

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

Gabriela de Souza Dias

**ANÁLISE DA MODIFICAÇÃO DE LIGANTE ASFÁLTICO PELA
ADIÇÃO DE POLÍMERO ESTIRENO-BUTADIENO-ESTIRENO (SBS)
NA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E REOLÓGICA**

Santa Maria, RS
2023

Gabriela de Souza Dias

**ANÁLISE DA MODIFICAÇÃO DE LIGANTE ASFÁLTICO PELA ADIÇÃO DE
POLÍMERO ESTIRENO-BUTADIENO-ESTIRENO (SBS) NA CARACTERIZAÇÃO
FÍSICA E REOLÓGICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Santa Maria, RS
2023

Gabriela de Souza Dias

**ANÁLISE DA MODIFICAÇÃO DE LIGANTE ASFÁLTICO PELA ADIÇÃO DE
POLÍMERO ESTIRENO-BUTADIENO-ESTIRENO (SBS) NA CARACTERIZAÇÃO
FÍSICA E REOLÓGICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Civil**.

Aprovado em 20 de julho de 2023.

Luciano Pivoto Specht, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Silvio Lisboa Schuster, Dr. (UFSM)

Victória Nunes Ramos, Eng. Civil (UFSM)

Santa Maria, RS
2023

Dedico este trabalho aos meus pais, Éderson Dias e Aline de Souza.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela minha vida e por ter permitido que eu tivesse saúde e determinação para alcançar os meus objetivos.

Aos meus pais e irmã, por todo apoio e compreensão nos momentos mais difíceis e por nunca medirem esforços para que eu pudesse lutar pelos meus sonhos, sem vocês nada disso seria possível. Agradeço à minha família como um todo, por compreenderem a minha ausência ao longo desses anos. Ao meu companheiro de vida, pela cumplicidade, paciência e por me lembrar todos os dias do quanto sou capaz.

Agradeço à Universidade Federal de Santa Maria, pelo ensino público e de qualidade. À Coordenação do curso de Engenharia Civil por todo o suporte. Ao corpo docente, por terem sido essenciais durante a minha formação.

Ao meu orientador, professor Luciano Pivoto Specht, pela confiança em mim depositada, por todo amparo e ensinamentos durante a graduação, especialmente na realização deste trabalho. Lhe admiro muito, o senhor é uma inspiração profissional.

Agradeço a todos os integrantes do GEPPASV, pelo convívio e amizade, os dias se tornaram mais leves ao lado de vocês. Em especial ao Lorenzo, Técnico do Laboratório, por todo auxílio na realização dos ensaios, ao Silvio Lisboa Schuster e a Victoria Nunes Ramos, por toda ajuda e incentivo, vocês foram essenciais para a realização dessa pesquisa.

À Bethania Machado, pela primeira oportunidade na iniciação científica, despertando meu interesse pela pavimentação. Ao Gabriel Wegener, pelo companheirismo ao longo de toda a trajetória.

Agradeço à empresa Kraton, pelo fornecimento dos polímeros, possibilitando a realização deste trabalho científico e ao engenheiro Rafael Martins, pela disponibilidade e assistências prestadas. À Betunel, pelo fornecimento do enxofre duplamente ventilado.

Enfim, agradeço à todas as pessoas que de alguma forma contribuíram e me incentivaram ao longo dessa caminhada. Muito obrigada!

RESUMO

ANÁLISE DA MODIFICAÇÃO DE LIGANTE ASFÁLTICO PELA ADIÇÃO DE POLÍMERO ESTIRENO-BUTADIENO-ESTIRENO (SBS)

AUTORA: Gabriela de Souza Dias
ORIENTADOR: Luciano Pivoto Specht

O intenso processo de degradação dos revestimentos asfálticos nos últimos anos, pela crescente ação do tráfego e pelas condições climáticas mais severas, tem levado ao desenvolvimento de pesquisas na busca de novas tecnologias, a fim de melhorar o desempenho e a vida útil dos pavimentos. Nesse sentido, a modificação dos ligantes asfálticos por polímeros tem se mostrado uma opção tecnológica promissora na melhoria das propriedades físicas, químicas e reológicas. Esse trabalho tem como objetivo avaliar a influência da adição de diferentes teores de polímero SBS (2,5%, 5,0% e 7,5%) em formato de *pellets* no ligante 50/70 convencional, caracterizado nas condições virgem e envelhecida à curto prazo em RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*). Foram realizados os ensaios convencionais de ponto de amolecimento, penetração e recuperação elástica. Para caracterização reológica, foi obtido a viscosidade Brookfield, o PG de alta temperatura e as curvas mestras de Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase, por meio do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR). No tratamento dos dados, foi utilizada a modelagem 2S2P1D. A avaliação do dano foi feita pelos ensaios de MSCR (*Multiple Stress Creep*) para deformação permanente e LAS (*Linear Amplitude Sweep*) para fadiga. Por fim, a estabilidade à estocagem dos ligantes modificados foi verificada pelo ensaio de Separação de Fases. O protocolo de mistura realizado em alto e baixo cisalhamento, com reticulação pela adição de enxofre, provocou excessivo enrijecimento no CAP, já a adição de SBS elevou a rigidez por ação do polímero, ao mesmo tempo que gerou comportamento protetivo frente ao envelhecimento. A ocorrência conjunta desses efeitos impediu a obtenção de tendências claras quanto a porcentagem de SBS adicionado na análise das propriedades físicas e reológicas. Os elevados valores de viscosidade obtidos sugerem a necessidade de temperaturas superiores às usuais para a obtenção de trabalhabilidade adequada a compactação e mistura. A análise das curvas mestras indicou maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico e menores valores de ângulo de fase. Observou-se também um acréscimo significativo no PG de alta temperatura, que ampliou a faixa de uso do ligante modificado. A adição de SBS reduziu o ganho de deformação permanente, assim como melhorou o comportamento desses ligantes frente ao fenômeno de fadiga, em baixos valores de deformações cisalhantes. O ensaio de separação de fases indicou a necessidade de agitação constante nos tanques de asfalto para as maiores concentrações de polímero. Por fim, conclui-se que o protocolo de mistura foi o maior responsável pelas alterações no comportamento dos ligantes asfálticos, indicando a necessidade de sua otimização. Da mesma forma, faz-se necessário maiores estudos a respeito da interação asfalto-polímero, a fim de ampliar o seu emprego na pavimentação.

Palavras-chave: Estireno-butadieno-estireno (SBS). Asfalto modificado por polímero. Protocolo de mistura.

ABSTRACT

ANALYSIS OF ASPHALT BINDER MODIFICATION BY ADDITION OF STYRENE-BUTADIENE-STYRENE (SBS) POLYMER

AUTHOR: Gabriela de Souza Dias

ADVISOR: Luciano Pivoto Specht

The intense process of degradation of asphalt coatings in recent years, due to the increasing action of traffic and more severe climatic conditions, has led to the development of research in the search for new technologies in order to improve the performance and useful life of pavements. In this sense, the modification of asphalt binders by polymers has been shown to be a promising technological option in improving physical, chemical and rheological properties. This work aims to evaluate the influence of the addition of different levels of SBS polymer (2.5%, 5.0% and 7.5%) in pellet format in the conventional 50/70 binder, characterized in virgin and short-term aged conditions in RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test). Conventional softening point, penetration and elastic recovery tests were performed. For rheological characterization, the Brookfield viscosity, the high temperature PG and the master curves of Dynamic Modulus and Phase Angle were obtained by means of the Dynamic Shear Rheometer (DSR). For the data analysis, 2S2P1D modeling was used. Damage assessment was performed by Multiple Stress Creep (MSCR) tests for permanent deformation and Linear Amplitude Sweep (LAS) for fatigue. Finally, the storage stability of the modified binders was verified by the Phase Separation test. The mixing protocol performed at high and low shear, with crosslinking by the addition of sulfur, caused excessive stiffening in the binder, while the addition of SBS increased the stiffness by action of the polymer, while generating protective behavior against aging. The joint occurrence of these effects prevented obtaining clear trends regarding the percentage of SBS added in the analysis of physical and rheological properties. The high viscosity values obtained suggest the need for higher than usual temperatures to obtain adequate workability for compaction and mixing. The analysis of the master curves indicated higher values of dynamic shear modulus and lower values of phase angle. A significant increase in high temperature PG was also observed, which extended the range of use of the modified binder. The addition of SBS reduced the permanent deformation gain as well as improved the behavior of these binders against fatigue phenomena at low shear strain values. The phase separation test indicated the need for constant agitation in the asphalt tanks for the highest polymer concentrations. Finally, it is concluded that the mixing protocol was the most responsible for the changes in the behavior of the asphalt binders, indicating the need for its optimization. Likewise, further studies on the asphalt-polymer interaction are necessary in order to expand its use in paving.

Keywords: Styrene-butadiene-styrene (SBS). Polymer modified asphalt. Mixing protocol.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Medidas no reômetro de cisalhamento dinâmico	25
Figura 2 – Esquema do planejamento da pesquisa	31
Figura 3 – Pellets de polímero SBS	33
Figura 4 – Equipamento de alto cisalhamento. (a) Misturador emulsificador 100L. (b) Estator utilizado no cisalhamento.....	35
Figura 5 – Conjunto adaptado para mistura à 180 °C	35
Figura 6 – Parafusadeira adaptada para baixo cisalhamento	36
Figura 7 – Utilização de espátula de metal para retirada de pellets presos ao cabeçote	37
Figura 8 – Smart test realizado durante alto cisalhamento	38
Figura 9 – Teste da pinça. (a) Esfriamento em béquer com água. (b) Alongamento da amostra	39
Figura 10 – Ensaio de Ponto de Amolecimento	40
Figura 11 – Ensaio de Penetração. (a) Penetrômetro manual. (b) Amostras de ensaio	41
Figura 12 – Ensaio de Recuperação Elástica. (a) Amostras com dimensões iniciais. (b) Amostras após estiramento	42
Figura 13 – Viscosímetro Rotacional Brookfield.....	43
Figura 14 – Estufa de Filme Fino Rotativo (RTFOT)	44
Figura 15 – Reômetro de Cisalhamento Dinâmico.....	45
Figura 16 – Ensaio de separação de fases. (a) Tubos metálicos após refrigeração. (b) Tubos metálicos seccionados	48
Figura 17 – Ligante asfáltico com SBS adicionado. (a) Após 1 hora de alto cisalhamento. (b) Após 5 horas de baixo cisalhamento	50
Figura 18 – Smear test do alto cisalhamento. (a) Após 1 hora e 30 minutos. (b) Após 2 horas	50
Figura 19 – Teste da pinça do alto cisalhamento. (a) Após 1 hora e 30 minutos. (b) Após 2 horas	51
Figura 20 – Resultados de Ponto de Amolecimento	52
Figura 21 – Resultados de Penetração	54
Figura 22 – Resultados de Recuperação Elástica.....	55
Figura 23 – Gráfico Viscosidade vs. Temperatura	56

Figura 24 – Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico na condição virgem	59
Figura 25 – Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico nas baixas frequências.....	60
Figura 26 – Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico nas altas frequências.....	61
Figura 27 – Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico na condição após RTFOT	61
Figura 28 – Curvas Mestras de Ângulo de Fase na condição virgem	62
Figura 29 – Curvas Mestras de Ângulo de Fase na condição após RTFOT	62
Figura 30 – Valores de Ângulo de Fase na condição virgem, 65 °C, 1Hz.....	63
Figura 31 – Valores de Ângulo de Fase na condição após RTFOT, 65 °C, 1Hz.....	64
Figura 32 – Valores de Ângulo de Fase na condição virgem, 25 °C, 1Hz.....	64
Figura 33 – Valores de Ângulo de Fase na condição após RTFOT, 25 °C, 1Hz.....	65
Figura 34 – Espaço Black na condição virgem.....	65
Figura 35 – Espaço Black na condição após RTFOT.....	66
Figura 36 – Plano Cole-Cole nas condições virgem e após RTFOT	67
Figura 37 – Resultados de Performance Grade (PG) para altas temperaturas.....	68
Figura 38 – Resultados de Jnr à 64 °C	70
Figura 39 – Resultados de percentual de recuperação (%)	71
Figura 40 – Curvas de deformações cisalhantes vs. tempo de ensaio MSCR à 64°C	74
Figura 41 – Curvas características de dano	74
Figura 42 – Curvas de fadiga	75
Figura 43 – Fator de Fadiga do Ligante (FFL19°C).....	75
Figura 44 – Nf pelo critério da máxima pseudoenergia acumulada.....	77
Figura 45 – Resultado Separação de Fases	78
Figura 46 – Indicação de separação de fase pelo ensaio de ponto de amolecimento	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação brasileira para CAP 30/45 e CAP 50/70	21
Tabela 2 – Especificação brasileira para CAP TLA.....	22
Tabela 3 – Especificação brasileira para asfalto borracha	23
Tabela 4 – Especificação brasileira para asfalto polímero	23
Tabela 5 – Protocolos de mistura de diferentes estudos.....	29
Tabela 6 – Propriedades do CAP 50/70 utilizado.....	33
Tabela 7 – Propriedades do polímero SBS	34
Tabela 8 – Classificação MSCR quanto às classes de tráfego	46
Tabela 9 – Classificação com base no FFL _{19°C}	47
Tabela 10 – Resultados de Viscosidade Brookfield	56
Tabela 11 – Temperaturas de Compactação e Mistura	57
Tabela 12 – Parâmetros 2S2P1D, C1 e C2	58
Tabela 13 – Resultado das classes de tráfego segundo o Jnr (3,2kPa) a 64 °C	72
Tabela 14 – Resultado de MSCR e classificação PG segundo AASHTO M 332-22 .	73
Tabela 15 – Parâmetros do modelo VECD para obtenção das curvas de fadiga.....	76
Tabela 16– Classificação segundo ao FFL a 19°C	76

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ADP	Asfalto Diluído de Petróleo
AMB	Asfalto Modificado por Borracha
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
AR	Agentes Rejuvenescedores
ARE	Agentes Rejuvenescedores Emulsionados
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
DTT	<i>Direct Tension Test</i>
EAP	Emulsão Asfáltica de Petróleo
EVA	Etileno-acetato de Polivinila
FFL	Fator de Fadiga do Ligante
GEPPASV	Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária
G*	Módulo de Cisalhamento Dinâmico
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
LVE	Linear Viscoelástico
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
Nf	Número de Ciclos
NBR	Norma Brasileira
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>
PE	Poliestireno
PG	<i>Performance Grade</i>
REFAP	Refinaria Alberto Pasqualini
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>

S	Enxofre
SBR	<i>Styrene Butadiene Rubber</i>
SBS	<i>Styrene-Butadiene-Styrene</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
Superpave	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
TLA	<i>Trinidad Lake Asphalt</i>
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
VECD	<i>Viscoelastic Continuum Damage</i>
2S2P1D	<i>2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO GERAL.....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	LIGANTES ASFÁLTICOS	18
2.1.1	Composição e comportamento dos ligantes asfálticos.....	18
2.1.2	Ligantes asfálticos modificados por polímeros	20
2.1.3	Especificação dos ligantes asfálticos	20
2.1.3.1	Especificação brasileira para cimentos asfálticos de petróleo.....	21
2.1.3.2	Especificação Superpave	24
2.2	POLÍMEROS E SUA INCORPORAÇÃO NOS LIGANTES E MISTURAS ASFÁLTICAS	26
2.2.1	Copolímero tribloco de estireno e butadieno (SBS).....	28
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	31
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA	31
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	32
3.3	PROCEDIMENTO DE MISTURA	34
3.3.1	Smear Test	38
3.3.2	Teste da Pinça	39
3.4	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS.....	39
3.4.1	Ensaio Convencionais	40
3.4.1.1	Ponto de Amolecimento	40
3.4.1.2	Penetração	41
3.4.1.3	Recuperação Elástica.....	41
3.4.2	Ensaio Reológicos	42
3.4.2.1	Viscosidade Rotacional Brookfield	42

3.4.2.2	Envelhecimento de Curto Prazo	43
3.4.2.3	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)	44
3.4.2.3.1	<i>Curvas Mestras, Espaço Black e Plano Cole-Cole</i>	45
3.4.2.3.2	<i>Performance Grade (PG)</i>	45
3.4.2.3.3	<i>Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)</i>	46
3.4.2.3.4	<i>Linear Amplitude Sweep (LAS)</i>	47
3.4.3	Ensaio de separação de fases	48
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	PROCESSO DE INCORPORAÇÃO DO SBS	49
4.2	ENSAIOS CONVENCIONAIS	52
4.2.1	Ponto de Amolecimento	52
4.2.2	Penetração	53
4.2.3	Recuperação Elástica	54
4.3	ENSAIOS REOLÓGICOS	55
4.3.1	Viscosidade Rotacional Brookfield.....	55
4.3.2	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR).....	57
4.3.2.1	<i>Curvas Mestras, Espaço Black e Plano Cole-Cole</i>	57
4.3.2.2	<i>Performance Grade (PG)</i>	68
4.3.2.3	<i>Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)</i>	69
4.3.2.4	<i>Linear Amplitude Sweep (LAS)</i>	74
4.4	ENSAIO DE SEPARAÇÃO DE FASES	77
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	81
	REFERÊNCIAS.....	82

1 INTRODUÇÃO

O modal rodoviário desempenha um papel importante no desenvolvimento econômico brasileiro, visto que, é responsável pela maior parte do transporte de cargas e passageiros em todo o país. No entanto, a Pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT) realizou um levantamento, no ano de 2022, sobre as condições das rodovias brasileiras, a qual avaliou 110.333 km e constatou que 66,0% da malha rodoviária pavimentada apresenta estado geral de conservação inadequado, sendo considerada como regular, ruim ou péssima.

Esse cenário impacta diretamente a economia e a sociedade, visto que eleva o custo operacional do transporte e aumenta a probabilidade de acidentes de trânsito. Nessa perspectiva, torna-se necessário investir em pavimentos que propiciem aos usuários melhores condições de rolamento, com conforto, economia e segurança (BERNUCCI et al., 2022).

Nos últimos anos, a crescente demanda e solicitação das rodovias, assim como as condições climáticas mais severas, representaram um desafio para o desempenho dos asfaltos convencionais e para a conservação das rodovias. Essas condições aliadas à falta de manutenção das mesmas, resultam em um grande número de pavimentos deteriorados (DAVID, 2006). Segundo King (1999) e Specht (2002), os mecanismos mais comuns de ruptura são deformação permanente e formação de trincas por fadiga e baixas temperaturas. Diante disso, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas, motivadas pelos diversos problemas que os pavimentos rodoviários têm enfrentado (SANTOS, RODRIGUES e MENDONÇA, 2018).

Atualmente, a maioria das rodovias são feitas com revestimentos flexíveis, compostos, basicamente, por uma mistura de agregados e fíler, aglutinados por ligante asfáltico, presente em menor proporção. González et al. (2002) afirmam que o desempenho do pavimento possui forte dependência com as propriedades do ligante, por ser o único componente deformável, o que o torna alvo de diversos estudos. Dessa forma, o uso de ligante modificado por polímeros constitui uma opção tecnológica promissora para reduzir a frequência das manutenções e aumentar a vida útil dos pavimentos.

No entanto, a eficiência do processo de modificação do asfalto depende de uma série de fatores a serem apresentados neste trabalho, tornando necessário aprofundar

os conhecimentos acerca do processo de incorporação do SBS no ligante asfáltico e dos seus efeitos nas propriedades físicas e reológicas.

Além disso, o desenvolvimento deste estudo dá continuação a uma linha de pesquisa recente no Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) e em ascensão nos diversos centros de pesquisa do mundo, que busca dar início na implementação de um protocolo de modificação de ligantes asfálticos pela adição de polímeros.

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral analisar a viabilidade e a influência da adição de *pellets* de polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), mediante reticulação com enxofre, em diferentes teores (2,5%, 5,0% e 7,5%), nas propriedades físicas e reológicas de um ligante asfáltico 50/70 convencional.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Considerando as variações de teor produzidas, em duas condições de envelhecimento, são objetivos específicos da pesquisa:

- Aferir a eficiência das variáveis adotadas no processo de mistura em alto e baixo cisalhamento (temperatura, tempo e velocidade rotacional);
- Caracterizar os ligantes asfálticos por meio de ensaios convencionais de ponto de amolecimento, penetração e recuperação elástica;
- Avaliar a resistência ao fluxo pelo ensaio de viscosidade *Brookfield*, assim como, verificar as temperaturas de usinagem e compactação obtidas;
- Analisar o impacto do processo de mistura no envelhecimento dos ligantes asfálticos, por meio de dados obtidos no domínio linear viscoelástico (LVE);
- Classificar os ligantes conforme o *Performance Grade* (PG) de alta temperatura, por meio da metodologia *Superpave* (*Superior Performing Asphalt Pavements*);
- Estudar o efeito da adição de polímero SBS no comportamento do ligante à deformação permanente, utilizando o ensaio de MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*);

- Avaliar a resistência ao dano por fadiga dos diferentes teores produzidos, por meio do ensaio de LAS (*Linear Amplitude Sweep*);
- Verificar a estabilidade ao armazenamento dos ligantes modificados, pelo ensaio de separação de fases.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seção de revisão bibliográfica irá abranger os conceitos necessários para o entendimento deste trabalho. Em primeiro lugar, é realizada uma revisão sobre ligantes asfálticos e suas especificações, seguindo pelos polímeros e métodos de incorporação nos ligantes e misturas asfálticas.

2.1 LIGANTES ASFÁLTICOS

O ligante asfáltico incorporado nas misturas que são utilizadas nas rodovias são hidrocarbonetos produzidos pela destilação fracionada do petróleo (HUNTER; SELF; READ, 2015). Na sua maioria, a composição química contém moléculas de hidrogênio, carbono, nitrogênio e oxigênio.

A utilização desse material nas misturas asfálticas visa unir os agregados, formando uma camada de rolamento impermeável, resistente ao intemperismo e com flexibilidade controlada (BERNUCCI et al., 2022). Além disso, esse material é denominado de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) quando é adequado para uso em pavimentação, podendo se apresentar de diversas formas na indústria.

Segundo Bernucci et al., (2010), os ligantes podem ser produzidos e comercializados como os cimentos asfálticos de petróleo (CAP), mencionados anteriormente, emulsões asfálticas (EAP), asfaltos diluídos (ADP), asfaltos modificados por polímero (AMP) ou por borracha de pneus (AMB), asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial, e agentes rejuvenescedores (AR e ARE). Seu comportamento, como será visto, é bastante singular, pois dependem da temperatura, do tempo e velocidade das cargas impostas.

2.1.1 Composição e comportamento dos ligantes asfálticos

A composição dos ligantes asfálticos varia com a origem do petróleo. Segundo Leite (1990), a maior parcela corresponde aos hidrocarbonetos (90 a 95%), com a presença de heteroátomos (5 a 10%), como nitrogênio, oxigênio, enxofre, vanádio, níquel e ferro. Esse arranjo possui influência nas propriedades físicas e reológicas do CAP.

Segundo Pinheiro (2004), uma divisão possível para os compostos do ligante é a existência de asfaltenos e maltenos. Os asfaltenos são compostos aromáticos com mais de 5 anéis benzênicos e alta polaridade e que, por se associarem, elevam a viscosidade do CAP. Os maltenos ainda são divididos em resinas (agentes peptizantes que dissolvem os asfaltenos nos óleos) e os próprios óleos (compostos saturados e aromáticos possuem estrutura parafínica-aromática). É importante mencionar que a oxidação do material muda a proporção desses compostos, e conseqüentemente as propriedades do ligante.

