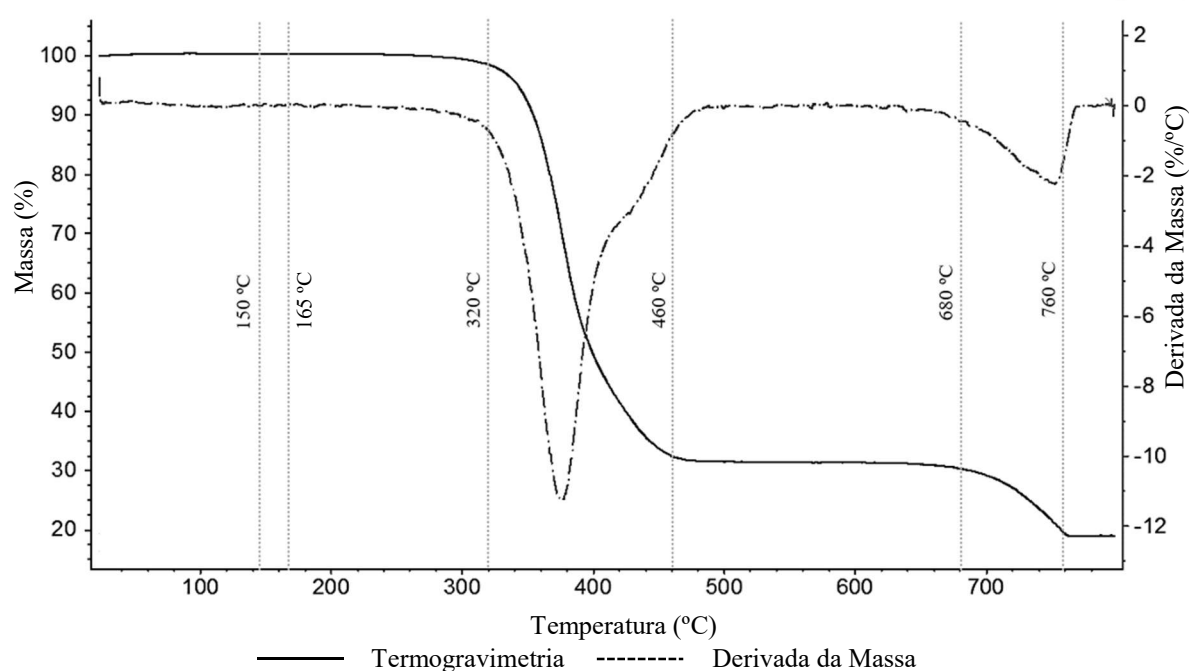
A micrografia apresentada na Figura 4.2 indica uma estrutura com superfície uniforme e rugosa. É possível observar aglomerados espalhados ao longo da amostra, que podem ser decorrentes de resíduos do pó bioabsorvível de amido de milho presente na superfície do material.

Nos tópicos a seguir, para uma amostra contendo fragmentos de luvas de látex obtidos após o processo de lavagem, são apresentados os resultados da análise termogravimétrica (TGA) e derivada da massa (DTG), bem como os resultados dos ensaios de difratometria de raios X (DRX) e espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

#### 4.1.3.1 Análises Térmicas

A Figura 4.3 apresenta os resultados da análise termogravimétrica (TGA) e da derivada da massa (DTG) de uma amostra de fragmentos de luva de látex em função do aumento da temperatura.

Figura 4.3: Análise TGA/DTG da amostra de fragmentos de luva de látex em função da temperatura.



De acordo com a Figura 4.3, a redução de massa do material ocorre em duas etapas. Até 320 °C, não há alteração significativa e, portanto, não há perda de massa substancial, ficando a amostra bastante estável. Conforme observado por Varkey, Augustine e Thomas

(2010), o látex é capaz de suportar longos períodos de exposição a temperaturas elevadas sem sofrer perda significativa de suas moléculas.

A perda da primeira etapa ocorre na região de temperatura de 320 °C a 460 °C e a perda de massa é de 69%. Em seguida, entre 460 °C a 680 °C, não são observados picos significativos relacionados à variação de massa, onde, para essa faixa de temperatura, a amostra volta a apresentar estabilidade. A redução da segunda etapa começa em 680 °C e termina em 760 °C e o percentual de perda de massa nessa região é de 13,5%. Na curva de derivada da massa, são observados picos a 377 °C e a 755 °C.

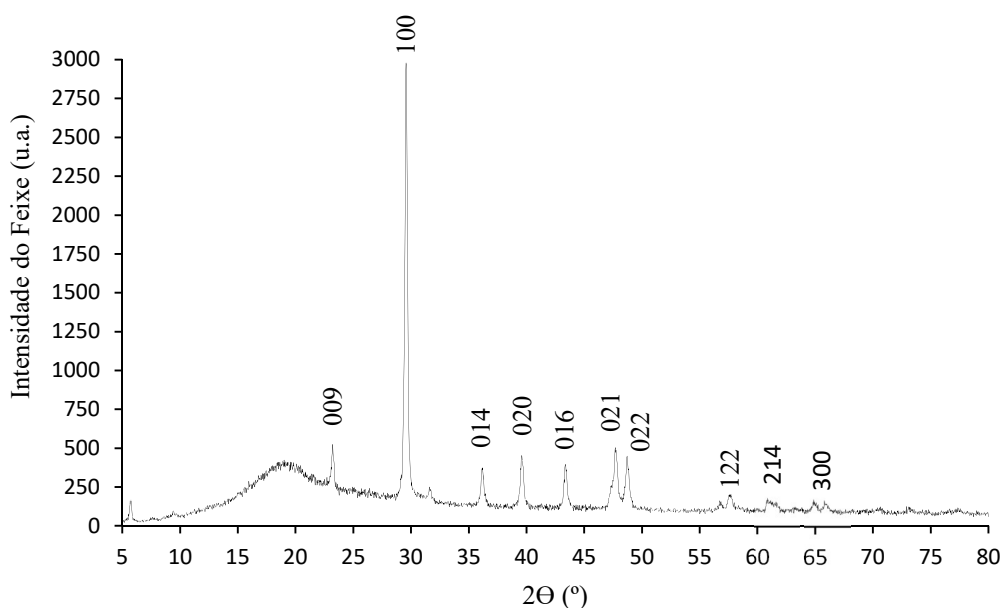
Não houve alteração na massa para a faixa de temperatura correspondente a temperaturas de incorporação dos fragmentos de luvas de látex no ligante asfáltico (150 °C a 160 °C), compactação (150 °C) e usinagem da mistura asfáltica (165 °C).

Em suma, o material demonstra um comportamento térmico estável na faixa de temperatura de interesse para pavimentação, apresentando-se resistente à degradação térmica.

#### 4.1.3.2 Difratomia de Raios X (DRX)

A técnica de difratometria de raios X foi utilizada com objetivo de caracterizar o grau de cristalinidade e amorfismo do látex proveniente de fragmentos de luvas comerciais. A Figura 4.4 apresenta o espectro de raios X através da curva intensidade do feixe *versus*  $2\theta$ .

Figura 4.4: Difrátograma de raios X do látex proveniente de fragmentos de luvas comerciais.



O difratograma da Figura 4.4 mostra picos de alta intensidade e bem definidos, pertencentes à fase cristalina do material. Todos os picos são característicos da fase calcítica do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), como encontrado também por AMIR *et al.* (2015). O espectro está em conformidade com o padrão disponibilizado pelo Centro Internacional para Dados de Difração (ICCD – *International Centre for Diffraction Data*), sob o nº 05-0586 (ICDD, 2023).

Conforme documentado por Dall’Antonia (2003), o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) é um aditivo mineral, inserido durante a fabricação do látex com intuito de atribuir propriedades específicas ao látex como a obtenção de produtos com aparência mais clara, aumento da dureza do material e redução de custos de produção.

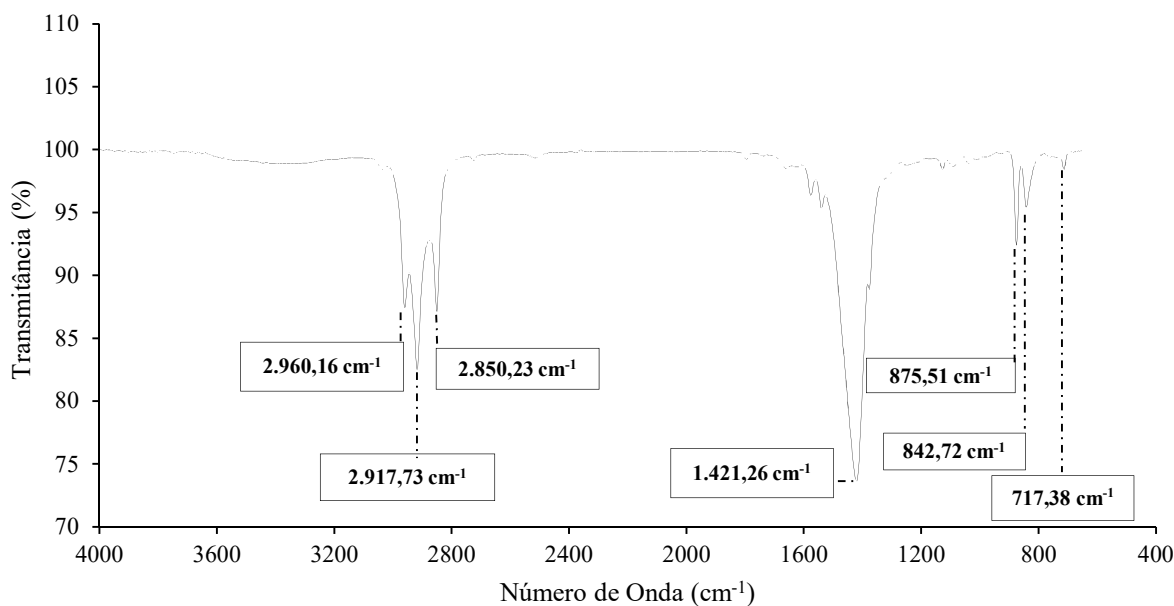
A estrutura cristalina verificada na amostra de látex possui forma trigonal-hexagonal escalenoédrica, conforme pesquisado por Cosmo (2013) para a calcita.

Pesquisas como a de Agostini (2009) apontam a presença de metais como o zinco e rubídio nas amostras de látex de borracha natural, enquanto que as concentrações de manganês, ferro, níquel, cobre e bromo são muito baixas. Porém, através das técnicas aplicadas na presente pesquisa, tais elementos não foram encontrados.

#### 4.1.3.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 4.5 apresenta os espectros de FTIR obtidos para a amostra de fragmentos de luva de látex através da curva transmitância *versus* número de onda.

Figura 4.5: Espectros na região de infravermelho para a amostra de fragmentos de luva de látex.



Analisando os espectros da Figura 4.5, nota-se três regiões distintas contendo vários picos. A primeira região compreende a posição da banda entre os picos  $717,38\text{ cm}^{-1}$  e  $875,51\text{ cm}^{-1}$ , correspondente a cadeia C=C (ligação de alcenos do tipo *cis*), comumente encontrado em materiais de alongamento.

A segunda região apresenta o pico de  $1.421,26\text{ cm}^{-1}$  e é característico do grupo funcional amida. A terceira região compreende a posição da banda entre os picos de  $2.850,23\text{ cm}^{-1}$  e  $2.960,16\text{ cm}^{-1}$ , correspondente a cadeia alifática dos grupos C-H encontrada na amostra ( $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$ ). Resultados semelhantes também foram observados nas amostras ensaiadas por Masson, Pelletier e Collins (2001), Rippel (2005), Agostini (2009), Teixeira (2018) e Kamal, Hadithon e Bakar (2020).

## 4.2 ETAPA 2: PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO ASFALTO-LÁTEX

As amostras de asfalto-látex foram preparadas a partir da incorporação de fragmentos de luva de látex no ligante asfáltico 50/70 nos teores de 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 15% em relação ao peso do ligante, totalizando 7 amostras produzidas. O ligante asfáltico 50/70 sem adição de material foi considerado como referência.

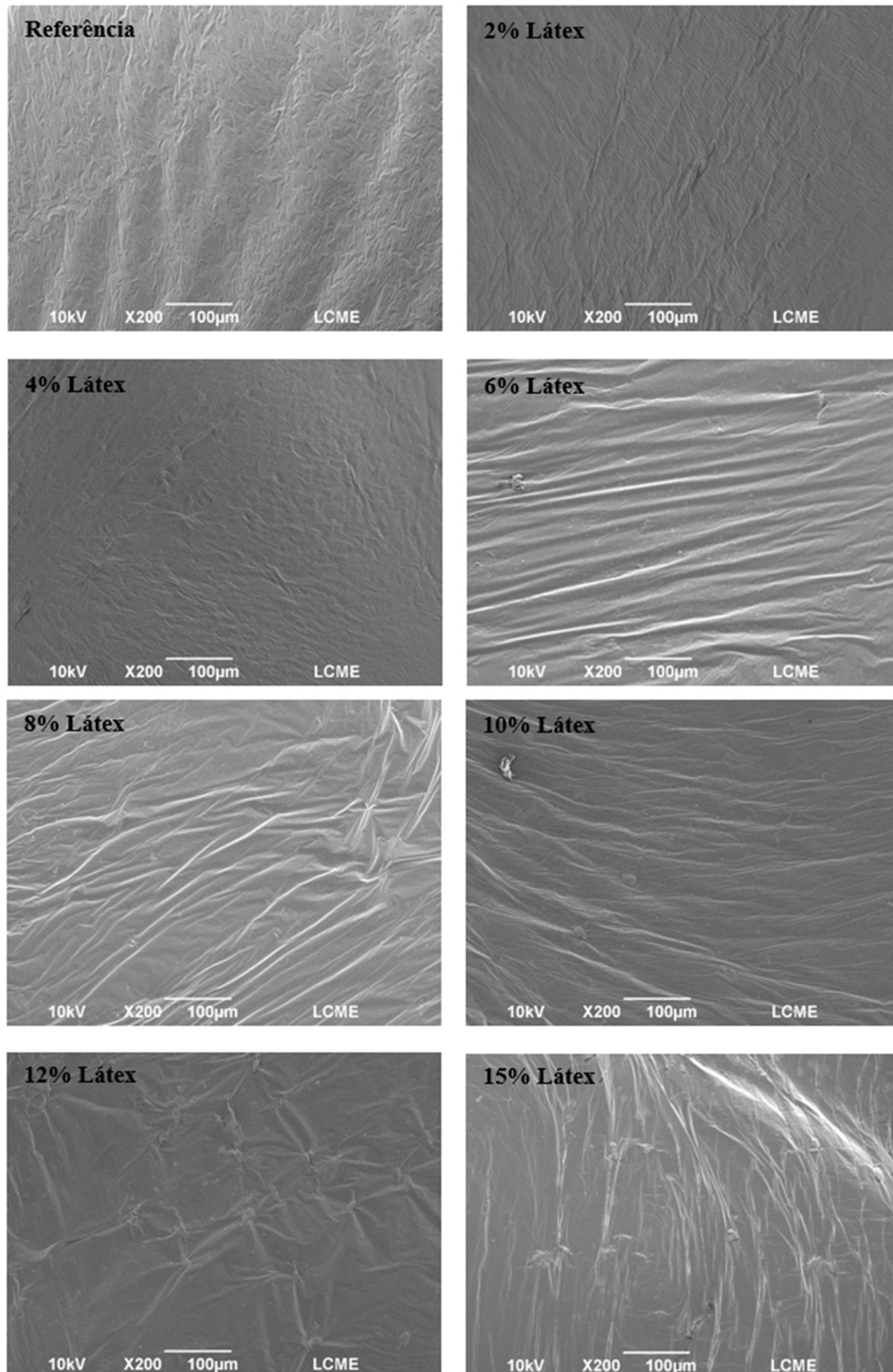
### 4.2.1 Caracterização dos Asfaltos-Látex Produzidos

Após a incorporação dos fragmentos de luva de látex no ligante nas proporções citadas, as matrizes modificadas foram caracterizadas em função da sua morfologia, estrutura polimérica e composição química. Nos tópicos a seguir, são apresentados os resultados para os ensaios de microscopia eletrônica de varredura (MEV), difratometria de raios X (DRX), espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e micrografia de fluorescência.

#### 4.2.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi utilizada para avaliar os aspectos de forma, textura e característica superficial do material estudado, considerando a ampliação de 200 vezes no microscópio. Os resultados de micrografia de varredura do ligante asfáltico de referência e dos ligantes modificados com diferentes teores de látex estão demonstrados na Figura 4.6.

Figura 4.6: Micrografia de varredura do ligante asfáltico de referência e dos ligantes modificados com diferentes teores de látex (magnitude de 200x).



A Figura 4.6 aponta mudanças na microestrutura após a incorporação do látex no ligante asfáltico. Tomando-se como referência a micrografia apresentada para o ligante 50/70, percebe-se que, para os teores de 2% e 4% de látex, a superfície está relativamente uniforme e

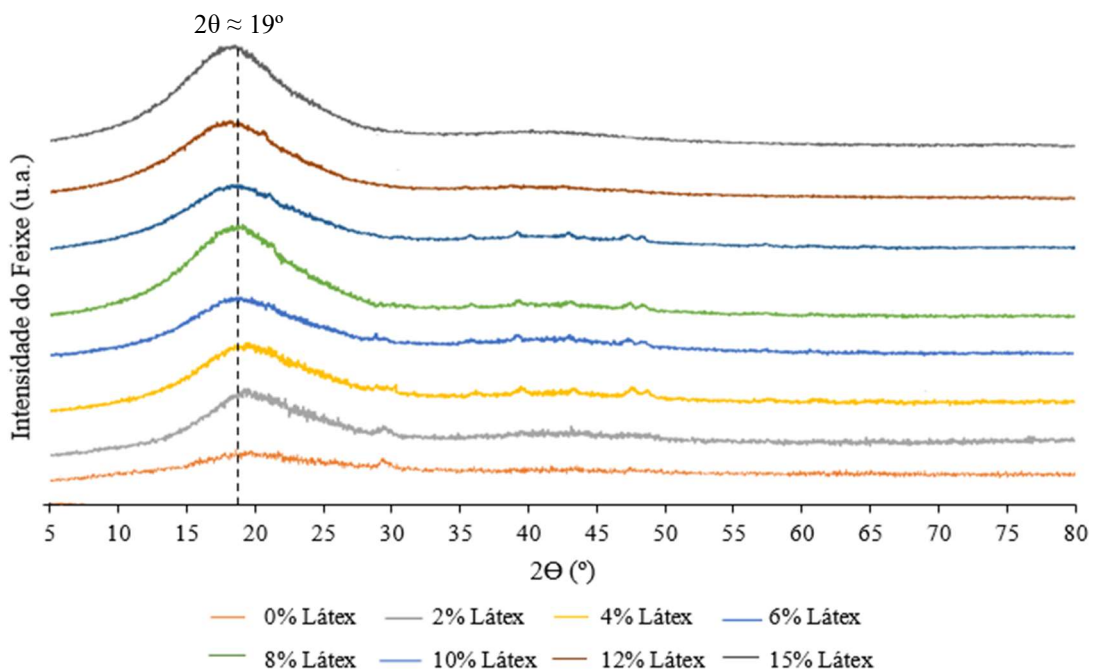
levemente rugosa. À medida que o teor de látex incorporado ao ligante vai aumentando, a superfície mostra-se irregular e com ranhuras, formando extensas estruturas em rede que podem contribuir favoravelmente para o desempenho da matriz asfáltica. Resultados similares estão documentados na literatura por Wen *et al.* (2017).

A partir do teor de 6% de látex, é possível observar pequenos grânulos não dissolvidos no processo de incorporação, que podem ser decorrentes de carboidratos, proteínas, lipídeos e outras impurezas contidas no látex (GAVARI, 2012). Estas partículas são pequenas, com tamanho menor que 50  $\mu\text{m}$ , e estão distribuídas ao longo da matriz asfáltica. Resultados semelhantes foram observados por Jitsangiam *et al.* (2021).

#### 4.2.1.2 Difratomia de Raios X (DRX)

A Figura 4.7 exibe os resultados da técnica de difratometria de raios X (DRX) para o ligante asfáltico de referência e modificados com diferentes teores de látex.

Figura 4.7: Difratograma de raios X dos ligantes asfálticos de referência e modificados com diferentes teores de látex, através da curva intensidade do feixe *versus*  $2\theta$ .



O difratograma da Figura 4.7 ilustra que o ligante asfáltico 50/70 possui estrutura amorfa, sem nenhum pico bem definido. Para todos os ligantes modificados, observa-se a  $2\theta \approx 19^\circ$  uma região alongada oriunda da incorporação do látex no ligante asfáltico. Nota-se

que a intensidade desta região apresenta tendência de crescimento à medida que o teor de látex aumenta. Outros autores como Mina e Haque (2004), Johns e Rao (2008), Abraham *et al.* (2012) e Jitsangiam *et al.* (2021) observaram o mesmo padrão de comportamento em suas amostras investigadas.

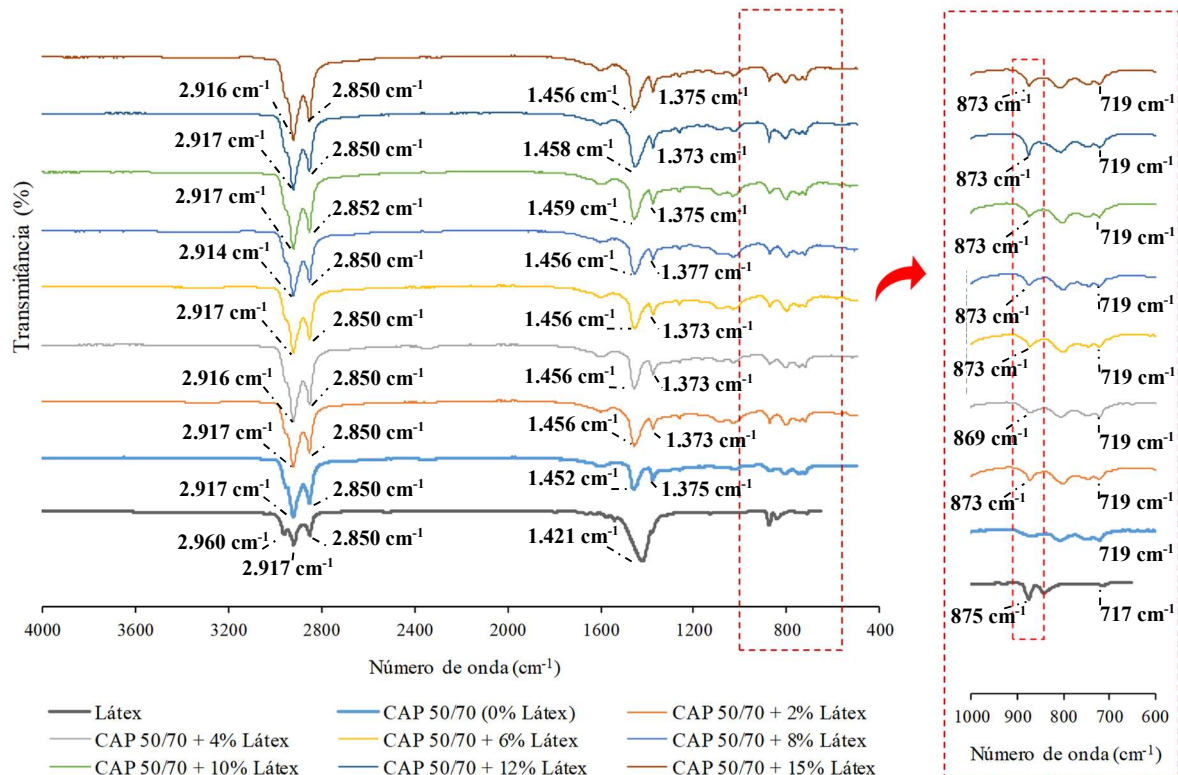
Por fim, os picos característicos da fase calcítica de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) ocorrem em menores intensidades e estão concentrados na faixa entre  $2\theta \approx 30^\circ$  a  $2\theta \approx 50^\circ$ , conforme também observado por Amir *et al.* (2015).

