

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

GABRIEL VARGAS WEGENER

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, REOLÓGICAS E DO PROCESSO
DE MISTURA NA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS
COMO MODIFICADOR DE LIGANTES ASFÁLTICOS**

SANTA MARIA, RS

2023

GABRIEL VARGAS WEGENER

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, REOLÓGICAS E DO PROCESSO
DE MISTURA NA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS
COMO MODIFICADOR DE LIGANTES ASFÁLTICOS**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

SANTA MARIA, RS

2023

GABRIEL VARGAS WEGENER

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, REOLÓGICAS E DO PROCESSO
DE MISTURA NA INCORPORAÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS
COMO MODIFICADOR DE LIGANTES ASFÁLTICOS**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como parte dos requisitos para 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 esse trabalho aos meus pais,
Débora Regina Vargas Wegener e Udo Wegener.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à UFSM, Universidade Federal de Santa Maria, que me proporcionou a oportunidade de produzir este trabalho, pelo ensino público de qualidade, pela graduação em Engenharia Civil e pelos momentos e emoções vividas na instituição.

Agradeço ao meu orientador, Professor Luciano Specht, pelos ensinamentos, pela paciência e confiança depositada ao longo da produção deste trabalho. As dicas, conversas, convívio e oportunidades que me proporcionou foram indispensáveis para a minha formação, agradeço-o imensamente, saiba que és motivo de inspiração para mim.

Aos colegas, que hoje chamo de amigos, do GEPPASV que tornaram o dia-a-dia do laboratório mais agradável e que sem a ajuda durante a produção do TCC o trabalho seria muito mais difícil, meus mais sinceros agradecimentos ao Lorenzo Chaves Pacheco, a Gabriella Gaube Guex, a Haline Dugolin Ceccato, e a Whadila Moraes da Silva pelo apoio.

Em especial ao Sílvio Lisboa Schuster e Victória Nunes Ramos pelos ensinamentos, paciência no auxílio das dúvidas, pela ajuda no entendimento dos processos e dos ensaios, meu eterno agradecimento e admiração.

Agradeço à Gabriela de Souza Dias pela parceria ao longo e toda a graduação, no início da jornada no GEPPASV e, onde não poderia ser diferente, na produção do trabalho de conclusão. Aos meus colegas de graduação e amigos, Alexandre Krauspenhar Dhein e Lucas Gabriel Ribas Cabral, agradeço a companhia e parceria durante a jornada.

Agradeço à Bethania Machado Correa pela oportunidade de me proporcionar a introdução ao ambiente de pesquisa científica e demais oportunidades ao longo do curso. Ao Fernando Dekeper Boeira e ao Felipe Cipriani Luzzi pelas palavras de apoio durante o processo.

Aos meus pais e irmão, Débora Regina Vargas Wegener, Udo Wegener e Rômulo Vargas Wegener, base de toda minha caminhada no curso, meus mais sinceros agradecimentos, onde não consigo transformar em palavras a imensa gratidão que sinto pelo apoio incondicional, pelas conversas, conselhos e suporte nos momentos difíceis ao longo da caminhada. Aos meus familiares, avós, tios e primos sou eternamente grato pelas orações, torcida e apoio.

Se consegui “pavimentar” o caminho até o final da graduação, todos possuem uma participação especial na “base” desse pavimento, sendo uma etapa indispensável dessa grande “obra” chamada VIDA. Muito obrigado!