A variação da temperatura permite que as moléculas polares se movimentem mais ou menos no meio não-polar, fazendo com que o ligante possa ser um sólido (baixa temperatura/alta frequência das cargas) ou mesmo um líquido viscoso (alta temperatura/baixa frequência das cargas) (BERNUCCI et al., 2022). Além de depender da temperatura, esse material depende das condições de carregamento, e pode ser denominado de um material viscoelastoplásticos. Assim, não são nem puramente elásticos (recuperam a deformação imposta no mesmo instante em que se retira a carga), nem puramente plásticos (permanecendo com deformação residual). Portanto, são materiais que, sob pequenas deformações, retornam à condição inicial mas com um atraso a partir da retirada da carga (HUNTER; SELF; READ, 2015).

O Princípio da Superposição Tempo-Temperatura, aplicado a materiais termoreologicamente simples, diz que o comportamento em altas temperaturas e altas taxas de carregamento podem ser equivalentes ao comportamento em baixas temperaturas e baixas taxas de carregamento (FERRY, 1980). Esse princípio se aplica adequadamente para ligantes convencionais, que se comportam como fluídos Newtonianos, mas pode mudar em CAPs modificados por polímeros ou borracha, que são Fluídos Não-Newtonianos (SPECHT, 2004).

Para descrever o comportamento dos ligantes, existem modelos que podem ser ajustados aos dados experimentais. O mais utilizado é o 2S2P1D (2 *Springs*, 2 *Parabolic*, 1 *Dashpot*), que combina um amortecedor linear em série com dois elementos parabólicos e uma mola, ainda em paralelo com outra mola (OLARD; DI BENEDETTO, 2003).

Os dados experimentais em varredura de temperaturas e frequências, juntamente com o modelo ajustado, podem ser mostrados em curvas no plano Cole-Cole, Espaço Black, curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase. O plano Cole-Cole cruza a parte imaginária e viscosa do módulo (G_2), com a parte real e

elástica (G1). O Espaço Black representa a plotagem dos dados de módulo de cisalhamento dinâmico contra o ângulo de fase, e as curvas mestras representam a variação desse módulo dinâmico ou do ângulo de fase com a frequência. Os valores de ângulo de fase perto de zero indicam que o material está mais elástico, e próximos a 90° que está mais viscoso.

2.1.2 Ligantes asfálticos modificados por polímeros

Segundo Silva et al. (2002), os ligantes com polímeros são utilizados desde 1970 na Europa e Estados Unidos, visando atender condições de projeto mais severas, como tráfegos mais pesados ou temperaturas extremas. Os teores podem variar normalmente de 3 a 8% em relação à massa do CAP, promovendo ou não uma reação química (CERATTI; BERNUCCI; SOARES, 2015). Esses materiais podem melhorar o desempenho à deformação permanente, à fadiga e ao envelhecimento, e pode ainda aprimorar as condições de adesividade (ROBINSON, 2004).

A utilização dos polímeros também pode promover economia nos projetos de pavimentos, caso seja observado que camadas menos espessas com esse material continuem atendendo às condições de projeto. Em geral, polímeros aumentam a rigidez e diminuem o ângulo de fase em altas temperaturas, o que é especialmente desejado para enfrentar a deformação permanente, pois o polímero incha nos maltenos e aumenta a elasticidade e resistência ao estiramento (LEITE, 1999). Como exemplos de polímeros modificadores de ligantes, existe o copolímero tribloco de estireno-butadieno-estireno (SBS), a borracha de estireno-butadieno (SBR), etilenoacetato de polivinila (EVA), entre outros (SILVA et al., 2002).

2.1.3 Especificação dos ligantes asfálticos

Os ensaios requeridos para adequar os ligantes nas especificações são de simples execução, e em geral medem propriedades de dureza e consistência. A grande maioria são métodos empíricos, com temperatura e/ou taxa de carregamento especificados (BERNUCCI et al., 2022).

2.1.3.1 Especificação brasileira para cimentos asfálticos de petróleo

No caso dos ligantes convencionais, a classificação é dada pelo resultado do método descrito em DNIT 155/2010 - ME: determinação da penetração – método de ensaio. O nível de penetração de uma agulha padronizada separa os ligantes em: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200 (Tabela 1).

Tabela 1 – Especificação brasileira para CAP 30/45 e CAP 50/70.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES		MÉTODOS		
		CAP 30/45	CAP 50/70	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 - 45	50 - 70	NBR 6576	D 5	ME 003/99
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	52	46	NBR 6560	D 36	
Viscosidade Saybolt Furol	s			NBR 14950	E 102	ME 004/94
a 135°C, mín		192	141			
a 150°C, mín		90	50			
a 177°C		40 - 150	30 - 150			
OU						
Viscosidade Brookfield	cP			NBR 15184	D 4402	
a 135°C, SP 21, 20rpm, mín		374	274			
a 150°C, SP 21, mín.		203	112			
a 177°C, SP 21		76 - 285	57 - 285			
Índice de susceptibilidade térmica	-	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)			
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25°C, mín	cm	60	60	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85min				-	D 2872	-
Variação em massa, máx	% massa	0,5	0,5	-	-	-
Ductilidade a 25°C, mín	Cm	10	20	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	NBR 6560	D 36	
Penetração retida, mín	%	60	55	NBR 6576	D 5	ME 003/99

Fonte: Adaptado de DNIT 095/2006 - EM.

Os asfaltos do tipo TLA (*Trinidad Lake Asphalt*) são modificados por asfalto natural do *Pitch Lake* de Trinidad e Tobago, que possuem elevada viscosidade e densidade. A Tabela 2 mostra a especificação brasileira para esse ligante.

Tabela 2 - Especificação brasileira para CAP TLA.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	CAP-TLA 40/55	Método de Ensaio		
		Limite da Especificação	ABNT	DNIT-ME	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	40 - 55	-	DNIT 155/2010	-
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	50	-	DNIT 131/2010	-
Ponto de fulgor mín	°C	232	11341:2008	-	-
Viscosidade Brookfield, mín.	cP		15184:2004	-	-
a 135°C, spindle 21, 20 rpm		400			
a 150°C, spindle 21, 50 rpm		215			
a 175°C, spindle 21, 100 rpm		80			
Solubilidade em tricloroetileno	%	75 - 90	14855:2002	-	-
Teor de Cinzas	%	7,5 - 19	9842:2009	-	-
Ductilidade a 25°C, 5cm/min., mín	cm	100	-	DNER- 163/1998	-
Presença de TLA	-	Presença	-	-	D6608- 12
Efeito do calor e do ar - RTFOT, 163 °C, 85 minutos					
Variação de massa, máx	% massa	1,0	15235:2009	-	-
Porcentagem da Penetração Original, mín.	%	55	-	DNIT- 155/2010	-
Ductilidade a 25°C, 5cm/min., mín.	cm	50	-	DNER- 163/1998	-

Fonte: Adaptado de DNIT 168/2013 – EM.

A borracha de pneus também pode ser utilizada para modificar ligantes por via úmida, pois o inchamento da borracha deixa o CAP mais dúctil, mais viscoso e mais resistente ao envelhecimento e à fissuração (SPECHEIT, 2004). Sua especificação é mostrada na Tabela 3. Por fim, como será objeto deste trabalho, Tabela 4 mostra a especificação de asfalto modificado por polímero elastomérico (para os tipos 55/75 e 60/85).

Tabela 3 - Especificação brasileira para asfalto borracha.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	Asfalto Borracha		Método de ensaio
		Tipo AB 8	Tipo AB 22	
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30-70	30-70	DNER ME 003/99
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	55	57	DNER ME-247/94
Viscosidade Brookfield, 175°C, 20rpm, Spindle 3	cP	800-2000	2200-4000	NBR 15529
Ponto de Fulgor, min	°C	235	235	DNER ME 148/94
Recuperação Elástica Ductilômetro, 25°C, 10 cm, min	%	50	55	NBR 15086:2006
Estabilidade à estocagem, máx	°C	9	9	DNER ME-384/99
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C:				
Varição em massa, máx	%	1	1	NBR 15235:2006
Varição do Ponto de Amolecimento, máx	°C	10	10	DNER ME-247/94
Porcentagem de Penetração Original, mín.	%	55	55	DNER ME 003/99
Porcentagem da Recuperação Elástica Original, 25°C 10cm, mín.	%	100	100	NBR 15086:2006

Fonte: Adaptado de DNIT 111/2009 – EM.

Tabela 4 - Especificação brasileira para asfalto polímero.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	55/75-E	60/85-E	Método de Ensaio	
		Limites da Especificação		ABNT	DNIT - ME
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	45-70	40-70	-	155/2010
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	55	60	-	131/2010
Ponto de Fulgor, min	°C	235	235	11341	-
Viscosidade Brookfield, máx.	cP			15184	-
a 135°C, spindle 21, 20 rpm		3000	3000		-
a 150°C, spindle 21, 50 rpm		2000	2000		-
a 175°C, spindle 21, 100 rpm		1000	1000		-
Ensaio de Separação de Fase, máx.	°C	5	5	15166	-
Recuperação Elástica a 25°C, 20cm, mín	%	75	85	-	130/2010
Efeito do calor e do ar - RTFOT, 163 °C, 85 minutos					
Varição de massa, máx.	% massa	1,0	1,0	15235	-
Varição do PA, máx.	°C	- 5 a +7	- 5 a +7	-	131/2010
Porcentagem de Penetração Original, mín.	%	60	60	-	155/2010
Porcentagem de Recuperação Elástica Original a 25°C, mín.	%	80	80	-	130/2010

Fonte: Adaptado de DNIT 129/2011 – EM.

2.1.3.2 Especificação Superpave

O *Strategic Highway Research Program* (SHRP) foi um programa de estudos nos Estados Unidos em 1987, que tinha por finalidade desenvolver métodos para avaliar os ligantes asfálticos, que ficou conhecido como metodologia Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*). A caracterização utiliza medidas de reologia em diferentes temperaturas, e classifica os ligantes pelo PG (*performance grade*). O PG contém a máxima e mínima temperatura na qual os ligantes apresentam as propriedades da especificação, por exemplo, PG 64-22, PG 70-22, etc. Os ensaios necessários para essa metodologia são:

(a) Estufa de Película Delgada Rotacional – RTFOT (AASHTO T 240 - 22 e ABNT NBR 15235/2009):

O *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT) simula o envelhecimento do ligante a curto prazo (usinagem, transporte e compactação). Submete-se uma película fina de CAP a 163°C por 85 minutos, com uma injeção de ar a cada 3 a 4 segundos.

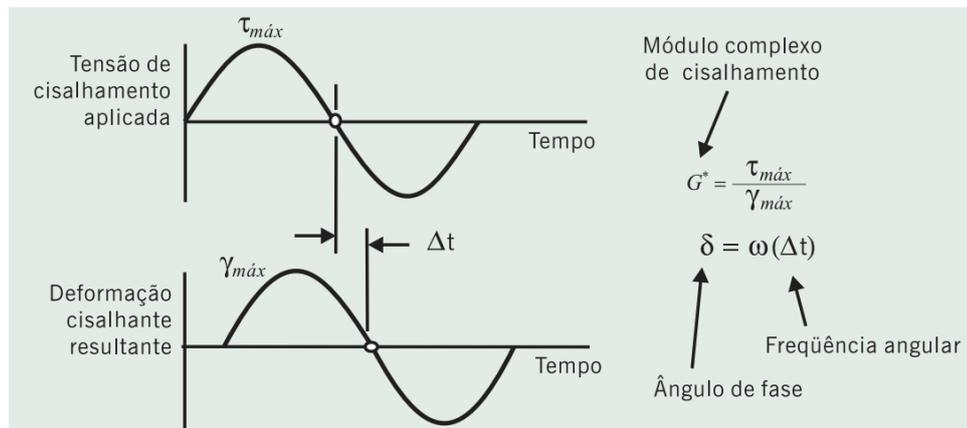
(b) Vaso de Pressão de Envelhecimento – PAV (AASHTO R 28 - 22).

O *Pressure Aging Vessel* (PAV) simula o envelhecimento do ligante asfáltico durante a vida do pavimento (longo prazo). As amostras após RTFOT ficam por 20 horas sob 2,1 MPa de pressão de ar, a uma temperatura que depende do tipo de CAP.

(c) Reômetro de Cisalhamento Dinâmico – DSR (AASHTO T 315 - 22):

O reômetro de cisalhamento dinâmico (*dynamic shear rheometer* – DSR) é um equipamento que mede a viscoelasticidade do ligante, e obtém o módulo dinâmico de cisalhamento ($|G^*|$) e o ângulo de fase (ϕ). A Figura 1 mostra que o $|G^*|$ é a razão entre o pico de tensão e pico da deformação, e o ϕ depende do tempo de atraso entre a tensão e a deformação.

Figura 1 – Medidas no reômetro de cisalhamento dinâmico



Fonte: BERNUCCI et al., 2010.

(d) Reômetro de Fluência em Viga – BBR (AASHTO T313 - 22):

O reômetro de fluência de viga (*bending beam rheometer* – BBR) encontra a temperatura inferior do PG (na qual pode acontecer o trincamento térmico). Uma amostra em formato de viga é fletida sob condições padronizadas, obtendo-se o valor da rigidez estática do material em diferentes leituras (*creep stiffness*) e a inclinação da rigidez de fluência versus tempo (*m-value*).

(e) Viscosímetro Rotacional (ABNT NBR 15184 - 2021 e AASHTO T 316 - 22):

O viscosímetro rotacional Brookfield obtém a viscosidade dinâmica pela rotação de cilindros mergulhados na amostra. Realizando o ensaio em mais temperaturas, monta-se a curva viscosidade-temperatura para determinar as temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas.

(f) Ensaio de Tração Direta – DTT (AASHTO T 314 - 22):

O ensaio de tração direta (*direct tension test* – DTT) avalia se os ligantes conseguem se deformar sem romper em baixas temperaturas (-36°C a 0°C), caso sua rigidez estática supere o valor especificado. O ensaio utiliza amostras envelhecidas após RTFOT e PAV.

(g) *Multiple Stress Creep Recovery* - MSCR (AASHTO T 350 - 19 e DNIT 423/2020 - ME):

O ensaio de Fluência e Recuperação sob Múltipla Tensão caracteriza os ligantes asfálticos quanto à deformação permanente, no DSR. O carregamento é cíclico, com 1s de carga e repouso de 9s, em dois níveis de tensão. Por esse ensaio,

são calculados o Jnr (compliance não recuperável) e o R% (percentual de recuperação).

Outro ensaio comumente realizado nas pesquisas atuais (mas não presente na especificação Superpave) é o LAS - *Linear Amplitude Sweep* (AASHTO T 391, 2020), que observa o dano por fadiga em ligantes por 3100 ciclos, 10Hz e 310 segundos. Por meio da utilização de critérios de falha e metodologias de análise do ensaio, é possível determinar parâmetros de fadiga.

2.2 POLÍMEROS E SUA INCORPORAÇÃO NOS LIGANTES E MISTURAS ASFÁLTICAS

Os polímeros são moléculas de grande dimensão, formadas pela repetição de unidades menores, e que possuem alto peso molecular. Eles podem ser obtidos de elementos como madeira e cortiça, ou pela união artificial de monômeros. Segundo Leite (1999), existem quatro grupos de polímeros:

- a) Termorrígidos: endurecem irreversivelmente com o calor (resina epóxi, poliuretano, poliéster, etc);
- b) Termoplásticos: amolecem com o calor e endurecem ao serem resfriados (EVA, polietileno, policloreto de vinila, etc);
- c) Elastômeros: se decompõem com o calor e possuem propriedades elásticas (como a borracha de estireno-butadieno - SBR);
- d) Elastômero-termoplástico: sob o calor são como termoplásticos, mas são elásticos em temperaturas baixas (como o estireno-butadieno-estireno - SBS).

A incorporação de polímeros no ligantes asfáltico pode ser realizada pelo processo úmido e pelo processo seco. No processo úmido, o polímero sólido é inserido no ligante quente, misturado sob determinada taxa de cisalhamento, e em seguida essa mistura é incorporada aos agregados. Dois desafios destacam-se nesse método: o superaquecimento do ligante, que pode envelhecê-lo, e a garantia da correta dispersão do polímero na matriz do ligante. Em geral, essa mistura utiliza cisalhamento elevado. Já no método seco, o polímero é misturado com os agregados, e só após se adiciona o ligante (KALANTAR; KARIM; MAHREZ, 2012).

Conforme Leite (1999), o SBS é um copolímero em bloco de estireno e butadieno, que forma um material fluido ao ser aquecido, mas resistente e resiliente na temperatura ambiente. Esse comportamento é desejável pensando na modificação

do ligante por via úmida, pois permite a incorporação adequada ao CAP (quando forem compatíveis), sem elevar em excesso sua viscosidade e promovendo propriedades reológicas superiores em relação ao ligante convencional.

A pesquisa da autora se desenvolveu pelo estudo de ligantes modificados com SBS, EVA, SBR, PE (poliestireno) e borracha moída de pneu. Os resultados indicaram que a modificação com SBS permitiu maior resistência ao envelhecimento, pelo baixo tempo de mistura necessário sob alto cisalhamento, mas deve ser observada a degradação do polímero que pode ocorrer caso haja superaquecimento. O polímero EVA teve boa compatibilidade com o CAP e resistência à deformação permanente, mas não conferiu ao ligante uma adequada resistência à fadiga e retorno elástico.

Já os asfaltos modificados por SBR não necessitaram de alto cisalhamento para a mistura, e produziram ligantes com boa elasticidade (embora abaixo do CAP com SBS). Quanto ao poliestireno, a incorporação foi a mais simplificada, e permitiu a obtenção de um ligante com baixa viscosidade a 135°C e maior ponto de amolecimento.

Dong et al. (2014) estudaram as propriedades de ligantes modificados com diferentes teores de SBS, incorporados em CAPs de diversas composições. Os resultados mostraram que a composição química do asfalto muda a dispersão do polímero, pela variação no teor de asfaltenos e de aromáticos (mais asfaltenos e menos aromáticos são indesejáveis). Também foi verificado que a relação estireno/butadieno do polímero também influencia na dispersão, sendo que a relação mais eficiente foi a de 30/70. Essa composição aumentou o ponto de amolecimento e a viscosidade. Quanto ao teor, valores de 1 a 3% de SBS garantem melhor compatibilidade, mas não necessariamente as melhores propriedades, pois teores maiores conseguem promover maior ponto de amolecimento e viscosidade, e menor penetração.

Alatas e Yilmaz (2013) avaliaram os efeitos da incorporação de polímeros SBS e EVA nas propriedades reológicas e mecânicas dos ligantes, no teor de 4%. Essa modificação promoveu um aumento o PG de alta temperatura. Além disso, a incorporação de SBS melhorou comportamento a baixas temperaturas pelo BBR com relação ao EVA. A adição dos polímeros aumentou a viscosidade rotacional Brookfield, assim como as temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas.

Bringel (2007) estudou as propriedades de ligantes modificados com polímeros (SBS e EVA) e aditivos. A construção de curvas mestras na temperatura de referência em 25°C mostraram que 4,5% de SBS e 4% de EVA misturado com 2% de cal hidratada melhoram substancialmente a elasticidade dos materiais (queda do ângulo de fase em altas temperaturas), aumentam o módulo dinâmico de cisalhamento em baixas frequências (ou altas temperaturas) e diminuem esse valor nas altas frequências (ou baixas temperaturas). Também foi observado um platô nas curvas em frequências angulares intermediárias, possivelmente pela formação de uma rede polimérica no ligante.

Em geral, nos estudos realizados a respeito da modificação de ligantes asfálticos pela adição de polímeros da classe estireno-butadieno-estireno (SBS), por via úmida, são utilizados equipamentos de alto e baixo cisalhamento, com velocidades rotacionais que variam de 50 a 2000 rpm, por períodos de 15 minutos à 6 horas. As temperaturas, neste caso, variam de 155°C a 190°C (BARROS et al., 2016; KRATON, 2023; LUCENA, 2005; RODRIGUES, 2020)

2.2.1 Copolímero tribloco de estireno e butadieno (SBS)

O uso de polímeros como modificadores de ligantes asfálticos vem sendo feito desde 1970 na Europa e Estados Unidos (SILVA et al., 2002). No Brasil, o polímero mais empregado atualmente é o elastômero termoplástico do tipo copolímero tribloco de estireno e butadieno (SBS), comercializado desde 1997 em diversas formas estruturais, lineares ou radiais (NEGRÃO, 2006).

Segundo Machado (2007), o polímero SBS é composto por blocos terminais de poliestireno, que fornecem rigidez ao asfalto, unidos por segmentos de cadeias flexíveis de polibutadieno, que acrescentam flexibilidade ao material. Sua estrutura química é capaz de produzir ligante modificado com comportamento superior ao ligante convencional, visto que aumenta a adesão ao agregado e a elasticidade do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) modificado, além de elevar a resistência ao envelhecimento e à oxidação deste material (CERATTI; BERNUCCI; SOARES, 2015).

Do mesmo modo, as propriedades termoplásticas e elastoméricas do polímero SBS ampliam os valores de recuperação elástica e resistência à tração, garantindo que o revestimento asfáltico se mantenha resistente e flexível em todas as temperaturas (IBP, 1999). Além disso, Gusmão (2009) afirma que os efeitos positivos

da modificação com SBS permitem a redução de 28,8% da espessura do revestimento, quando comparado ao produzido com ligante convencional.

Os protocolos utilizados para a incorporação do SBS no ligante normalmente utilizam misturadores de alto e baixo cisalhamento e variam em valores de temperatura, velocidade rotacional, teores produzidos e tempo de mistura, além da adição ou não de outros compostos, como óleos e enxofre. Na Tabela 5, é possível observar alguns protocolos utilizados no estudo da modificação do ligante asfáltico pela adição de SBS.

Tabela 5 – Protocolos de mistura de diferentes estudos.

Autor(a)	Etapas Protocolo de Mistura
Dong et al., 2023	<ol style="list-style-type: none"> 1. Adição de 4% de SBS; 2. Mistura à 1000 rpm por 10 minutos, à 175°C; 3. Cisalhamento à 4000 rpm por 30 minutos, à 180°C; 4. Adição de enxofre; 5. Mistura à 500 rpm por 2 horas, à 170°C.
Kraton, 2023	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alto cisalhamento à 2000 rpm por 60 minutos, à 180 ± 2 °C; 2. Adição de 0,1% de enxofre; 3. Baixo cisalhamento durante 4 - 6 horas, à 180 ± 2 °C.
Hao et al., 2022	<ol style="list-style-type: none"> 1. Adição de 3% de SBS; 2. Alto cisalhamento à 5000 rpm durante 55 minutos, à 175 ± 2 °C; 3. Adição de 0,1% de enxofre; 4. Mistura à 5000 rpm por 5 minutos, à 175 ± 2 °C; 5. Período para inchamento em estufa por 60 minutos, à 165°C.
Pandey et al., 2022	<ol style="list-style-type: none"> 1. Adição de 3, 4,5 e 7% de SBS; 2. Alto cisalhamento à 3000 rpm por 120 minutos, à 180 °C; 3. Adição de 0,12% de enxofre; 4. Baixo cisalhamento à 600 rpm por 120 minutos, à 180 °C.
Nan et al., 2022	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aquecimento do asfalto convencional à 170 °C; 2. Adição de 3% de SBS; 3. Alto cisalhamento à 3000-4000 rpm por 60 minutos, à 180 ± 5 °C; 4. Adição do teor de 0,20% de enxofre e 3% de óleo de borracha.
Shan et al., 2020	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aquecimento do ligante à 180 ± 5 °C, até fluir completamente; 2. Adição de 3, 5 e 7% de SBS; 3. Baixo cisalhamento de 500 rpm para adição de SBS à 5g/min; 4. Alto cisalhamento de 4000 rpm por 120 minutos.
Rodrigues, 2020	<ol style="list-style-type: none"> 1. Adição de 4% de SBS; 2. Cisalhamento à 250 rpm por 2 horas, à 155 ± 5 °C.
Lucena, 2005	<ol style="list-style-type: none"> 1. Adição de 4,5% de SBS; 2. Cisalhamento do SBS à 1086 rpm por 3 horas, à 175 °C.