Em suma, a adição de látex no ligante asfáltico, em teores de até 15% em peso, não providenciam grau de cristalinidade significativo na matriz final, prevalecendo o amorfismo da matriz original.

#### 4.2.1.3 Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de FTIR obtidos para os ligantes asfálticos de referência e modificados com diferentes teores de látex estão representados pela Figura 4.8 por meio da curva transmitância *versus* número de onda.

Figura 4.8: Espectros na região de infravermelho para os ligantes asfálticos de referência e modificados com diferentes teores de látex.



Através da Figura 4.8, percebe-se três regiões distintas contendo vários picos para as amostras de ligantes asfálticos de referência e modificados com diferentes teores de látex. A primeira região compreende a posição da banda entre os picos  $719\text{ cm}^{-1}$  e  $875\text{ cm}^{-1}$ , correspondente, respectivamente, à cadeia C-H ou C-S e à cadeia C=C (ligação de alcenos do tipo *cis*), característicos de materiais de alongamento como o látex.

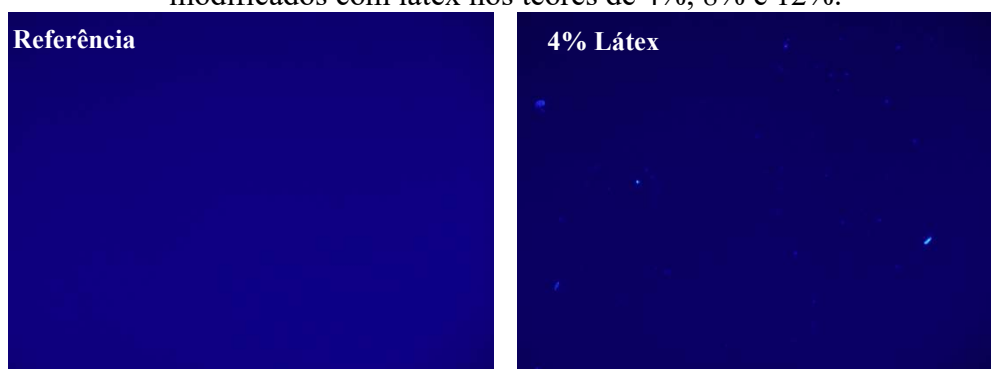
Por sua vez, a segunda região apresenta os picos de  $1.452\text{ cm}^{-1}$  a  $1.459\text{ cm}^{-1}$  e são atribuídos ao alongamento de sulfóxidos presentes na ligação S=O e os picos de  $1.373\text{ cm}^{-1}$  a  $1.377\text{ cm}^{-1}$  são atribuídos ao grupo C-H ( $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$ ). A terceira região é característica de materiais asfálticos, tendo os picos compreendidos entre  $2.850\text{ cm}^{-1}$  e  $2.917\text{ cm}^{-1}$  presentes nas cadeias alifáticas dos grupos C-H ( $\text{CH}_2$  e  $\text{CH}_3$ ). Tais resultados vão de encontro com as pesquisas de Masson, Pelletier e Collins (2001), Saowapark, Jubsilp e Rimdusit (2017), Teixeira (2018), Hou *et al.* (2018), Kamal, Hadithon e Bakar (2020) e Jitsangiam *et al.* (2021).

Em síntese, a inserção de látex, em teores de até 15% em peso, provoca alteração química no ligante asfáltico 50/70, visto que o composto formado herda as características químicas do polímero incorporado.

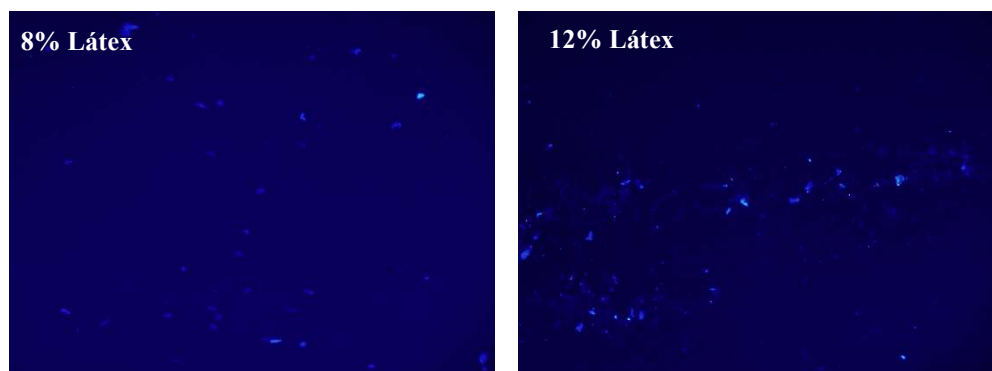
#### 4.2.1.4 Micrografia de Fluorescência

A Figura 4.9 apresenta a micrografia de fluorescência do ligante asfáltico de referência e dos ligantes modificados com 4%, 8% e 12% de látex considerando a ampliação de 10 vezes no microscópico. Como informado no capítulo 3, os demais teores não foram analisados devido à indisponibilidade do equipamento no período proposto para a realização do ensaio.

Figura 4.9: Micrografia de fluorescência para os ligantes asfálticos de referência e modificados com látex nos teores de 4%, 8% e 12%.







A partir da Figura 4.9, é possível constatar que o ligante asfáltico de referência demonstra uma resposta de fluorescência uniforme, enquanto que os ligantes modificados com 4%, 8% e 12% de látex mostram pequenas regiões poliméricas distribuídas na fase asfáltica, que crescem em número com o aumento do teor de incorporação. Contudo, com até 12% de látex, não ocorre uma inversão de fases, característica de ligantes altamente modificados.

As micrografias de fluorescência indicam que, com o aumento do teor de látex, maior é a presença do biopolímero no reforço da matriz asfáltica, que, possivelmente, irá repercutir no desempenho mecânico/reológico do compósito formado, principalmente, quanto à rigidez e à elasticidade.

As pesquisas de Malithong e Thongpin (2010), Wen *et al.* (2017) e Teixeira (2018) apresentaram resultados semelhantes para o material estudado.

### 4.3 ETAPA 3: AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES EMPÍRICAS, MECÂNICAS E REOLÓGICAS DOS LIGANTES ASFÁLTICOS DE REFERÊNCIA E MODIFICADOS

Nos tópicos a seguir são apresentados e discutidos os resultados das propriedades empíricas, mecânicas e reológicas dos ligantes asfálticos de referência e modificados, tendo o intuito de verificar a influência da adição de látex no comportamento do ligante asfáltico base.

A investigação da viscosidade aparente, da estabilidade ao armazenamento (ensaio empírico) e do grau de desempenho (PG) em altas temperaturas foram realizadas para os ligantes asfálticos de referência e modificados na condição virgem.

Após o processo de envelhecimento a curto prazo, utilizando-se a estufa de filme rotativo (RTFOT), foi determinado novamente o grau de desempenho (PG) em altas temperaturas e conduzido os ensaios de MSCR e LAS. Além disso, a variação de massa (parâmetro empírico) e o índice de envelhecimento (AI) foram obtidos para avaliar o efeito da inserção de látex na resistência ao envelhecimento da matriz asfáltica.

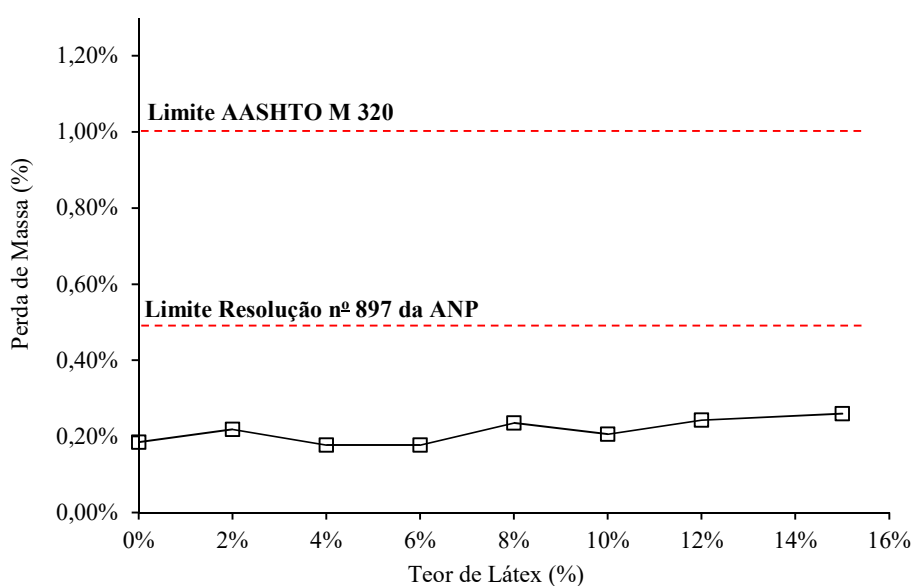
Finalmente, ainda nesta etapa foi determinado o teor ótimo de fragmentos de luva de látex para a formulação da mistura asfáltica modificada. Para isso, foi adotado como critério o ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR), analisando-se os pares ordenados ( $J_{nr3,2}$ ,  $\%R_{3,2}$ ) plotados em conjunto com a curva MSCR, que delimita as regiões de alta e baixa elasticidade, conforme demonstrado nos próximos itens a seguir.

### 4.3.1 Variação de Massa

A variação de massa possibilita verificar a resistência ao envelhecimento dos ligantes, além de permitir validar os compósitos asfálticos desenvolvidos em relação aos limites contidos na norma AASHTO M 320 (AASHTO, 2022) e na Resolução nº 897 da ANP (2022).

A Figura 4.10 evidencia os resultados da variação de massa ocorrida após o ensaio de envelhecimento a curto prazo (RTFOT) para os ligantes asfálticos de referência e modificados.

Figura 4.10: Variação de massa ocorrida após o ensaio de envelhecimento a curto prazo (RTFOT) para os ligantes asfálticos de referência e modificados nos diferentes teores de látex.



A partir da Figura 4.10, verifica-se que os ligantes asfálticos investigados apresentam valores abaixo dos limites de 1,00% da norma AASHTO M 320 (AASHTO, 2022) e de 0,50% da Resolução nº 897 da ANP (2022).

Analisando estritamente os dados obtidos para o ligante base e para todos os ligantes modificados, obtém-se uma variação de massa média de todos os teores na faixa de 0,21% (desvio padrão  $\pm 0,04\%$ ), indicando que a incorporação de látex na matriz não providencia

mudanças significativas em relação a este parâmetro empírico. Finalmente, conclui-se que todas as matrizes se enquadram nos critérios da norma e da resolução.

### 4.3.2 Estabilidade ao Armazenamento

A Tabela 4.6 apresenta os resultados para o ensaio de separação de fases das amostras na condição virgem do ligante asfáltico 50/70 e do ligante modificado com 12% de teor de látex (teor ótimo de incorporação – discutido na seção 4.3.8).

Tabela 4.6: Diferença nos valores de ponto de amolecimento dos ligantes asfálticos após o ensaio de estabilidade ao armazenamento.

Teor de Incorporação de Látex (%)	Diferença do Ponto de Amolecimento: Topo-Base (°C)
0%	0,43 °C (desvio padrão $\pm 0,24$ )
12%	4,65 °C (desvio padrão $\pm 0,60$ )

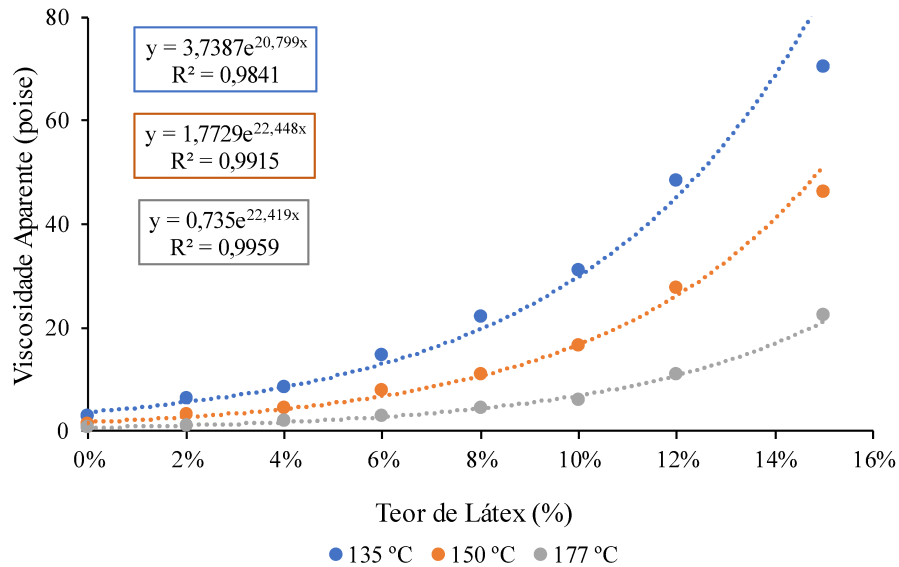
Conforme resultados apresentados na Tabela 4.6, os valores médios para a diferença entre os pontos de amolecimento (topo-base) estão abaixo do limite máximo de 5 °C proposto pelas normas vigentes (EN 13399, 2017; ASTM D 7173, 2020) e pela Resolução nº 32 da ANP (2010).

Apesar de estar em conformidade com o limite máximo estabelecido, o teor de incorporação de 12% de látex apresentou o valor de 4,65 °C para a diferença do ponto de amolecimento, o que indica uma separação do ligante e do polímero entre o topo e a base das amostras ensaiadas. Pesquisas como a de Hosseinezhad *et al.* (2019) e Poovaneshvaran, Hasan e Jaya (2020) justificam que esse comportamento está relacionado com o tamanho dos fragmentos de látex incorporados na matriz asfáltica, com a diferença de densidade do polímero e do ligante asfáltico e com a diferença de solubilidade entre os materiais.

### 4.3.3 Viscosidade Aparente

Em relação à viscosidade aparente em amostras virgens, a Figura 4.11 apresenta os resultados dos efeitos da incorporação do látex no ligante asfáltico 50/70.

Figura 4.11: Viscosidade aparente dos ligantes asfálticos de referência e modificados com diferentes teores de látex (amostras virgens).



A partir da Figura 4.11, constata-se que ocorre um aumento da viscosidade aparente com o aumento do teor de incorporação do látex em todas as temperaturas analisadas. O ligante asfáltico de referência (teor 0%) tem os valores de viscosidade mais baixos enquanto os ligantes modificados mostram viscosidade mais alta, dada a interação entre o agente modificador e o ligante asfáltico base que providencia um composto com maior resistência ao escoamento.

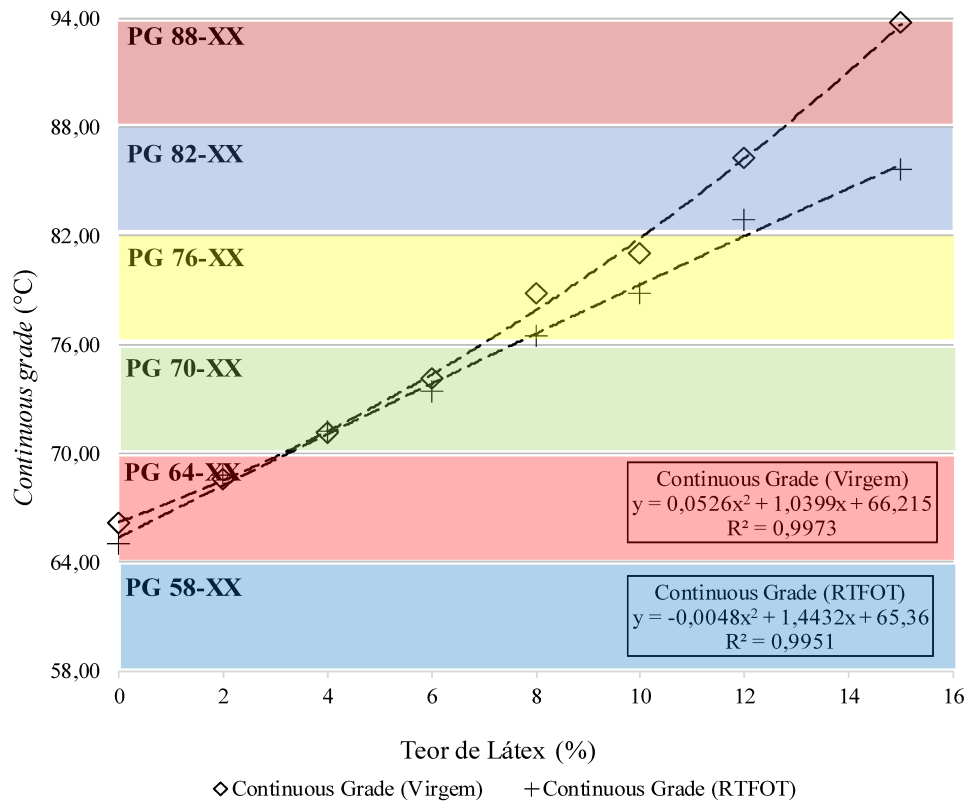
Resultados semelhantes foram obtidos por Al-Mansob *et al.* (2014), Wen *et al.* (2017), Teixeira (2018), Kumar e Juneja (2019), Poovaneshvaran, Hasan e Jaya (2020), Kamal, Hadithon e Bakar (2020) e Jitsangiam *et al.* (2021) em suas pesquisas.

Pode-se concluir, por fim, que a presença de látex na matriz asfáltica investigada proporciona um aumento na viscosidade aparente e propicia uma matriz com maior resistência ao escoamento em altas temperaturas.

#### 4.3.4 Grau de Desempenho (PG)

Quanto à classificação PG da matriz asfáltica, a Figura 4.12 apresenta os resultados de *Continuous Grade* (temperatura estimada de falha) dos ligantes asfálticos de referência e modificados em todos os teores de látex, na condição virgem e envelhecida a curto prazo (RTFOT). De forma complementar, para todos ligantes investigados, o Apêndice A apresenta a variação do  $|G^*|/\text{sen } \delta$  nas diferentes temperaturas de ensaio, tanto para condição virgem quanto para os resíduos envelhecidos a curto prazo (RTFOT).

Figura 4.12: *Continuous Grade* e classificação PG do ligante asfáltico de referência e dos modificados nos diferentes teores de látex (amostras virgens e envelhecidas no RTFOT).



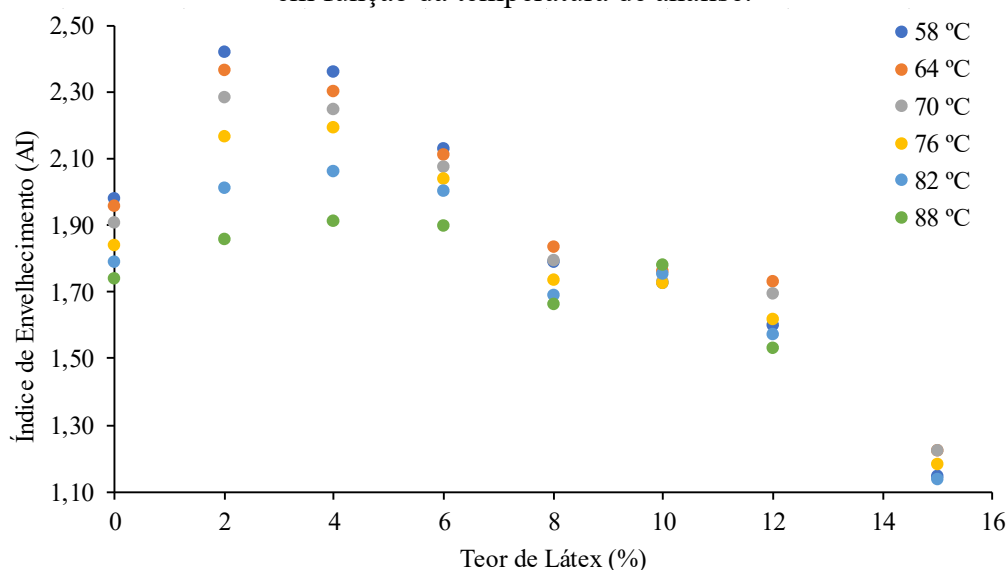
Conforme resultados apresentados na Figura 4.12, observa-se um crescimento significativo do *Continuous Grade* com a incorporação do látex no ligante asfáltico nas condições virgem e envelhecida a curto prazo. Tomando como base o teor de 15% de látex, em relação ao ligante asfáltico base (0%), na condição virgem, há um aumento de 27,60 °C (cerca de 41%) da temperatura de falha, e de 20,60 °C (cerca de 31%) na condição envelhecida (RTFOT). Já com um teor de 12% de látex (teor ótimo de incorporação – discutido na seção 4.3.8), em relação ao ligante asfáltico de referência, na condição virgem, há um aumento de 20,15 °C (cerca de 30%) da temperatura de falha, e de 17,80 °C (cerca de 27%) na condição envelhecida (RTFOT). Observa-se, portanto, que a temperatura de falha do material aumenta com o teor de incorporação de látex na matriz asfáltica. À vista disso, o efeito da adição do látex resulta em um aumento no grau de desempenho (PG). Resultados semelhantes foram vistos por Al-Khateeb e Ramadã (2015) e Wen *et al.* (2017).

Observa-se, portanto, que a modificação com látex tende a aumentar a rigidez e a resposta elástica do ligante base. Este comportamento é atribuído a fase polimérica que reforça a fase asfáltica, conforme identificado anteriormente nas análises microscópicas dos compostos asfalto-látex. Dessa forma, o aumento da parcela elástica e a maior rigidez irão

contribuir para a resistência à deformação permanente do compósito. Conclusões semelhantes são vistas pelas pesquisas de Ali, Mashaan e Karim (2013) e Wen *et al.* (2017).

Por fim, analisou-se também o índice de envelhecimento (AI) do ligante asfáltico de referência e dos modificados pelos diferentes teores de látex. A Figura 4.13 apresenta o comportamento do IA em função do teor de látex e da temperatura da análise.

Figura 4.13: Índice de envelhecimento (AI) dos ligantes asfálticos de referência e modificados em função da temperatura de análise.



Conforme a Figura 4.13, para os ligantes modificados com até 8% de látex, não há uma tendência bem definida para o índice de envelhecimento. Entretanto, a partir de 8%, com o aumento do teor de látex, os valores de AI reduzem comparativamente ao ligante base, indicando menor tendência ao envelhecimento, o que segundo Cadorin *et al.* (2021), irá providenciar benefícios para a vida à fadiga do revestimento asfáltico em serviço.