Fonte: Autora.

Apesar da adição de materiais poliméricos mostrar-se como uma alternativa promissora na melhoria das propriedades físicas, químicas e reológicas dos ligantes asfálticos, para que a modificação do ligante seja viável de forma técnica e econômica, é necessário que o polímero seja resistente à degradação nas temperaturas usuais de utilização do asfalto, misture-se adequadamente e melhore as características de fluidez em altas temperaturas, sem que o ligante fique muito viscoso para a mistura e espalhamento, nem tão rígido ou quebradiço em baixas temperaturas (BERNUCCI et al., 2010).

Segundo estudos de Schuster (2023), acredita-se que possivelmente ocorra degradação polimérica a partir de determinada temperatura durante o processo de envelhecimento, o que foi verificado pelo autor durante produção em usina, visto que o segmento de polibutadieno do polímero SBS contém um grande número de ligações duplas de carbono, que são alvos fáceis para o oxigênio e podem se degradar sob a influência do calor. Os efeitos gerados pela degradação nas propriedades do AMP e do SBS podem ser monitorados por espectroscopia FTIR, cromatografia de penetração em gel e reologia.

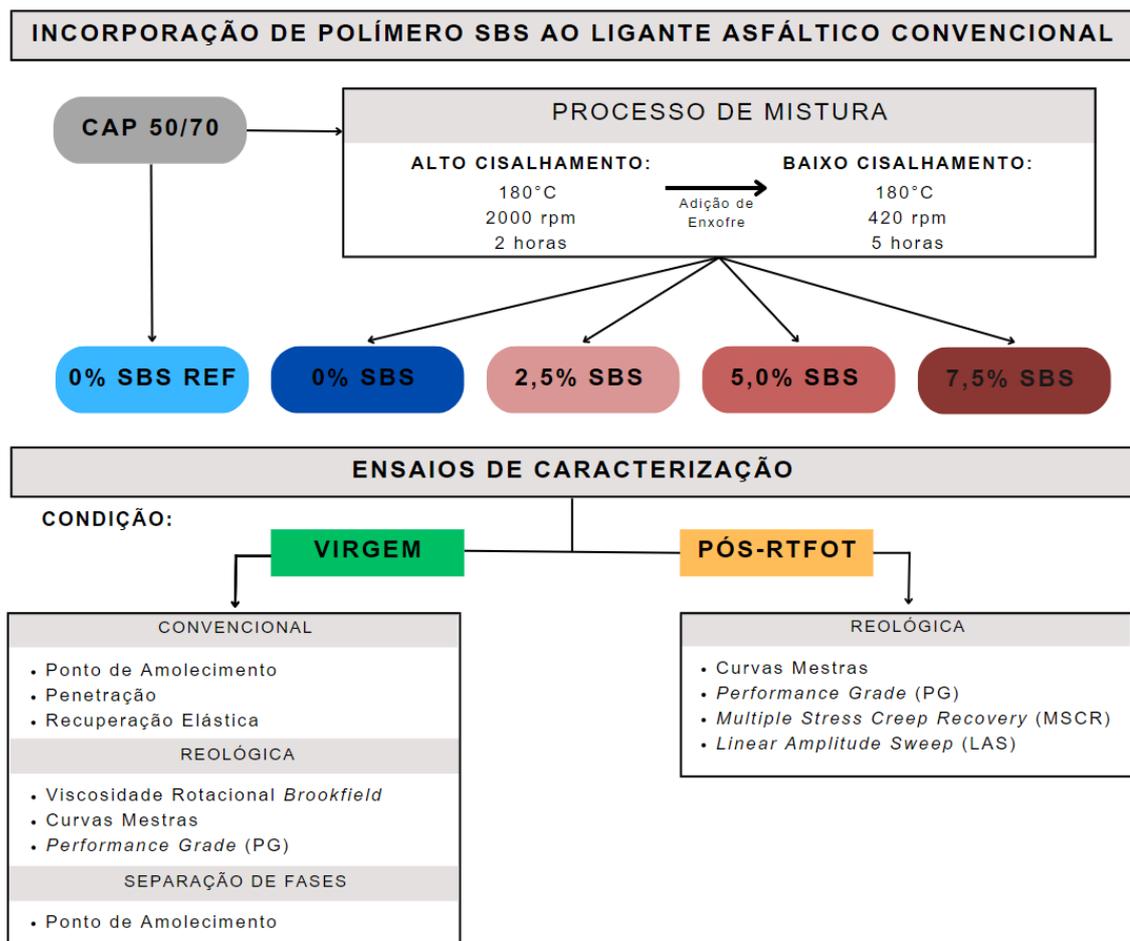
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, será apresentado de forma detalhada o planejamento da pesquisa, os materiais utilizados, o processo de modificação do ligante asfáltico convencional, assim como os ensaios de caracterização dessas misturas, a fim de avaliar o comportamento dos asfaltos modificados por polímeros.

3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

A fim de alcançar os objetivos estabelecidos anteriormente, esta pesquisa seguiu o programa experimental esquematizado na Figura 2 abaixo.

Figura 2 – Esquema do planejamento da pesquisa.



Fonte: Autora.

Para avaliar a influência da adição de polímeros em diferentes proporções nas propriedades do ligante asfáltico convencional, foram produzidos os teores de 2,5, 5,0 e 7,5% de SBS, em relação à massa do CAP. Além disso, uma amostra com mesma massa de ligante foi submetida ao processo de mistura, sem a incorporação de SBS, para servir como referência para a análise do envelhecimento gerado por esse protocolo, sendo designada nessa pesquisa, como “0% SBS”.

Os ensaios de caracterização foram realizados em amostras de ligantes antes e após o ensaio de envelhecimento RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*). Na condição virgem, foram avaliadas as propriedades físicas por meio dos ensaios de ponto de amolecimento, penetração e recuperação elástica. Para a análise da resistência ao fluxo, foi realizado o ensaio de viscosidade rotacional no viscosímetro *Brookfield* e para a análise da estabilidade ao armazenamento dos ligantes modificados por polímeros, realizou-se o ensaio de separação de fases.

Nessa mesma condição, foi feita a caracterização da rigidez das amostras por meio do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) e o tratamento dos dados obtidos por meio da modelagem 2S2P1D, de forma a obter as curvas mestras de Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase, o Espaço *Black*, o Plano Cole-Cole e o *Performance Grade* (PG) para altas temperaturas, segundo a metodologia *Superpave* (*Superior Performing Asphalt Pavements*).

Nas amostras envelhecidas a curto prazo, por meio da Estufa de Filme Fino Rotativo (RTFOT), foi feito no reômetro a mesma caracterização reológica descrita acima, para as amostras na condição virgem, junto aos ensaios de caracterização do dano, o MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*) para deformação permanente e o LAS (*Linear Amplitude Sweep*) para fadiga.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento dessa pesquisa, foi utilizado o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70, proveniente da Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP), localizada na cidade de Canoas, Rio Grande do Sul. Esse material, com as propriedades descritas na Tabela 6, também foi utilizado por Possebon (2018), Possebon (2021) e Nunes-Ramos (2022).

Tabela 6 – Propriedades do CAP 50/70 utilizado.

Propriedade	Método	Especificação	Resultado
Ponto de Amolecimento (°C)	DNIT 131/2010 - ME	46	48
Penetração (dmm)	DNIT 155/2010 - ME	50 - 70	52,3
Viscosidade Brookfield, 135 °C (cP)	AASHTO T 316-19	Mín. 274	327,5
Viscosidade Brookfield, 150 °C (cP)	AASHTO T 316-19	Mín. 112	166,3
Viscosidade Brookfield, 177 °C (cP)	AASHTO T 316-19	57 - 285	62,7
Densidade Relativa, 25 °C (g/cm ³)	ASTM D 70	-	1,000

Fonte: Adaptado de Nunes-Ramos.

O processo de modificação do ligante foi realizado com o polímero tribloco D1101 AT, da classe Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), produzido na Alemanha e fornecido pela empresa Kraton, localizada na cidade de Paulínea, São Paulo. O polímero utilizado se apresenta na forma física de *pellets* porosos polvilhados com talco, com dimensões em torno de 5 mm de diâmetro e 7 mm de espessura, como ilustrado na Figura 3. As suas propriedades são descritas na Tabela 7.

Figura 3 – *Pellets* de polímero SBS.

Fonte: Autora.

Já o processo de reticulação, a fim de garantir a estabilidade ao armazenamento do ligante asfáltico modificado, foi realizado com a adição do teor de 0,1% de enxofre duplamente ventilado em formato de pó, fornecido pela empresa Betunel.

Tabela 7 – Propriedades do polímero SBS.

Propriedade	Método	Valores
Teor de Poliestireno (%m)	KM 03	30 - 32
Teor de Antioxidantes (%m)	KM 08	≥ 0,14
Matéria Volátil (%m)	KM 04	≤ 0,30
Densidade Relativa (g/cm ³)	ISO 2781	0,94
Densidade Aparente (g/cm ³)	ASTM D 1895 - B	0,40
Índice de Fluxo de Fusão, 200 °C/5 kg (g/10min)	ISO 1133	< 1
Resistência à tração (Mpa)	ISO 37	33
Alongamento na ruptura (%)	ISO 37	880
Dureza (<i>Shore</i> 30A)	ISO 868	72 (meio duro)

Fonte: Adaptado de ficha técnica fornecida pela Kraton.

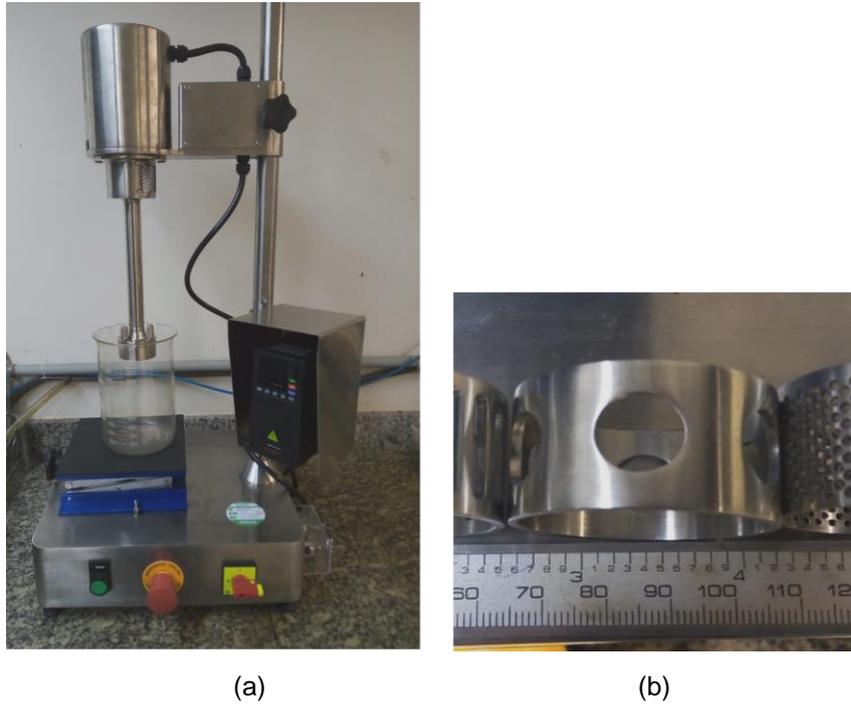
3.3 PROCEDIMENTO DE MISTURA

A incorporação do polímero SBS foi realizada em duas etapas de mistura por via úmida, à temperatura de 180 °C, em latas padronizadas contendo aproximadamente 450 g de CAP 50/70 em estado fluido, pré-aquecidas por duas horas em estufa com a mesma temperatura.

Devido as grandes dimensões dos grânulos porosos, que impedem uma rápida dissolução de baixo cisalhamento no ligante asfáltico, iniciou-se o processo de mistura com um reator de alto cisalhamento (Figura 4), a fim de triturar os *pellets* em partículas menores, que são incorporados mais facilmente ao CAP. Esse corte mecânico ocorreu de forma contínua, com a entrada do polímero pela parte inferior do cabeçote, momento em que a hélice em elevada velocidade rotacional empurra o grânulo às aberturas do estator, aonde este é cisalhado. Nessa pesquisa, foi utilizado um estator com aberturas circulares de 15 mm de diâmetro.

Durante essa primeira etapa, utilizou-se uma chapa aquecedora para fornecer calor à mistura, adaptada a uma caixa revestida de papel alumínio e lã de rocha, a fim de garantir o isolamento térmico do sistema (Figura 5). Quando este atingia 180 °C, após aproximadamente 15 minutos, realizava-se a mistura em alto cisalhamento com a adição de teores conhecidos de SBS, durante 2 horas, com rotação de 2000 rpm e controle constante da temperatura, por meio de medições com um termômetro digital.

Figura 4 – Equipamento de alto cisalhamento. (a) Misturador emulsificador 100L. (b) Estator utilizado no cisalhamento.



Fonte: Autora.

Figura 5 – Conjunto adaptado para mistura à 180 °C.



Fonte: Autora.

Na segunda etapa do protocolo, com os *pellets* em dimensões menores, foi adicionado aos poucos o teor de 0,1% de enxofre (S) duplamente ventilado, em relação à massa total da mistura, para atuar como reticulador nesse processo. Em seguida, foi realizada a mistura de baixo cisalhamento, durante 5 horas à 420 rpm, por meio da adaptação de uma parafusadeira de bancada no interior de uma estufa (Figura 6). A velocidade rotacional, medida com o auxílio de um tacômetro, foi determinada conforme procedimento realizado por Nunes-Ramos (2022).

Figura 6 – Parafusadeira adaptada para baixo cisalhamento.



Fonte: Autora.

Por meio do protocolo de mistura descrito anteriormente, foram produzidas amostras com teores de polímero SBS de 0, 2,5, 5,0 e 7,5% em relação à massa de ligante asfáltico, designadas nessa pesquisa como “0% SBS”, “2,5% SBS”, “5,0% SBS” e “7,5% SBS”, respectivamente. Nessa pesquisa, o ligante asfáltico 50/70 convencional foi denominado de “0% SBS REF”.

A produção de AMP exige um controle rigoroso da temperatura. Esse valor deve ser suficiente para promover a fusão do polímero e tornar a amostra fluida, mas, ainda assim, não gerar envelhecimento excessivo no CAP. Além disso, temperaturas acima de 200 °C podem levar à degradação do polímero. Assim, a determinação desta

e das demais variáveis do protocolo em estudo foi feita com base na literatura para misturas com o mesmo material, bem como em fichas técnicas fornecidas pela empresa Kraton.

Devido à ausência de uma unidade de monitoramento que ajuste constantemente a saída de calor excedente do sistema, gerado pelo atrito do alto cisalhamento, a temperatura alvo de 180 °C variou dentro de uma faixa de ± 5 °C durante o processo. A mistura de baixo cisalhamento apresentou menor variação nesta grandeza física, visto que foi realizada dentro de uma estufa capaz de manter a temperatura interior constante.

Visando a produção de uma mistura homogênea, foram necessárias algumas interrupções durante o alto cisalhamento para puxar, com o auxílio de uma espátula de metal, os pellets presos às paredes da lata e à cabeça do rotor-estator, como mostra a Figura 7. Além disso, foi realizado o *smear test* e o teste da pinça, descritos posteriormente, para determinar o tempo de 2 horas como necessário para um cisalhamento satisfatório, sem partículas de polímeros visíveis.

Figura 7 – Utilização de espátula de metal para retirada de pellets presos ao cabeçote.



Fonte: Autora.

Ao término das duas etapas do protocolo de mistura, foram produzidas as amostras para a realização dos ensaios de caracterização, de modo a evitar possível segregação do material e a obtenção de resultados distorcidos.

3.3.1 Smear Test

O *smear test* é realizado durante a mistura em alto cisalhamento e consiste em espalhar uma pequena quantidade da amostra em um pedaço grosso de papel, formando um filme fino que permite observar a existência de *pellets* ainda não triturados, como mostra a Figura 8. Esse procedimento empírico, utilizado pela empresa KRATON (2023), foi feito após os tempos de mistura de 1 hora, 1 hora e 30 minutos e 2 horas, quando o teste apresentou resultado satisfatório, sem partículas de polímeros visíveis. Dessa forma, determinou-se o tempo de mistura em alto cisalhamento necessário para o protocolo em estudo.

Figura 8 – Smear test realizado durante alto cisalhamento.

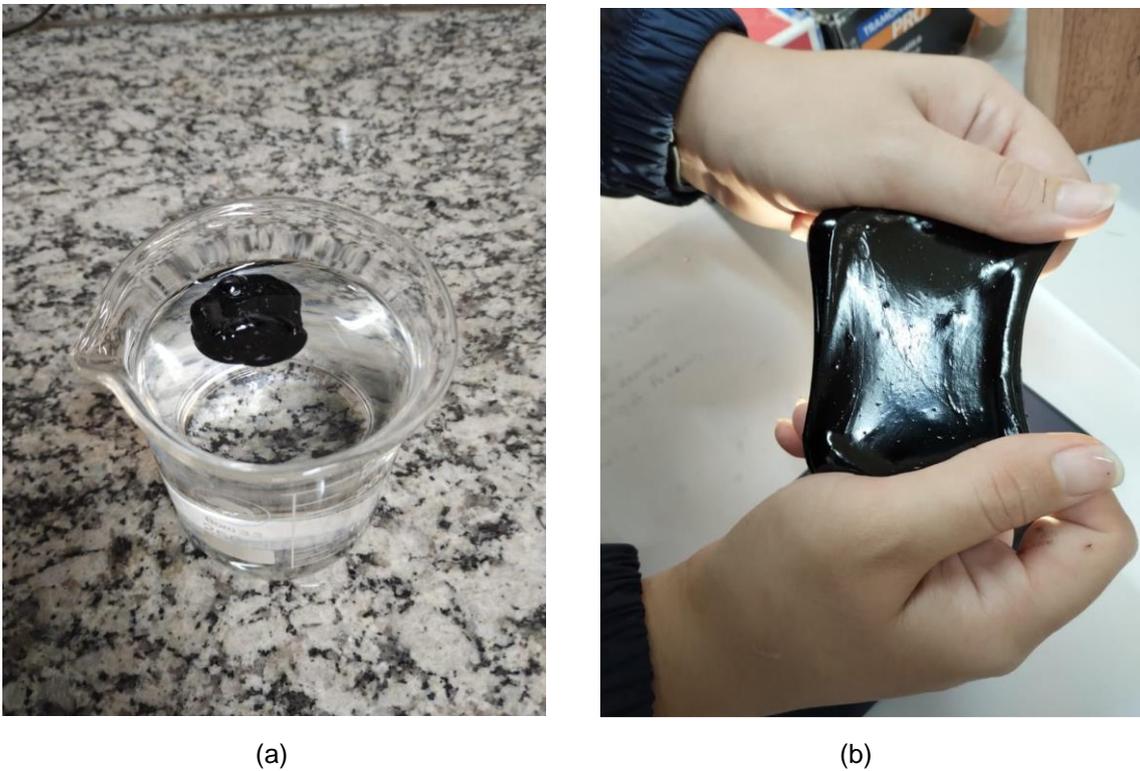


Fonte: Autora.

3.3.2 Teste da Pinça

O teste da pinça, também realizado durante o alto cisalhamento, consiste em esfriar uma pequena porção da mistura em um béquer com água e posteriormente, estica-la com as mãos e posicioná-la contra a luz, de forma a verificar a presença de pequenas partículas ainda não dissolvidas (Figura 9), como feito pela empresa KRATON (2023). Assim, foi possível constatar empiricamente a suficiência da moagem realizada à 2000 rpm, durante 2 horas.

Figura 9 – Teste da pinça. (a) Esfriamento em béquer com água. (b) Alongamento da amostra.



Fonte: Autora.

3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DE LIGANTES ASFÁLTICOS

Os ensaios laboratoriais utilizados para a avaliação das propriedades dos ligantes asfálticos convencionais e modificados por polímeros SBS foram realizados no GEPPASV, Laboratório de Pavimentação Asfáltica da UFSM e serão descritos nos itens subsequentes, divididos em três categorias: convencionais, reológicos e de separação de fases.

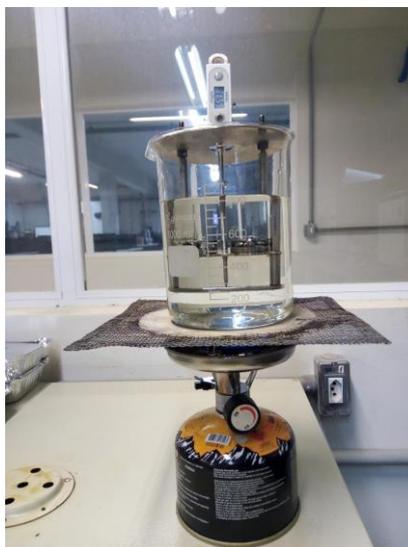
3.4.1 Ensaio Convencionais

As propriedades físicas são utilizadas na especificação dos ligantes asfálticos pela facilidade de execução em laboratório. Acrescidas a estas, outras propriedades são consideradas em ligantes modificados por polímeros. Esses parâmetros de caracterização foram analisados por meio dos ensaios de ponto de amolecimento, penetração e recuperação elástica, realizados nas amostras de ligante na condição virgem, com base nos procedimentos descritos a seguir.

3.4.1.1 Ponto de Amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento, pelo método do Anel e Bola, foi determinado conforme a norma DNIT 131/2010 – ME e consiste em uma medida empírica que correlaciona a temperatura na qual o asfalto atinge uma determinada condição de escoamento. Nesse ensaio, dois anéis de latão preenchidos com o mesmo material são mantidos suspensos em banho de Monoetilenoglicol, suportando pequenas esferas padronizadas de aço. O conjunto é aquecido a uma taxa controlada de 5 °C por minuto, de forma que a amostra amoleça no anel, cedendo ao peso da bola. O ponto de amolecimento consiste na média das temperaturas indicadas pelo termômetro no instante em que o material que envolve a esfera metálica entra em contato com a placa inferior do suporte. A Figura 10 mostra a execução do ensaio.

Figura 10 – Ensaio de Ponto de Amolecimento.



Fonte: Autora.

3.4.1.2 Penetração

O ensaio de penetração foi realizado conforme descrito na norma DNIT 155/2010 – ME e indica o grau de dureza do ligante asfáltico, sendo utilizado em diversas especificações no mundo como parâmetro de classificação. A penetração obtida nesse ensaio consiste na média aritmética de 3 valores de profundidade, em décimos de milímetro, em que a agulha padrão de 100 g penetra verticalmente na amostra submersa em água, durante o tempo de 5 segundos, à temperatura de 25 °C. Quanto maior o grau de dureza do ligante asfáltico, menor o valor da penetração. Na Figura 11, são apresentadas as amostras e o equipamento utilizado no ensaio.

Figura 11 – Ensaio de Penetração. (a) Penetrômetro manual. (b) Amostras de ensaio.



Fonte: Autora.

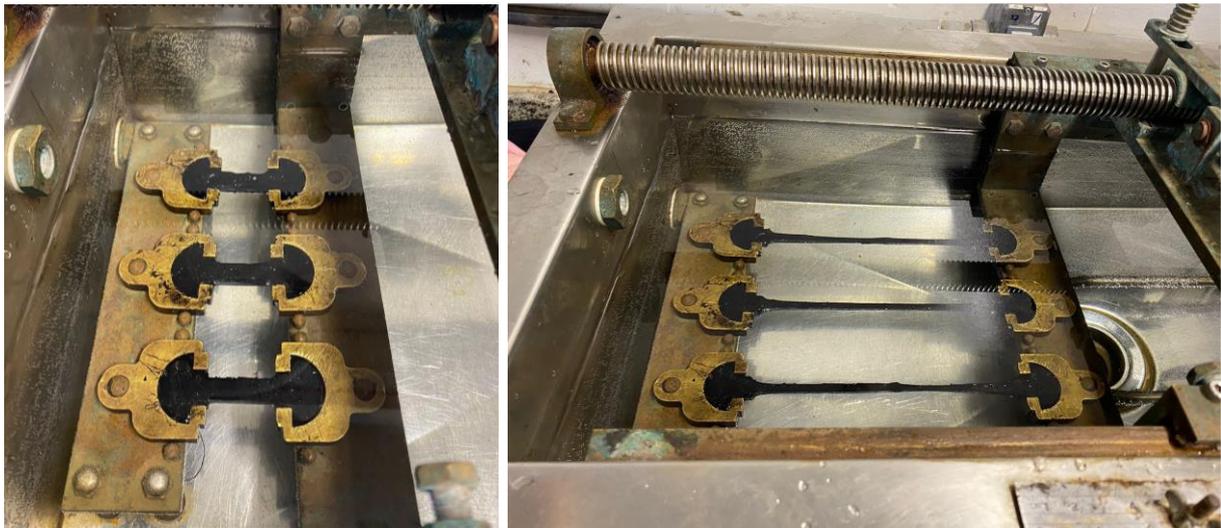
3.4.1.3 Recuperação Elástica

O ensaio de recuperação elástica, realizado conforme os procedimentos descritos na norma DNIT 130/2010 – ME, indica a capacidade do ligante de retornar à sua dimensão inicial, após interrupção da tração mecânica, tornando visível a diferença de comportamento de um asfalto convencional e um modificado por polímeros.

O ensaio é realizado em um ductilômetro que submete três amostras submersas em banho d'água, à temperatura de 25 °C, a um estiramento de 5 cm/min.

Ao atingir 20 cm de comprimento, o corpo de prova é cortado no centro e mantido em repouso por 60 minutos. Após esse período de retorno, é feita a leitura do comprimento da amostra, em centímetros, e o cálculo da recuperação elástica, em porcentagem, com base na média dos três valores de ensaio obtidos. A Figura 12 demonstra a execução do ensaio.

Figura 12 – Ensaio de Recuperação Elástica. (a) Amostras com dimensões iniciais. (b) Amostras após estiramento.



(a)

(b)

Fonte: Autora.

3.4.2 Ensaio Reológicos

As propriedades reológicas referem-se às características de fluxo e deformação dos materiais, avaliadas em função da temperatura e do tempo de carregamento. Esses parâmetros de caracterização foram determinados por meio dos ensaios de Viscosidade Rotacional e Cisalhamento Dinâmico, com base nos procedimentos descritos a seguir.

3.4.2.1 Viscosidade Rotacional Brookfield

O ensaio de viscosidade rotacional, especificado pelas normas ABNT NBR 15184/2021 e AASHTO T 316-22, mede a consistência dos ligantes asfálticos em temperaturas elevadas, propriedade importante para a análise do processo de mistura

do asfalto com os agregados. Por meio deste estudo, é possível estabelecer as temperaturas adequadas para os processos de usinagem e compactação das misturas asfálticas.

Para esta pesquisa, utilizou-se o viscosímetro rotacional *Brookfield* (Figura 13), que permite obter com a mesma amostra, a curva viscosidade-temperatura em ampla faixa de determinação, por meio da aplicação de uma velocidade rotacional constante capaz de gerar um torque entre 10 e 98% da capacidade do equipamento, em uma haste (*spindle*) imersa na amostra de ligante contida em um tubo cilíndrico termostaticamente controlado. O ensaio é realizado, normalmente, em temperaturas de 135, 150 e 177 °C, com rotações de 20, 50 e 100 rpm, respectivamente, com o uso do *spindle* nº 27 para as amostras de AMP e *spindle* nº 21 para amostras não modificadas.

Figura 13 – Viscosímetro Rotacional *Brookfield*.



Fonte: Autora.

3.4.2.2 Envelhecimento de Curto Prazo

A estufa de filme fino rotativo ou película delgada rotacional, *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT), ilustrada na Figura 14, simula o envelhecimento do ligante por oxidação e evaporação, a curto prazo, durante o processo de usinagem, transporte, aplicação e compactação em pista da mistura asfáltica, promovendo o endurecimento da amostra.

Durante o ensaio RTFOT, especificado pelas normas ABNT NBR 15235/2009 e AASHTO T 240-22, recipientes padronizados de vidro, contendo 35 g de ligante asfáltico, são continuamente girados a uma velocidade de 15 rpm, durante 85 minutos, à temperatura de 163 °C e submetidos a uma injeção de ar a uma taxa de 4 L/min, de forma a produzir uma fina película de asfalto. As amostras envelhecidas, expostas ao calor e ao fluxo de ar, são posteriormente ensaiadas no DSR.

Figura 14 – Estufa de Filme Fino Rotativo (RTFOT).



Fonte: Autora.

3.4.2.3 Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)

O reômetro de cisalhamento dinâmico (*dynamical shear rheometer – DSR*), ilustrado na Figura 15, é utilizado na caracterização viscoelástica do ligante asfáltico, ao submeter uma pequena amostra circular de CAP a tensões de cisalhamento oscilatórias, entre duas placas paralelas. O ensaio é realizado com amostras duplicatas para as condições virgens e envelhecidas no RTFOT, em uma varredura de frequências e temperaturas pré-determinadas, de modo a obter os parâmetros de dano e rigidez do material.

Figura 15 – Reômetro de Cisalhamento Dinâmico.



Fonte: Autora.

3.4.2.3.1 *Curvas Mestras, Espaço Black e Plano Cole-Cole*

O comportamento reológico dos ligantes asfálticos em função da temperatura e do carregamento, em uma ampla faixa de frequência, pode ser observado com o auxílio das curvas mestras, elaboradas com base no princípio da superposição tempo-temperatura, a partir dos valores de módulo dinâmico de cisalhamento $|G^*|$ e ângulo de fase (ϕ). Esses dados são provenientes do ensaio realizado no DSR (AASHTO T 315-22), em uma varredura de frequências na faixa de 0,1 a 30 Hz, com geometria de 8 mm, para as baixas temperaturas (5 a 35 °C) e geometria de 25 mm, para as altas temperaturas (35 a 65 °C).

Da mesma forma, foi elaborado o Espaço *Black*, relacionando o módulo dinâmico com o ângulo de fase e o Plano Cole-Cole, a partir dos valores do módulo de perda (G_2) e de armazenamento (G_1).

3.4.2.3.2 *Performance Grade (PG)*

O grau de desempenho (*Performance Grade* – PG) classifica os ligantes asfálticos em uma faixa de temperatura máxima e mínima, em que este apresenta determinadas propriedades.

Nessa pesquisa, o ensaio foi realizado segundo os procedimentos descritos na norma AASHTO R 29-15 (2019), com amostras de 25 mm de diâmetro e *gap* de 1 mm de espessura, em intervalos de 6 °C, de forma a obter o PG de alta temperatura que garanta um desempenho satisfatório em campo. Esse dado foi obtido a partir da máxima temperatura na qual os valores de $|G^*|/\sin(\varphi)$ são superiores ao limite de 1,0 kPa e 2,2 kPa, para as amostras nas condições virgem e pós-RTFOT, respectivamente.

Além disso, a norma AASHTO M 332-22 acrescentou outro parâmetro no PG, por meio do ensaio *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR), que classifica o ligante asfáltico por níveis de tráfego, como descrito na Tabela 8, apresentada no tópico seguinte.

3.4.2.3.3 *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR)

O *Multiple Stress Creep Recovery* foi utilizado na avaliação da resistência dos ligantes asfálticos à deformação permanente, segundo as normas AASHTO T 350 - 19 e DNIT 423/2020 – ME, em amostras envelhecidas no RTFOT com dimensões de 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura, à temperatura de 64 °C.

O ensaio MSCR consistiu em aplicar ciclos sucessivos de carregamento e recuperação, com duração de 10 segundos cada (1 segundo de carga constante e 9 segundos de repouso), em dois níveis de tensão, de modo a ultrapassar o domínio linear viscoelástico, provocando dano ao material. Os primeiros 10 ciclos de carregamento à 0,1 kPa condicionaram a amostra, enquanto os últimos 10 ciclos à 0,1 kPa juntamente com os 10 ciclos à 3,2 kPa determinaram o percentual de recuperação (R%) e a parcela não recuperável (J_{nr}), medida em kPa^{-1} .

Tabela 8 – Classificação MSCR quanto às classes de tráfego.

Limites (k/Pa)	Classificação MSCR
$J_{nr,3,2} \leq 4,5$	S - <i>Standard</i> (tráfego padrão)
$J_{nr,3,2} \leq 2,0$	H - <i>Heavy</i> (tráfego pesado)
$J_{nr,3,2} \leq 1,0$	V - <i>Very Heavy</i> (tráfego muito pesado)
$J_{nr,3,2} \leq 0,5$	E - <i>Extreme</i> (tráfego extremamente pesado)

Fonte: Adaptado da norma AASHTO M 332 - 22.

3.4.2.3.4 Linear Amplitude Sweep (LAS)

O *Linear Amplitude Sweep* foi utilizado na avaliação do comportamento dos ligantes asfálticos frente ao fenômeno de fadiga, conforme procedimentos descritos na norma AASHTO T 391 – 20 e DNIT 439/2022 – ME, em amostras envelhecidas no RTFOT com dimensões de 8 mm de diâmetro e 2 mm de espessura, à temperatura de 19 °C.

O ensaio foi realizado em duas etapas, executadas sucessivamente. Durante a primeira, aplicou-se um carregamento com amplitude de deformação constante de 0,1%, em uma varredura de frequências de 0,2 a 30 Hz, de modo a determinar as propriedades viscoelásticas lineares do ligante asfáltico. Já na segunda etapa, aplicou-se um carregamento com frequência constante de 10 Hz, em uma varredura de amplitudes de deformação com crescimento linear de 0,1 a 30%, ao longo de 3100 ciclos, de forma a se obter as propriedades de dano do material.

O critério de ruptura adotado para o ensaio de LAS foi o de máxima pseudoenergia de deformação acumulada (W^R). De forma a avaliar o comportamento à fadiga, foi elaborado a curva característica de integridade versus dano (C vs. D) e a curva de fadiga, a partir do número de ciclos até a ruptura (N_f) em função da deformação de cisalhamento aplicada (WANG et al., 2015). Além disso, foi calculado o Fator de Fadiga do Ligante a 19°C ($FFL_{19°C}$), proposto por Martins (2014) e utilizado para a classificação dos ligantes por Possebon (2021), como pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 – Classificação com base no $FFL_{19°C}$.

Classes	FFL 19°C
1 - Pobre	$FFL < 1,22$
2 - Inferior	$1,22 < FFL < 1,31$
3 - Mediano	$1,31 < FFL < 1,48$
4 - Superior	$1,48 < FFL < 1,57$
5 - Excelente	$FFL > 1,57$

Fonte: Adaptado de Possebon (2018).

3.4.3 Ensaio de separação de fases

O ensaio de separação de fases foi realizado segundo os procedimentos descritos nas normas DNIT 384/2022 – ME e ABNT NBR 15166:2004, para quantificar a estabilidade à estocagem dos ligantes modificados por polímeros e indicar a eficiência do processo de modificação.

O ensaio foi realizado em duplicata, onde dois tubos de alumínio preenchidos com 50 gramas de amostra foram lacrados e mantidos na posição vertical por 48 horas, no interior de uma estufa à temperatura de 163 °C. Após esse período de condicionamento, os tubos foram postos num freezer a -10 °C, aonde permaneceram por 4 horas.

Com as amostras totalmente solidificadas, os tubos foram cortados em três seções com aproximadamente o mesmo comprimento, como mostra a Figura 16. A seção do meio foi descartada, enquanto as seções do topo e do fundo foram ensaiadas pelo método do anel e bola, conforme descrito anteriormente. A diferença obtida entre as temperaturas do ponto de amolecimento de cada seção indica a ocorrência da separação de fase.

Figura 16 – Ensaio de separação de fases. (a) Tubos metálicos após refrigeração. (b) Tubos metálicos seccionados.



(a)

(b)

Fonte: Autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos no processo de mistura e nos ensaios descritos anteriormente, ao longo do programa experimental, bem como sua discussão, de modo a avaliar e comparar as propriedades obtidas em cada amostra de ligante asfáltico convencional e modificado.

4.1 PROCESSO DE INCORPORAÇÃO DO SBS

De início, o processo de mistura foi realizado em alto cisalhamento por 1 hora nas condições já especificadas. Nessas amostras, foi possível identificar de forma visual, uma significativa quantidade de polímeros não dissolvidos no ligante asfáltico, que se tornava maior conforme o aumento do teor de SBS adicionado, constatando a insuficiência do intervalo de 1 hora para a produção de AMP. Além disso, foi observado a ocorrência do fenômeno de inchamento nos *pellets*, com leve aumento das suas dimensões.

Após a mistura dessas amostras também em baixo cisalhamento, os polímeros não triturados na etapa anterior foram encapsulados pelo enxofre adicionado, causando separação de fase pela formação de grumos desse material e impedindo a modificação efetiva do asfalto pelo polímero, como pode ser observado na Figura 17. Por esse motivo, não foram realizados ensaios de caracterização nesse lote de misturas. Vale ressaltar, ainda, a importância da adição do enxofre de forma gradual, para evitar a sua aglomeração.

De forma a facilitar a incorporação do polímero SBS ao CAP, evitando envelhecimento excessivo por processos de mistura mais rigorosos, tentou-se reduzir a granulometria dos *pellets* com o uso de equipamentos domésticos comuns, porém não se obteve sucesso.

Outra dificuldade encontrada durante esse primeiro processo de mistura foi de controlar a temperatura dentro de um intervalo estreito, condição imprescindível para a produção de AMP de alta qualidade. Isso porque o atrito gerado pelo alto cisalhamento produziu calor em excesso no sistema, ocasionando a perda de misturas pela possível degradação do polímero em temperaturas acima de 200 °C. Como forma de contornar essa situação, a chapa de aquecimento permaneceu desligada em grande parte do tempo.

Figura 17 – Ligante asfáltico com SBS adicionado. (a) Após 1 hora de alto cisalhamento. (b) Após 5 horas de baixo cisalhamento.



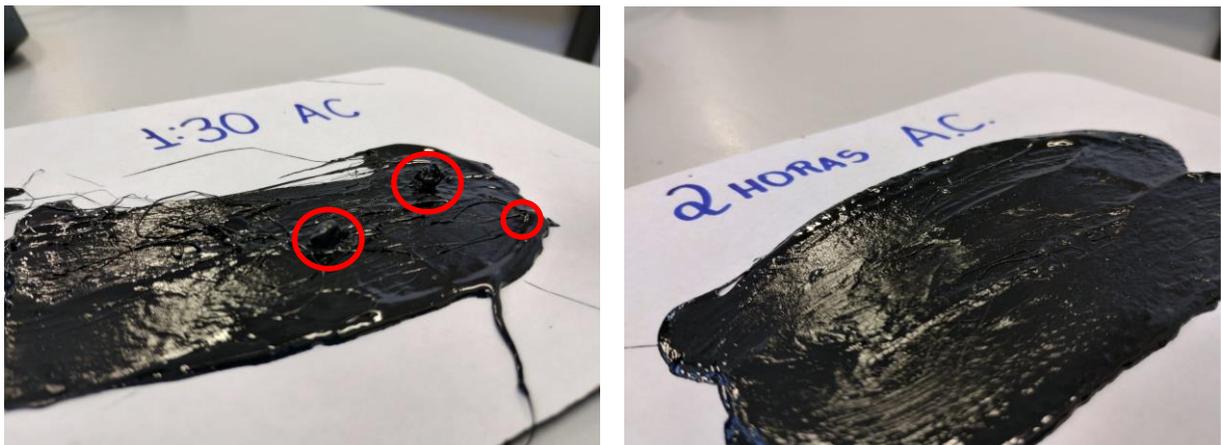
(a)

(b)

Fonte: Autora.

Em um segundo momento, para a produção de novas amostras, optou-se por realizar a mistura de alto cisalhamento em períodos maiores, até se obter um ligante sem partículas de polímeros visíveis. Essa verificação foi feita de forma visual, por meio do *smear test* (Figura 18) e do teste da pinça (Figura 19).

Figura 18 – Smear test do alto cisalhamento. (a) Após 1 hora e 30 minutos. (b) Após 2 horas.

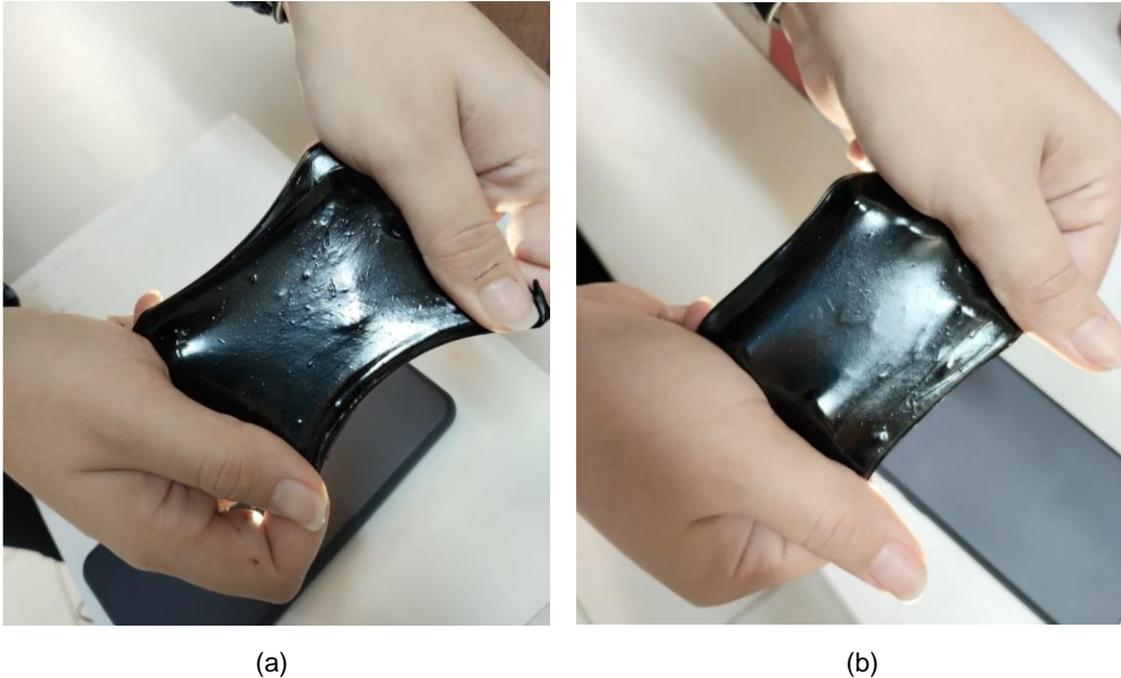


(a)

(b)

Fonte: Autora.

Figura 19 – Teste da pinça do alto cisalhamento. (a) Após 1 hora e 30 minutos. (b) Após 2 horas.



Fonte: Autora.

Após 1 hora e 30 minutos de alto cisalhamento, foi perceptível a redução dos *pellets* em suspensão, indicando o aumento do teor de polímero incorporado no ligante asfáltico, nesse acréscimo de tempo. Entretanto, no *smear test*, ainda foi possível constatar a presença de partículas não dissolvidas, em destaque nas imagens acima, que produziram amostras de ensaio heterogêneas. O mesmo pôde ser observado também pelo teste da pinça.

Imediatamente após as verificações, acrescentou-se mais 30 minutos de mistura em alto cisalhamento, o que também ocorre na indústria durante a modificação de ligantes asfálticos mais complexos. Após as 2 horas, repetiu-se o *smear test* e o teste da pinça, aonde foi possível observar uma maior homogeneidade das misturas, pela redução das partículas visíveis, em comparação com os períodos anteriores.

Nesse instante, o protocolo foi finalizado para evitar maior envelhecimento do ligante e as amostras, após mistura em baixo cisalhamento, foram imediatamente moldadas, para impedir uma possível segregação do material e a obtenção de resultados distorcidos. Iniciou-se pelas amostras a serem ensaiadas no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico, devido à grande importância dos dados obtidos nesse equipamento e as pequenas dimensões de suas amostras, de 8 e 25 mm, aonde qualquer partícula de SBS não dissolvida, geraria excessiva heterogeneidade.

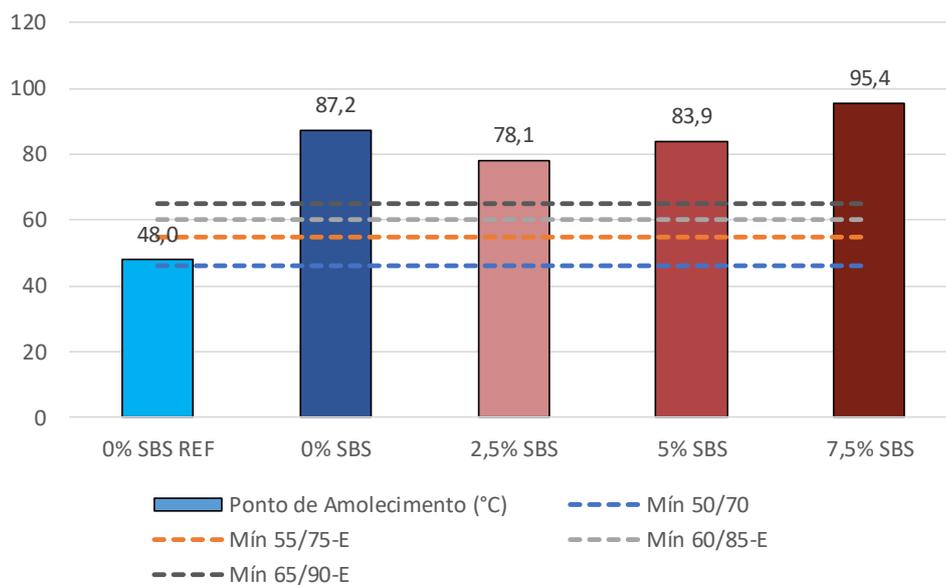
Além disso, mesmo antes da realização dos ensaios, foi perceptível o maior enrijecimento do AMP produzido com 2 horas de alto cisalhamento, comparado com o produzido com apenas 1 hora. Isso porque, nessa condição de mistura, ocorre excessiva injeção de ar quente em uma porção muito pequena de asfalto, processo semelhante ao utilizado na produção de asfalto oxidado ou soprado (*blown asphalt*), utilizado para fins industriais. No entanto, em tempos inferiores, não se obteve a produção de ligante modificado nos teores de polímeros desejados.