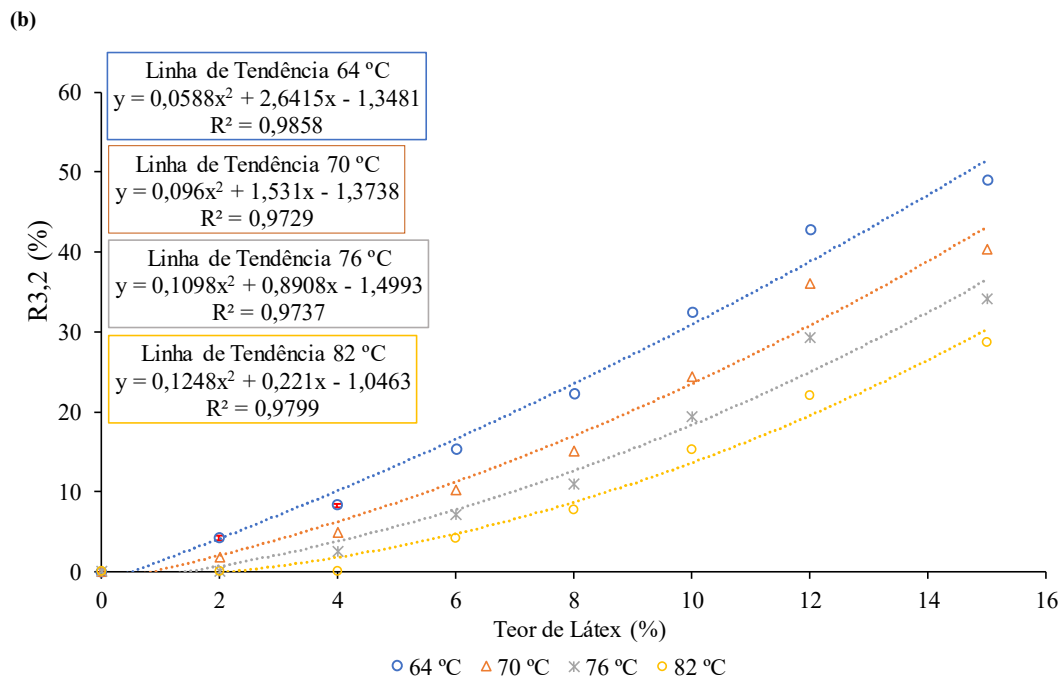
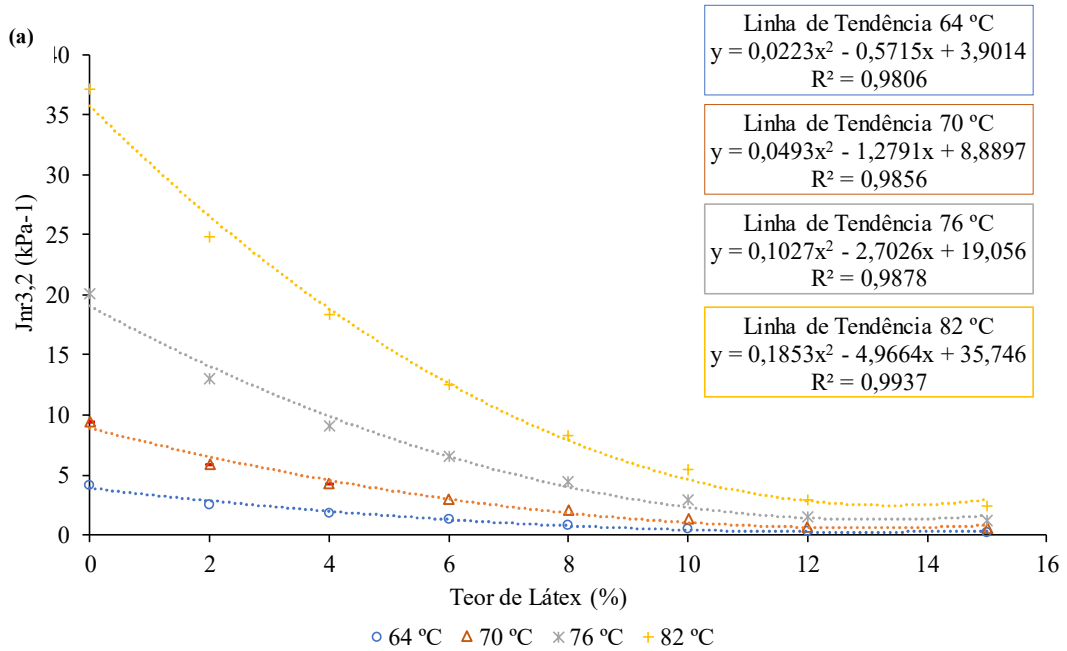
Em resumo, a incorporação do látex no ligante asfáltico provoca um crescimento significativo no *Continuous Grade* e garante maior resistência ao envelhecimento para os compósitos formulados nos teores mais altos (10%, 12% e 15% de látex). Tais fatos contribuem para que o ligante adquira maior resistência à deformação permanente (temperaturas elevadas) e à fadiga em serviço (menos suscetível ao envelhecimento oxidativo).

#### 4.3.5 Suscetibilidade do Ligante Asfáltico à Deformação Permanente

Através dos parâmetros obtidos pelo ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR), foi analisado o desempenho dos ligantes modificados em relação à

suscetibilidade à deformação permanente. A Figura 4.14 apresenta o comportamento do ligante asfáltico base e dos modificados nos diferentes teores de látex para os parâmetros de (a) compliância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) e (b) percentual de recuperação (%R), na tensão de 3,2 kPa, considerando as temperaturas de ensaio de 64 °C, 70 °C, 76 °C e 82 °C e resíduos RTFOT.

Figura 4.14: Parâmetros de (a) compliância não-recuperável ( $J_{nr}$ ) e (b) percentual de recuperação (%R), a 3,2 kPa, em função dos diferentes teores de látex (resíduos RTFOT).



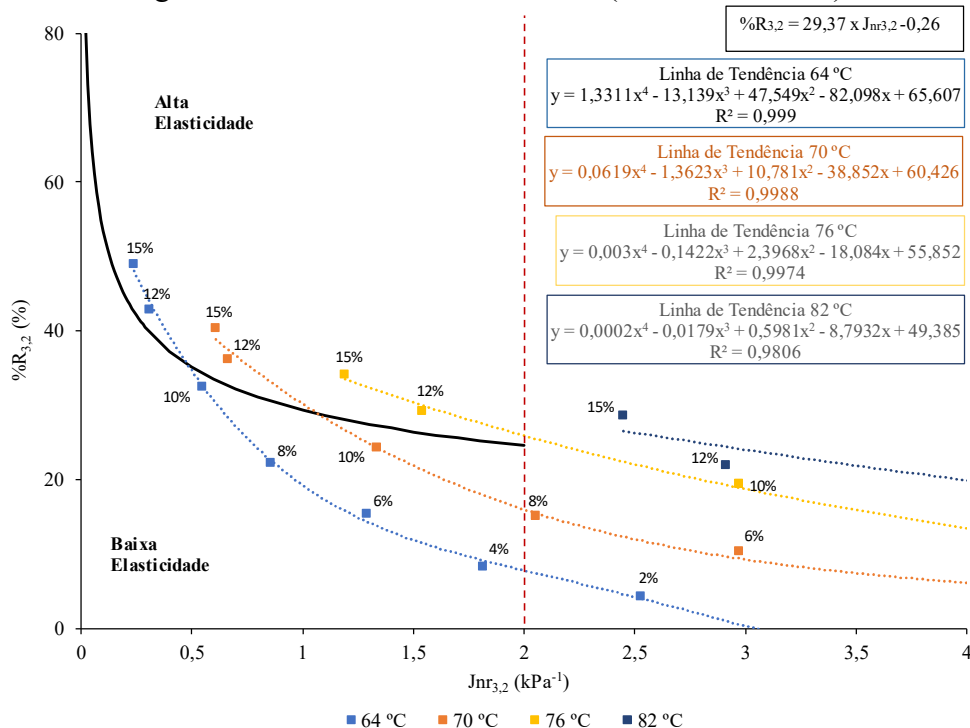
A partir da Figura 4.14a, observa-se uma diminuição dos valores de compliância não-recuperável ( $J_{nr3,2}$ ) com o aumento do teor de látex para todas as temperaturas de ensaio. Isto indica que a modificação do ligante asfáltico com látex contribui para a redução do acúmulo de deformações não recuperáveis na estrutura asfáltica.

Fazendo-se uma comparação entre os valores do parâmetro  $J_{nr3,2}$ , em relação ao ligante asfáltico base e o ligante modificado nos teores de 12% e 15% de látex, a redução foi de, aproximadamente, 92% e 95% para todas as temperaturas de ensaio. A redução dos valores de  $J_{nr3,2}$  corroboram com o comportamento observado para o parâmetro  $|G^*|/\text{sen } \delta$  apresentado no Apêndice A, onde a adição de látex propiciou maior rigidez e maior elasticidade ao ligante base.

Em relação ao percentual de recuperação (%R) apresentado na Figura 4.14b, há um aumento nos valores à medida que o teor de látex também aumenta. Esse comportamento está associado a valores mais altos de recuperação elástica do material, conforme apontam as pesquisas de Anderson, D'Angelo e Bukowski (2011), Wang *et al.* (2015) e Wen *et al.* (2017).

A Figura 4.15 apresenta as curvas de percentual de recuperação *versus* compliância não-recuperável a 3,2 kPa, plotadas no gráfico MSCR, que delimita as regiões de alta e baixa elasticidade indicadas pelas normas (AASHTO R 92, 2018; AASHTO T 350, 2019). As curvas são formadas pelos pares ordenados ( $J_{nr3,2}$  e  $\%R_{3,2}$ ) dos ligantes asfálticos de referência e modificados (resíduos RTFOT) nas temperaturas de 64 °C, 70 °C, 76 °C e 82 °C.

Figura 4.15: Percentual de recuperação *versus* compliância não-recuperável a 3,2 kPa, para os ligantes de referência e modificados (resíduos RTFOT).

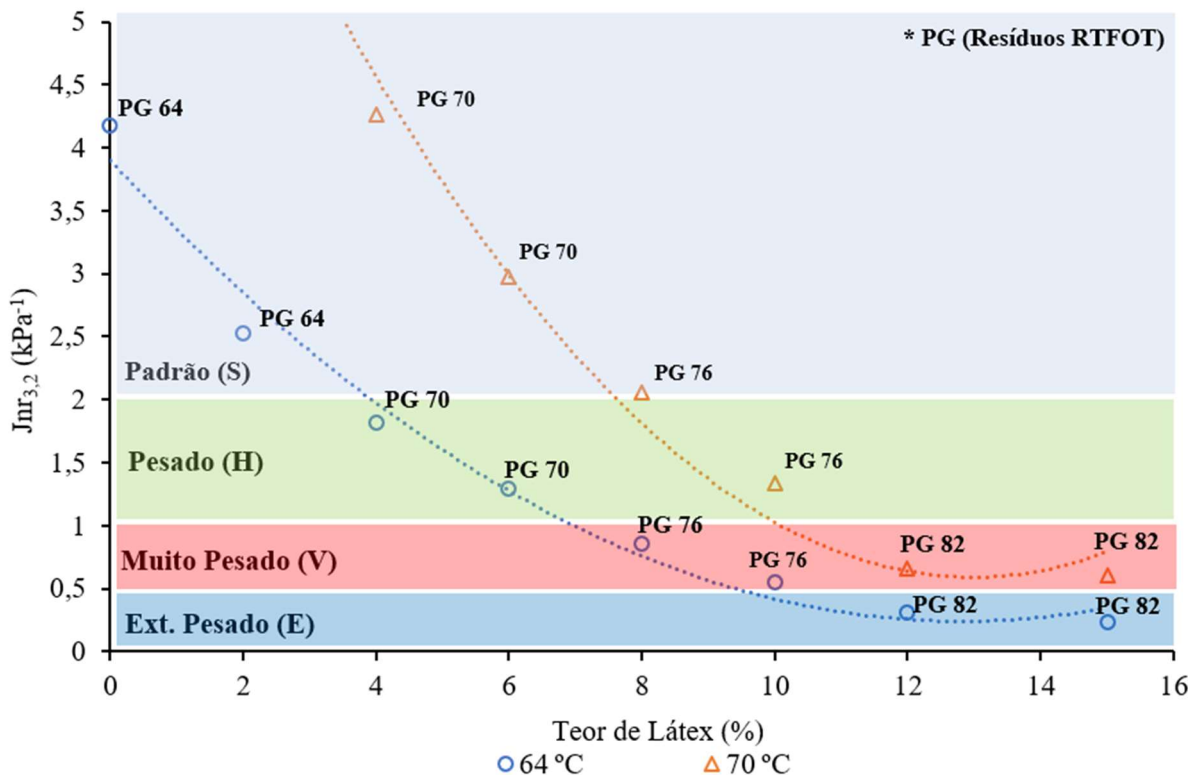




De acordo com a Figura 4.15, nota-se que os teores de 12% e 15% de látex, para as temperaturas de 64 °C, 70 °C e 76 °C, classificam a matriz asfáltica na zona de alta elasticidade. Os teores de 4% a 10% de látex para 64 °C e de 10% de látex para 70 °C estão localizados na zona de baixa elasticidade. As demais amostras não são classificadas por estarem fora do valor máximo de  $2 \text{ kPa}^{-1}$  do parâmetro de  $J_{nr3,2}$  (AASHTO R 92, 2018). Infere-se que a adição de látex contribui para o aumento da resposta elástica da matriz asfáltica, visto que com o aumento da incorporação, há tendência do compósito de evoluir para a região de alta elasticidade.

A partir dos resultados de compliância não-recuperável na tensão de 3,2 kPa obtidos nas temperaturas altas do PG, o ligante asfáltico de referência e os modificados com látex foram classificados com base no nível de tráfego: padrão (S – *Standard*), pesado (H – *Heavy*), muito pesado (V – *Very Heavy*) e extremamente pesado (E – *Extreme*), conforme demonstrado na Figura 4.16.

Figura 4.16: Classificação dos ligantes asfálticos de referência e modificados quanto ao nível de tráfego conforme resultados de compliância não-recuperável obtidos nas temperaturas altas do PG (resíduos RTFOT).



A partir da Figura 4.16, observa-se que as curvas indicam uma melhora no nível de tráfego nas duas faixas de temperatura analisadas (64 °C e 70 °C) com o aumento do teor de látex adicionado na matriz.

Desta forma, considerando a curva a 64 °C, para o PG 64-XX (ligante de referência e modificado com 2% de látex), as amostras permaneceram na classificação padrão (S); para o PG 70-XX (ligantes modificados com 4% e 6% de látex), as amostras se concentraram na classificação pesado (H); para o PG 76-XX (ligantes modificados com 8% e 10% de látex), as amostras evoluíram para a classificação muito pesado (V); e para o PG 82-XX (ligantes modificados com 12% e 15% de látex), as amostras se concentraram na classificação extremamente pesado (E).

Considerando a curva a 70 °C, para o PG 70-XX (ligantes modificados com 4% e 6% de látex), as amostras permaneceram na classificação padrão (S); para o PG 76-XX (ligantes modificados com 8% e 10% de látex), as amostras passaram da classificação padrão (S) para pesado (H); e para o PG 82-XX (ligantes modificados com 12% e 15% de látex), as amostras se concentraram na classificação muito pesado (V).

Os parâmetros  $J_{nr3,2}$  e  $\%R_{3,2}$  do ensaio de MSCR indicam que o látex quando adicionado no ligante asfáltico, melhora a capacidade de recuperação elástica da matriz asfáltica e reduz o acúmulo de deformações não recuperáveis, o que confere ao compósito um melhor desempenho à deformação permanente em altas temperaturas.

#### 4.3.6 Tolerância do Ligante Asfáltico ao Dano por Fadiga

Os ensaios de LAS foram executados em consonância com a norma AASHTO T 391 (AASHTO, 2020), com uma adaptação: aplicação de deformação em rampa linear. Já para a interpretação dos resultados do ensaio foram utilizadas as premissas do princípio do dano contínuo viscoelástico (*Simplified Viscoelastic Continuum Damage – S-VECD*) e dois procedimentos de cálculo: um conforme a planilha “*Linear Amplitude Sweep Analysis Template (AASHTO TP-101-12-Modified) Version 1.52*” e outro segundo a planilha “*Linear Amplitude Sweep Analysis Template (AASHTO T 391-20) Version 1.57*”, ambas planilhas de cálculo desenvolvidas pelo MARC (*Modified Asphalt Research Center at University of Wisconsin – Madison, USA – <https://uwmarc.wisc.edu/>*).

Dessa forma, os resultados dos parâmetros A e B para o ligante asfáltico de referência e modificados com látex (resíduos RTFOT) estão representados na Figura 4.17, considerando a planilha AASHTO TP-101-12-Modified, e na Figura 4.18, considerando a planilha AASHTO T 391-20. A temperatura de ensaio foi de 20 °C.

Figura 4.17: (a) Parâmetro A e (b) parâmetro B dos ligantes asfálticos de referência e modificados nos diferentes teores de látex (resíduos RTFOT), considerando a planilha AASHTO TP-101-12-Modified – temperatura de 20 °C.

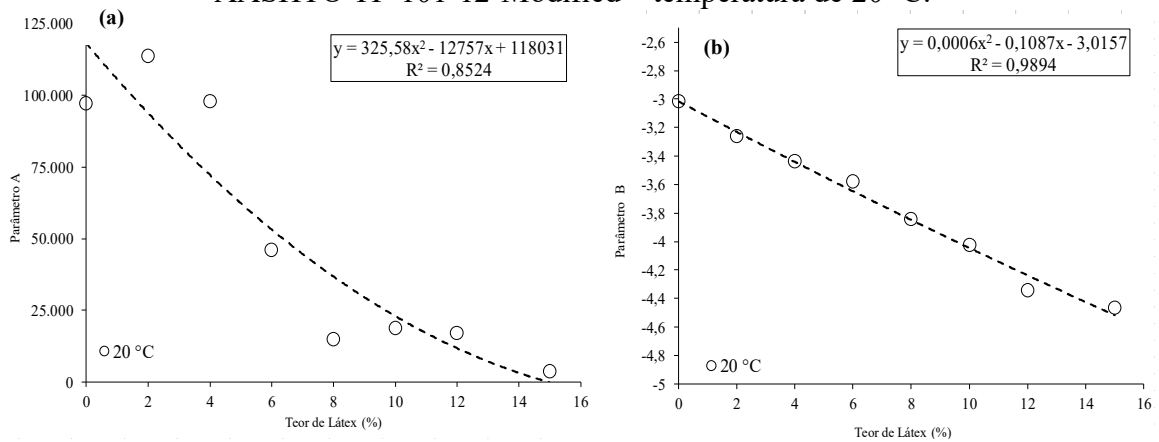
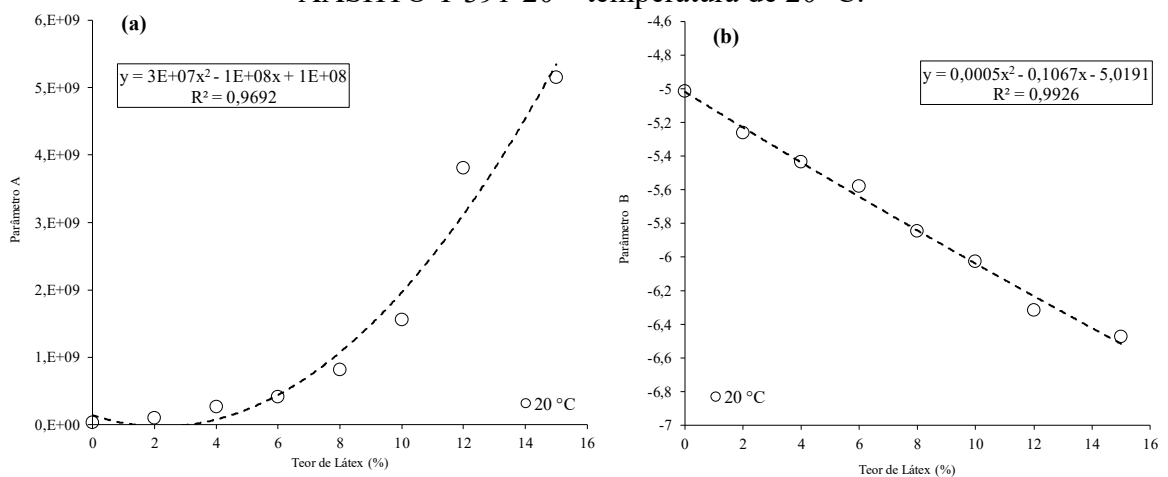


Figura 4.18: (a) Parâmetro A e (b) parâmetro B dos ligantes asfálticos de referência e modificados nos diferentes teores de látex (resíduos RTFOT), considerando a planilha AASHTO T 391-20 – temperatura de 20 °C.



Através da Figura 4.17a, considerando a planilha AASHTO TP-101-12-Modified, percebe-se uma tendência de redução do parâmetro A em função do aumento do teor de látex. Quando comparado ao ligante asfáltico de referência, todos os teores influenciam na matriz asfáltica, prejudicando a integridade do material. O ligante asfáltico modificado com 12% de teor de látex, por exemplo, apresentou uma redução de 83% em relação ao base.

Quanto ao parâmetro B apresentado pela Figura 4.17b, também há uma tendência de redução em função do aumento do teor de látex. Esse resultado indica que a sensibilidade do ligante asfáltico modificado ao nível de deformação é afetada pela adição do polímero.

No entanto, analisando a Figura 4.18a, considerando a planilha AASHTO T 391-20, percebe-se uma tendência de crescimento do parâmetro A com o aumento do teor de incorporação de látex. Todos os teores aumentam a integridade da matriz asfáltica,

apresentando valores superiores quando comparados ao ligante asfáltico de referência. Nesse cenário, o ligante asfáltico modificado com 12% de látex apresentou um aumento significativo em relação ao ligante de referência (em torno de 111%).

Quanto ao parâmetro B apresentado pela Figura 4.18b, há uma tendência de redução em função do aumento do teor de látex. Desta maneira, é possível identificar que o ligante modificado conferiu à matriz asfáltica um aumento, em módulo, do parâmetro B. Por exemplo, para o ligante modificado com 12% de látex, houve um aumento, em módulo, de 25% do parâmetro B em relação ao ligante convencional. Ainda, destaca-se que a incorporação de maiores teores de látex implica em maior sensibilidade do material ao nível de deformação.

Como complemento, a Tabela 4.7 apresenta os números de ciclos estimados ( $N_f$ ) da tolerância do material ao dano por fadiga para os ligantes asfálticos de referência e modificados em todos os teores de látex, ensaiados a 20 °C, na amplitude de deformação de 1,0%, 2,5%, 5,0%, 10% e 15%, considerando os parâmetros A e B obtidos segundo a metodologia de cálculo da planilha AASHTO TP-101-12-Modified e da planilha AASHTO T 391-20.

Tabela 4.7: Número de ciclos estimados da tolerância do material ao dano por fadiga (resíduos RTFOT).