4.2 ENSAIOS CONVENCIONAIS

4.2.1 Ponto de Amolecimento

Os resultados obtidos no ensaio de ponto de amolecimento, exibidos na Figura 20 abaixo, foram comparados com os mínimos sugeridos para o CAP convencional 50/70 (DNIT 095/2006 – EM) e para os asfaltos modificados por polímeros elastoméricos 55/75, 60/85 e 65/90 (DNIT 129/2011 – EM). Dessa forma, foi possível obter um entendimento acerca da resistência dos ligantes asfálticos à deformação permanente em altas temperaturas.

Figura 20 – Resultados de Ponto de Amolecimento.



Fonte: Autora.

A análise dos resultados mostrou um aumento significativo na temperatura do ponto de amolecimento, à medida que se aumenta o teor de SBS adicionado, especialmente quando se compara as misturas de 5,0% e 7,5%, onde o acréscimo foi de aproximadamente 14%. Como resultado, todos os ligantes modificados ultrapassaram os valores mínimos para o AMP 65/90, que exige maior valor de temperatura, assim como o 0% SBS REF, que ultrapassou o limite para o CAP 50/70.

O elevado valor obtido no ensaio pelo 0% SBS sugere que o processo de mistura realizado nesse estudo gera excessivo envelhecimento. Ao comparar esse valor com o obtido pelo teor de 2,5% de SBS, percebe-se uma redução na temperatura, indicando uma possível proteção gerada pelo polímero frente à oxidação.

Por fim, a análise dos resultados sugere que pode haver um ganho de desempenho em relação à deformação permanente em altas temperaturas nas misturas com maiores teores de SBS, o que pode ser comprovado pelo elevado valor obtido com o teor de 7,5%, quando comparado à mistura 0% SBS, utilizada como referência ao envelhecimento gerado pelo protocolo em estudo.

4.2.2 Penetração

As profundidades obtidas no ensaio de penetração estão exibidas na Figura 21 abaixo, em décimos de milímetros. Esses valores também foram comparados com os limites máximos e mínimos para o CAP 50/70 e os AMP 55/75, 60/85 e 65/90. Assim, foi possível inferir sobre o grau de dureza de cada amostra.

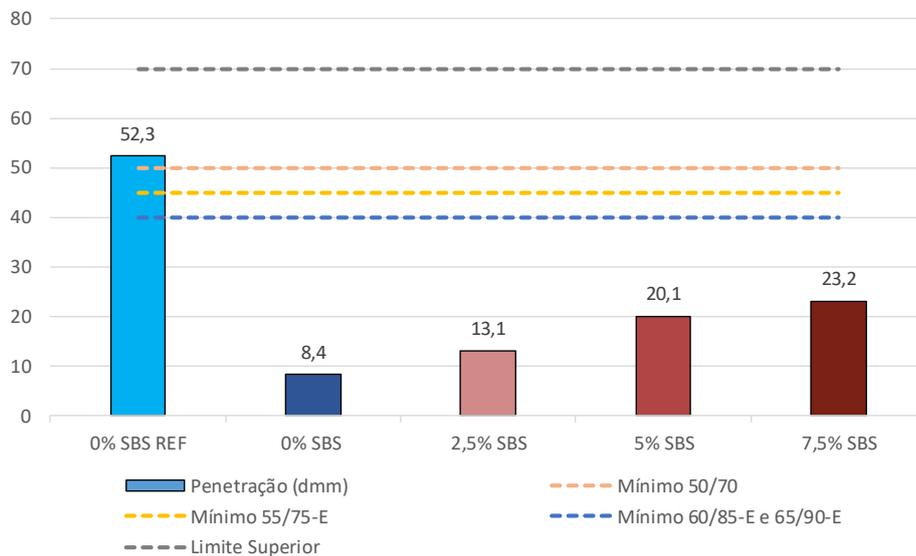
A análise desses dados demonstrou o alto potencial de oxidação do protocolo de mistura, visto que todas as amostras submetidas a esse processo, apresentaram penetrações inferiores ao limite mínimo previsto em norma para os ligantes modificados, sugerindo elevada “dureza” do CAP.

Em contrapartida, obteve-se um aumento nos valores de penetração com a adição de maiores teores de polímeros, diferentemente do que foi constatado por Nunes-Ramos (2022), na modificação de CAP com polietileno de alta densidade.

Segundo Ceratti (2015), a resistência ao envelhecimento e à oxidação dos ligantes asfálticos são propriedades que sofrem melhorias significativas com a adição de polímeros. Isso pode ser observado pelo acréscimo nas profundidades obtidas

durante ensaio, indicando a capacidade do polímero SBS de flexibilizar a rigidez em temperaturas intermediárias.

Figura 21 – Resultados de Penetração.



Fonte: Autora.

4.2.3 Recuperação Elástica

Os percentuais de recuperação elástica obtidos para cada ligante asfáltico estão exibidos na Figura 22 abaixo, assim como os limites especificados em norma para a classificação destes como AMP 55/75, 60/85 e 65/90.

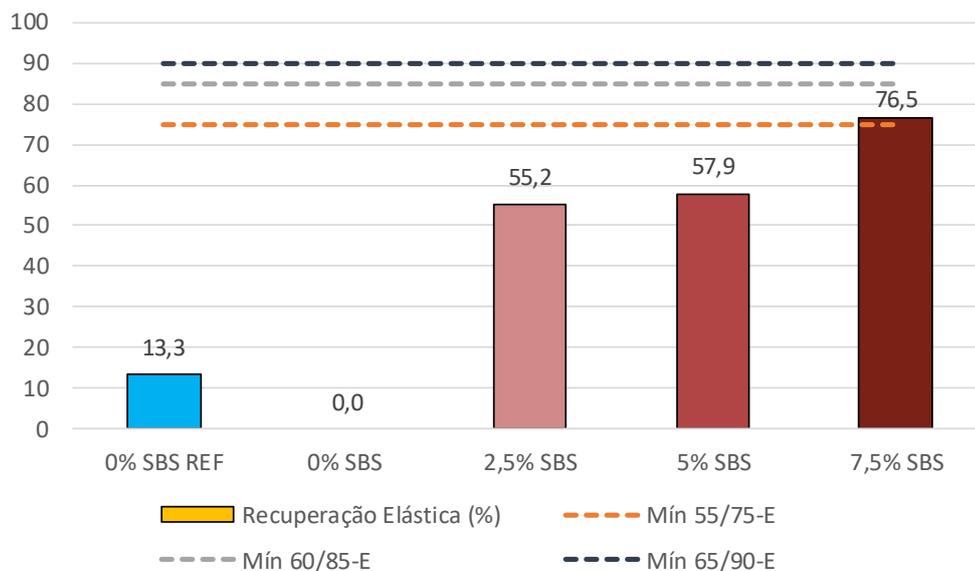
Os valores obtidos no ensaio exibem, de forma clara, a diferença no comportamento de um ligante modificado por polímero para um CAP 50/70, quanto à capacidade de retornar à sua condição inicial. Por esse motivo, as especificações não estabelecem parâmetros de recuperação elástica para o asfalto convencional.

A mistura “0% SBS” obteve percentual de retorno nulo, isso porque não suportou o alongamento necessário de 20 cm durante o ensaio, o que provocou o rompimento de suas três amostras. Essa situação pode ser explicada por sua elevada rigidez, proveniente do processo de mistura e pela inexistência de SBS incorporado, capaz de intensificar as propriedades elásticas do material em temperaturas mais baixas.

Além disso, foi possível observar claramente um crescimento no percentual de recuperação, consequência do efeito gerado pelo aumento do teor de elastômeros no

asfalto. Entretanto, apenas a mistura “7,5% SBS” superou o limite mínimo estabelecido para ligantes modificados 55/75 – E. Isso decorre do acréscimo na fração de asfaltenos pelo intenso processo de envelhecimento sofrido por essas amostras, que aumentam a rigidez e reduzem a elasticidade dos ligantes asfálticos (MULLINS, 2010; CAVALLI et al., 2018).

Figura 22 – Resultados de Recuperação Elástica.



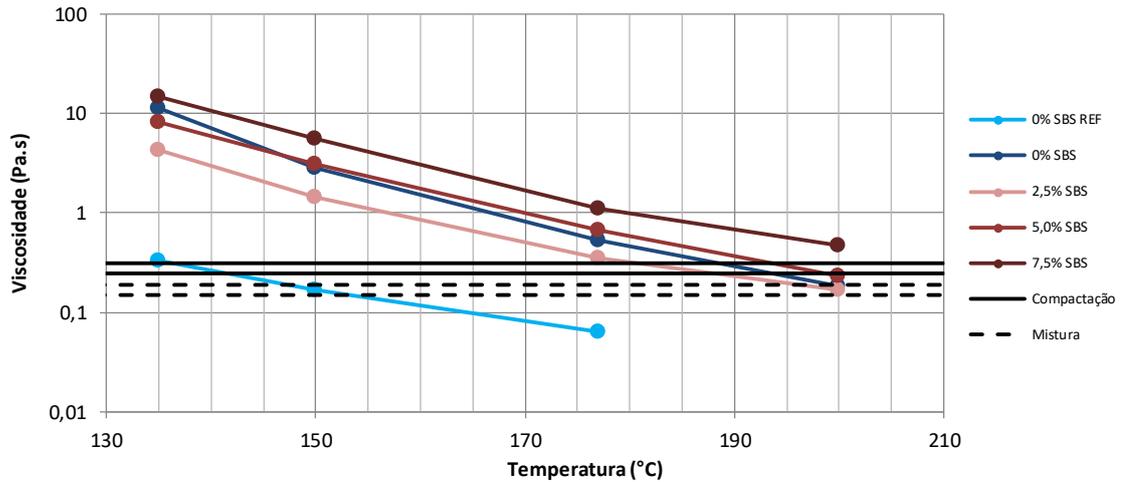
Fonte: Autora.

4.3 ENSAIOS REOLÓGICOS

4.3.1 Viscosidade Rotacional Brookfield

Os valores de viscosidade em função da temperatura estão apresentados, em escala logarítmica, na Figura 23. Para a realização do ensaio, utilizam-se normalmente rotações de 20, 50 e 100 rpm, em temperaturas de 135, 150 e 177 °C, respectivamente. No entanto, ao seguir essa recomendação, obteve-se torque superior à 98% da capacidade do equipamento em determinadas combinações de mistura e temperatura, sendo necessário a redução da velocidade rotacional para a realização do ensaio nesses casos, o que indica a elevada consistência dos ligantes asfálticos em estudo.

Figura 23 – Gráfico Viscosidade vs. Temperatura.



Fonte: Autora.

A análise do gráfico mostra que o processo de mistura elevou de forma significativa os valores de viscosidade obtidos pelas amostras modificadas, em comparação com o CAP 50/70, denominado como “0% SBS REF”, indicando o alto grau de oxidação desses ligantes asfálticos. Essa situação pode ser comprovada ao comparar os valores obtidos no ensaio com as viscosidades máximas estabelecidas em norma de 3000, 2000 e 1000 centipoise para as temperaturas de 135, 150 e 177°C, respectivamente, conforme mostra a Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados de Viscosidade Brookfield.

Temperaturas (°C)	Viscosidade (cP)					
	0% SBS REF	Limite	0% SBS	2,5% SBS	5,0% SBS	7,5% SBS
135	327,5	3000	11250,0	4303,8	8153,8	14938,3
150	166,3	2000	2803,5	1456,5	3083,5	5568,0
177	62,7	1000	537,5	354,3	680,8	1120,0
	Viscosidade inferior ao limite máximo para AMP/SBS					
	Viscosidade superior ao limite máximo para AMP/SBS					

Fonte: Autora.

As curvas representativas dos teores de 2,5, 5,0 e 7,5% de SBS mostram que a incorporação de polímero aumenta consideravelmente a viscosidade dos ligantes asfálticos. Em contrapartida, o aumento da temperatura provoca a redução da mesma.

Os intervalos adequados de viscosidade para compactação e mistura estão exibidos no gráfico e indicam a necessidade de temperaturas mais elevadas que as usuais, para que os ligantes modificados possuam consistência ideal durante esses

processos, como pode ser observado também pela Tabela 11. Essa condição parece estar associada ao intenso envelhecimento oxidativo gerado pelo protocolo em estudo. Diante disso, diversos intervalos sugerem valores acima de 200 °C, o que poderia levar a degradação do polímero e a consequente modificação na sua estrutura.

Tabela 11 – Temperaturas de Compactação e Mistura.

Misturas	Faixa de Compactação (°C)	Faixa de Mistura (°C)
0% SBS REF	135 - 141	148 - 154
0% SBS	190 - 193	198 - 202
2,5% SBS	182 - 187	196 - 201
5,0% SBS	195 - 199	204 - 209
7,5% SBS	204 - 208	213 - 217

Fonte: Autora.

4.3.2 Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)

4.3.2.1 Curvas Mestras, Espaço Black e Plano Cole-Cole

O efeito da incorporação de polímero SBS na rigidez dos ligantes asfálticos, nas condições virgem e após RTFOT, em um amplo espectro de frequências e temperaturas, foi avaliado com o auxílio das curvas mestras. A partir do princípio da superposição tempo-temperatura, foram elaboradas as curvas mestras de módulo de cisalhamento dinâmico $|G^*|$ e ângulo de fase (ϕ), por meio da utilização de *shift factors*, que transladam os dados obtidos nas diferentes temperaturas de ensaio aos dados pertencentes à temperatura de referência de 25 °C, formando uma curva contínua.

O tratamento dos dados obtidos foi feito, posteriormente, por meio da modelagem 2S2P1D, proposta por Olard e Benedetto (2003), a fim de gerar uma aproximação matemática que representa o real comportamento linear viscoelástico do ligante asfáltico em campo.

As curvas mestras com os dados experimentais de módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase serão apresentadas nas condições virgem e envelhecida, junto às respectivas modelagens 2S2P1D.

Os valores encontrados para os parâmetros do modelo reológico 2s2p1d, assim como as constantes C1 e C2 de WLF (WILLIAMS; LANDEL; FERRY; 1955), podem ser observados para o ligante virgem e após RTFOT na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros 2S2P1D, C1 e C2.

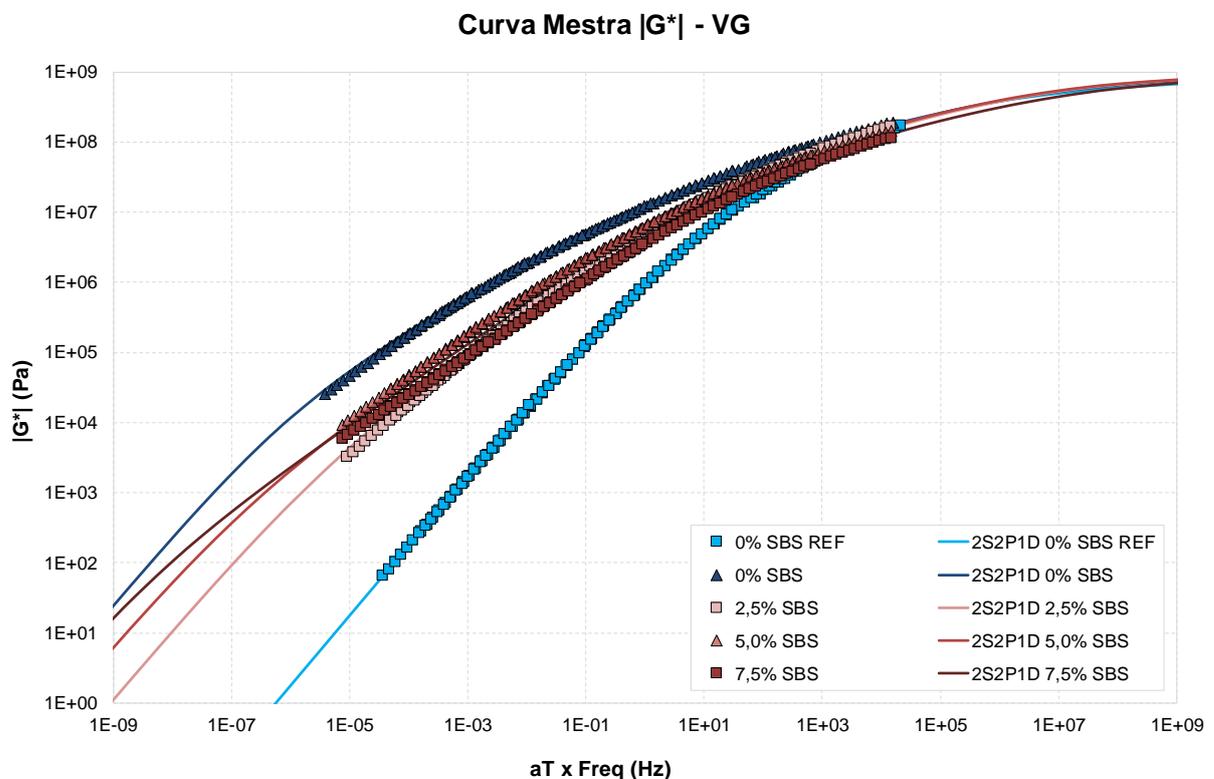
CAP	PARÂMETROS 2S2P1D							WLF	
	E_{00} (Pa)	E_0 (Pa)	k	h	δ	τ_E (s)	β	C1	C2
0% SBS REF VG	0,00	8,90E+08	0,190	0,555	1,95	2,50E-06	130	13,39	113,93
0% SBS REF RTFOT	0,00	8,90E+08	0,190	0,555	2,30	3,50E-06	167	15,54	130,22
0% SBS VG	0,00	9,20E+08	0,250	0,540	10,00	3,50E-04	12500	15,95	121,87
0% SBS RTFOT	0,00	9,20E+08	0,250	0,540	10,00	6,00E-04	20000	15,95	121,87
2,5% SBS VG	0,00	9,20E+08	0,270	0,620	8,00	8,00E-05	2500	15,15	135,28
2,5% SBS RTFOT	0,00	9,20E+08	0,270	0,620	8,00	9,00E-05	6000	15,83	122,22
5,0% SBS VG	0,00	9,20E+08	0,270	0,600	8,00	1,00E-04	12000	16,19	119,46
5,0% SBS RTFOT	0,00	9,20E+08	0,270	0,580	8,50	1,50E-04	55000	16,17	121,56
7,5% SBS VG	0,00	9,20E+08	0,250	0,580	8,00	4,00E-05	100000	16,77	123,41
7,5% SBS RTFOT	0,00	9,20E+08	0,250	0,580	8,00	4,00E-05	120000	16,17	119,77

Fonte: Autora.

Como pode ser observado na Figura 24, as curvas mestras de módulo de cisalhamento dinâmico demonstram o alto potencial de oxidação do protocolo de mistura, composto pelo processo de alto e de baixo cisalhamento. Observa-se que a

amostra 0% SBS submetida somente ao protocolo de mistura, sem a adição de polímeros, obteve os valores mais elevados de rigidez, sugerindo o maior incremento de envelhecimento entre todos os ligantes testados. Com a adição de SBS, os dados também demonstram aumento de rigidez, embora em menor magnitude quando comparados ao ligante 0% SBS. Tal fato sugere que, como o protocolo de mistura foi realizado para todos estes ligantes, a adição de SBS funcionou como um protetor frente ao envelhecimento gerado durante o protocolo de mistura.

Figura 24 – Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico na condição virgem.



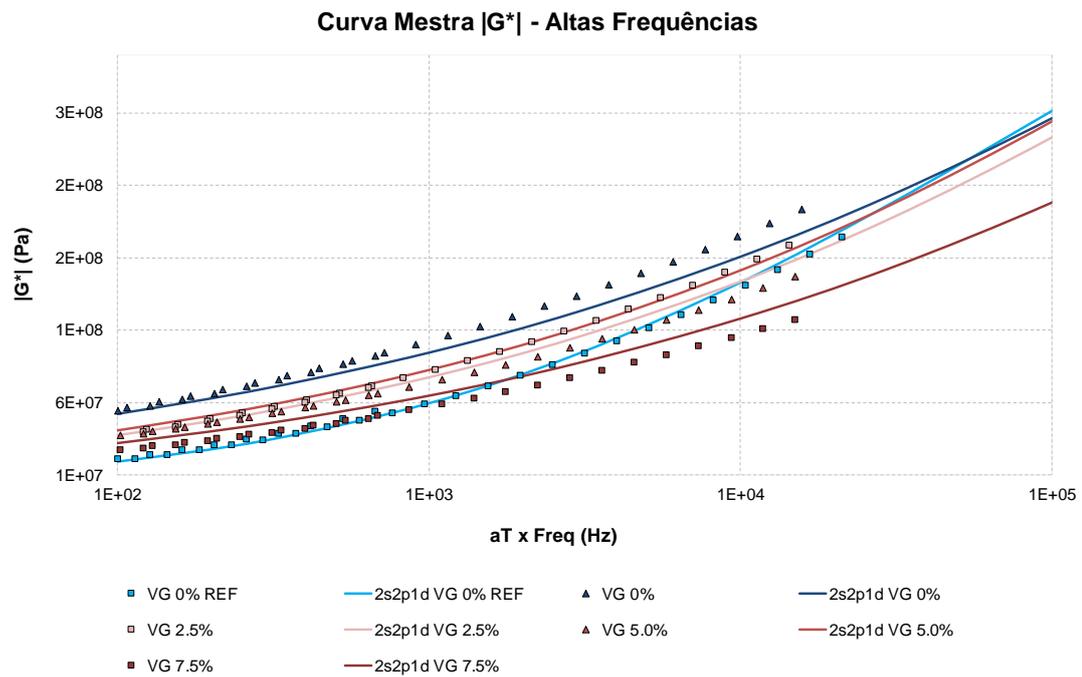
Fonte: Autora.

Não foram encontradas tendências ao longo do aumento do teor de SBS no ligante base. Este fato é condicionado pelo efeito concomitante do envelhecimento junto com o efeito da adição de SBS, adição esta que leva ao aumento da rigidez por ação do polímero, ao mesmo tempo que diminuiu a taxa de incremento de rigidez ao longo do processo de mistura, visto o comportamento protetivo frente ao envelhecimento. A discretização de ambos os efeitos de influência é tarefa que está além do escopo deste trabalho.

O aumento das rigidezes na zona das altas temperaturas e baixas frequências (Figura 25) sugere um aumento da resistência a deformação permanente tanto com o envelhecimento, quanto com a adição dos teores de polímero. O aumento das rigidezes nos intervalos de baixas temperaturas e altas frequências (Figura 26), ocasionado pelo envelhecimento, pode levar a uma ruptura de caráter mais frágil, possivelmente tornando os ligantes mais suscetíveis ao fenômeno de fadiga. Já com a adição de polímeros, os valores de rigidez diminuem e conseqüentemente esse comportamento frágil é reduzido.

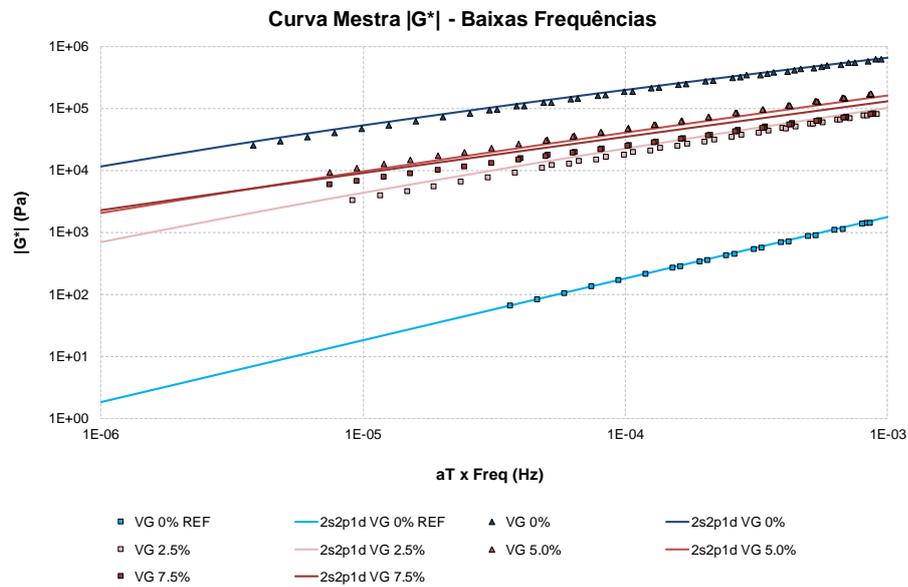
De maneira geral, o efeito do envelhecimento pelo protocolo de mistura utilizado foi muito mais influente na alteração dos dados de módulo de cisalhamento, em comparação aos efeitos gerados pela adição dos diferentes teores de polímero nesta pesquisa.

Figura 25 – Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico nas baixas frequências.



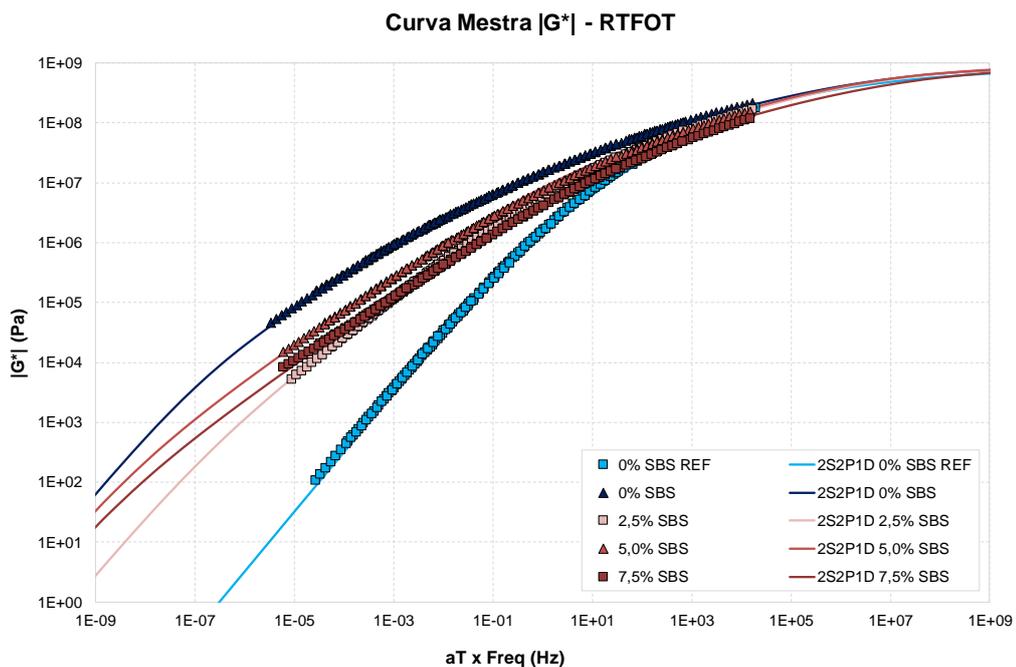
Fonte: Autora.

Figura 26 – Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico nas altas frequências.



As curvas para os mesmos ligantes, após passagem pelo protocolo de RTFOT, podem ser visualizadas na Figura 27 abaixo. As tendências encontradas são semelhantes às observadas na condição virgem.

Figura 27 – Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico na condição após RTFOT.



As curvas mestras com os dados experimentais de ângulo de fase para as condições virgem e envelhecida em RTFOT podem ser observadas, juntamente com as respectivas modelagens 2S2P1D, nas Figuras 28 e 29.

Figura 28 – Curvas Mestras de Ângulo de Fase na condição virgem.

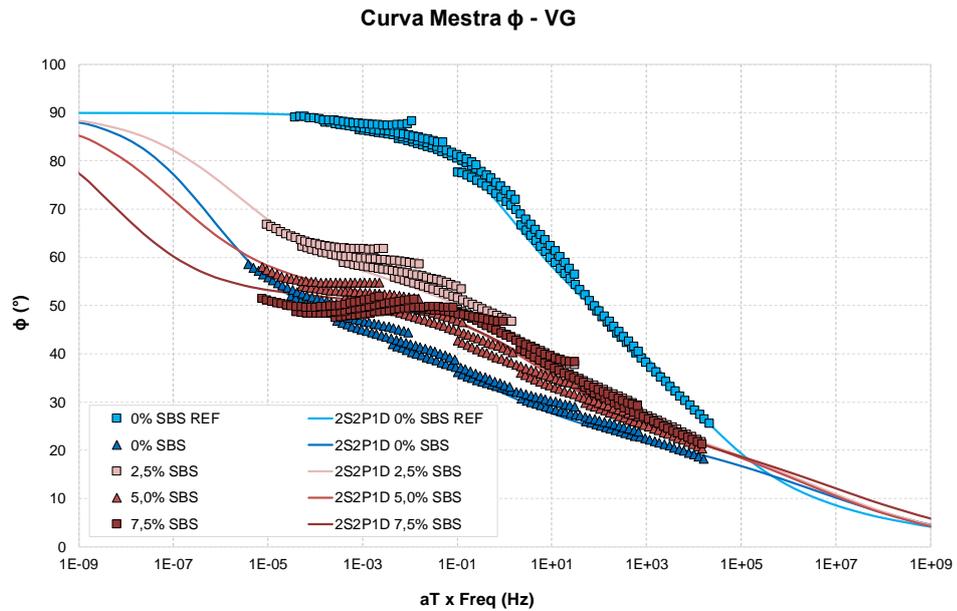
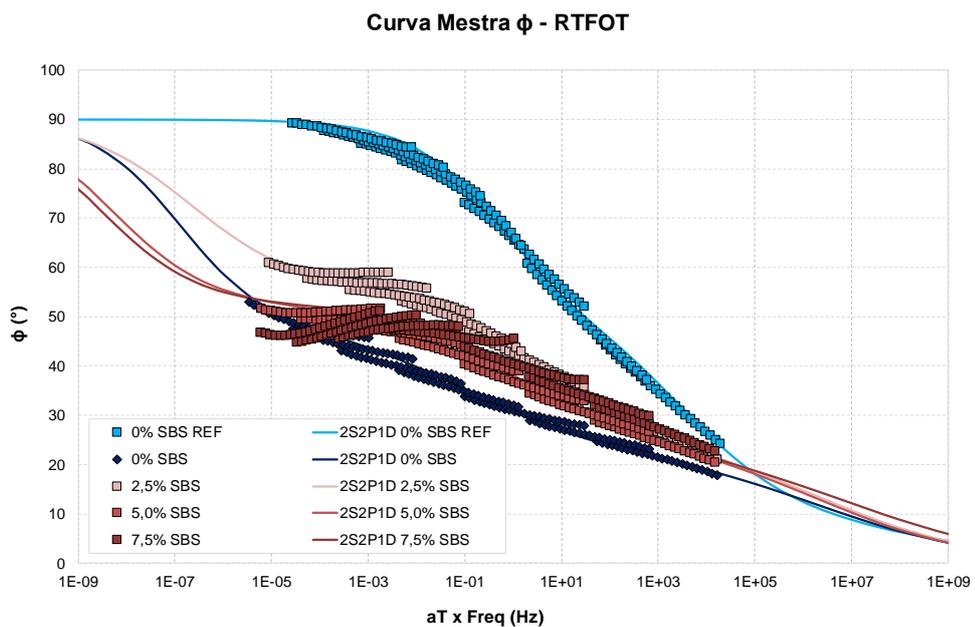


Figura 29 – Curvas Mestras de Ângulo de Fase na condição após RTFOT.



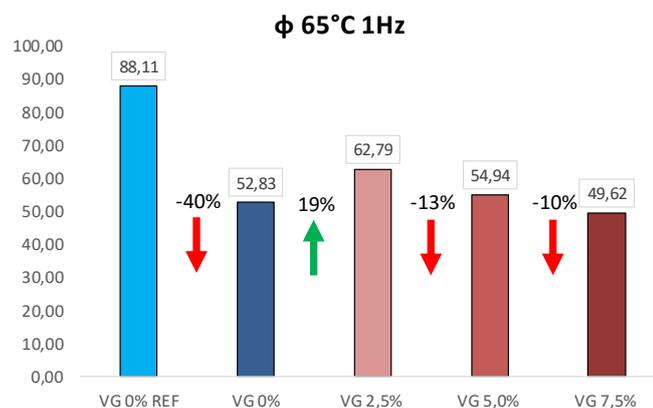
Os dados observados nas curvas mestras de ângulo de fase, tanto para a condição virgem, quanto para a condição após RTFOT, demonstram o alto potencial oxidativo do protocolo de mistura utilizado, assim como foi possível observar nas curvas mestras de módulo de cisalhamento dinâmico.

Esse cenário pode ser observado com a perda severa dos valores de ângulo de fase na mistura 0% SBS, em comparação com a mistura 0% SBS REF. Tais achados demonstram que a parcela elástica de deformação se torna significativamente maior nas altas temperaturas, à medida que ocorre a perda da parcela viscosa, tendência clara para ligantes mais envelhecidos.

Os ligantes modificados por SBS apresentaram menor perda de parcela viscosa, já que seus valores de ângulo de fase se encontram ligeiramente aumentados em relação ao ligante que passou apenas pelo protocolo de mistura (0% SBS). Este fato sugere novamente a proteção dada pelo polímero SBS frente ao envelhecimento do ligante asfáltico.

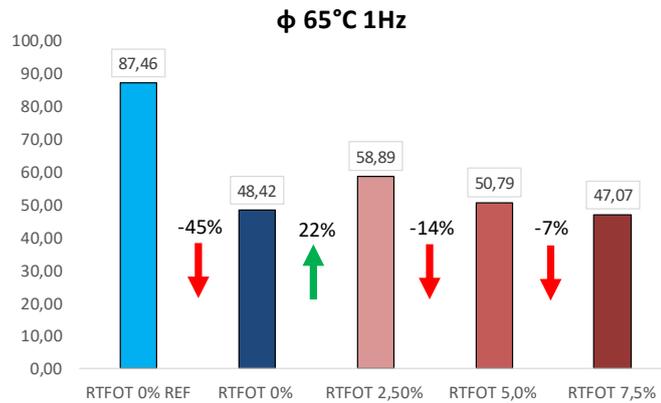
As tendências não foram claras quanto a porcentagem de adição de SBS, com os efeitos do envelhecimento e da adição do polímero ocorrendo concomitantemente. Os ligantes com 5,0% e 7,5% de teor de SBS apresentaram valores de ângulo de fase menores em relação ao teor de 2,5%, efeito esperado pelos maiores níveis de modificação, que tornam o ligante mais rígido e mais elástico em altas temperaturas, levando à maior resistência frente ao fenômeno de afundamento de trilha de roda em campo. Essa situação foi exemplificada nas Figuras 30 e 31, para as condições virgem e após RTFOT respectivamente, aonde são mostrados os valores de ângulo de fase à 65 °C, com frequência de carregamento de 1Hz e os percentuais de variação entre esses valores.

Figura 30 – Valores de Ângulo de Fase na condição virgem, 65 °C, 1Hz.



Fonte: Autora.

Figura 31 – Valores de Ângulo de Fase na condição após RTFOT, 65 °C, 1Hz.

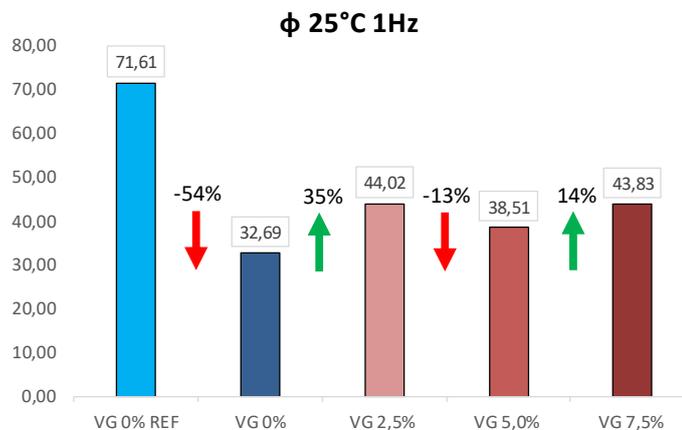


Fonte: Autora.

Nas zonas de temperaturas intermediárias e baixas, os valores de ângulo de fase nos ligantes asfálticos com polímero adicionado são superiores aos valores correspondentes ao ligante 0% SBS, submetido apenas ao processo de mistura. Tal situação sugere ligantes menos suscetíveis ao trincamento por fadiga, visto a maior capacidade de relaxar as tensões aplicadas, dada pela parcela aumentada de deformações viscosas com a modificação por SBS.

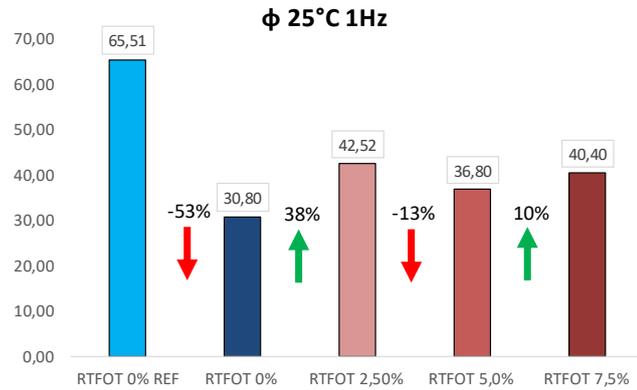
Esse comportamento está exemplificado nas Figuras 32 e 33, para as condições virgem e após RTFOT respectivamente, aonde são mostrados os valores de ângulo de fase à 25 °C, com frequência de carregamento de 1Hz.

Figura 32 – Valores de Ângulo de Fase na condição virgem, 25 °C, 1Hz.



Fonte: Autora.

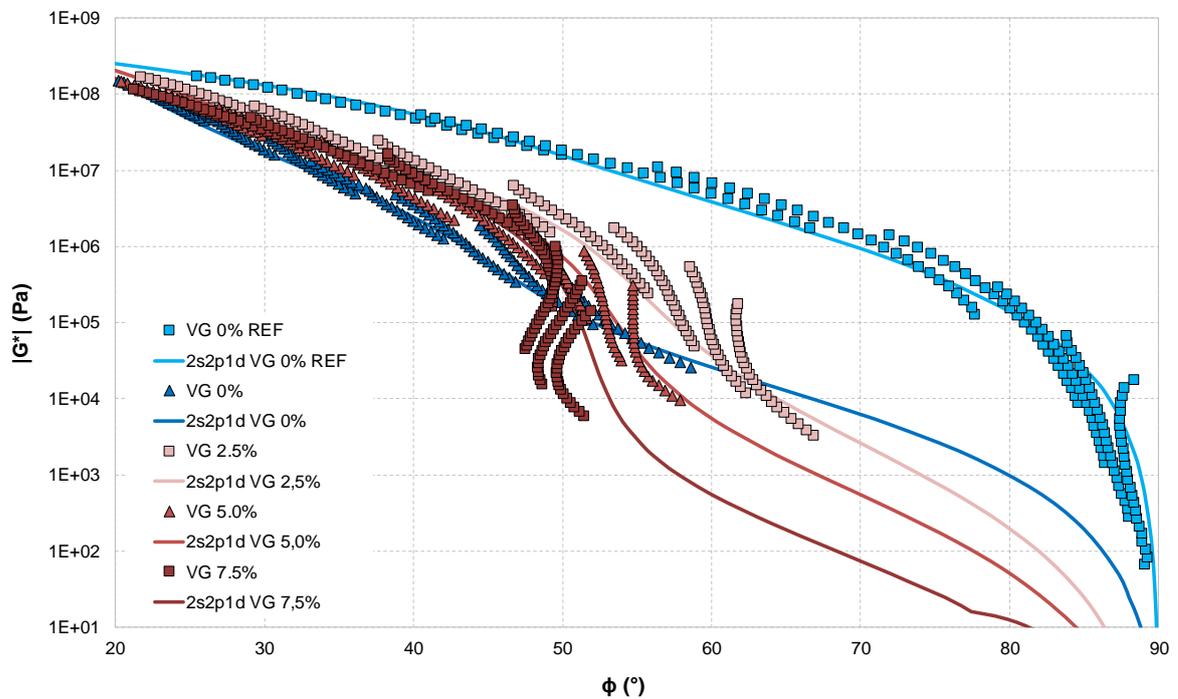
Figura 33 – Valores de Ângulo de Fase na condição após RTFOT, 25 °C, 1Hz.



Fonte: Autora.

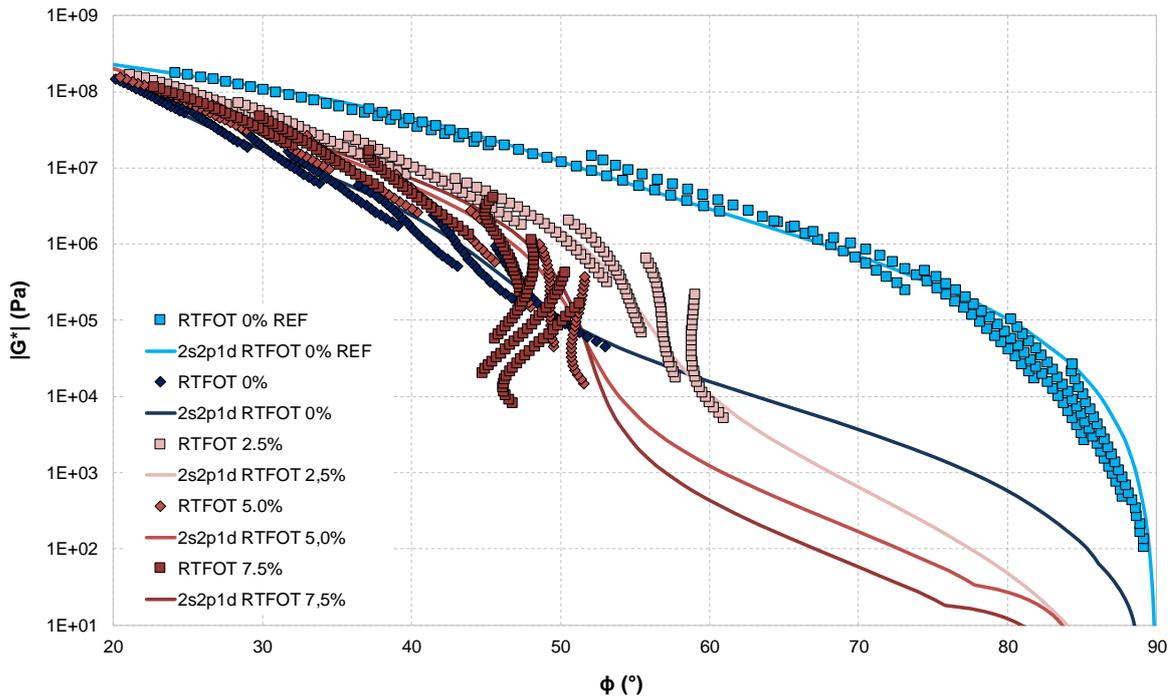
O gráfico conhecido como Espaço *Black* está apresentado nas Figuras 34 e 35, para a condição virgem e após RTFOT, respectivamente. Neste são plotados os dados de módulo de cisalhamento dinâmico, em escala logarítmica, *versus* os dados de ângulo de fase, em escala aritmética, juntamente com as modelagens 2s2p1d.

Figura 34 – Espaço Black na condição virgem.



Fonte: Autora.

Figura 35 – Espaço Black na condição após RTFOT.



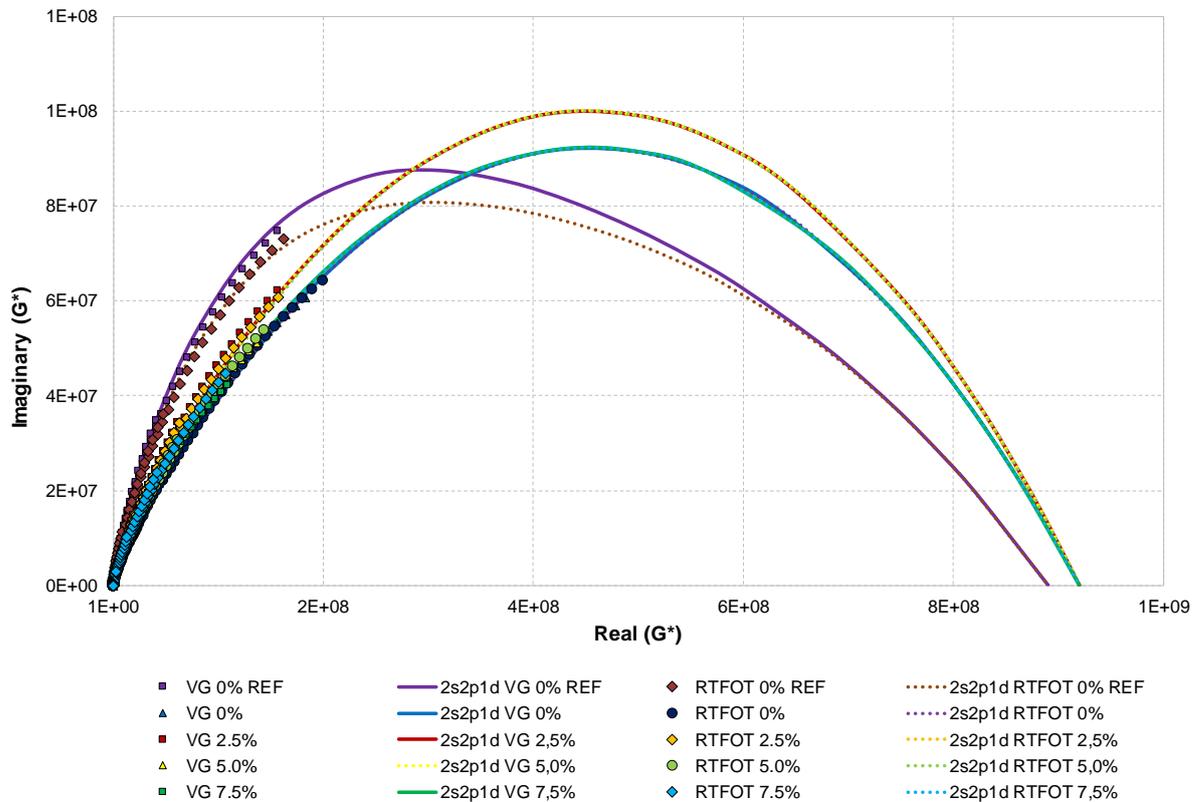
Fonte: Autora.

O formato da curva do ligante convencional 50/70 possui recessão próxima ao ângulo de 90°, isso ocorre devido ao seu comportamento se aproximar de um líquido viscoso nas elevadas temperaturas. Já nos ligantes modificados, há um retorno nessa curva, de forma a se obter valores menores que 90°, indicando um aumento na resposta elástica desses materiais devido ao envelhecimento causado pelo protocolo de mistura.

Observa-se também, ao longo das duas condições apresentadas, uma diminuição do comportamento viscoso com o aumento do teor de SBS adicionado. Isso indica uma redução na defasagem entre a aplicação do carregamento e a deformação sofrida pelo material.

Na Figura 36, está apresentado o Plano Cole-Cole, indicado para a análise do comportamento dos ligantes asfálticos em altas frequências e baixas temperaturas, com as curvas das condições virgem e envelhecida em RTFOT, junto às modelagens 2s2p1d.

Figura 36 – Plano Cole-Cole nas condições virgem e após RTFOT.