Teor de Incorporação de Látex	Amplitude de Deformação ( $\gamma$ )				
	1,0%	2,5%	5,0%	10%	15%
<b>Planilha AASHTO TP-101-12-Modified</b>					
0%	97.156	6.129	758	94	28
2%	113.502	5.710	595	62	17
4%	97.692	4.184	386	36	9
6%	46.010	1.731	145	12	3
8%	14.945	440	31	2	0
10%	18.822	473	29	2	0
12%	17.133	319	16	1	0
15%	3.622	61	3	0	0
<b>Planilha AASHTO T 391-20</b>					
0%	3,43E+07	345.976	10.695	331	43
2%	1,02E+08	823.631	21.459	560	41
4%	2,64E+08	1.807.931	41.677	961	106
6%	4,10E+08	2.467.779	51.590	1079	112
8%	8,17E+08	3.850.019	66.908	1163	109
10%	1,56E+08	6.226.991	95.321	1459	127
12%	3,80E+08	12.272.719	151.770	1796	144
15%	5,15E+08	11.577.766	130.019	1460	106

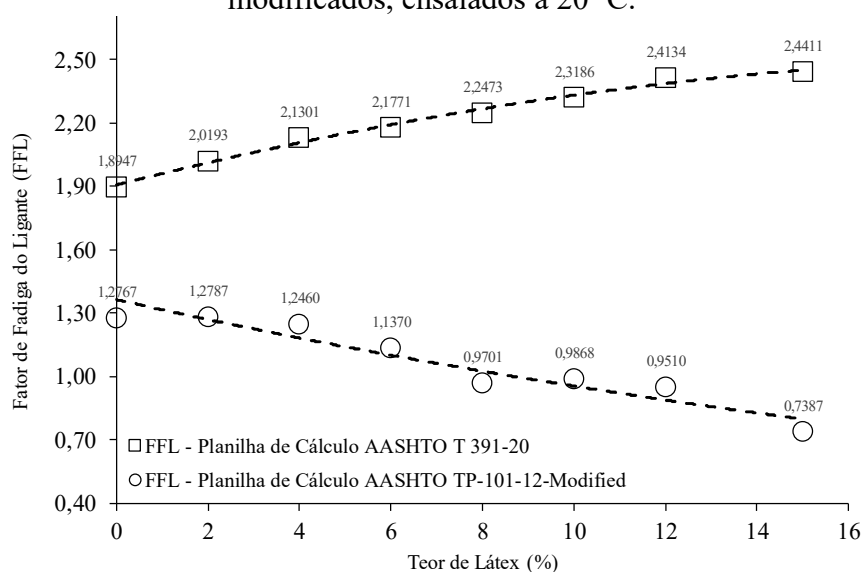
Conforme a Tabela 4.7, independente da metodologia de cálculo, percebe-se uma redução na vida de fadiga com o aumento da amplitude de deformação ( $\gamma$ ) para todos os teores

de látex analisados. Além disso, globalmente, considerando a planilha AASHTO TP-101-12-Modified, o número de ciclos suportados diminui com o aumento do teor de látex incorporado no ligante, demonstrando que a inserção de látex acarreta na redução da vida de fadiga do material. Porém, considerando a planilha AASHTO T 391-20, de forma geral, ocorre um aumento no número de ciclos suportados com o aumento do teor de látex, observando-se melhor desempenho à fadiga para os teores mais altos (12% e 15% de látex).

Na literatura existente, diversos resultados divergentes quanto ao LAS são reportados para ligantes modificados com látex. Vale ressaltar que as diferenças no comportamento reológico podem ser atribuídas a variações da natureza e característica do ligante asfáltico, do tipo de látex utilizado, do processo de incorporação na matriz asfáltica, entre outras situações específicas de laboratório, conforme observado por Becker, Mendez e Rodriguez (2001) e Airey, Mohammed e Fichter (2008). Além disso, o LAS é um ensaio ainda não consagrado na comunidade científica, podendo ser realizado através de diferentes modos de execução, com diferentes critérios de ruptura e métodos de cálculo, e interpretação dos resultados.

Nesse contexto, para os ligantes asfálticos de referência e modificados, a Figura 4.19 apresenta os resultados do fator de fadiga do ligante (FFL), calculados considerando as curvas de fadiga formuladas com os parâmetros A e B obtidos pela planilha de cálculo AASHTO TP-101-12-Modified e pela planilha de cálculo AASHTO T 391-20.

Figura 4.19: Fator de fadiga do ligante (FFL) dos ligantes asfálticos de referência e modificados, ensaiados a 20 °C.



Analisando a Figura 4.19, dependendo do método de cálculo, percebe-se tendências opostas para o fator de fadiga do ligante (FFL). Tomando como base a planilha AASHTO TP-

101-12-Modified, observa-se uma redução do FFL de 42% entre o teor de 0% e 15%, enquanto que para a planilha AASHTO T 391-20, ocorre um aumento do FFL de 28% entre o teor de 0% e 15%. Nessa mesma ótica, entre o teor de 0% e 12% (teor ótimo de incorporação), obtém-se um aumento do FFL de 26% considerando a planilha AASHTO T 391-20, enquanto tem-se uma redução do FFL de 25% considerando a planilha AASHTO TP-101-12-Modified.

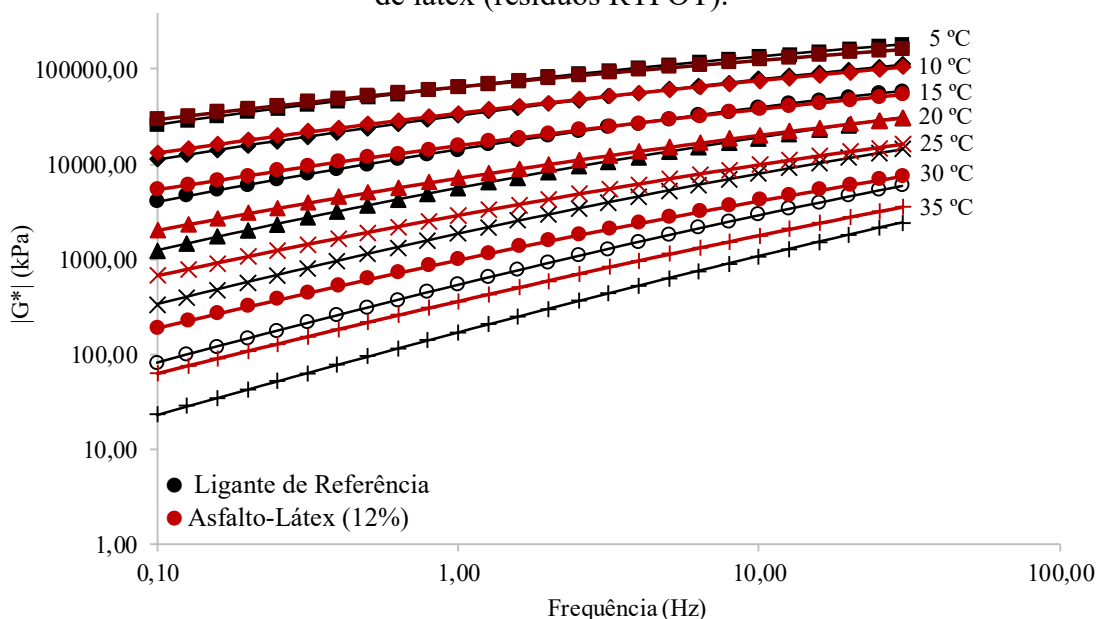
Finalmente, reforça-se que não há uma norma consagrada para o ensaio de LAS. Além disso, não há um consenso na comunidade científica sobre a efetividade da predição do teste LAS em relação à contribuição do ligante asfáltico para o desempenho à fadiga de misturas asfálticas, principalmente aquelas produzidas com ligantes modificados e/ou envelhecidos.

#### 4.3.7 Comportamento Reológico em Temperaturas Intermediárias

Quanto ao comportamento reológico do ligante asfáltico 50/70 e do modificado com 12% de látex (resíduos RTFOT), são analisadas neste tópico as curvas isotérmicas e isócronas, espaço de Black e plano Cole-Cole.

A Figura 4.20 apresenta as curvas isotérmicas plotadas através da frequência *versus* módulo de cisalhamento dinâmico para o ligante asfáltico 50/70 e para o modificado com 12% de látex (resíduos RTFOT). De forma complementar, o Apêndice B traz a Tabela B.1 contendo o comportamento do ligante asfáltico de referência e do modificado com 12% de látex em termos de módulo de cisalhamento dinâmico, em diferentes frequências e temperaturas de teste.

Figura 4.20: Curvas isotérmicas para o ligante asfáltico de referência e modificado com 12% de látex (resíduos RTFOT).

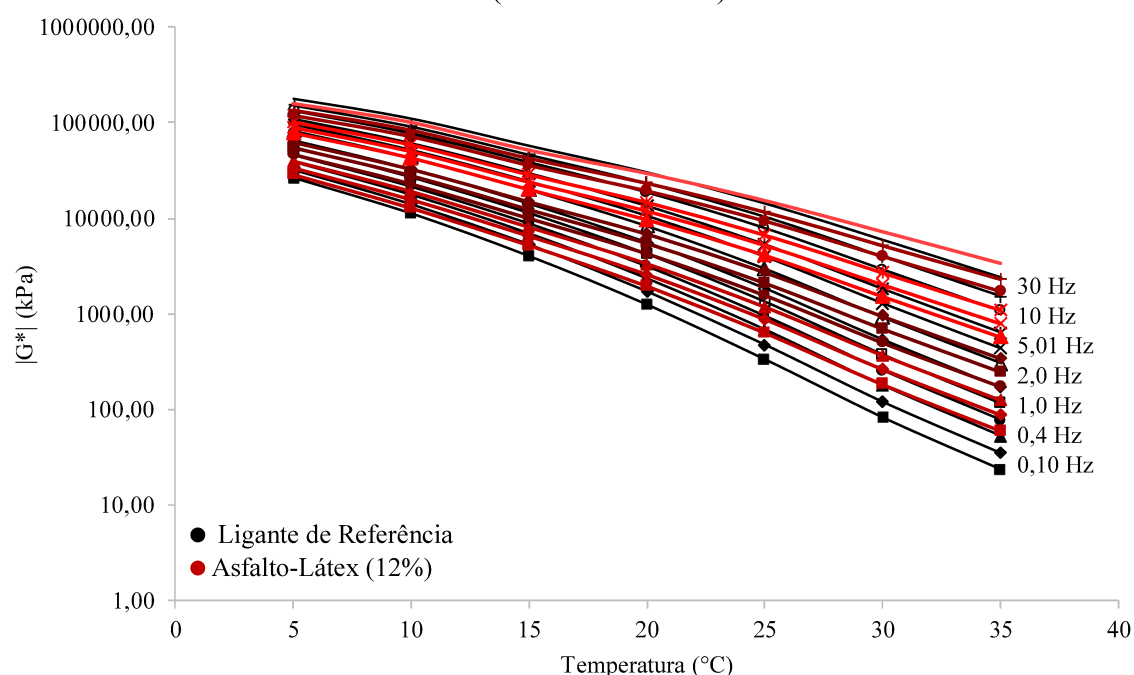


Com base nas curvas isotérmicas apresentadas na Figura 4.20 e nos resultados contidos na Tabela B.1 do Apêndice B, percebe-se que, nas temperaturas de ensaio mais baixas e/ou nas temperaturas intermediárias com frequências mais altas (5 °C [de 1 Hz a 30 Hz]; 10 °C [de 5,01 Hz a 30 Hz]; 15 °C [de 5,01 Hz a 30 Hz]; e 20 °C [a 30 Hz]), os valores do módulo de cisalhamento dinâmico do ligante modificado com látex são inferiores aos valores do ligante de referência, apresentando menor rigidez. Por conseguinte, este comportamento é positivo, pois a menor rigidez em baixas temperaturas e/ou a altas frequências, torna o material menos susceptível ao trincamento térmico. Já a partir da temperatura de 25 °C e/ou nas temperaturas intermediárias com frequências mais baixas, o ligante asfáltico modificado apresenta maior rigidez que a matriz asfáltica original.

Por fim, de maneira geral, o ligante modificado com 12% de látex apresenta uma maior estabilidade frente as variações térmicas, dado o menor espaçamento entre as curvas isotérmicas em relação à referência. Para Becker, Méndez e Rodri (2001), Khadivar e Kavussi (2013) e Al-Mansob *et al.* (2014), a elevação de  $|G^*|$  indica melhora do ligante asfáltico em termos de suscetibilidade à temperatura.

A Figura 4.21 apresenta as curvas isócronas plotadas através da temperatura *versus* módulo de cisalhamento dinâmico para o ligante asfáltico 50/70 e para o modificado com 12% de látex (resíduos RTFOT).

Figura 4.21: Curvas isócronas para o ligante asfáltico de referência e modificado com 12% de látex (resíduos RTFOT).



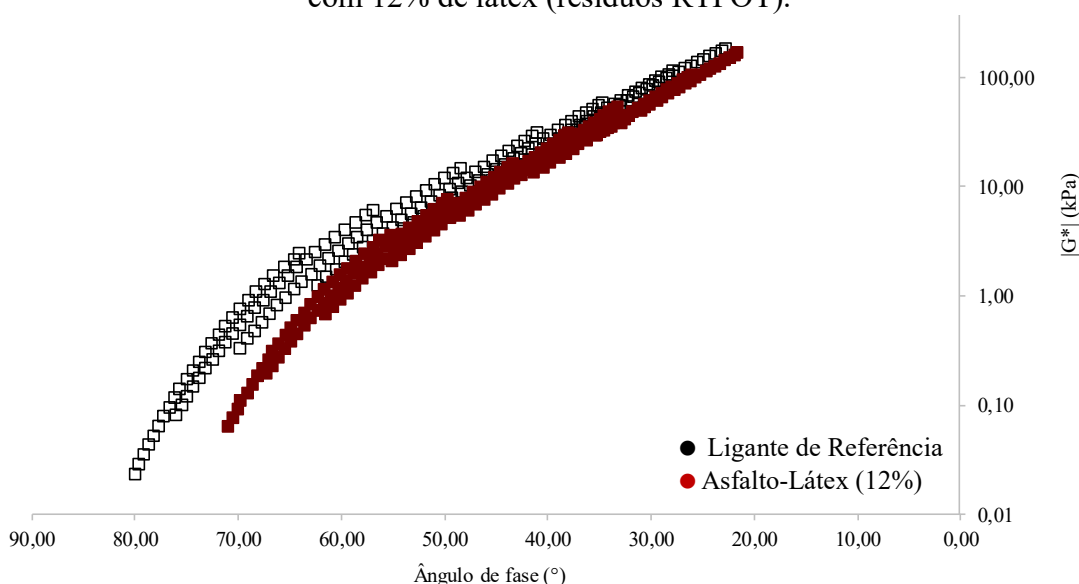
Referente às curvas isócronas apresentadas na Figura 4.21, de maneira geral, observa-se que à medida que a temperatura aumenta e a frequência diminui, a rigidez do material reduz, visto a diminuição do valor do módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ). Este comportamento indica a sensibilidade térmica dos ligantes asfálticos estudados.

Fazendo-se uma comparação entre as curvas isócronas, observa-se que o asfalto-látex (12%) apresenta um comportamento termicamente mais estável do que o ligante de referência. Analisando o ponto final da curva a 35 °C, verifica-se que para todas as frequências do ligante asfáltico modificado, o módulo de cisalhamento dinâmico apresenta maiores valores do que o ligante de referência. Por exemplo, considerando a frequência de 10 Hz a 35 °C, o asfalto-látex possui  $|G^*|$  63% superior ao da referência, 1.758,12 kPa e 1.075,11 kPa, respectivamente.

Desta forma, percebe-se que a incorporação de látex no ligante asfáltico resulta em um aumento no módulo de cisalhamento dinâmico ( $|G^*|$ ) nas temperaturas de ensaio mais altas e/ou nas temperaturas intermediárias com frequências mais baixas, conforme constatado pelas curvas isotérmicas e isócronas. Conclusões semelhantes são vistas pelos estudos de Al-Mansob *et al.* (2014), Al-Khateeb e Ramadã (2015), Wen *et al.* (2017), Poovaneshvaran, Hasan e Jaya (2020), Kamal, Hadithon e Bakar (2020) e Jitsangiam *et al.* (2021).

A Figura 4.22 apresenta o diagrama de espaço de Black plotado através do ângulo de fase *versus* módulo de cisalhamento dinâmico para o ligante asfáltico 50/70 e para o modificado com 12% de látex (resíduos RTFOT). De forma complementar, o Apêndice B apresenta a Tabela B.2 contendo o comportamento do ligante asfáltico de referência e do modificado com 12% de látex em termos de ângulo de fase, em diferentes frequências e temperaturas de teste.

Figura 4.22: Diagrama de espaço de Black para o ligante asfáltico de referência e modificado com 12% de látex (resíduos RTFOT).

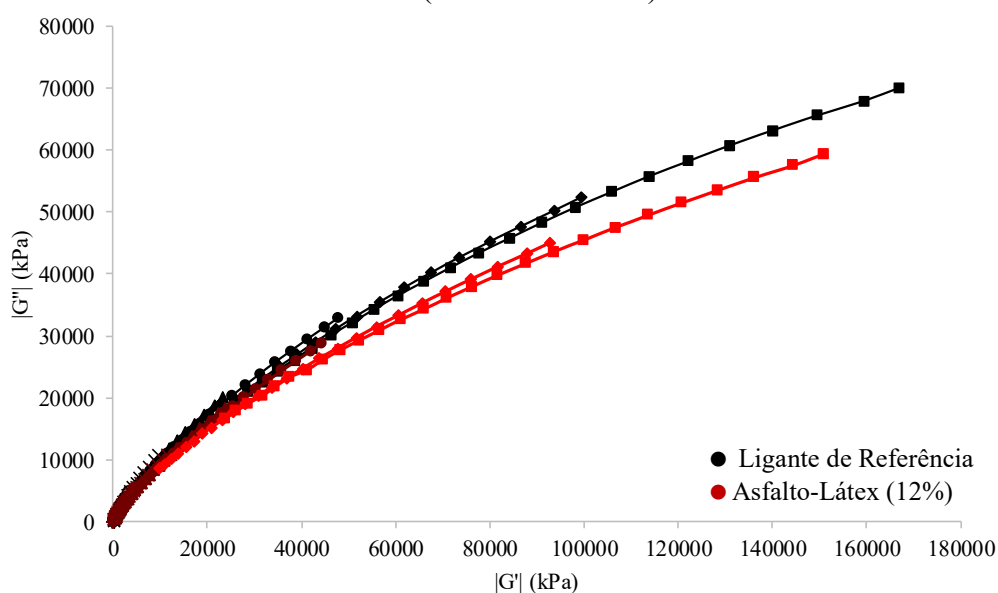




Através do espaço de Black apresentado na Figura 4.22, observa-se que a incorporação de látex no ligante asfáltico proporciona uma redução do ângulo de fase ( $\delta$ ) na matriz estudada, conforme também evidenciado pela pesquisa de Jitsangiam *et al.* (2021). As curvas do espaço de Black variam em direção aos ângulos de fase mais baixos com a adição de látex (deslocamento à direita no diagrama de espaço de Black). Ou seja, os resultados ilustram claramente que a adição de látex melhora a resposta elástica do ligante base, devido a fase polimérica distribuída ao longo da fase asfáltica, conforme identificado anteriormente nas análises microscópicas dos compósitos asfalto-látex.

A Figura 4.23 apresenta os planos Cole-Cole plotados (módulo de armazenamento cisalhante ( $|G'|$ ) *versus* módulo de perda cisalhante ( $|G''|$ )) para o ligante asfáltico 50/70 e para o modificado com 12% de látex (resíduos RTFOT). De forma complementar, o Apêndice B apresenta a Tabela B.3 e a Tabela B.4 contendo, respectivamente, o comportamento do ligante asfáltico de referência e do modificado com 12% de látex em termos de módulo de armazenamento cisalhante ( $|G'|$ ) e módulo de perda cisalhante ( $|G''|$ ), em diferentes frequências e temperaturas de teste.

Figura 4.23: Plano Cole-Cole para o ligante asfáltico de referência e modificado com 12% de látex (resíduos RTFOT).



Conforme os resultados da Figura 4.23, verifica-se uma diminuição das parcelas viscosas ( $|G''|$ ) do asfalto-látex comparativamente ao ligante base. Nesse viés, o ligante asfáltico de referência possui sob a ação de solicitações dinâmicas, maior energia dissipada na forma de calor e, conseqüentemente, menor tolerância aos danos por fadiga. Desta forma, a

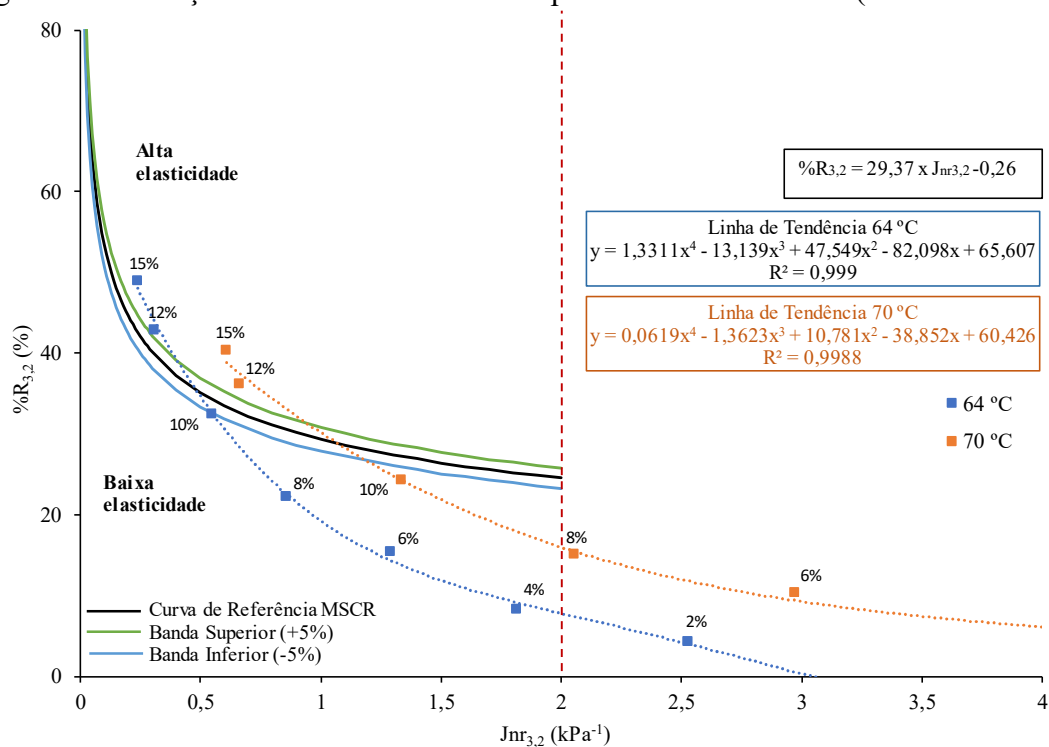
adição de 12% de látex melhora o comportamento reológico da matriz em temperaturas intermediárias, favorecendo uma maior resistência ao fenômeno de fadiga.

#### 4.3.8 Seleção do Teor Ótimo

A seleção do teor de látex para ser utilizado na modificação do ligante asfáltico e, conseqüentemente, na produção da mistura asfáltica foi determinada considerando as condições climáticas brasileiras, que condicionam os revestimentos asfálticos a dois principais mecanismos de deterioração: a deformação permanente e o trincamento por fadiga. Neste sentido, buscou-se formular um ligante asfáltico com maior capacidade de recuperação elástica, a qual pode beneficiar o comportamento frente à deformação permanente e à fadiga. Para tanto, tendo em vista a falta de uma norma consagrada para o ensaio de LAS, o teor ótimo de látex foi determinado somente com base no ensaio de MSCR em resíduos RTFOT.