Fonte: Autora.

Analisando os dados a partir do eixo real (G_1), é possível observar que o aumento do comportamento elástico é muito mais significativo ao longo do processo de mistura, em comparação com as variações geradas pela adição de polímero SBS e pela simulação do envelhecimento a curto prazo no RTFOT. Isso pode ser observado pela defasagem entre as curvas referentes ao ligante convencional e as curvas referentes aos ligantes submetidos ao protocolo de mistura, que apresentam comportamento mais próximo dos sólidos elásticos e conseqüentemente, maior capacidade de dissipar os esforços e retornar às condições iniciais.

No entanto, esse cenário não é o mesmo quando se analisa o eixo imaginário (G_2), que apresenta uma tendência clara apenas para o comportamento do ligante asfáltico 50/70 convencional, ao indicar um aumento perceptível na parcela viscosa do material submetido ao envelhecimento no RTFOT, em comparação ao material na condição virgem.

Por fim, é preciso ressaltar que, mesmo nos maiores teores de SBS, o protocolo de mistura em estudo foi o maior responsável pelas alterações no comportamento dos

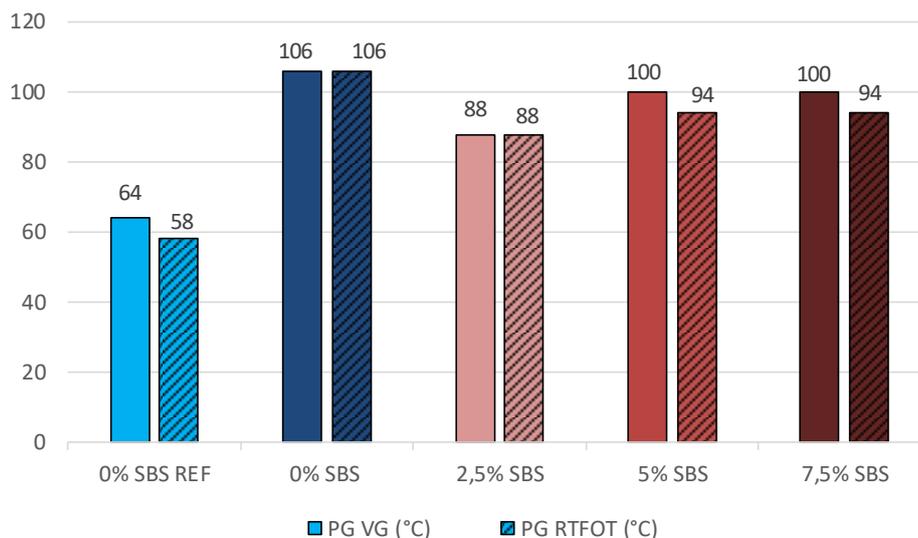
ligantes asfálticos, indicando não ser o mais otimizado para esse processo. Isso porque gerou um envelhecimento excessivo ao CAP, aumentando consideravelmente a sua rigidez e impedindo a obtenção do máximo potencial do SBS na melhoria de suas propriedades.

Dessa forma, o processo de incorporação do SBS deve ser aprimorado, por exemplo, com o aumento da velocidade rotacional, a fim de reduzir a temperatura e o tempo de mistura, ou com a utilização de um sistema que faça a injeção de gás inerte na superfície do ligante, deslocando parte do oxigênio e evitando o seu endurecimento excessivo. Assim, seria possível minimizar o processo de envelhecimento gerado pelo contato do CAP com o ar e a elevada temperatura, tornando o protocolo de mistura mais próximo ao realizado nos tanques de asfalto.

4.3.2.2 Performance Grade (PG)

Ainda no domínio linear viscoelástico, foram observados os valores de classificação PG para alta temperatura, que são apresentados na Figura 37. Essa classificação é um método utilizado em larga escala para avaliação da resistência à deformação permanente dos ligantes asfálticos.

Figura 37 – Resultados de Performance Grade (PG) para altas temperaturas.



Fonte: Autora.

Segundo a norma AASHTO R 29 – 15 (2019), nos casos em que ocorrer diferença nos resultados das duas condições, virgem e após RTFOT, adota-se a

menor temperatura. Dessa forma, o ligante 0% SBS REF foi classificado como um ligante com PG de alta de 58 °C, valor típico para ligantes convencionais não modificados. Após o protocolo de mistura, esse valor sofreu um aumento de classe para 106 °C, o que corresponde a um acréscimo de 82,76%. Este ganho, sem a ocorrência da modificação do CAP com a incorporação do polímero, é explicado pelo aumento dos níveis de envelhecimento do ligante após a mistura, como já sinalizado pelos ensaios de caracterização convencional.

Com a adição de SBS, os valores de PG de alta temperatura sofreram incrementos em relação ao ligante base (0% SBS REF). O ligante com 2,5% de SBS apresentou grau PG de 88 °C. Para os teores de 5,0% e 7,5%, o grau PG obtido foi de 94 °C. Assim, os ligantes modificados apresentaram aumento da resistência ao afundamento de trilha de roda à medida que mais SBS foi adicionado.

O envelhecimento também teve um papel influente no acréscimo dos valores de PG de alta temperatura dos ligantes. Esses aumentos de PG se relacionam com o ganho de rigidez observado nas curvas mestras de módulo de cisalhamento dinâmico e com a perda da parcela viscosa observada nas curvas mestras de ângulo de fase. E assim, indicam um aumento no limite superior de temperatura em que o ligante pode ser utilizado de forma adequada.

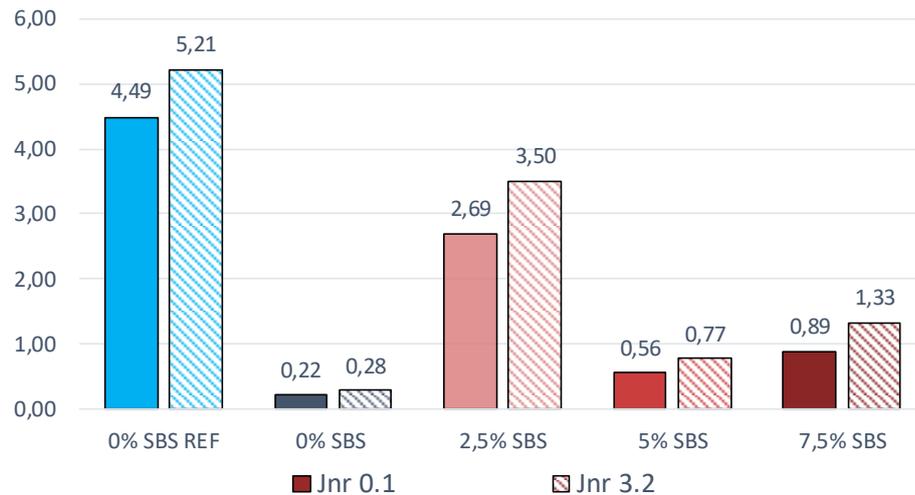
Embora os dados de PG se relacionem fortemente com a resistência à deformação permanente, os testes são realizados no domínio LVE, sem a indução de dano nas amostras. Para uma inferência mais forte sobre a resistência a deformação permanente, testes que avaliam o dano como o de MSCR foram realizados, conforme se demonstra na próxima seção.

4.3.2.3 Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)

A compliância não-recuperável (J_{nr}), utilizada para avaliar a resistência à deformação permanente dos ligantes asfálticos, foi determinada com a divisão da deformação cisalhante não recuperável pela tensão cisalhante, a partir dos valores médios de J_{nr} de 10 ciclos, obtidos na temperatura de 64 °C, para cada nível de tensão, 0,1 kPa e 3,2 kPa, como pode ser observado na Figura 38. Valores mais altos de J_{nr} sugerem maiores porções não recuperáveis de deformação, indicando suscetibilidade a deformações permanentes no material.

Vale ressaltar que a norma solicita que o ensaio seja realizado na temperatura correspondente ao PG do ligante. No entanto, para fins de comparação, realizou-se o ensaio à de 64 °C para todas as misturas, visto que essa é a temperatura necessária na maior parte do país.

Figura 38 – Resultados de Jnr à 64 °C.



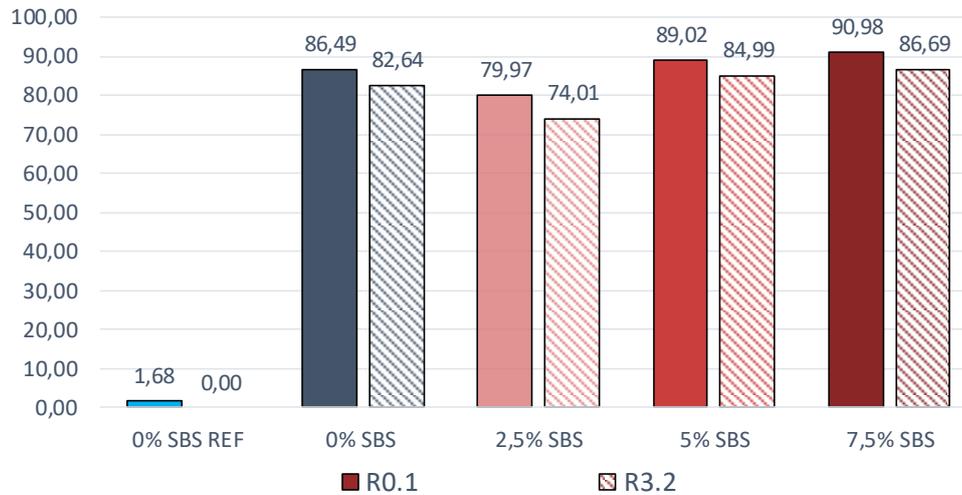
Fonte: Autora.

Os valores de Jnr obtidos demonstram que o ligante base (0% SBS REF) apresenta as maiores parcelas não recuperáveis após deformação, para ambos os carregamentos de 0,1 e 3,2 kPa. A partir do protocolo de mistura aplicado, o ligante apresenta uma queda considerável nos valores de Jnr, mesmo sem a adição de SBS nas amostras, sugerindo que o processo de envelhecimento ao longo do protocolo de mistura impacta significativamente esses resultados. Assim, obtém-se respostas predominantemente elásticas e a produção de um ligante de elevada rigidez, com mínimas plastificações ao longo da aplicação do carregamento.

A partir da adição dos teores de SBS na produção das misturas, nota-se um aumento dos valores de Jnr para o menor dos teores (2,5%), com posterior queda (5,0%) e leve aumento (7,5%). Tal comportamento sugere que o envelhecimento gerado pelo protocolo de mistura e a adição de SBS levam a efeitos concomitantes que afetam os valores de Jnr, devido ao possível fenômeno de proteção frente ao envelhecimento produzido pela combinação asfalto-polímero.

A partir dos ensaios de MSCR também puderam ser observados os valores de percentual de recuperação (R%), como mostra a Figura 39.

Figura 39 – Resultados de percentual de recuperação (%).



Fonte: Autora.

Os valores de R(%) encontrados para o ligante referência (0% SBS REF) exibem o comportamento esperado para os ligantes convencionais, com percentual de recuperação muito próximo a zero, demonstrando pouca ou nenhuma recuperação das deformações.

Para o ligante submetido apenas ao protocolo de mistura (0% SBS), observa-se elevados valores de R(%), sugerindo boa recuperação viscoelástica do material. Tais achados não condizem com o esperado, visto que o ligante não contém adições de SBS, que aumentariam estes valores, como demonstrado por Schuster (2023).

Diante disso, sugere-se que devido ao envelhecimento significativo consequente do processo de mistura, os carregamentos de 0,1kPa e 3,2 kPa não foram suficientes para deformar o ligante além do intervalo linear viscoelástico (LVE), de forma que todas as recuperações estão relacionadas a uma deformação muito pequena ocasionada no CAP.

Os valores de R(%) obtidos para a mistura com 2,5% de SBS são inferiores aos encontrados para a mistura 0% SBS, indicando uma proteção frente ao envelhecimento, dado que o material ficou menos rígido e sofreu mais deformações causadas pelos níveis de tensão aplicados na amostra, gerando maior distância do domínio LVE.

Também foi possível observar um aumento nos valores de R(%), a medida que mais SBS foi adicionado ao ligante, sugerindo maior comportamento elástico nas altas temperaturas para maiores porcentagens de modificação. Dessa forma, observa-se

que o fenômeno do envelhecimento é concomitante com a adição de polímero na determinação dos valores de R(%).

Os valores de Jnr a 3,2 kPa foram utilizados para classificar os ligantes de acordo com as classes de tráfego propostas na norma AASHTO M 332 - 22, conforme Tabela 13, que são posteriormente adicionadas à classificação PG comentada anteriormente.

Tabela 13 – Resultado das classes de tráfego segundo o Jnr (3,2kPa) a 64 °C.

CAP	Jnr _{3,2kPa}	Tráfego	Limites da Classe (k/Pa)
0% SBS REF	5,21	*	*
0% SBS	0,28	<i>Extreme (E)</i>	$Jnr_{3,2} \leq 0,5$
2,5% SBS	3,50	Standard (S)	$2,0 < Jnr_{3,2} \leq 4,5$
5% SBS	0,77	<i>Very Heavy (V)</i>	$0,5 < Jnr_{3,2} \leq 1,0$
7,5% SBS	1,33	Heavy (H)	$1,0 < Jnr_{3,2} \leq 2,0$

*Jnr_{3,2kPa} superior ao limite das classes de tráfego.

Fonte: Autora.

Observa-se que o ligante 0% SBS REF não atingiu classificação para tráfego, visto que possui valor de Jnr (3.2kPa) superior à 4,50, isso porque não foi ensaiado à 58 °C, que corresponde ao seu PG de alta temperatura. O ligante 0% SBS com alto grau de oxidação, proveniente do processo de mistura, recebeu uma classificação para tráfego extremo (do inglês *Extreme*). Com a adição de SBS junto ao processo de mistura, as classificações obtidas foram: padrão (do inglês *Standard*), muito pesado (do inglês *Very Heavy*) e pesado (do inglês *Heavy*), para 2,5%, 5,0%, e 7,5% de teor de polímero, respectivamente.

Novamente a classificação dos ligantes modificados foi impactada pelo efeito conjunto do envelhecimento e da adição de SBS. Além disso, deve-se considerar o efeito protetor do polímero frente ao envelhecimento, o que dificulta ainda mais a observação de tendências nos comportamentos dos ligantes.

Os resultados finais, com o grau PG de alta e a classificação de tráfego podem ser observados na Tabela 14.

Tabela 14 – Resultado de MSCR e classificação PG segundo a AASHTO M 332-22.

CAP	PG	Jnr0.1	Jnr3.2	R0.1	R3.2	Tráfego
0% SBS REF	58	4,49	5,21	1,68	0	-
0% SBS	106	0,22	0,28	86,49	82,64	E
2,5% SBS	88	2,69	3,50	79,97	74,01	S
5% SBS	94	0,56	0,77	89,02	84,99	V
7,5% SBS	94	0,89	1,33	90,98	86,69	H

Fonte: Autora.

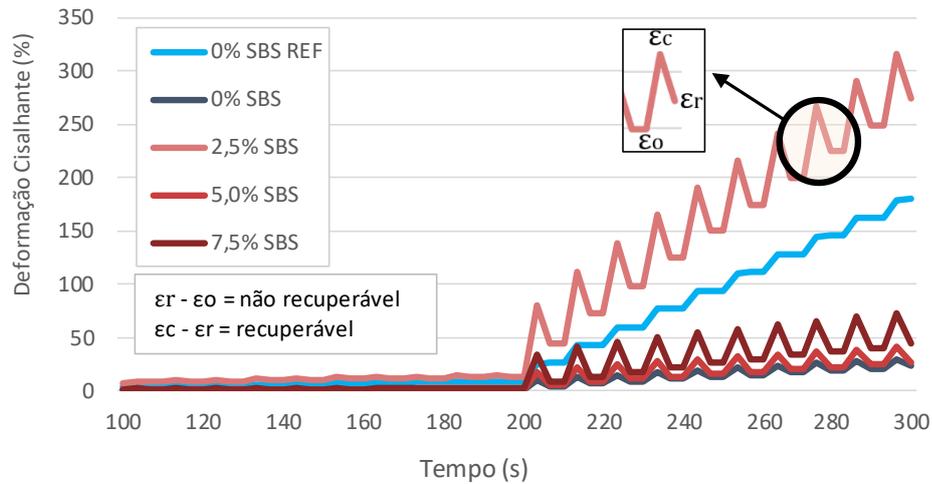
A Figura 40 mostra as deformações cisalhantes que ocorreram durante o tempo de ensaio, pela aplicação de ciclos de carregamento e repouso. Curvas mais íngremes indicam que foram atingidos maiores valores de deformação, como ocorreu com a curva representativa da mistura 2,5% SBS, que apresentou percentuais de deformação cisalhante superiores às encontradas para os demais ligantes, inclusive para a referência 0% SBS REF. Esse comportamento já era esperado, visto as análises anteriores, que indicam maior proteção frente ao envelhecimento causada pela incorporação de polímeros nesse teor.

Os demais ligantes submetidos ao processo de mistura apresentaram maior resistência à deformação permanente, visto o enrijecimento gerado por este protocolo e pela adição de polímero. No entanto, é possível observar que à medida que aumenta o teor de SBS incorporado, mais atuante se torna o efeito de proteção ao envelhecimento, gerando menores rigidezes e conseqüentemente, um leve aumento nas deformações sofridas.

A partir do gráfico é possível visualizar a variável R%, discutida anteriormente, que corresponde a média da parcela de deformação recuperável ($\epsilon_c - \epsilon_r$) dos 10 ciclos para cada tensão atuante. Da mesma forma, identifica-se a variável Jnr, que se relaciona com a parcela não recuperável ($\epsilon_r - \epsilon_o$), ou seja, com o dano permanente acumulado após a deformação.

Observa-se também que durante os 10 ciclos de 0,1kPa, que ocorrem durante o intervalo de 100 a 200 segundos, as deformações cisalhantes sofridas foram insignificantes. A partir do tempo de 200 segundo, com o início dos 10 ciclos de 3,2 kPa, as curvas passaram a apresentar comportamentos distintos, com deformações mais expressivas.

Figura 40 – Curvas de deformações cisalhantes vs. tempo de ensaio MSCR à 64 °C.

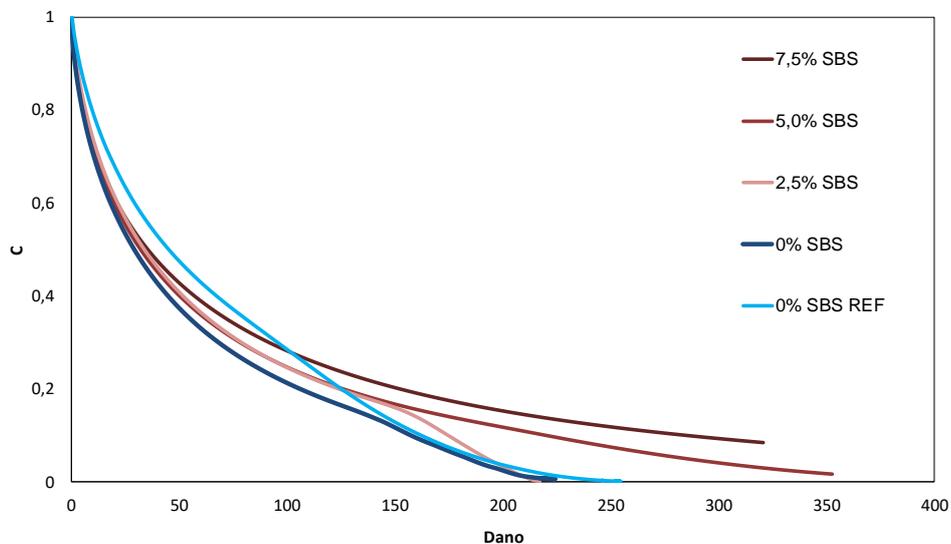


Fonte: Autora.

4.3.2.4 Linear Amplitude Sweep (LAS)

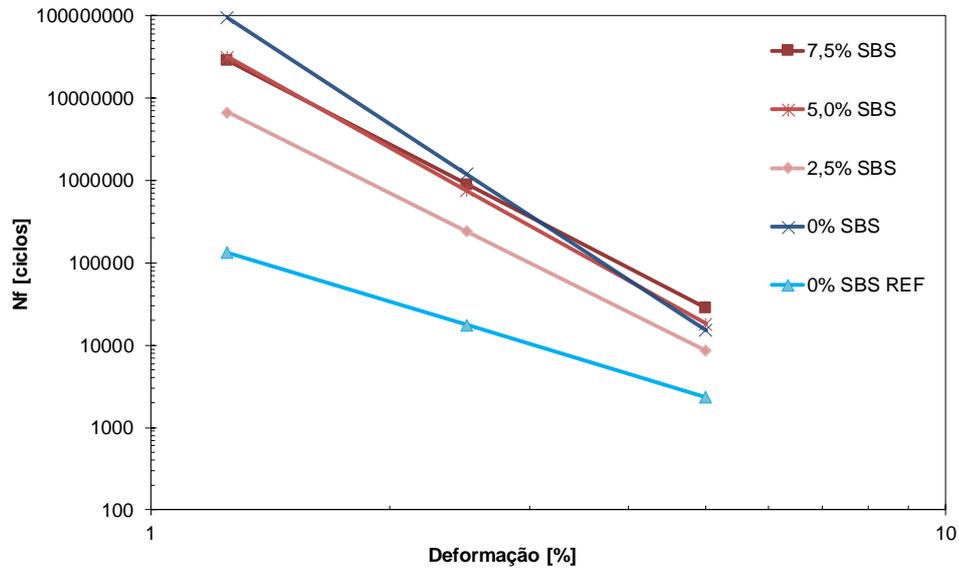
O *Linear Amplitude Sweep* foi utilizado na avaliação do comportamento dos ligantes asfálticos frente ao fenômeno de fadiga, a partir do critério de máxima pseudoenergia de deformação acumulada (W^R). A Figura 41 mostra as curvas características de dano para todos os ligantes, utilizadas na obtenção das curvas de Wöhler e posteriormente nas curvas de fadiga, conforme Figura 42, a partir do número de ciclos até a ruptura (N_f) em função da deformação de cisalhamento aplicada.

Figura 41 – Curvas características de dano.



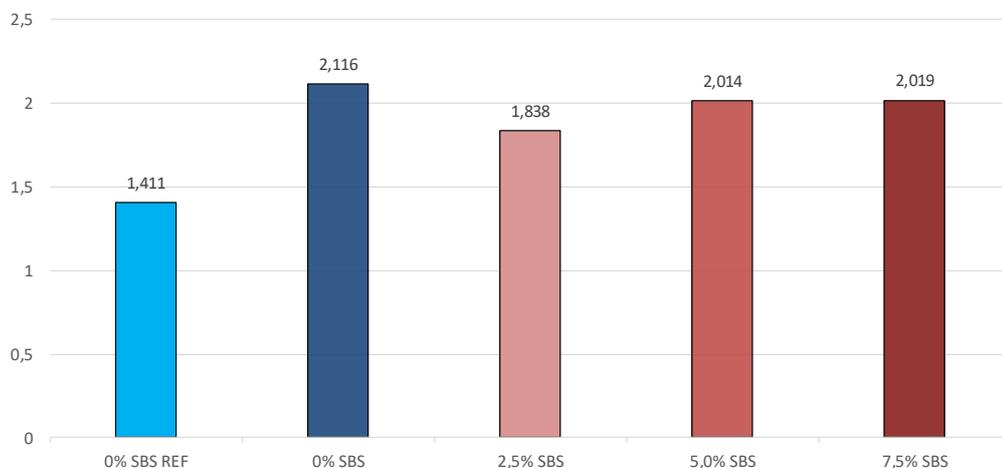
Fonte: Autora.