Desta forma, para a seleção do teor ótimo de látex, analisou-se os pares ordenados ( $J_{nr3,2}$ ,  $\%R_{3,2}$ ) plotados em conjunto com a curva MSCR, que delimita as regiões de alta e baixa elasticidade de matrizes asfálticas. Onde, aplicou-se uma faixa de confiança de  $\pm 5\%$  sobre os valores da curva MSCR, obtendo-se uma banda superior e inferior a curva de referência, conforme ilustra a Figura 4.24.

Figura 4.24: Seleção do teor ótimo de látex a partir do ensaio MSCR (resíduos RTFOT).



Isto posto, buscou-se o teor ótimo de látex na zona de alta elasticidade. Logo, foram descartadas as curvas ensaiadas a 76 °C e 82 °C por estarem fora do valor máximo de 2 kPa<sup>-1</sup> para o parâmetro de compliância não-recuperável ( $J_{nr3,2}$ ), além de serem temperaturas que dificilmente ocorrerão em camadas de revestimento brasileiras. Dessa maneira, foi definido o valor de 12% como teor ótimo de látex, pois os pares ordenados ( $J_{nr3,2}$ , % $R_{3,2}$ ) estão acima da banda superior da curva MSCR para ambas as temperaturas analisadas (64 °C e 70 °C).

Em suma, o teor de 12% de látex foi selecionado com o objetivo de obter um ligante modificado com alta elasticidade, tendo a avaliação de seu comportamento na mistura asfáltica detalhada na etapa subsequente. A Tabela 4.8 sintetiza as alterações provocadas com a incorporação de 12% de látex na matriz asfáltica, apresentando a variação percentual dos principais parâmetros pesquisados nessa seção.

Tabela 4.8: Variação percentual dos principais parâmetros referentes aos ligantes asfálticos de referência e modificado com 12% de látex.

Parâmetro	Ligante Asfáltico de Referência	Ligante Asfáltico Modificado com 12% de Látex	Variação Percentual
<b>Estado Virgem</b>			
Viscosidade Aparente – 135 °C	298 cP	4820 cP	+1.617,4%
Viscosidade Aparente – 150 °C	147 cP	2750 cP	+1.870,7%
Viscosidade Aparente – 177 °C	70 cP	1100 cP	+1.571,4%
Classificação PG	PG 64-XX	PG 82-XX	+3 PG
<b>Resíduos RTFOT</b>			
Classificação PG	PG 64-XX	PG 82-XX	+3 PG
% $R_{3,2}$ – 64 °C	0%	42,8%	+42,8%
$J_{nr3,2}$ – 64 °C	4,18 kPa <sup>-1</sup>	0,311 kPa <sup>-1</sup>	-92,5%
% $R_{3,2}$ – 70 °C	0%	36,1%	+36,1%
$J_{nr3,2}$ – 70 °C	9,43 kPa <sup>-1</sup>	0,66 kPa <sup>-1</sup>	-93,0%
% $R_{3,2}$ – 76 °C	0%	29,2%	+29,2%
$J_{nr3,2}$ – 76 °C	20,10 kPa <sup>-1</sup>	1,54 kPa <sup>-1</sup>	-92,3%
% $R_{3,2}$ – 82 °C	0%	22%	+22%
$J_{nr3,2}$ – 82 °C	37,15 kPa <sup>-1</sup>	2,91 kPa <sup>-1</sup>	-92,1%
Parâmetro A – 20 °C <sup>1</sup>	97.156	17.133	-82,3%
Parâmetro B – 20 °C <sup>1</sup>	-3,0157	-4,3440	+44,0%
Nf – 2,5% - 20 °C <sup>1</sup>	6.129	319	-94,8%
Fator de Fadiga do Ligante <sup>1</sup>	1,2767	0,9509	-25,5%
Parâmetro A – 20 °C <sup>2</sup>	3,43E+07	3,80E+09	+11.078,7%
Parâmetro B – 20 °C <sup>2</sup>	-5,0160	-6,3170	+25,9%
Nf – 2,5% - 20 °C <sup>2</sup>	345.976	12.272.719	+3.547,2%
Fator de Fadiga do Ligante <sup>2</sup>	1,89468	2,4134	+27,3%

<sup>1</sup> Planilha AASHTO TP-101-12-Modified e <sup>2</sup> planilha AASHTO T 391-20.

#### 4.4 ETAPA 5: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Nos tópicos a seguir são apresentados e discutidos os resultados da investigação da mistura asfáltica produzida quanto à suscetibilidade à deformação permanente, ao comportamento reológico e à resistência à fadiga.

Vale ressaltar que a mistura asfáltica produzida foi composta pela curva granulométrica de Melo (2014) e por 4,65% de ligante asfáltico modificado com 12% de látex. A mistura asfáltica base foi apresentada por Schuster (2020), conforme discussão apresentada no item 3.4 da metodologia.

##### 4.4.1 Desempenho à Deformação Permanente das Misturas Asfálticas

Quanto à suscetibilidade à deformação permanente, é analisado o desempenho das misturas asfálticas quanto à formação de trilhas de roda.

As placas de mistura asfáltica, com dimensões de 50 x 18 x 5 cm, foram submetidas à pesagem hidrostática, a fim de determinar o volume de vazios. A Tabela 4.9 apresenta os resultados do volume de vazios para as placas de mistura asfáltica de referência, por Schuster (2020), e modificada.

Tabela 4.9: Volume de vazios das placas de mistura asfáltica de referência e modificada.

<b>Mistura</b>	<b>Volume de Vazios (%)</b>	<b>Volume de Vazios Médio (%)</b>
Referência (Schuster, 2020)	5,92%	6,01%
	6,09%	
Modificada (12% de Látex)	6,86%	6,84%
	6,82%	

De acordo com a Tabela 4.9, os valores do volume de vazios médios foram superiores a 4%, estando acima do valor especificado como critério de dosagem na metodologia Superpave (anterior ao Superpave 5). Apesar disso, estas placas de mistura asfáltica estão adequadas para a realização do ensaio de deformação permanente, visto que, no início da vida útil do pavimento, a camada asfáltica apresenta volume de vazios superior ao volume da dosagem.

A dificuldade de se compactar placas com volume de vazios pré-estabelecido também foi observado por Melo (2014). Segundo o autor, variações milimétricas na espessura final da placa podem acarretar em alterações significativas do volume de vazios.

Adicionalmente, deve-se ressaltar que outros ensaios também utilizam volume de vazios superior ao de projeto para avaliar a deformação permanente das misturas asfálticas. Por exemplo, o ensaio uniaxial de carga repetida (*Flow Number*), referenciado pela norma ABNT NBR 16505 (ABNT, 2016), utiliza corpos de prova com um grau de compactação de  $97\% \pm 0,5\%$  da densidade aparente ( $G_{mb}$ ), obtida durante o projeto de dosagem da mistura asfáltica.

Somado ao exposto, cabe enfatizar que a volumetria é um importante aspecto para a formulação de misturas asfálticas, porém, conforme Melo (2014) e Schuster (2020), o desempenho mecânico do material formulado é o critério decisório.

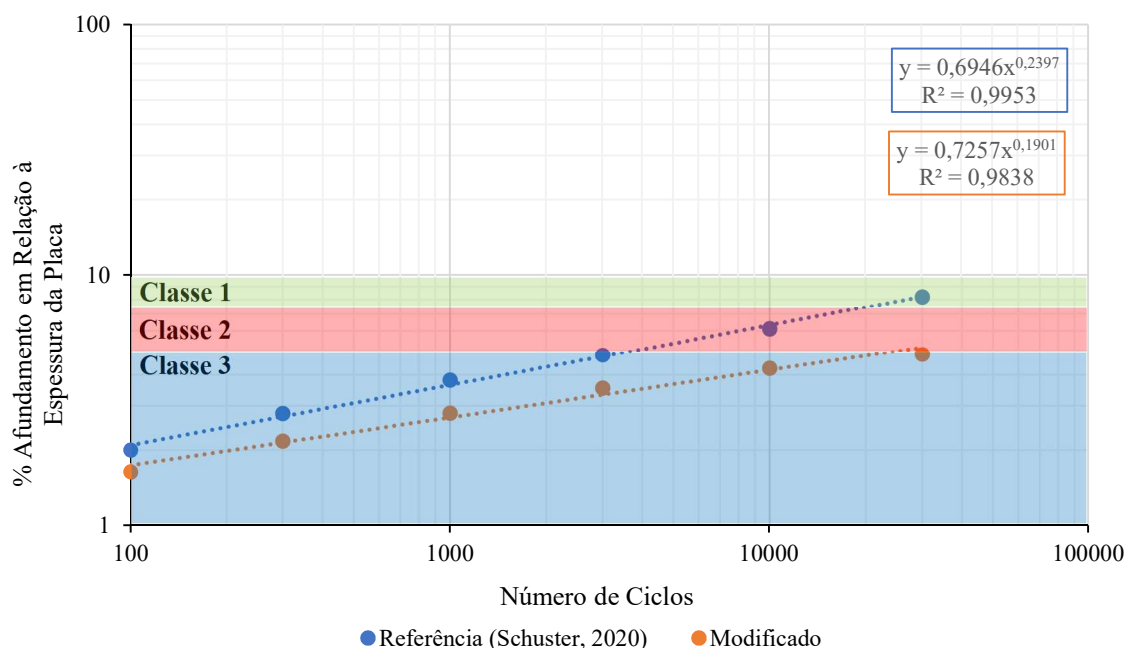
Isto posto, a Tabela 4.10 apresenta os valores de deformação obtidos em cada ciclo (100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000) para as placas de mistura asfáltica ensaiadas: referência de Schuster (2020) e modificada com 12% de látex.

Tabela 4.10: Valores de deformação obtidos em cada ciclo para as placas de mistura asfáltica de referência (SCHUSTER, 2020) e modificada (12% de látex).

<b>Mistura</b>	<b>Nº de Ciclos</b>	<b>Afundamento Direita (%)</b>	<b>Afundamento Esquerda (%)</b>	<b>Afundamento Médio (%)</b>
Referência (Schuster, 2020)	100	1,7	2,3	2,0
	300	2,2	3,3	2,8
	1.000	3,4	4,3	3,8
	3.000	4,3	5,3	4,8
	10.000	6,2	6,0	6,1
	30.000	8,2	8,2	8,2
Modificada (12% de Látex)	100	1,97	1,31	1,6
	300	2,53	1,82	2,2
	1.000	3,19	2,42	2,8
	3.000	4,00	3,07	3,5
	10.000	4,93	3,54	4,2
	30.000	5,56	4,09	4,8

Como complemento, a Figura 4.25 exibe os valores da porcentagem de afundamento médio em função do número de ciclos para as placas de mistura asfáltica ensaiadas nas três classes de desempenho estabelecidas pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC) para misturas do tipo EB14-BBSG (*Béton Bitumineux Semi-Grenus*), conforme descrito no item 3.5.1 da metodologia.

Figura 4.25: Valores de deformação permanente médio em função do número de ciclos para as placas de mistura asfáltica ensaiadas nas três classes de desempenho LCPC (misturas do tipo EB14-BBSG).



Com base na Tabela 4.10 e na Figura 4.25, observa-se que a mistura de referência de Schuster (2020) obteve 8,2% de afundamento ao final de 30.000 ciclos, enquanto que a mistura modificada apresentou desempenho superior, obtendo 4,8% de afundamento (reduzindo cerca de 42% do valor da referência). Esses resultados mostram que a mistura asfáltica modificada com látex (12%) apresenta alta resistência a deformações permanentes. Cabe também ressaltar que para a mistura com látex não foram utilizados melhoradores de adesividade. Já Schuster (2020) empregou aditivo melhorador de adesividade (dope) no teor de 0,40% sobre o peso de ligante asfáltico.

Em relação às classes de desempenho do LCPC, a mistura de referência de Schuster (2020) é classificada na classe 1 com afundamentos inferiores a 10% ao final de 30.000 ciclos; a mistura modificada é classificada na classe 3 com afundamentos inferiores a 5% ao final de 30.000 ciclos. Dessa forma, a mistura com 12% de látex pode ser aplicada em rodovias com maiores solicitações de tráfego e regiões de clima com temperatura mais elevada.

Os resultados reológicos do ligante asfáltico com 12% de látex em temperaturas altas, principalmente no que diz respeito ao PG e ao MSCR, indicavam uma contribuição favorável do compósito para melhorar a resistência à deformação permanente da mistura asfáltica, o qual veio a se confirmar com os resultados obtidos nesta seção.

Corroborando com os achados desta seção a pesquisa de Siswanto (2017), que relata a contribuição do látex para a diminuição da taxa de deformação das misturas asfálticas,

umentando significativamente sua resistência à deformação permanente. De modo geral, quanto maior o teor de látex na mistura, menor a sua suscetibilidade à deformação permanente (TUNTIWORAWIT; LAVANSIRI; PHROMSORN, 2005; ALI *et al.*, 2013; KRISHNAPRIYA, 2015; ANSARI *et al.*, 2021).

Em resumo, constata-se que a mistura asfáltica modificada com látex apresenta maior resistência à formação de trilhas de roda devido a sua maior capacidade de recuperação elástica e menor susceptibilidade térmica.

#### 4.4.2 Comportamento Reológico das Misturas Asfálticas

O comportamento reológico das misturas asfálticas é determinado através do módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase obtidos em diferentes frequências de carregamento e temperaturas de teste. Para tanto, inicialmente, os corpos de prova prismáticos com dimensões de 5,08 x 6,35 x 38,1 cm foram submetidos à pesagem hidrostática, a fim de determinar o volume de vazios. A Tabela 4.11 apresenta os resultados do volume de vazios para os corpos de prova prismáticos da mistura asfáltica de referência, apresentada por Schuster (2020), e modificada.

Tabela 4.11: Volume de vazios dos corpos de prova prismáticos utilizados para determinação do módulo dinâmico das misturas asfálticas estudadas.

<b>Mistura</b>	<b>* Volume de Vazios (%)</b>	<b>Volume de Vazios Médio (%)</b>
Referência (Schuster, 2020)	5,26%	5,26%
Modificada (12% de Látex)	5,12%	4,88%
	4,64%	

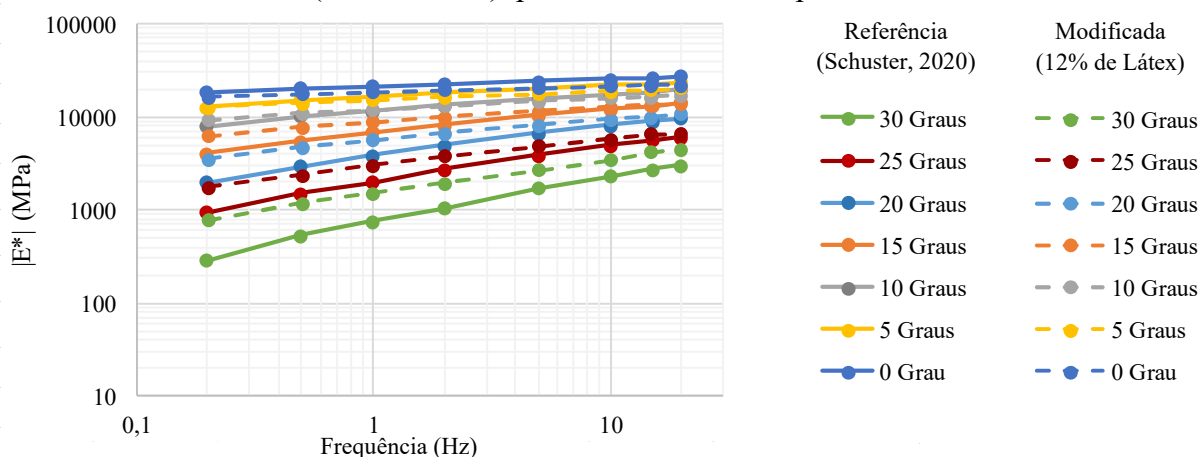
\* Schuster (2020) utilizou um corpo de prova; enquanto que nesta pesquisa foram utilizados dois corpos de prova.

Quanto ao comportamento reológico da mistura asfáltica de referência de Schuster (2020) e a modificada (12% de látex), são analisadas neste tópico as curvas isotérmicas, curvas isócronas, espaço de Black e plano Cole-Cole. Cabe também destacar que para a mistura com látex não foram utilizados melhoradores de adesividade. Já Schuster (2020) empregou aditivo melhorador de adesividade (dope) no teor de 0,40% sobre o peso de ligante asfáltico.

A Figura 4.26 apresenta as curvas isotérmicas plotadas através da frequência *versus* módulo dinâmico para a mistura asfáltica de referência de Schuster (2020) e a modificada. De forma complementar, o Apêndice C apresenta a Tabela C.1 contendo o comportamento das

misturas asfálticas em termos de módulo dinâmico, nas faixas de temperatura (0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C e 30 °C) e frequências de carregamento (0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz e 20 Hz).

Figura 4.26: Curvas isotérmicas das misturas asfálticas de referência (SCHUSTER, 2020) e modificada (12% de látex), para as diferentes temperaturas ensaiadas.



Através da Figura 4.26 e da Tabela C.1 do Apêndice C, percebe-se que, nas temperaturas de ensaio mais baixas e/ou nas temperaturas intermediárias com frequências mais altas (0 °C [de 0,1 Hz a 20 Hz]; 5 °C [de 0,2 Hz a 20 Hz]; 10 °C [de 2 Hz a 20 Hz]; e 15 °C [a 20 Hz]), os valores do módulo dinâmico da mistura modificada são inferiores aos valores da mistura de referência de Schuster (2020), apresentando menor rigidez. Portanto, este comportamento é positivo, uma vez que a menor rigidez em baixas temperaturas torna o material menos susceptível ao trincamento térmico. Porém, a partir da temperatura de 15 °C (com exceção de 15 °C a 20 Hz), a mistura modificada apresenta maior rigidez que a referência.

Por fim, globalmente, a mistura modificada apresenta uma maior estabilidade frente as variações térmicas, dado que as curvas isotérmicas se apresentam mais compactas; com menor espaçamento entre elas comparativamente à referência.

Através das curvas isotérmicas, também foi possível analisar a suscetibilidade cinética das misturas asfálticas. A Tabela 4.12 apresenta a respectiva inclinação das curvas isotérmicas das misturas asfálticas analisada; inclinações obtidas através das equações de correlação entre o módulo dinâmico ( $|E^*|$ ) e a frequência (Hz).

Tabela 4.12: Suscetibilidade cinética das misturas asfálticas analisadas.

(°C)	Mistura de Referência (Schuster, 2020)			Mistura Modificada (12% de Látex)		
	Equação	R <sup>2</sup>	Inclinação	Equação	R <sup>2</sup>	Inclinação
30	$717,32x^{0,5014}$	0,9949	0,5014	$1477,10x^{0,3720}$	0,9979	0,3720



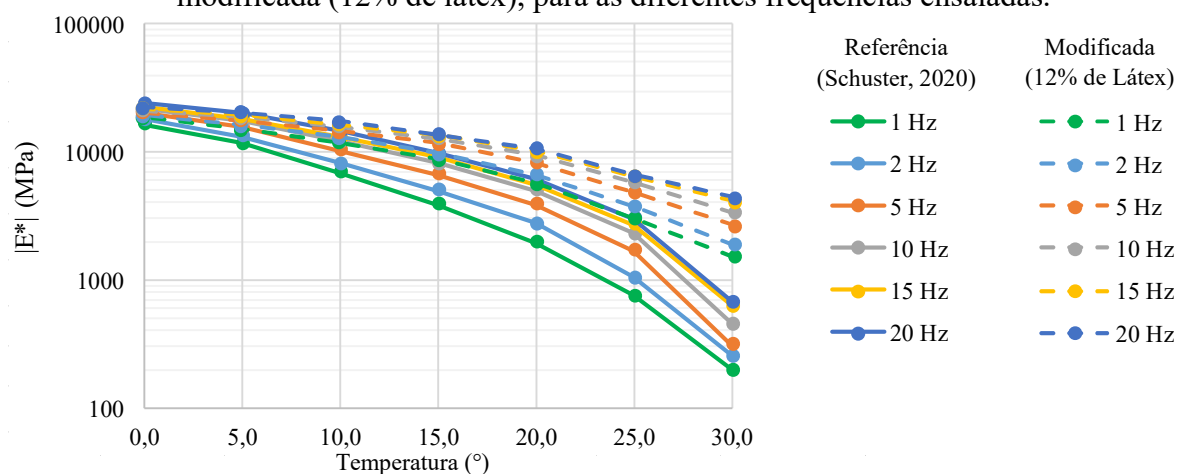
(°C)	Mistura de Referência (Schuster, 2020)			Mistura Modificada (12% de Látex)		
	Equação	R <sup>2</sup>	Inclinação	Equação	R <sup>2</sup>	Inclinação
25	$1950,00x^{0,4016}$	0,9950	0,4016	$2926,70x^{0,2901}$	0,9927	0,2901
20	$3723,40x^{0,3382}$	0,9922	0,3382	$5469,20x^{0,2327}$	0,9914	0,2327
15	$6597,20x^{0,2653}$	0,9947	0,2653	$8494,10x^{0,1705}$	0,9902	0,1705
10	$11310,00x^{0,1887}$	0,9922	0,1887	$11704,00x^{0,1277}$	0,9952	0,1277
5	$16270,00x^{0,1277}$	0,9937	0,1277	$14890,00x^{0,0982}$	0,9965	0,0982
0	$21270,00x^{0,0825}$	0,9930	0,0825	$18291,00x^{0,0623}$	0,9940	0,0623

De acordo com a Tabela 4.12, percebe-se que a mistura asfáltica modificada apresenta menores inclinações do que a mistura asfáltica de referência de Schuster (2020). Como pode ser visto, a redução da inclinação foi aproximadamente de 25% para a faixa de temperatura a 0° C e também para 30 °C.

Para ambas as misturas, as maiores inclinações das curvas isotérmicas são observadas nas temperaturas mais altas (25° C e 30 °C), indicando maior sensibilidade do módulo dinâmico à frequência de carregamento. Por outro lado, as menores inclinações são observadas nas temperaturas de ensaio iguais a 5 °C e 0 °C, indicando menor contribuição da parcela viscosa das misturas nas baixas temperaturas.

A Figura 4.27 apresenta as curvas isócronas plotadas através da temperatura *versus* módulo dinâmico para a mistura asfáltica de Schuster (2020) e a modificada.

Figura 4.27: Curvas isócronas das misturas asfálticas de referência (SCHUSTER, 2020) e modificada (12% de látex), para as diferentes frequências ensaiadas.



Através das curvas isócronas apresentadas na Figura 4.27, foi possível também caracterizar a suscetibilidade térmica das misturas asfálticas a partir de outra perspectiva. De maneira geral, percebe-se que o valor do módulo dinâmico diminui à medida que a temperatura aumenta, indicando a sensibilidade térmica das matrizes asfálticas.

Fazendo-se uma comparação entre as curvas isócronas, observa-se que a mistura modificada apresenta um comportamento termicamente mais estável do que a mistura de Schuster (2020). Analisando o ponto final da curva a 30 °C, verifica-se que, para todas as frequências da mistura modificada, o módulo dinâmico se concentra acima de 1.000 MPa, enquanto que, para a mistura de referência, os valores estão abaixo de 1.000 MPa.

Como complemento à análise, a Tabela 4.13 apresenta a perda no módulo dinâmico por grau Celsius (°C) para as duas misturas asfálticas analisadas, em cada frequência, considerando uma amplitude de temperatura de 0 °C a 30 °C.

Tabela 4.13: Perda no módulo dinâmico considerando uma amplitude de temperatura de 0 °C a 30 °C para ambas as misturas asfálticas analisadas.

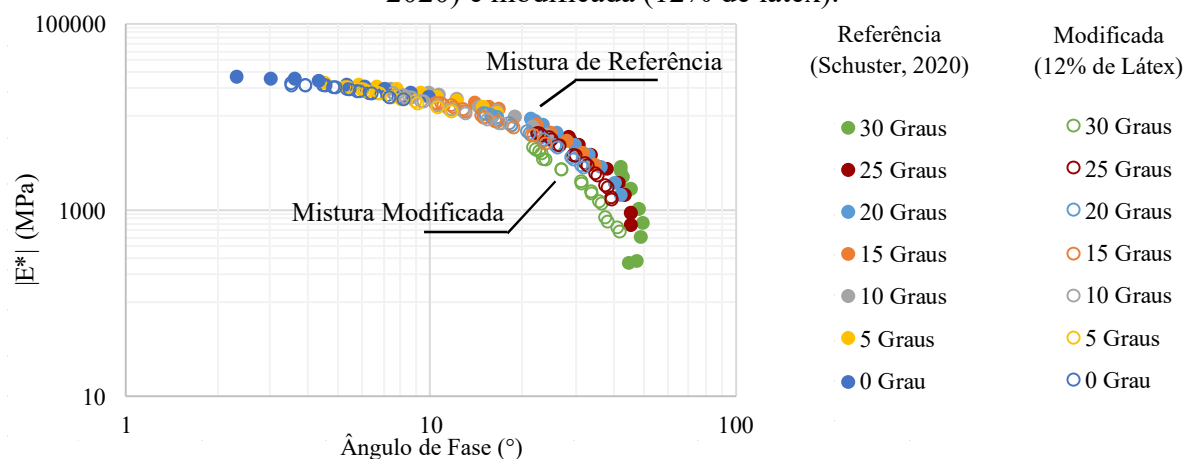
Frequência (Hz)	Perda no Módulo Dinâmico (MPa/°C)		Diferença entre as Misturas
	Mistura de Referência (Schuster, 2020)	Mistura Modificada (12% de Látex)	
0,1	547,90	490,00	10,57%
0,2	600,17	517,93	13,70%
0,5	658,03	546,75	16,91%
1,0	692,10	564,13	18,49%
2,0	722,53	579,55	19,79%
5,0	755,17	586,77	22,30%
10,0	774,07	589,30	23,87%
15,0	783,13	580,52	25,87%
20,0	814,50	583,67	28,34%
<b>Média</b>	<b>705,29</b>	<b>559,85</b>	<b>20,62%</b>

Com base na Tabela 4.13, percebe-se que a mistura modificada com 12% de látex apresenta uma variação média de perda no módulo dinâmico 20,62% menor que a mistura de Schuster (2020), considerando uma amplitude térmica de 0 °C a 30 °C. Nesse sentido, analisando-se a frequência de 10 Hz, por exemplo, observa-se que a perda no módulo dinâmico foi de 774,07 MPa/°C para a mistura de referência, e de 589,30 MPa/°C para a mistura modificada, o que representa uma diferença de 23,87% entre as perdas para as misturas ensaiadas. Além disso, nota-se que ocorre um crescimento gradual na diferença entre a perda no módulo dinâmico com o aumento das frequências de carregamento do teste, ou seja, de 10,57% (a 0,1 Hz) para 28,34% (a 20 Hz). Este comportamento está atrelado aos efeitos da incorporação do látex na mistura asfáltica, visto que a modificação influencia no aumento da parcela elástica e da rigidez da mistura e resulta em uma menor sensibilidade à temperatura.

A Figura 4.28 apresenta o diagrama de espaço de Black plotado através do ângulo de fase *versus* módulo dinâmico para a mistura asfáltica de Schuster (2020) e a modificada. Como

complemento para a análise, o Apêndice C contém a Tabela C.2 que apresenta os valores da variação do ângulo de fase nas diferentes frequências e temperaturas ensaiadas para ambas as misturas asfálticas.

Figura 4.28: Diagrama de espaço de Black das misturas asfálticas de referência (SCHUSTER, 2020) e modificada (12% de látex).

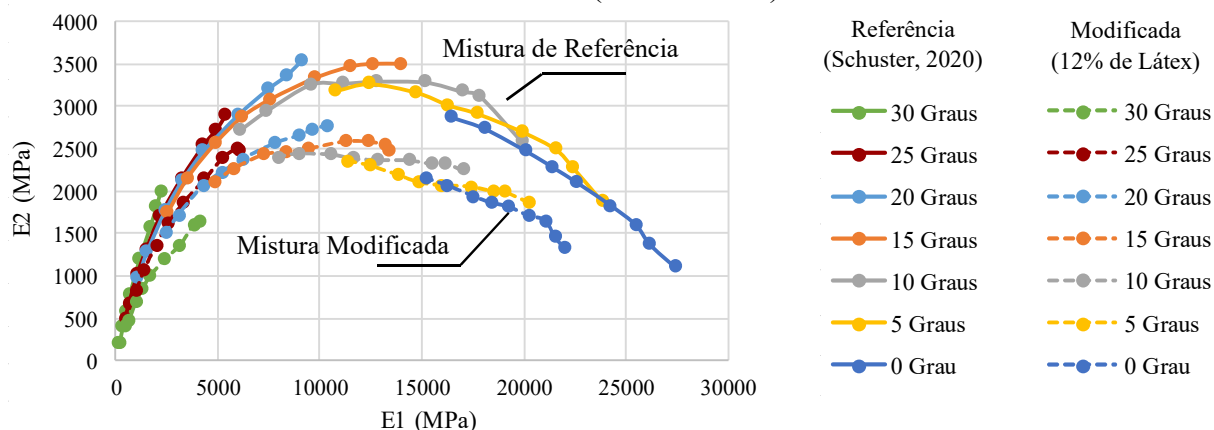


A partir do diagrama de espaço de Black apresentado na Figura 4.28 e da Tabela C.2 do Apêndice C, percebe-se que os valores do ângulo de fase da mistura asfáltica modificada com 12% de látex são menores do que os valores da mistura de referência de Schuster (2020). Ou seja, há um encurtamento do espaço de Black com a adição do látex no teor de 12%. Este comportamento ocorre em função do ganho de elasticidade a partir da adição de látex na matriz asfáltica, o que resulta em uma mistura com menor ângulo de fase; na mistura de referência de Schuster (2020), o aumento do ângulo de fase está relacionado com o aumento da parcela viscosa do material.

Dessa maneira, a adição de látex contribui para a redução do ângulo de fase e confere uma melhora na resposta elástica da mistura asfáltica. Resultados semelhantes são vistos nas pesquisas de Ali, Mashaan e Karim (2013) e Ali *et al.* (2013).

A Figura 4.29 apresenta os planos Cole-Cole (módulo de armazenamento (E1) *versus* módulo de perda (E2)) para a mistura asfáltica de Schuster (2020) e para a modificada. Como complemento para a análise, o Apêndice C contém a Tabela C.3 e C.4 que exibem os valores obtidos para o módulo de perda (E2) e para o módulo de armazenamento (E1) para as misturas asfálticas de referência e modificada, nas frequências e temperaturas de teste.

Figura 4.29: Planos Cole-Cole das misturas asfálticas de referência (SCHUSTER, 2020) e modificada (12% de látex).



Em relação aos planos Cole-Cole apresentados pela Figura 4.29, há uma tendência em arco da parcela viscosa e elástica do módulo de cisalhamento dinâmico para as misturas de referência de Schuster (2020) e modificada com 12% de látex. Comparativamente, constata-se uma redução abrupta da parcela viscosa da mistura de referência com a incorporação do látex no teor de 12%, comportamento reológico favorável ao aumento da tolerância aos danos por fadiga do material. Pelo gráfico, a temperatura em que ocorre a maior energia dissipada sob a forma de calor durante os ciclos de carregamento a 10 Hz é 15 °C para a mistura de Schuster (2020) e 20 °C para a mistura modificada.

Em relação à mistura asfáltica modificada com látex, as propriedades observadas são condizentes com o comportamento verificado nos ligantes modificados, ou seja, a mistura asfáltica herdou características reológicas do composto anteriormente formulado.

#### 4.4.3 Resistência à Fadiga das Misturas Asfálticas

Quanto à resistência à fadiga, inicialmente, os corpos de prova prismáticos, com dimensões de 5,08 x 6,35 x 38,1 cm, foram submetidos à pesagem hidrostática, a fim de determinar o volume de vazios. As vigotas feitas com a mistura de referência apresentaram volume de vazios médio igual a 7,06% com desvio padrão igual a 1,17 (SCHUSTER, 2020) e as vigotas oriundas da mistura modificada com látex apresentaram volume de vazios médio igual a 4,75% com desvio padrão igual a 0,67. Além disso, enfatiza-se que para a mistura com látex não foram utilizados melhoradores de adesividade. Já Schuster (2020) empregou aditivo melhorador de adesividade (dope) no teor de 0,40% sobre o peso de ligante asfáltico.

A Tabela 4.14 apresenta os resultados do ensaio de fadiga para a mistura asfáltica de referência e modificada, com temperatura controlada de 20 °C e frequência de 10 Hz. Os ensaios

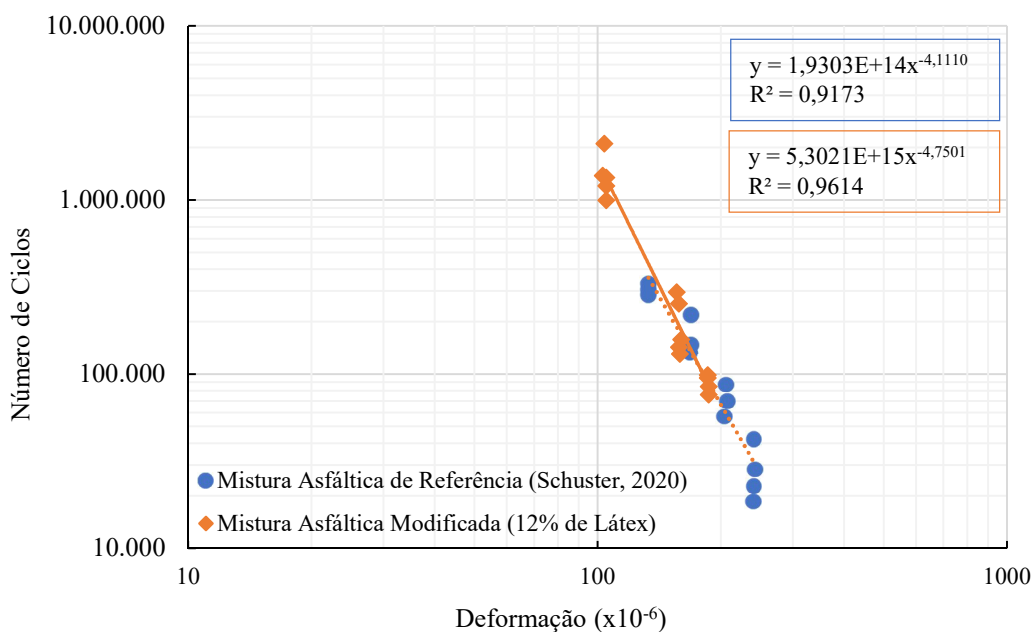
tiveram como critério de finalização a redução de 50% do módulo dinâmico lido no 100º ciclo de carregamento, conforme especificado na norma da EN 12697-24 (EN, 2004).

Tabela 4.14: Resultados obtidos no ensaio de fadiga para as misturas asfálticas analisadas.

Amostras	Mistura de Referência (Schuster, 2020)		Mistura Modificada (12% de Látex)	
	$\epsilon$ ( $\mu\text{m/m}$ )	Nº Ciclos	$\epsilon$ ( $\mu\text{m/m}$ )	Nº Ciclos
1	133	286.165	105	1.348.561
2	133	330.932	105	998.731
3	133	306.527	104	2.114.070
4	169	218.185	105	1.208.142
5	168	133.052	103	1.385.692
6	169	147.983	158	254.938
7	206	87.404	158	143.111
8	208	69.922	159	131.132
9	204	57.449	160	158.568
10	242	28.400	156	297.157
11	241	22.687	187	76.520
12	240	18.561	186	95.250
13	241	42.460	186	99.149
14	--	--	187	85.214

Os dados apresentados na Tabela 4.14 são plotados em um gráfico que relaciona o número de ciclos *versus* deformação ( $\times 10^{-6}$ ), fazendo-se um comparativo entre a mistura asfáltica de referência e a modificada, conforme Figura 4.30.

Figura 4.30: Curvas de fadiga plotadas pelo número de ciclos *versus* deformação das misturas asfálticas analisadas.



Por fim, na Tabela 4.15 é apresentado um resumo dos parâmetros do modelo de fadiga ( $N = a \times \varepsilon^b$ ) das duas misturas asfálticas analisadas.

Tabela 4.15: Resultados dos modelos de fadiga para as misturas asfálticas analisadas.

Parâmetro	Mistura de Referência (Schuster, 2020)	Mistura Modificada (12% de Látex)
a	1,9303E+14	5,3021E+15
b	-4,1110	-4,7501
$\varepsilon_6$	103,6275 $\mu\varepsilon$	111,4791 $\mu\varepsilon$
$\Delta\varepsilon_6$	$\pm 11,8542 \mu\varepsilon$	$\pm 4,4854 \mu\varepsilon$
R <sup>2</sup>	0,9173	0,9614
S <sub>N</sub>	0,1319	0,1085

Com base nas Tabelas 4.14 e 4.15 e na Figura 4.30, percebe-se que as curvas de fadiga geradas apresentam um comportamento similar e uma correlação muito forte ( $> 0,90$ ) entre a deformação aplicada e o número de ciclos até a ruptura.

A semelhança entre os resultados é vista pela inclinação da equação de fadiga, caracterizada pela constante “b”. A mistura asfáltica de referência de Schuster (2020) e a mistura modificada apresentaram, respectivamente, inclinação de -4,1110 e -4,7501. Nesta ótica, infere-se que a mistura modificada com látex demonstra maior suscetibilidade à deformação do que a mistura de referência, assim como, uma maior integridade, caracterizada pelo parâmetro “a”.

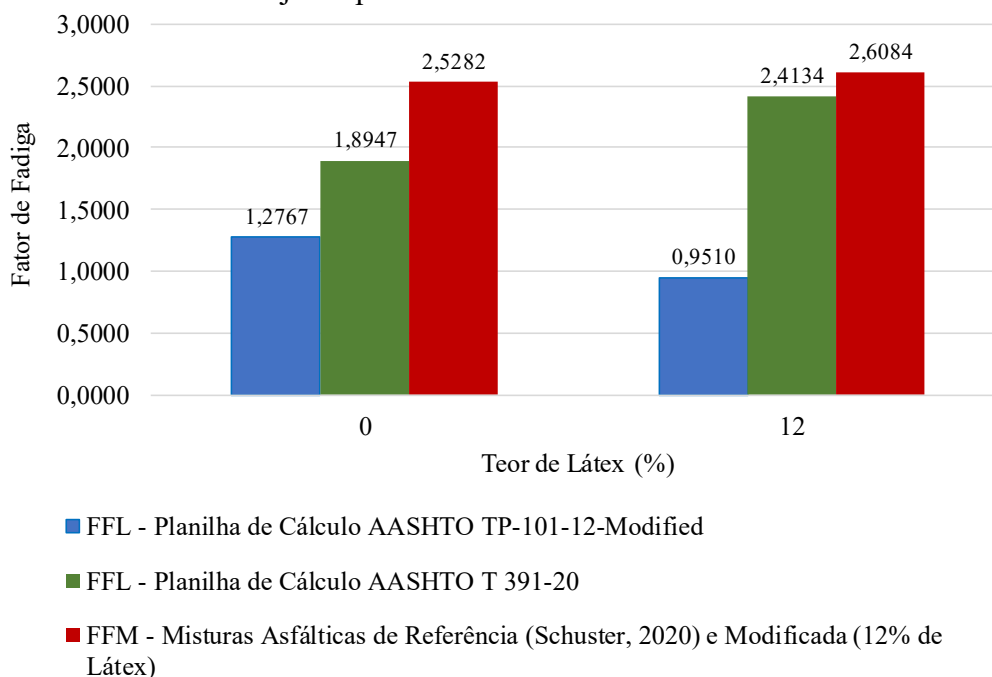
Analisando-se as microdeformações centrais, em torno de 158  $\mu\varepsilon$  a 169  $\mu\varepsilon$ , percebe-se um melhor comportamento para a mistura asfáltica modificada, obtendo-se um aumento de 18,37% no número de ciclos aplicados no ensaio antes de ocorrer a ruptura. Nessa linha, com base na deformação para um milhão de ciclos ( $\varepsilon_6$ ), os resultados de microdeformações são, respectivamente, iguais a 103,6275  $\mu\varepsilon$  e 111,4791  $\mu\varepsilon$  para as misturas de referência de Schuster (2020) e modificada, havendo, portanto, um aumento de 7,57% em relação à primeira.

Por fim, foi calculado o fator de fadiga da mistura (FFM), conforme Equação 3.7, considerando as deformações de 50  $\mu$  e 150  $\mu$ , para a mistura asfáltica de referência de Schuster (2020) e a modificada. Logo, o valor de FFM foi igual a 2,5282 para a mistura de Schuster (2020), enquanto que, para a mistura modificada (12% de látex), o valor de FFM foi de 2,6084, havendo, portanto, um aumento de 3,17% em relação à mistura de referência.

Como complemento, a Figura 4.31 apresenta os valores do fator de fadiga do ligante (FFL), calculados com base nos resultados obtidos pela planilha de cálculo AASHTO T 391-20 e pela planilha de cálculo AASHTO TP-101-12-Modified, e os valores do fator de fadiga da

mistura (FFM), calculados para a mistura asfáltica de Schuster (2020) e a modificada com 12% de látex.

Figura 4.31: Fator de fadiga do ligante (FFL) e fator de fadiga da mistura (FFM) plotados em conjunto para a matriz asfáltica estudada.



Percebe-se, com base na Figura 4.31, que os valores do fator de fadiga da mistura (FFM) estão mais próximos dos valores do fator de fadiga do ligante (FFL) obtidos com os resultados provenientes da planilha de cálculo AASHTO T 391-20, demonstrando uma maior capacidade de correspondência com este método de cálculo. Ademais, verifica-se que a adição de látex influenciou no comportamento quanto à fadiga da matriz asfáltica, visto que a mistura modificada apresentou um desempenho ligeiramente superior à mistura de referência. Ou seja, parte das propriedades reológicas do asfalto-látex foram transferidas para a mistura asfáltica.

De acordo com os resultados, percebe-se que a resistência à fadiga não é prejudicada com a adição de látex e pode até ser ligeiramente melhorada. Conclusões semelhantes também foram reportadas por Poovaneshvaran, Hasan e Jaya (2020), Hasan *et al.* (2022).

## 5 CONCLUSÕES

A presente pesquisa buscou desenvolver uma mistura asfáltica modificada com látex de borracha natural com propriedades mecânicas e reológicas superiores a uma mistura asfáltica convencional. Para tal objetivo, foram investigadas adições de 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12% e 15% de látex no ligante asfáltico 50/70, visando, a partir do estudo das propriedades reológicas dos compósitos formulados, alcançar um teor ótimo de incorporação de látex no ligante asfáltico base e, conseqüentemente, desenvolver uma mistura asfáltica modificada.

Desta forma, a partir da condução do plano experimental, obteve-se as seguintes conclusões:

- a) Com base no comportamento reológico dos compósitos desenvolvidos, o teor de 12% de látex foi considerado ideal para a formulação do asfalto-látex;
- b) A adição de 12% de látex no ligante asfáltico 50/70 providenciou em temperaturas elevadas, aumento do módulo de cisalhamento dinâmico, redução do ângulo de fase e, conseqüentemente, incremento do parâmetro  $|G^*|/\sin \delta$  e do PG. Além de repercutir na redução da compliância não-recuperável e no aumento do percentual de recuperação, indicando a contribuição do látex na resistência à deformação permanente da matriz. Já em temperaturas intermediárias, a adição de 12% de látex no ligante asfáltico promoveu, substancialmente, a redução da parcela viscosa do módulo de cisalhamento dinâmico;
- c) O ligante asfáltico com 12% de látex melhorou o desempenho à deformação permanente da mistura asfáltica, reduzindo cerca de 42% de afundamento em relação à mistura de referência. Assim como, não prejudicou o comportamento à fadiga, melhorando ligeiramente o comportamento do material quanto à tolerância aos danos;
- d) A incorporação de 12% de látex no ligante asfáltico 50/70 e, conseqüentemente, na mistura asfáltica, melhorou efetivamente o desempenho mecânico e reológico do material, sendo este o teor de incorporação indicado para o ligante asfáltico base com classificação 50/70;
- e) Recomenda-se para pesquisas futuras, avaliar a mistura asfáltica desenvolvida em segmentos experimentais de campo, visando observar o seu desempenho na camada de rolamento do pavimento sob ação do tráfego e das condições climática.



## REFERÊNCIAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation. **AASHTO M 320:** Standard specification for performance-graded asphalt binder. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC, 2022.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation. **AASHTO M 323:** Standard specification for Superpave volumetric mix design. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC, 2013.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation. **AASHTO M 332:** Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC, 2022.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation. **AASHTO R 30:** Standard practice for mixture conditioning of hot mix asphalt (HMA). Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC, 2002.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation. **AASHTO R 35:** Standard practice for Superpave volumetric design for hot-mix asphalt (HMA). Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC, 2012.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation. **AASHTO R 92:** Standard Practice for Evaluating the Elastic Behavior of Asphalt Binders Using the Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test. Washington, DC, 2018.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation. **AASHTO T 112:** Standard method of test for clay lumps and friable particles in aggregate. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC, 2012.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation. **AASHTO T 176:** Standard method of test for plastic fines in graded aggregates and soils by use of the sand equivalent test. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC, 2008.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation. **AASHTO T 240:** Standard method of test for effect of heat and air on a moving film of asphalt binder (Rolling Thin-Film Oven Test). Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC, 2022.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation. **AASHTO T 350:** Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC, 2019.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation. **AASHTO T 391**: Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders using the Linear Amplitude Sweep. Washington, DC, 2020.

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation. **AASHTO TP 101-12**: Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders using the Linear Amplitude Sweep. Washington, DC, 2018.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6954**: Lastro-padrão – Determinação da forma do material, Rio de Janeiro, 1989.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15184**: Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional, Rio de Janeiro, 2021.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 16505**: Misturas asfálticas – Resistência à deformação permanente utilizando o ensaio uniaxial de carga repetida, Rio de Janeiro, 2016.

ABRAHAM, Eldho *et al.* X-ray diffraction and biodegradation analysis of green composites of natural rubber/nanocellulose. **Polymer Degradation and Stability**, [s.1.], v. 97, n. 11, p. 2378-2387, nov. 2012.

AFNOR – Association Française de Normalisation. **AFNOR NF EN 12697-22**: Bituminous mixtures. Test methods: Wheel tracking. Association Française de Normalisation, AFNOR. 2020.

AFNOR – Association Française de Normalisation. **AFNOR NF EN 12697-33**: Bituminous mixtures. Test methods: Specimen prepared by roller compactor. Association Française de Normalisation, AFNOR. 2022.