Figura 42 – Curvas de fadiga.



Fonte: Autora.

A partir das curvas de fadiga é possível calcular o Fator de Fadiga do Ligante a 19°C ($FFL_{19^{\circ}C}$), apresentado na Figura 43. Analisando esses dados, é possível perceber que o enrijecimento do ligante, a partir da adição de SBS e do processo de mistura, não prejudicou seu desempenho frente ao fenômeno de fadiga, visto que todos os ligantes modificados apresentaram valores de $FFL_{19^{\circ}C}$ superiores aos obtidos pela mistura 0% SBS REF.

Figura 43 – Fator de Fadiga do Ligante ($FFL_{19^{\circ}C}$).

Fonte: Autora.

No entanto, vale destacar que o melhor comportamento à fadiga foi obtido pelo ligante submetido apenas ao processo de mistura (0% SBS), sem a adição de polímeros, o que indica a sua capacidade de suportar maior número de ciclos até que ocorra a ruptura. Na Tabela 15, estão apresentados os parâmetros obtidos pelo modelo *Viscoelastic Continuum Damage* (VECD), para obtenção das curvas de fadiga.

Tabela 15 – Parâmetros do modelo VECD para obtenção das curvas de fadiga.

CAP	C ₀	C ₁	C ₂	A	B
0% SBS REF	1,000	0,061	0,546	2,56E+05	-2,917
0% SBS	1,000	0,104	0,454	3,89E+08	-6,301
2,5% SBS	1,000	0,089	0,480	1,98E+07	-4,809
5,0% SBS	1,000	0,100	0,452	1,05E+08	-5,385
7,5% SBS	1,000	0,100	0,444	8,78E+07	-4,992

Fonte: Autora.

A partir da Tabela 16, é possível classificar os ligantes quanto a sua resistência ao dano por fadiga da mesma forma que Possebon (2021) e Nunes-Ramos (2022) fizeram em suas pesquisas. No entanto, os limites estabelecidos não possibilitaram a diferenciação do comportamento à fadiga dos diferentes teores de SBS (0%, 2,5%, 5,0% e 7,5%), avaliados como excelente por essa classificação, embora apresentem diferentes valores de FFL_{19°C}. Assim apenas o ligante referência obteve classificação distinta, com comportamento inferior, classificado como mediano.

Tabela 16 – Classificação segundo ao FFL a 19°C.

CAP	FFL _{19°C}	Classificação
0% SBS REF	1,41	Mediano
0% SBS	2,12	Excelente
2,5% SBS	1,84	Excelente
5,0% SBS	2,01	Excelente
7,5% SBS	2,02	Excelente

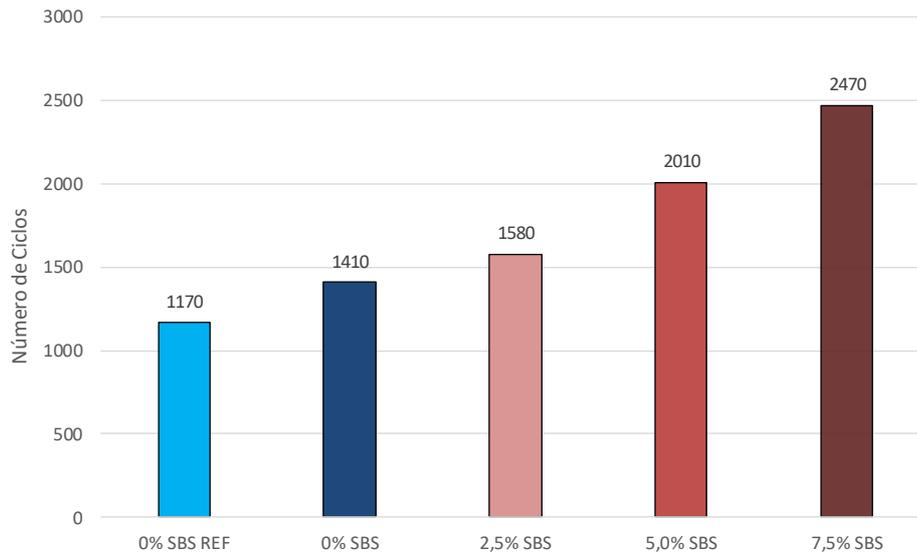
Fonte: Autora.

O número de ciclos até a falha pelo critério da máxima pseudoenergia de deformação acumulada pode ser observado pela Figura 44. A partir de sua análise, observa-se que o processo de mistura e a adição de SBS possibilitam ao CAP suportar maior número de ciclos até que ocorra a ruptura por fadiga no ligante.

No entanto, essa melhora da resistência ao dano por fadiga foi obtida para baixas deformações cisalhantes, de no máximo 2,5%, não sendo possível conhecer o

comportamento real dos ligantes quando submetidos à maiores deformações em campo. Nesse sentido, são necessários maiores estudos para definir a melhor metodologia a ser utilizada na classificação dos ligantes convencionais e modificados quanto à resistência ao dano por fadiga.

Figura 44 – Nf pelo critério da máxima pseudoenergia acumulada.



Fonte: Autora.

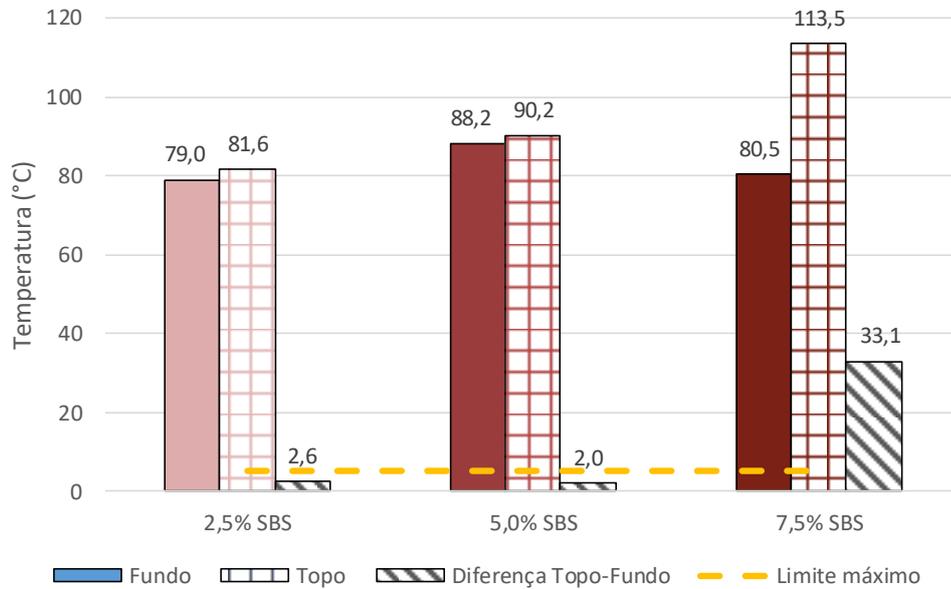
4.4 ENSAIO DE SEPARAÇÃO DE FASES

As temperaturas do ponto de amolecimento das amostras localizadas no topo e no fundo do tubo de separação de fases estão apresentadas na Figura 45 abaixo, bem como a diferença entre esses dois valores, a fim de compará-la com o limite máximo de 5 °C estabelecido em norma, para os ligantes asfálticos modificados por polímeros elastoméricos.

A análise dos dados indica que a diferença entre os pontos de amolecimento do topo e do fundo das misturas “2,5% SBS” e “5,0% SBS” não foram significativas, já que apresentaram valores menores do que o limite máximo estabelecido. Em contrapartida, a mistura “7,5% SBS” obteve a diferença topo-fundo 6 vezes maior do que a temperatura máxima de 5 °C, indicando claramente a ocorrência de separação de fases e a necessidade de agitação permanente nos tanques de asfalto nesse teor, como pode ser observado na Figura 46.

Vale destacar ainda, a ocorrência de maiores pontos de amolecimento na seção localizada no topo, sugerindo que as partículas de polímero flotaram dentro do tubo metálico, devido a menor densidade do SBS comparado ao ligante asfáltico.

Figura 45 – Resultado Separação de Fases.



Fonte: Autora.

Figura 46 – Indicação de separação de fase pelo ensaio de ponto de amolecimento.



Fonte: Autora.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O atual cenário de degradação da malha rodoviária brasileira pela crescente demanda e solicitação das vias, junto às condições climáticas mais severas, motivaram o desenvolvimento de novas tecnologias. A modificação de ligantes asfálticos por polímeros constitui uma excelente opção para melhorar o desempenho e aumentar a vida útil dos pavimentos. No entanto, ainda representa um desafio para a indústria da pavimentação, o que ressalta a importância de maiores estudos acerca do processo de modificação e da consequente interação asfalto-polímero.

Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade do protocolo de mistura utilizado e a influência da adição de *pellets* de polímero Estireno-Butadieno-Estireno (SBS), mediante reticulação com enxofre, em diferentes teores (2,5%, 5,0% e 7,5%), nas propriedades físicas e reológicas de um ligante asfáltico 50/70 convencional.

O protocolo de mistura utilizado nessa pesquisa foi realizado em duas etapas, de alto e baixo cisalhamento, pelo tempo necessário para que não fosse possível observar a presença de *pellets* de SBS não dissolvidos no ligante asfáltico. Essa verificação visual foi realizada por meio do *smear test* e do teste da pinça.

Em vista disso, estabeleceu-se a temperatura de 180 °C para o processo de mistura, com alto cisalhamento à 2000 rpm por 2 horas e baixo cisalhamento à 420 rpm por 5 horas. E, apesar da produção de misturas aparentemente homogêneas, essas variáveis provocaram excessivo enrijecimento no CAP. Já a adição de SBS elevou a rigidez por ação do polímero, ao mesmo tempo que também gerou um comportamento protetivo frente ao envelhecimento. Assim, a ocorrência conjunta desses efeitos impediu a obtenção de tendências claras quanto a porcentagem de SBS adicionado, na análise dos dados provenientes dos ensaios de caracterização.

A modificação do CAP 50/70 levou a um acréscimo significativo nos valores de ponto de amolecimento, que pode indicar um bom comportamento frente à deformação permanente, à medida que também reduziu os valores de penetração abaixo do limite mínimo previsto em norma para os asfaltos modificados por polímero, devido ao elevado enrijecimento provocado pelo processo de mistura.

Os dados do ensaio de recuperação elástica apresentaram um salto significativo na mistura com maior teor de polímero (7,5% SBS), indicando a ocorrência de maior comportamento elástico com a adição de SBS. Os elevados

valores de viscosidade obtidos sugerem a necessidade de temperaturas superiores às usuais para a obtenção de trabalhabilidade adequada à mistura e posterior compactação.

A análise das curvas mestras indicou maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico e menores valores de ângulo de fase nos ligantes submetidos ao processo de mistura, em comparação ao ligante referência (0% SBS REF), sugerindo a elevada rigidez dessas misturas, com consequente aumento do comportamento elástico e da resistência à deformação permanente. Observou-se também um acréscimo significativo no PG de alta temperatura, que ampliou a faixa de uso do ligante modificado, especialmente naquele sem adição de polímero (0% SBS).

A adição de SBS reduziu o ganho de deformação permanente, assim como possivelmente melhorou o comportamento desses ligantes frente ao fenômeno de fadiga, em baixos valores de deformações cisalhantes estabelecidas por norma. Além disso, o ensaio de separação de fases indicou a necessidade de agitação constante nos tanques de asfalto para as maiores concentrações de polímero, a fim de manter a estabilidade do material, visto a elevada diferença obtida nos pontos de amolecimento do topo e do fundo correspondentes à mistura 7,5% SBS.

Por fim, conclui-se que o protocolo de mistura foi o maior responsável pelas alterações no comportamento dos ligantes asfálticos, mesmo comparado com a adição de maiores teores de SBS e com a simulação de envelhecimento a curto prazo no RTFOT, indicando não ser o mais otimizado para esse processo. Isso porque gerou um envelhecimento excessivo ao CAP, aumentando consideravelmente a sua rigidez e impedindo a obtenção do máximo potencial do SBS na melhoria de suas propriedades.

Nesse sentido, a adoção de velocidades rotacionais maiores pode gerar cisalhamento suficiente para a produção de misturas homogêneas em menor tempo e temperatura, reduzindo o envelhecimento do CAP. Da mesma forma, seria possível impedir esse endurecimento excessivo pela adoção de um sistema que promova a injeção de gás inerte e o consequente deslocamento do oxigênio em contato com a superfície do ligante.

Apesar das condições descritas acima, foi possível observar que a modificação do ligante com SBS gera uma melhoria nas suas propriedades físicas e reológicas, com o aumento da resistência frente aos principais defeitos encontrados na malha viária brasileira, com destaque para a mistura “5,0% SBS”, que apresentou resultados

mais satisfatórios ao considerar todos os ensaios realizados. Por fim, faz-se necessário maiores estudos a respeito da interação asfalto-polímero, a fim de ampliar o seu emprego na pavimentação.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das análises feitas e dos obstáculos encontrados, são desafios futuros:

- Otimizar o protocolo de mistura, a fim de torna-lo mais próximo ao realizado nas usinas de asfalto;
- Compreender a eficiência dos estatores com aberturas de diâmetro distinto no cisalhamento do *pellet* de polímero;
- Determinar qual a faixa de teor viável para a modificação dos ligantes asfálticos, além do teor ótimo para cada condição de aplicação;
- Estudar qual a melhor granulometria a ser utilizada, a fim de reduzir a heterogeneidade do asfalto modificado, sem comprometer o seu desempenho;
- Compreender o efeito da modificação de ligantes asfálticos por polímeros nas misturas asfálticas;
- Avaliar a estabilidade à estocagem dos ligantes modificados após processo de reticulação com diferentes teores de enxofre;
- Estabelecer por meio de um protocolo de envelhecimento realizado em estufa, a temperatura que dá início ao processo de degradação térmica do polímero.
- Analisar os efeitos da degradação térmica nas propriedades químicas e reológicas dos polímeros SBS adicionados na modificação de ligantes asfálticos em diferentes níveis de envelhecimento;
- Determinar o impacto da temperatura de mistura no comportamento linear viscoelástico, na resistência à fadiga e na resistência à deformação permanente.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO R 28-22: **Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)**. Washington, D.C., 2022.

_____. AASHTO R 29-15 (R2019): **Standard Practice for Grading or Verifying the Performance Grade of an Asphalt Binder**. Washington, D.C., 2019

_____. AASHTO T 240-22: **Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test)**. Washington, D.C., 2022.

_____. AASHTO T 313: **Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)**. Washington, D.C., 2022.

_____. AASHTO T 314: **Standard Method of Test for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT)**. Washington, D.C., 2022.

_____. AASHTO T 315-22: **Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)**. Washington, D.C., 2022.

_____. AASHTO T 316-22: **Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer**. Washington, D.C., 2022.

_____. AASHTO M 332-22: **Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test**. Washington, D.C., 2022.

_____. AASHTO T 350-19: **Standard Method of Test for Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)**. Washington, D.C., 2019.

_____. AASHTO T 391-20: **Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep**. Washington, D.C., 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 70. **Standard Test Method for Density of Semi Solid Bituminous Materials (Pycnometer Method)**. Estados Unidos, 2021.

_____. ASTM D 1895 – B. **Standard Test Methods for Apparent Density, Bulk Factor, and Pourability of Plastic Materials**. Estados Unidos, 2017.

ALATAŞ, T.; YILMAZ, M. **Effects of different polymers on mechanical properties of bituminous binders and hot mixtures**. *Construction and Building Materials*. v. 42, p. 161–167, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 2781. **Borracha vulcanizada ou termoplástica – Determinação de densidade**. Rio de Janeiro, 2015.

_____. ABNT NBR 15166. **Asfalto modificado – Ensaio de separação de fase**. Rio de Janeiro, 2004.

_____. ABNT NBR 15184: **Materiais betuminosos — Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro, 2021.

_____. ABNT NBR 15235. **Materiais Betuminosos – Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional**. Rio de Janeiro, 2009.

BARROS, A. L. C. M. et al. **Estudo comparativo entre o asfalto convencional e o asfalto modificado por polímero SBS**. Governador Valadares, 2016.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2a ed ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2022.

BRINGEL, R. M. **Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos**. [s.l.] Dissertação (Mestrado) – Curso de Química Inorgânica, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza., 2007.

CAVALLI, M. C.; ZAUMANIS, M.; MAZZA, E.; PARTL, M.N.; POULIKAKOS, L.D. Aging effect on rheology and cracking behavior of reclaimed binder with bio-based reju venators. **Journal of Cleaner Production**, 189, p. 88-97,2018.

CERATTI, Jorge Augusto Pereira; BERNUCCI, Liedi Bariani; SOARES, Jorge Barbosa. **Utilização de Ligantes Asfálticos em Serviços de Pavimentação**. Rio de Janeiro: Abeda, 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas**. Brasília, DF, 2022. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2022/Rodoviario/1-1-/Principais-dados>. Acesso em: 27 mar. 2023.

DAVID, D. **Misturas asfálticas recicladas a frio: Estudo em laboratório utilizando emulsão e agente de reciclagem emulsionado**. 2006. 117 P. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia/UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. DNIT 095/2006 - EM: **Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006.

_____. DNIT 129/2011- EM: **Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material**. Rio de Janeiro: DNIT, 2011.

_____. DNIT 130/2010 - ME. **Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro – Método de Ensaio.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. DNIT 131/2010 - ME. **Materiais asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. DNIT 155/2010 - ME. **Material asfáltico – Determinação da penetração.** Rio de Janeiro, 2010.

_____. DNIT 384/2022 - ME. **Pavimentação – Estabilidade ao armazenamento de ligantes modificados por polímero – Método de ensaio.** Brasília, DF, 2022.

_____. DNIT 423/2020 - ME. **Pavimentação – Ligante asfáltico – Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas (MSCR) – Método de ensaio.** Brasília, DF, 2020.

_____. 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.** Brasília, DF, 2022.

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

DONG, F. et al. **Morphology, chemical reaction mechanism, and cross-linking degree of asphalt binder modified by SBS block co-polymer.** Construction and Building Materials, v. 378, n. March, 2023.

FERRY, J. D. **Viscoelastic properties of polymers.** Disponível em: <<https://www.wiley.com/enus/Viscoelastic+Properties+of+Polymers%2C+3rd+Edition-p-9780471048947>>. Acesso em: 24 mar. 2021.

GONZÁLEZ, O. et al. **Rheological Techniques as a Tool To Analyze Polymer-Bitumen Interactions: Bitumen Modified with Polyethylene and Polyethylene-Based Blends.** 2002.

GUSMÃO, Marcio. **Restauração rodoviária usando asfalto modificado por polímero.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2009.

HAO, H. et al. **Rheological, chemical and short-term aging properties of waste polyurethane particles modified asphalt binder with or without SBS.** Construction and Building Materials, v. 357, n. June, 2022.

HUNTER, R. N.; SELF, A.; READ, J. **The Shell bitumen handbook.** [s.l: s.n.].

IBP – Instituto Brasileiro de petróleo. **Informações básicas sobre materiais asfálticos.** Rio de Janeiro, 1999.

INTERNATION ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 37. **Rubber, vulcanized or thermoplastic — Determination of tensile stress-strain properties.** 2017.

_____. ISO 868. **Plastics and ebonite — Determination of indentation hardness by means of a durometer (Shore hardness).** 2003.

_____. ISO 1133. **Plastics – Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and the melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics.** 2005.

KALANTAR, Z. N.; KARIM, M. R.; MAHREZ, A. **A review of using waste and virgin polymer in pavement.** *Construction and Building Materials*, v. 33, p. 55–62, 2012.

KING, G.; KING, R. D. H.; PAVLOVICH, A. L. E.; PRITHCI, K. **Additives in asphalt.** *Asphalt Paving Technology*, Lino Lakes, v. 68^a, p. 32-69, 1999.

KRATON CORPORATION (KRA) - **The leader in high-value performance styrenic block copolymers, specialty polymers & products derived from pine wood pulping.** Disponível em: <<https://kraton.com/>>. Acesso em: 30 jun. 2023.

LEITE, L. F. M. **Estudos Reológicos de cimentos asfálticos.** Dissertação de Mestrado, 1990.

LUCENA, M. C. C. **Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

MACHADO, Ronaldo Z. **Asfalto modificado com polímero.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campinas, São Paulo, 2007.

MARTINS, A. T. **Contribuição Para a Validação Do Ensaio De Resistência Ao Dano Por Fadiga Para Ligantes Asfálticos.** 2014. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

ME, D. 095/2006. **Cimentos asfálticos de petróleo-Especificação de material.** [s.d.].

MULLINS, O. C. The modified yen model. *Energy and Fuels*, 24, p. 2179-2270, 2010.

NAN, H. et al. **Investigation of fatigue performance of asphalt binders containing SBS and CR through TS and LAS tests.** *Construction and Building Materials*, v. 361, n. June, 2022.

NEGRÃO. Douglas P., **Estudo de asfaltos modificados por polímeros.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia e Transporte. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

NUNES-RAMOS. **O uso de polietileno de alta densidade como modificador do cimento asfáltico de petróleo.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2022.

OLARD, F.; DI BENEDETTO, H. **General 2S2P1D Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes.** *Road Materials and Pavement Design*, v. 4, n. 2, p. 185–224, 30 jun. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2003.9689946>. Acesso em: 16 dez. 2021.

PANDEY, A. et al. **Quantifying the effect of SBS molecular structure on the upper service temperature rheological properties of modified binders.** *Construction and Building Materials*, v. 352, n. March, 2022.

PINHEIRO, J. H. M. **Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco).** [s.l.: s.n.]. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará.

POSSEBON, E. P. **Estudo laboratorial das propriedades mecânicas de misturas com diferentes cimentos asfálticos de petróleo produzidos no Brasil.** 2018. Tese de Mestrado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

POSSEBON, E. P. **Advanced characterization of brazilian bitumens and mixtures.** 2021. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2021.

ROBINSON, H. L. **Polymers in Asphalt.** [s.l.: s.n.]. v. 15

RODRIGUES, L. M. **Avaliação do ligantes asfáltico modificado por polímero SBS e aditivo surfactante.** Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário Christus, Fortaleza, 2020.

SANTOS, N. S., RODRIGUES, J. K. G., MENDONCA, A. M. G. D. **Efeito da adição de lignina kraft proveniente da madeira de eucalipto na reologia do CAP 50/70.** *Matéria*, 23 (3), e12158. 2018.

SCHUSTER, S. L. **Investigation of the Aging Phenomenon in Asphalt Binders and Asphalt Mixtures: Linear Viscoelastic Behavior and Performance Properties.** Dissertação de doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2023.

SHAN, L. et al. **Effect of styrene-butadiene-styrene (SBS) on the rheological behavior of asphalt binders.** *Construction and Building Materials*, v. 231, 2020.

SILVA, L. S.; FORTE, M. M. C.; SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. **Polímeros como modificadores asfálticos.** v.10, n.1, 2002.

SPECHT, L. P. **Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus.** [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004.

WANG, C. et al. **Unified failure criterion for asphalt binder under cyclic fatigue loading.** Road Materials and Pavement Design, v. 84, n. sup2, p. 269–300, 2015.

WILLIAMS, M. L.; LANDEL, R. F.; FERRY, J. D. **The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids.** Journal of the American Chemical Society, v. 77, n. 14, p. 3701–3707, 1955. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ja01619a008>. Acesso em: 19 dez. 2021.