AGOSTINI, Deuber Lincon da Silva. **Caracterização dos constituintes do látex e da borracha natural que estimulam a angiogênese**. 2009. 101 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Presidente Prudente, 2009.

AIREY, Gordon D.; MOHAMMED, Musarrat H.; FICHTER, Caroline. Rheological characteristics of synthetic road binders. **Fuel**, [s.1.], v. 87, n. 10-11, p. 1763-1775, ago. 2008.

ALBIAJAWI, Mohammad I. *et al.* Performance of sustainable concrete containing recycled latex gloves and silicone catheter under elevated temperature. **Journal of King Saud University**, [s.1.], nov. 2021.

ALI, Asim Hassan; MASHAAN, Nuha S.; KARIM, Mohamed Rehan. Investigations of physical and rheological properties of aged rubberized bitumen. **Advances in Materials Science and Engineering**, [s.1.], v. 2013, fev. 2013.

ALI, Saad Abdulqader *et al.* Pavement performance with carbon black and natural rubber (latex). **International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)**, [s.1.], v. 2, jan. 2013.

AL-KHATEEB, Ghazi G.; RAMADÃ, Khaled Z. Investigation of the effect of rubber on rheological properties of asphalt binders using Superpave DSR. **Journal of Civil Engineering**, [s.1.], v. 19, p. 127-135, set. 2014.

AL-MANSOB, Ramez A. *et al.* Rheological characteristics of Epoxidised Natural Rubber modified bitumen. **Mechanics and Materials**, [s.1.], v. 505-506, p. 174-179, jan. 2014.

AL-MANSOB, Ramez A. *et al.* Engineering characterization of epoxidized natural rubber-modified hot-mix asphalt. **PLoS ONE 12**, [s.1.], p. 1-16, fev. 2017.

AL-SABAEEL, Abdalnaser *et al.* A review of using natural rubber in the modification of bitumen and asphalt mixtures used for road construction. **Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)**, [s.1.], v. 81, n. 6, p. 81-88, 2019.

ALQAHTANI, Haifa. A study of asphalt binders by X-Ray Diffraction using Pearson-VII, Pseudo-Voigt and generalize Fermi functions. **Master's Thesis**, Memorial University of Newfoundland, 2017.

AMINI, Nahid; HAYATI, Parham. Effects of CuO nanoparticles as phase change material on chemical, thermal and mechanical properties of asphalt binder and mixture. **Construction and Building Materials**, [s.1.], v. 251, p. 1-11, ago. 2020.

AMIR, Amalina *et al.* Thermal and Rheological behavior of recycled rubber/natural rubber blends in recycle tire process. **Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)**, [s.1.], n. 76, p. 89-94, mai. 2015.

ANDERSON, R. Michael; D'ANGELO, John A.; BUKOWSKI, John R. Evaluation of the MSCR test for Canadian asphalt binders. **Proceedings of the fifty-sixth annual conference of the Canadian technical asphalt association (CTAA) – Quebec City, Quebec, Canadian Technical Asphalt Association**, 2011.

ANDRADE, Viviane Dias. **Influência da Formulação de Esqueletos Mineraiis na Deformação Permanente de Misturas de Concreto Asfáltico Densas**. 2018. 167 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução nº 32**. Brasília: [s.1.], 2010.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução nº 897**. Brasília: [s.1.], 2022.

ANSARI, Anwaar Hazoor *et al.* Natural rubber as a renewable and sustainable bio-modifier for pavement applications: A review. **Journal of Cleaner Production**, [s.1.], v. 289, p. 1-16, mar. 2021.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt binder testing. Manual Series nº 25 (MS-25)**. Third Edition. United States, 2012.

ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Mix Design Methods. Manual Series nº 2 (MS-2)**. 7th Edition. United States, 2014.

ASPHALT INSTITUTE. **Superpave Mix Design. Superpave Series nº 2 (SP-2)**. Third Edition. United States, 2001.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM C 88**: Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate. USA. 2013.

ASTM — American Society for Testing and Materials. **ASTM C 127**: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate. USA. 2012.

ASTM — American Society for Testing and Materials. **ASTM C 131**: Standard teste method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the Los Angeles machine. USA. 2006.

ASTM — American Society for Testing and Materials. **ASTM C 1252**: Standard test method for uncompacted void content of fine aggregate (as influenced by particle shape, surface texture and grading). USA. 2006.

ASTM — American Society for Testing and Materials. **ASTM D 5/D 5 M**: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. West Conshohocken, 2013.

ASTM — American Society for Testing and Materials. **ASTM D 36/D 36 M**: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). West Conshohocken, 2014.

ASTM — American Society for Testing and Materials. **ASTM D 70-17**: Standard Test Method for Density of Semi-Solid Asphalt Binder (Pycnometer Method). West Conshohocken, 2017.

ASTM — American Society for Testing and Materials. **ASTM D 92**: Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester. West Conshohocken, 2017.

ASTM — American Society for Testing and Materials. **ASTM D 113**: Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials. West Conshohocken, 2017.

ASTM — American Society for Testing and Materials. **ASTM D 2042**: Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene. West Conshohocken, 2015.

ASTM – American Society for Testing and Materials. **ASTM D 2872-04**: Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (Rolling thin-film oven test). USA. 2015.

ASTM — American Society for Testing and Materials. **ASTM D 4402/D 4402 M**: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. West Conshohocken, 2015.

ASTM — American Society for Testing and Materials. **ASTM D 4402/D 4402 M**: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. West Conshohocken, 2023.

ASTM — American Society for Testing and Materials. **ASTM D 5821**: Standard test method for determining the percentage of fractured particles in coarse aggregate. USA. 2013.

ASTM — American Society for Testing and Materials. **ASTM D 7173**: Standard Practice for Determining the Separation Tendency of Polymer from Polymer Modified Asphalt. West Conshohocken, 2020.

ASTM — American Society for Testing and Materials. **ASTM D 7175**: Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. West Conshohocken, 2020.

ASTM — American Society for Testing and Materials. **ASTM D 7405**: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. West Conshohocken, 2020.

ASTM — American Society for Testing and Materials. **ASTM E 2550**: Standard Test Method for Thermal Stability by Thermogravimetry. West Conshohocken, 2021.

AZAHAR, Norfazira Mohd *et al.* An overview on natural rubber application for asphalt modification. **International Journal of Agriculture, Forestry and Plantation**, [s.1.], v. 2, p. 212-218, fev. 2016.

BARRA, Breno Salgado *et al.* Diretrizes para a Formulação e Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas. **Revista Pavimentação**. ABPV – Associação Brasileira de Pavimentação. v. 17. p. 38-58, 2010.

BECKER, Yvonne; MÉNDEZ, Maryro P.; RODRIGUEZ, Yajaira. Polymer Modified Asphalt. **Vision Tecnologica**, [s.1.], v. 9, n. 1, 2001.

BEHNOOD, Ali; GHAREHVERAN, Mahsa Modiri. Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. **European Polymer Journal**, [s.1.], n. 112, p. 766-791, mar. 2019.

BERNUCCI, Liedi Bariani *et al.* **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2ª edição, 2022.

BROERING, Wellington Borba; MELO, João Victor Staub de; MANFRO, Alexandre Luiz. Incorporation of nanoalumina into a polymeric asphalt matrix: Reinforcement of the nanostructure, improvement of phase stability, and amplification of rheological parameters. **Construction and Building Materials**, [s.1.], v. 320, fev. 2022.

CADORIN, Natália Dell'Antonio *et al.* Asphalt nanocomposite with titanium dioxide: Mechanical rheological and photoactivity performance. **Construction and Building Materials**, [s.1.], v. 289, p. 123-178, jun. 2021.

CHE, Tiankai *et al.* The effect of styrene-butadiene rubber modification on the properties of asphalt binders: Aging and restoring. **Construction and Building Materials**, [s.1.], n. 316, p. 1-7, jan. 2022.

CHEN, Keke *et al.* Microscopic action and rheological properties of reinforced modified asphalt with varying fiber content. **Case Studies in Construction Materials**, [s.1.], v. 18, jul. 2023.

CORREA, Harrison Lourenço. **Látex de borracha natural (NRL): estudos comparativos entre amostras de origem nacional e importada**. 2015. 147 f. Tese (Doutorado em Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

COSMO, Rafael de Paula. **Modelagem e simulação termodinâmica da precipitação de calcita em condições de poço**. 2013. 220 f. Dissertação (Mestre em Energia) – Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2013.

DALL'ANTONIA, Ana Carolina. **Estudo do desempenho mecânico e térmico de compostos de borracha natural (NR) de diferentes clones**. 2003. 104 f. Dissertação (Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais) – Interunidades Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

DESCARPACK. **Ficha técnica. Luva para procedimento não cirúrgico Descarpack**. Descarpack – Efficiency in Disposables. 2021.

DESCARPACK. **Luva para procedimento não cirúrgico Descarpack**. Descarpack – Efficiency in Disposables. 2023.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Método de Ensaio DNER-ME 078/94**. Agregado graúdo – Adesividade a ligante betuminoso. Rio de Janeiro, 1994.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Método de Ensaio DNER-ME 084/95**. Agregado miúdo – determinação da densidade real. Rio de Janeiro, 1995.

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Método de Ensaio DNER-ME 085/94**. Material finamente pulverizado – determinação da massa específica real. Rio de Janeiro, 1994.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 095/2006 – EM**. Cimentos asfálticos de petróleo – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **DNIT 439/2022 – ME**. Pavimentação – Ligante asfáltico – Avaliação da resistência à fadiga de ligantes asfálticos usando varredura de amplitude linear (LAS – *Linear Amplitude Sweep*) – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022.

DONGWEI, Cao *et al.* Research on performance of natural rubber latex composite-modified asphalt. **Journal of Testing and Evaluation**, [s.1.], v. 50, n. 4, jul. 2022.

EN – European Standard. **EN 12697-24**: Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt, part 24: Resistance to fatigue. CEN, Brussels. 2004.

EN – European Standard. **EN 12697-26**: Bituminous mixtures – test methods for hot mix asphalt, part 26: Stiffness. CEN, Brussels. 2004.

EN – European Standard. **EN 13399**: Bitumen and bituminous binders. Determination of storage stability of modified bitumen. CEN, Brussels. 2017.

FERNANDES, Paulo Roberto Nunes. **Caracterização de ligante asfáltico brasileiro e avaliação da presença de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs)**. 2007. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Química Inorgânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

GAVARI, Leyla Khirkhah. **Obtenção e caracterização de compósitos de borracha natural e polianilina com ferrite de bário**. 2012. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Ciência dos Materiais, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

HASAN, Mohd Rosli Mohd *et al.* Experimental assessments of metanol-based foaming agent in latex modified foamed binders and warm asphalt mixtures. **Journal of Road Engineering**, [s.1.], v. 2, n. 1, p. 84-97, mar. 2022.

HERNANDEZ, Nacu; WILLIAMS, R. Christopher; COCHRAN, Eric W. The battle for the “green” polymer. Different approaches for biopolymer synthesis: bioadvantaged vs. bioreplacement. **Organic & Biomolecular Chemistry**, [s.1.], v. 12, n. 18, p. 2834-2849, 2014.

HOSSEINNEZHAD, Shahrzad *et al.* Surface functionalization of rubber particles to reduce phase separation in rubberized asphalt for sustainable construction. **Journal of Cleaner Production**, [s.1.], v. 225, p. 82-89, 2019.

HOU, Xiangdao *et al.* Identification of asphalt aging characterization by spectrophotometry technique. **Fuel**, [s.1.], n. 226, 230-239, ago. 2018.

IBRAHIM, Suhawati; DAIK, Rusli; ABDULLAH, Ibrahim. Functionalization of liquid natural rubber via oxidative degradation of natural rubber. **Polymers**, [s.1.], n. 6(12), p. 2928-2941, nov. 2014.

ICDD – International Centre for Diffraction Data. **PDF Nº 05-0586**. Disponível em: <<http://www.icdd.com/products/>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

IKEDA, Yuko *et al.* Basic science of rubber. In: Rubber Science. **Springer Singapore**, Singapore, 2018.

JIN, Xin *et al.* Rheological properties and micro-characteristics of polyurethane composite modified asphalt. **Construction and Building Materials**, [s.1.], v. 234, fev. 2020.

JITSANGIAM, Peerapong *et al.* An examination of natural rubber modified asphalt: Effects of rubber látex contents based on macro- and micro-observation analyses. **Construction and Building Materials**, [s.1.], v. 289, jun. 2021.

JOBLING, Steve. Improving starch for food and industrial applications. **Current Opinion in Plant Biology**, [s.1.], v. 7, n. 2, p. 210-218, abr. 2004.

JOHNS, Jobish; RAO, Vijaya Iakshmi. Characterization of natural rubber latex/chitosan blends. **International Journal of Polymer Analysis and Characterization**, [s.1.], v. 13, p. 280-291, ago. 2008.

KAMAL, Mazlina Mustafa; HADITHON, Kamarul Arifin; BAKAR, Rohani Abu. Natural Rubber Modified Asphalt, **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science**, [s.l.], v. 498, dez. 2020.

KARAHRODI, Marzieh Habibi *et al.* Modification of thermal and rheological characteristics of bitumen by waste PET/GTR blends. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 134, p. 157-166, mar. 2017.

KHADIVAR, Alireza; KAVUSSI, Amir. Rheological characteristics of SBR and NR polymer modified bitumen emulsions at average pavement temperatures. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 47, p. 1099-1105, out. 2013.

KISHORE, Kintali Sai Nanda; GOTTALA, Anirudh. A study on effect of addition of natural rubber on the properties of bitumen & bituminous mixes. **International Journal of Science Technology & Engineering (IJSTE)**, [s.l.], v. 2, n. 1, p. 206-212, ago. 2015.

KRISHNAPRIYA, M. G. Performance evaluation of natural rubber modified bituminous mixes. **Journal of Civil, Structural, Environmental, Water resources and Infrastructure Engineering Research (JCSEWIER)**, [s.l.], v. 5, n. 1, p. 1-12, fev. 2015.

KUMAR, Rohitash; JUNEJA, Deepak. Effect of natural rubber on the properties of bitumen and bituminous mixes. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)**, [s.l.], v. 8, n. 9, p. 526-530, jul. 2019.

LAMONTAGNE, J. *et al.* Comparison by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques: application to road bitumens. **Fuel**, [s.l.], v. 80, n. 4, p. 483-488, mar. 2001.

LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. **Manual LCPC d'aide à la formulation des enrobes**. Paris, France. Septembre, 2007.

LESUEUR, Didier. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. **Advances in Colloid and Interface Science**, [s.l.], v. 145, n. 1-2, p. 42-82, jan. 2009.

LI, Ruoyu *et al.* Developments of nano materials and technologies on asphalt materials – A review. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v.143, p. 633-648, jul. 2017.

LIANG, Ming *et al.* Investigation of the rheological properties and storage stability of CR/SBS modified asphalt. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 74, p. 235-240, jan. 2015.

LU, Xiaohu; TALON, Yohann; REDELIUS, Per. Aging of bituminous binders – Laboratory tests and field data. **The 4th Eurasphalt and Eurobitume Congress**. Copenhagen, [s.l.], p. 1-12, jan. 2008.

MA, Yuetan *et al.* Recycled polyethylene and crumb rubber composites modified asphalt with improved aging resistance and thermal stability. **Journal of Cleaner Production**, [s.l.], n. 334, fev. 2022.



MA, Tao *et al.* Influences by air voids on fatigue life of asphalt mixture based on discrete element method. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 126, n. 15, p. 785-799, nov. 2016.

MALITHONG, Saovaros; THONGPIN, Chanchai. The modification of asphalt emulsion using pre-vulcanized natural rubber latex for highway application. **Trans Tech Publications**, [s.l.], v. 93-94, p. 639-642, 2010.

MANFRO, Alexandre Luiz *et al.* Permanent deformation performance under moisture effect of an asphalt mixture modified by calcium carbonate nanoparticles. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 342, parte B, ago. 2022.

MARTINS, Adam Macedo. **Análise da Qualidade das Tensões obtidas na Simulação de Escoamentos de Fluidos Viscoelásticos usando a Formulação Log-Conformação**. 2016. 106 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

MASHAAN, Nuha S. *et al.* Investigating the engineering properties of asphalt binder modified with waste plastic polymer. **Ain Shams Engineering Journal**, [s.l.], v. 12, n. 2, p. 1569-1574, jun. 2021.

MASSON, Jean François; PELLETIER, L.; COLLINS, P. Rapid FTIR method for quantification of styrene-butadiene type copolymers in bitumen. **Journal of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 79, n. 6, p. 1034-1041, fev. 2001.

MELO, João Victor Staub de. **Desenvolvimento e Estudo do Comportamento Reológico e Desempenho Mecânico de Concretos Asfálticos Modificados com Nanocompósitos**. 2014. 414 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MELO, João Victor Staub de; TRICHÊS, Glicério; ROSSO, Lucas Torres de. Experimental evaluation of the influence of reinforcement with Multi-Walled Carbon Nanotubes (MWCNTs) on the properties and fatigue life of hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 162, p. 369-382, fev. 2018.

MINA, M. F.; HAQUE, M. E. Development of Crystal structure in natural rubber during uniaxial deformation as revealed by x-ray scattering method. **Institute of Nuclear Science & Technology – Atomic Energy Research Establishment**, Bangladesh, 2004.

NANJEGOWDA, Vinay Hosahally; BILIGIRI, Krishna Prapoorna. Recyclability of rubber in asphalt roadway systems: A review of applied research and advancement in technology. **Resources, Conservation & Recycling**, [s.l.], v. 155, abr. 2020.

PARVEZ, M. Anwar *et al.* Utilization of sulfur and crumb rubber in asphalt modification. **Journal of Applied Polymer Science**, [s.l.], v. 131, n. 7, jan. 2014.

PAUL, Dibyendu *et al.* Effect of rubber polymeric materials on moisture susceptibility of asphalt mixtures: Optimization and evaluation study. **Materials Today: Proceedings**, [s.l.], v. 57, parte 2, p. 454-459, 2022.

PAMPLONA, Thaís Ferreira; NUNEZ, Javier Yesid Mahecha; FAXINA, Adalberto Leandro. Desenvolvimentos recentes em ensaios de fadiga em ligantes asfálticos. **Transportes**, [s.1.], v. 22, n. 3, p. 12-25, set. 2014.

PEREZ, Ignacio Perez *et al.* Use of lignin biopolymer from industrial waste as bitumen extender for asphalt mixtures. **Journal of Cleaner Production**, [s.1.], n. 220, p. 87-98, mai. 2019.

POOVANESHVARAN, Sharvin; HASAN, Mohd Rosli Mohd; JAYA, Ramadhansyah Putra. Impacts of recycled crumb rubber powder and natural rubber latex on the modified asphalt rheological behavior, bonding, and resistance to shear. **Construction and Building Materials**, [s.1.], v. 234, fev. 2020.

RAGAB, A. A. *et al.* Improving of Temperature Susceptibility of Asphalt 60/70 using Synthesized Reactive Rubber Nanoparticles for use in Different Climate. **Journal of Civil & Environmental Engineering**, [s.1.], v. 7, n. 5, p. 1-9, 2017.

REPAR – Refinaria Presidente Getúlio Vargas. **Certificado de ensaio: Cimento Asfáltico CAP 50/70**. 2046. ed. Araucária: [s.1.], 2017.

RIPPEL, Márcia Maria. **Caracterização microestrutural de filmes e partículas de látex de borracha natural**. Tese (Doutorado em Ciências). 2005. 350 f. Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, SP, 2005.

SANI, Ashiru *et al.* Behavioural interface-bonding and chemical characterization of silane and wax based additives on latex modified asphalt binders. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, [s.1.], v. 106, abr. 2021.

SAOWAPARK, Wattanapahu; JUBSILP, Chanchira; RIMDUSIT, Sarawut. Natural rubber latex-modified asphalts for pavement application: effects of phosphoric acid and sulphur addition. **Road Mater Pavement**, [s.1.], v. 20, n. 1, p. 211-224, set. 2017.

SCHUSTER, Luana. **Avaliação da contribuição da lã de aço associada ao nanotubo de carbono na reparação de danos em misturas asfálticas submetidas ao aquecimento por micro-ondas**. 2020. 209 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

SCHUSTER, Luana; MELO, João Victor Staub de; DEL CARPIO, Joe Arnaldo Villena. Effects of the associated incorporation of steel wool and carbono nanotube on the healing capacity and mechanical performance of an asphalt mixture. **International Journal of Fatigue**, [s.1.], v. 168, mar. 2023.

SHAFII, Mohd Amin *et al.* Effect of Blending Temperature and Blending Time on Physical Properties of NRL-Modified Bitumen. **International Journal of Applied Engineering Research**, [s.1.], v. 12, n. 13, p. 3844-3849, 2017.

SHAFFIE, Ekarizan *et al.* Investigation on rutting performance of nanopolyacrylate and natural rubber latex polymer modified asphalt binder mixes. **Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)**, [s.1.], v. 78, n. 7-3, p. 11-15, jan. 2016.

SHAN, Liyan *et al.* Effect of styrene-butadiene-styrene (SBS) on the rheological behavior of asphalt binders. **Construction and Building Materials**, [s.1.], v. 231, jan. 2020.

SIDDIQUI, Mohammad Nahid; ALI, Mohammad Farhat; SHIROKOFF, John. Use of X-ray diffraction in assessing the aging pattern of asphalt fractions. **Fuel**, [s.1.], v. 81, n. 1, p. 51-58, jan. 2002.

SIN, Lee Tin; TUEEN, Bee Soo. Biopolymers and challenges. **Plastics and Sustainability – Practical Approaches**, cap. 7, p. 205-253, 2023.

SRIRING, Manus. *et al.* Viscoelastic and mechanical properties of large- and small-particle natural rubber before and after vulcanization. **Polymer Testing**, [s.1.], v. 70, p. 127-134, set. 2018.

SISWANTO, Henri. The effect of latex on permanent deformation of asphalt concrete wearing course. **Construction and Building Materials**, [s.1.], v. 171, p. 1390-1394, 2017.

SURESH, Machavarapu; PAL, Manish. Utilization of recycled concrete wastes and latex polymer for sustainable road construction. **Materials Today: Proceedings**, [s.1.], n. 47, parte 14, p. 4171-4176, 2021.

SWETHA, D. Vasavi; RANI, K. Durga. Effect of Natural Rubber on the Properties of Bitumen and Bituminous Mixes. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, [s.1.], v. 5, n. 10, p. 9-21, out. 2014.

TEIXEIRA, Heloise Sasso. **Estudo e caracterização de pavimentação asfáltica modificada empregando os polímeros elastoméricos látex de borracha natural (NRL) e estireno-butadieno-estireno (SBS) em sua composição.** 2018. 102 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

TUNTIWORAWIT, Nrachai; LAVANSIRI, Direk; PHROMSORN, Chayatan. The modification of asphalt with natural rubber latex. **Proceeding of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, [s.1.], v. 5, 2005.

VARKEY, Jyothi T.; AUGUSTINE, Sunny; THOMAS, Sabu. Thermal degradation of natural rubber/styrene butadiene rubber latex blends by thermogravimetric method. **Polymer-Plastics Technology and Engineering**, [s.1.], v. 39, n. 3, p. 415-435, jul. 2010.

VICHITCHOLCHAI, Nopparat; PANMAI, Jaratsri; NA-RANONG, Nuchanat. Modification of Asphalt Cement by Natural Rubber for Pavement Construction. **Rubber Thai Journal**, [s.1.], v. 1, p. 654-664, 2012.

VILLENA, Joe; MENDES, Gabriel Di Marcantonio; DALLEDONE, Renato dos Santos. Misturas asfálticas modificadas com 5% de látex reciclado de luvas descartadas pela rede de saúde. **Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade (Congestas)**, v. 5, p. 1645-1653, 2017.

WANG, P. E. Yuhong *et al.* Effects of aging on the properties of asphalt at the nanoscale. **Construction and Building Materials**, [s.1.], v. 80, p. 244-254, abr. 2015.

WEBER, Fernanda Hart; COLLARES-QUEIROZ, Fernanda Paula; CHANG, Yoon Kil. Caracterização físico-química, reológica, morfológica e térmica dos amidos de milho normal, ceroso e com alto teor de amylose. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, [s.1.], v. 29, n. 4, p. 748-753, out.-dez. 2009.

WEN, Yong *et al.* The use of natural rubber latex as a renewable and sustainable modifier of asphalt binder. **International Journal of Pavement Engineering**, [s.1.], v. 18, n. 6, set. 2017.

YAACOB, Haryati *et al.* Rheological properties of styrene butadiene rubber modified bitumen binder. **Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)**, [s.1.], v. 78, n. 7-2, p. 121-126, jul. 2016.

YANG, Fan *et al.* Study on preparation and performance of a thermosetting polyurethane modified asphalt binder for bridge deck pavements. **Construction and Building Materials**, [s.1.], v. 326, abr. 2022.

YILDIRIM, Yetkin. Polymer modified asphalt binders. **Construction and Building Materials**, [s.1.], v. 21, n. 1, p. 66-72, jan. 2007.

YUAN, Jie *et al.* Impacts of multiple-polymer components on high temperature performance characteristics of airfield modified binders. **Construction and Building Materials**, [s.1.], v. 134, p. 694-702, mar. 2017.

## APÊNDICE A – COMPORTAMENTO DO PARÂMETRO $|G^*|/\text{sen } \delta$

Figura A.1:  $|G^*|/\text{sen } \delta$  versus teor de incorporação de látex, na condição virgem, para as diferentes temperaturas de ensaio.

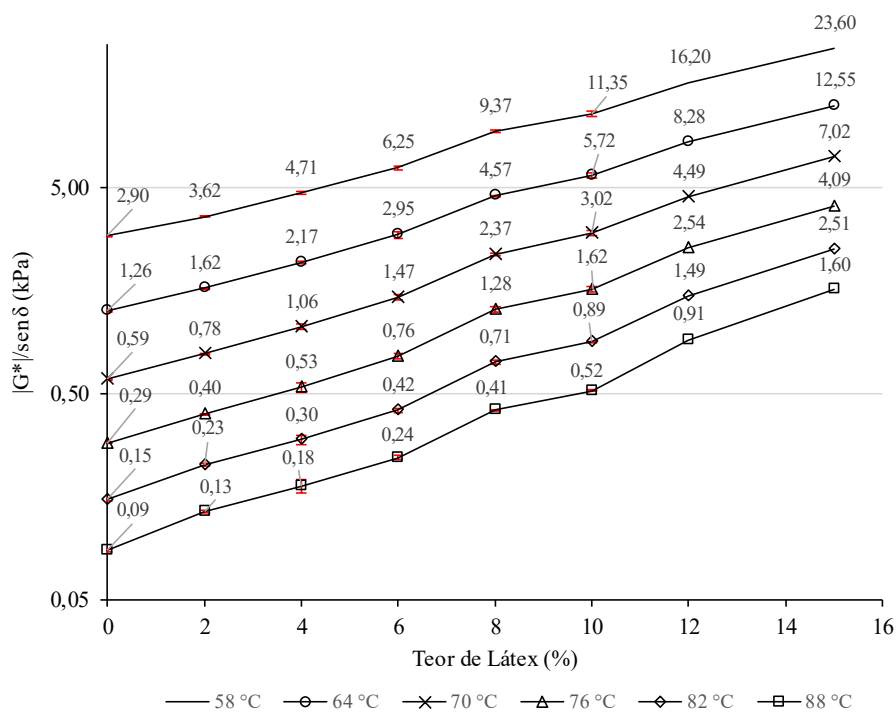
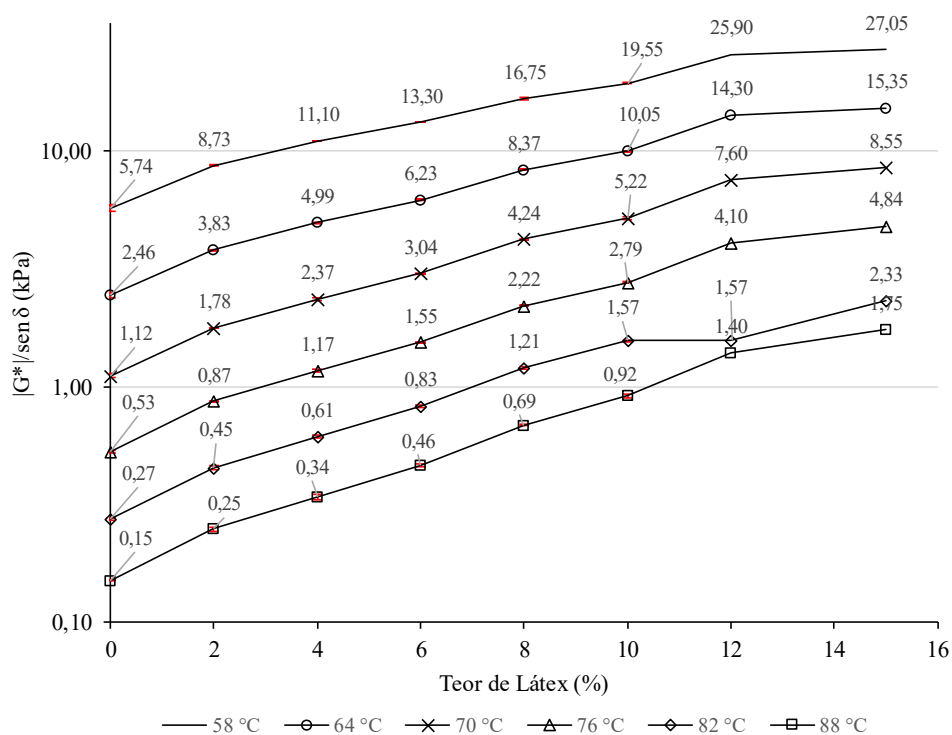


Figura A.2:  $|G^*|/\text{sen } \delta$  versus teor de incorporação de látex, na condição envelhecida (RTFOT), para as diferentes temperaturas de ensaio.



**APÊNDICE B – COMPORTAMENTO REOLÓGICO EM TEMPERATURAS  
INTERMEDIÁRIAS PARA OS LIGANTES ASFÁLTICOS DE REFERÊNCIA E  
MODIFICADO COM 12% DE LÁTEX**

Tabela B.1: Módulo de cisalhamento dinâmico (kPa) para os ligantes asfálticos de referência e modificado com 12% de látex em função das diferentes frequências e temperaturas de teste.

Frequência	Temperatura						
	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C
<b>Ligante Asfáltico de Referência</b>							
<b>0,10 Hz</b>	26.426,20	11.196,30	4.030,18	1.243,78	331,80	81,35	23,20
<b>0,40 Hz</b>	46.528,60	21.839,00	8.877,09	3.168,35	955,94	258,02	77,73
<b>1,00 Hz</b>	65.166,10	32.574,10	14.247,20	5.574,49	1.849,98	539,20	170,30
<b>2,00 Hz</b>	82.602,70	43.248,50	19.766,60	8.270,32	2.948,07	913,15	300,32
<b>5,01 Hz</b>	110.552,00	61.401,80	29.620,40	13.450,40	5.308,89	1.802,04	630,36
<b>10,00 Hz</b>	135.344,00	78.626,30	39.216,50	18.882,00	7.985,04	2.927,35	1.075,11
<b>30,00 Hz</b>	181.123,00	112.247,00	57.996,30	30.677,30	14.439,60	5.989,72	2.423,43
<b>Ligante Modificado com 12% de Látex</b>							
<b>0,10 Hz</b>	29.183,20	13.132,10	5.350,47	2.017,57	658,39	189,82	62,29
<b>0,40 Hz</b>	48.107,40	23.760,00	10.375,50	4.419,37	1.628,49	522,00	180,83
<b>1,00 Hz</b>	64.686,20	34.064,60	15.470,60	7.091,11	2.836,44	987,13	357,33
<b>2,00 Hz</b>	79.696,60	43.780,90	20.476,40	9.883,85	4.187,23	1.557,67	587,17
<b>5,01 Hz</b>	103.351,00	59.691,80	29.189,80	14.959,80	6.833,93	2.751,06	1.115,64
<b>10,00 Hz</b>	123.962,00	74.527,40	37.269,20	19.968,80	9.631,46	4.125,78	1.758,12
<b>30,00 Hz</b>	162.206,00	103.207,00	53.008,60	30.316,50	15.825,80	7.501,54	3.504,20

Tabela B.2: Variação do ângulo de fase para os ligantes asfálticos de referência e modificado com 12% de látex em função das diferentes frequências e temperaturas de ensaio.

Frequência	Temperatura						
	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C
<b>Ligante Asfáltico de Referência</b>							
<b>0,10 Hz</b>	38,72	45,45	53,92	62,23	69,83	76,02	79,99
<b>0,40 Hz</b>	34,16	40,41	48,34	56,89	65,37	72,45	77,19
<b>1,00 Hz</b>	31,70	37,63	44,92	53,17	62,04	69,78	74,94
<b>2,00 Hz</b>	29,76	35,53	42,57	50,42	59,32	67,55	73,14
<b>5,01 Hz</b>	27,31	32,83	39,66	46,94	55,55	64,24	70,51
<b>10,00 Hz</b>	25,47	30,84	37,60	44,48	52,72	61,55	68,22
<b>30,00 Hz</b>	22,75	27,82	34,64	40,94	48,39	56,91	64,11
<b>Ligante Modificado com 12% de Látex</b>							
<b>0,10 Hz</b>	35,01	41,19	48,26	54,88	61,35	67,07	70,74
<b>0,40 Hz</b>	30,76	36,88	43,71	50,07	56,97	63,41	67,93
<b>1,00 Hz</b>	28,68	34,04	41,02	47,00	53,83	60,72	65,89
<b>2,00 Hz</b>	27,01	32,14	39,16	44,86	51,48	58,55	64,05
<b>5,01 Hz</b>	24,99	29,89	36,84	42,21	48,47	55,49	61,41
<b>10,00 Hz</b>	23,55	28,25	35,27	40,39	46,35	53,16	59,16
<b>30,00 Hz</b>	21,49	25,87	33,05	37,77	43,17	49,49	55,05

Tabela B.3: Módulo de armazenamento cisalhante ( $|G' |$ ) e módulo de perda cisalhante ( $|G'' |$ ), em kPa, para o ligante asfáltico de referência em função das diferentes frequências e temperaturas de ensaio.

Frequência		Temperatura						
		5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C
Módulo de Armazenamento	0,10 Hz	20.617,49	7.854,39	2.373,23	579,55	114,42	19,66	4,03
	0,40 Hz	38.502,61	16.628,07	5.900,18	1.730,67	398,36	77,79	17,24
	1,00 Hz	55.444,16	25.797,05	10.088,68	3.341,97	867,51	186,37	44,25
	2,00 Hz	71.711,13	35.198,18	14.557,91	5.269,79	1.504,36	348,70	87,09
	5,01 Hz	98.231,51	51.593,66	22.802,50	9.183,28	3.003,54	783,27	210,37
	10,00 Hz	122.194,87	67.510,26	31.069,57	13.471,57	4.836,98	1.394,61	398,91
	30,00 Hz	167.028,02	99.273,10	47.714,31	23.172,32	9.587,98	3.269,77	1.058,36
Módulo de Perda	0,10 Hz	16.530,67	7.979,08	3.257,32	1.100,51	311,45	78,94	22,84
	0,40 Hz	26.123,93	14.158,01	6.632,54	2.653,91	868,98	246,01	75,79
	1,00 Hz	34.242,74	19.889,30	10.059,88	4.461,63	1.633,97	505,97	164,45
	2,00 Hz	40.996,58	25.130,08	13.371,08	6.373,97	2.535,35	843,95	287,42
	5,01 Hz	50.718,00	33.290,77	18.905,40	9.827,55	4.377,57	1.622,91	594,22
	10,00 Hz	58.192,89	40.304,58	23.929,38	13.230,53	6.353,31	2.573,80	998,37
	30,00 Hz	70.051,29	52.385,50	32.968,40	20.103,24	10.796,88	5.018,50	2.180,11

Tabela B.4: Módulo de armazenamento cisalhante ( $|G' |$ ) e módulo de perda cisalhante ( $|G'' |$ ), em kPa, para o ligante asfáltico modificado com 12% de látex em função das diferentes frequências e temperaturas de ensaio.

Frequência		Temperatura						
		5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C
Módulo de Armazenamento	0,10 Hz	23.902,00	9.882,89	3.561,89	1.160,66	315,68	73,97	20,54
	0,40 Hz	41.339,08	19.006,66	7.500,41	2.836,53	887,76	233,69	67,95
	1,00 Hz	56.748,79	28.228,86	11.672,92	4.836,14	1.673,94	482,83	145,94
	2,00 Hz	71.004,76	37.073,30	15.877,56	7.006,50	2.607,65	812,71	256,96
	5,01 Hz	93.677,34	51.752,34	23.360,36	11.080,66	4.531,42	1.558,45	533,96
	10,00 Hz	113.634,22	65.652,22	30.429,61	15.209,83	6.648,74	2.473,62	901,36
	30,00 Hz	150.925,02	92.866,37	44.433,66	23.964,85	11.542,09	4.873,34	2.007,42
Módulo de Perda	0,10 Hz	16.743,76	8.647,58	3.992,55	1.650,29	577,78	174,82	58,80
	0,40 Hz	24.604,92	14.257,79	7.169,02	3.388,94	1.365,23	466,77	167,58
	1,00 Hz	31.046,40	19.066,42	10.152,95	5.186,09	2.289,83	860,98	326,17
	2,00 Hz	36.192,16	23.288,15	12.930,05	6.971,33	3.276,14	1.328,85	527,95
	5,01 Hz	43.657,58	29.745,70	17.502,51	10.050,60	5.115,55	2.267,06	979,56
	10,00 Hz	49.536,26	35.272,08	21.518,18	12.938,86	6.968,45	3.302,01	1.509,48
	30,00 Hz	59.434,21	45.028,01	28.906,08	18.568,15	10.827,56	5.702,95	2.872,23

**APÊNDICE C – COMPORTAMENTO REOLÓGICO DAS MISTURAS  
ASFÁLTICAS**

Tabela C.1: Comportamento das misturas asfálticas para o módulo dinâmico (MPa).

Frequência	Temperatura						
	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C
<b>Mistura de Referência (Schuster, 2020)</b>							
<b>0,1 Hz</b>	16.718	11.200	6.657	3.141	1.465	692	281
<b>0,2 Hz</b>	18.294	12.868	7.984	4.078	1.989	955	289
<b>0,5 Hz</b>	20.273	15.090	10.113	5.557	2.989	1.495	532
<b>1 Hz</b>	21.518	16.561	11.584	6.830	3.914	1.979	755
<b>2 Hz</b>	22.715	18.019	13.246	8.226	4.976	2.760	1.039
<b>5 Hz</b>	24.358	20.131	15.546	10.333	6.683	3.876	1.703
<b>10 Hz</b>	25.539	21.707	17.267	12.064	8.132	5.006	2.317
<b>15 Hz</b>	26.209	22.530	18.150	13.078	9.014	5.624	2.715
<b>20 Hz</b>	27.439	23.919	20.096	14.458	9.770	6.119	3.004
<b>Mistura Modificada (12% de Látex)</b>							
<b>0,1 Hz</b>	15.306	11.604	8.264	5.256	2.871	1.315	606
<b>0,2 Hz</b>	16.312	12.610	9.286	6.174	3.532	1.741	774
<b>0,5 Hz</b>	17.586	13.974	10.817	7.650	4.740	2.373	1.183
<b>1 Hz</b>	18.450	14.974	11.884	8.669	5.661	3.032	1.526
<b>2 Hz</b>	19.309	16.005	12.971	9.764	6.671	3.761	1.922
<b>5 Hz</b>	20.260	17.490	14.508	11.542	8.207	4.825	2.657
<b>10 Hz</b>	21.085	18.543	15.615	12.620	9.293	5.747	3.406
<b>15 Hz</b>	21.537	19.108	16.287	13.394	9.996	6.436	4.122
<b>20 Hz</b>	21.952	20.276	17.125	13.607	10.694	6.528	4.442

Tabela C.2: Variação do ângulo de fase nas diferentes frequências e temperaturas das misturas asfálticas analisadas.

Temperatura	Frequência (Hz)								
	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	15	20
<b>Mistura de Referência (Schuster, 2020)</b>									
<b>0 °C</b>	9,9	8,6	7,0	6,1	5,3	4,3	3,6	3,0	2,3
<b>5 °C</b>	16,5	14,7	12,1	10,5	9,3	7,7	6,6	5,8	4,5
<b>10 °C</b>	24,1	21,7	18,8	16,4	14,4	12,2	10,6	9,9	7,4
<b>15 °C</b>	34,5	31,6	27,7	24,8	22,1	18,8	16,7	15,5	14,0
<b>20 °C</b>	42,0	40,0	36,2	33,0	29,8	25,7	23,2	21,9	21,2
<b>25 °C</b>	45,2	45,2	43,3	41,0	37,9	33,6	30,5	28,9	28,3
<b>30 °C</b>	44,2	47,2	49,0	49,2	48,1	45,1	42,6	41,8	41,7
<b>Mistura Modificada (12% de Látex)</b>									
<b>0 °C</b>	8,1	7,3	6,4	5,8	5,4	4,9	4,5	3,9	3,5
<b>5 °C</b>	11,8	10,6	9,0	8,1	7,5	6,8	6,2	6,0	5,3
<b>10 °C</b>	16,9	15,3	13,0	11,6	10,6	9,4	8,6	8,2	7,6
<b>15 °C</b>	23,6	21,6	18,6	16,6	14,9	13,0	11,9	11,0	10,5
<b>20 °C</b>	31,7	29,2	25,9	23,2	20,9	18,3	16,6	15,9	15,1
<b>25 °C</b>	39,2	37,7	34,9	32,4	29,6	26,4	24,7	23,0	22,5
<b>30 °C</b>	41,6	37,9	36,3	33,8	31,3	26,9	23,65	23,0	21,9



Tabela C.3: Módulo de perda (E2) e módulo de armazenamento (E1) da mistura de referência nas diferentes frequências e temperaturas.

Frequência	Temperatura							
	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	
<b>Mistura de Referência (Schuster, 2020)</b>								
Módulo de Perda (E2)	0,1 Hz	2.874,31	3.180,97	2.718,26	1.756,99	980,28	491,02	195,90
	0,2 Hz	2.735,60	3.265,36	2.952,06	2.156,73	1.278,50	677,64	212,05
	0,5 Hz	2.470,66	3.163,14	3.259,07	2.567,79	1.765,32	1.025,30	401,51
	1 Hz	2.286,59	3.018,00	3.270,64	2.879,96	2.131,72	1.298,34	571,53
	2 Hz	2.098,20	2.911,94	3.294,15	3.080,90	2.472,94	1.695,43	773,34
	5 Hz	1.826,33	2.697,28	3.285,26	3.329,97	2.898,14	2.144,95	1.206,30
	10 Hz	1.603,61	2.494,94	3.176,29	3.466,72	3.203,54	2.540,74	1.568,32
	15 Hz	1.371,67	2.276,80	3.120,51	3.494,94	3.362,11	2.717,98	1.809,64
	20 Hz	1.101,18	1.876,66	2.588,28	3.497,71	3.533,07	2.900,95	1.998,35
Módulo de Armazenamento (E1)	0,1 Hz	16.469,06	10.738,78	6.076,74	2.556,44	10.88,71	487,61	201,45
	0,2 Hz	18.088,31	12.446,80	7.418,19	3.505,71	1.523,66	672,93	196,36
	0,5 Hz	20.121,89	14.754,75	9.573,46	4.890,91	2.412,00	1.088,02	349,02
	1 Hz	21.396,16	16.283,68	11.112,69	6.232,80	3.282,56	1.493,57	493,33
	2 Hz	22.617,89	17.782,15	12.829,85	7.587,34	4.318,00	2.177,87	693,88
	5 Hz	24.289,44	19.949,48	15.194,91	9.781,73	6.021,90	3.228,40	1.202,10
	10 Hz	25.488,60	21.563,14	16.972,34	11.555,17	7.474,41	4.313,32	1.705,54
	15 Hz	26.173,08	22.414,66	17.879,73	12.602,36	8.363,52	4.923,61	2.023,97
	20 Hz	27.416,90	23.845,27	19.928,62	14.028,54	9.108,80	5.387,64	2.242,90

Tabela C.4: Módulo de perda (E2) e módulo de armazenamento (E1) da mistura modificada nas diferentes frequências e temperaturas.

Frequência	Temperatura							
	0 °C	5 °C	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	
<b>Mistura Modificada (12% de Látex)</b>								
Módulo de Perda (E2)	0,1 Hz	2.156,70	2.363,06	2.409,41	2.104,23	1.506,76	832,32	402,67
	0,2 Hz	2.072,68	2.308,81	2.442,51	2.267,79	1.723,36	1.066,18	473,86
	0,5 Hz	1.945,04	2.198,06	2.433,41	2.440,20	2.066,72	1.359,40	700,65
	1 Hz	1.864,49	2.109,86	2.389,61	2.469,52	2.230,30	1.624,89	848,91
	2 Hz	1.817,14	2.075,22	2.374,91	2.510,77	2.385,24	1.860,57	998,78
	5 Hz	1.712,97	2.055,73	2.369,61	2.596,50	2.570,14	2.145,36	1.204,41
	10 Hz	1.654,31	2.002,69	2.334,99	2.591,52	2.655,04	2.401,69	1.366,31
	15 Hz	1.464,88	1.997,38	2.337,14	2.555,79	2.730,24	2.514,94	1.611,26
	20 Hz	1.340,14	1.872,95	2.264,96	2.479,68	2.776,82	2.498,16	1.656,81
Módulo de Armazenamento (E1)	0,1 Hz	15.153,80	11.360,84	7.905,49	4.816,40	2.444,42	1.018,71	453,54
	0,2 Hz	16.179,78	12.396,83	8.959,02	5.742,42	3.083,60	1.376,99	611,99
	0,5 Hz	17.478,11	13.800,04	10.540,25	7.250,90	4.265,71	1.945,03	953,82
	1 Hz	18.355,55	14.824,61	11.641,27	8.310,34	5.203,68	2.560,42	1.268,08
	2 Hz	19.223,31	15.869,89	12.751,73	9.436,18	6.230,00	3.268,55	1.642,70
	5 Hz	20.187,96	17.368,77	14.313,68	11.246,67	7.794,18	4.321,81	2.368,90
	10 Hz	21.020,00	18.435,04	15.439,43	12.351,05	8.906,17	5.221,65	3.119,94
	15 Hz	21.487,63	19.003,82	16.118,95	13.148,41	9.616,43	5.924,83	3.794,04
	20 Hz	21.911,06	20.189,81	16.975,06	13.379,15	10.327,19	6.031,09	4.121,45