RESUMO

O cimento asfáltico de petróleo (CAP) tem grande influência no comportamento de misturas betuminosas, pois confere às mesmas propriedades de coesão, resistência ao afundamento nas trilhas de roda e resistência à fadiga. Entretanto com o aumento do tráfego e da capacidade de carga de veículos comerciais, ressalta-se a necessidade de materiais com maior desempenho frente a essas solicitações. Diversos estudos propõem adição de polímeros, borrachas e outros materiais à matriz asfáltica afim de melhorar suas propriedades. Então, frente a essa necessidade o presente estudo tem por objetivo modificar cimentos asfálticos convencionais com a adição de borracha triturada de pneus reciclados. Para isso foram avaliados três teores de incorporação (15, 18 e 21% em relação a massa de CAP), e três tempos de maturação para o teor de 15% (2, 4 e 6 horas). Os ensaios de penetração, ponto de amolecimento, recuperação elástica e separação de fases foram feitos seguindo a norma de especificação. Para a caracterização reológica foram executados ensaios sob cisalhamento dinâmico, pelos quais se obteve as curvas mestras de módulo de cisalhamento dinâmico e de ângulo de fase, bem como a classificação do grau PG (*Performance grade*) de alta temperatura para as amostras no estado virgem. Foram realizados, posteriormente, o envelhecimento de curto prazo em RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*) e de longo prazo no equipamento PAV (*Pressure Aging Vessel*). Nesses estágios de envelhecimento também foram construídas as curvas mestras e realizados os ensaios de quantificação de resistência ao dano MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*) e LAS (*Linear Amplitude Sweep*), que para avaliação da resistência à deformação permanente e à fadiga, respectivamente. A incorporação de borracha reciclada de pneus promoveu um aumento da recuperação elástica e do ponto de amolecimento, diminuição da penetração e boa capacidade de estabilidade a estocagem. Nos ensaios reológicos, identificou-se, principalmente, um aumento da rigidez e diminuição do ângulo de fase em altas temperaturas, assim como um aumento do PG de alta temperatura. A amostra que apresentou maior destaque dentre os comportamentos citados e os resultados reológicos de caracterização de dano foi a de maior teor (21%), o que sugere um incremento no desempenho, com o aumento da adição de borracha, frente à deformação permanente e à fadiga evidenciado pelos ensaios MSCR e LAS. Já a variação do tempo de digestão produziu melhoras no comportamento pouco significativas. Por fim, o protocolo de mistura provocou enrijecimento nas amostras com aumento do módulo de cisalhamento dinâmico, indicando um certo grau de envelhecimento. Por esse motivo, ainda é necessário entender melhor a interação entre a borracha e a matriz asfáltica para otimizar o processo de mistura e obter ligantes modificados em laboratório de maneira mais eficiente.

Palavras-chave: Borracha de pneu reciclada. Ligante asfáltico modificado por borracha. Asfalto-borracha. Reologia. Avaliação reológica.

ABSTRACT

The Bitumen has great influence on the behavior of mixtures asphalt, through this material, it's conferred properties of cohesion, rutting and fatigue resistance to the pavement. However, with the increase in traffic and load capacity of commercial vehicles, the need for greater performance in face of these requests is highlighted. Some research's purpose addiction of polymers, rubbers and other materials in Bitumen matrix in order to beneficiate your performance, so the present study aims to modify conventional petroleum asphalt cements with the addition of crushed rubber from recycled tires. Three levels of incorporation 15, 18, 21% were evaluated in relation to the mass of bitumen, moreover for the 15% samples the variation of digestion time of 2, 4, 6 hours was also investigated. The Penetration, Softening Point, Elastic Recovery and phase separation tests were performed following the specification standard. For the rheological characterization were performed tests to obtain the masters curves of Dynamic Shear Modulus and Phase angle, as well as the high temperature of PG classification of the samples in virgin state. The same steps were executed to short-term aging in Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) and long-term aging in Pressure Aging Vessel (PAV). In this aging states tests of damage quantification Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) and Linear Amplitude Sweep (LAS) were performed to measure parameters of rutting and fatigue resistance, respectively. The incorporation of recycled rubber from tires promoted an increase in elastic recovery and the softening point, a decrease in penetration and good capacity for storage stability. In the rheological tests, it was identified, mainly, an increase in stiffness and a decrease in the phase angle at high temperatures, as well as an increase in PG at high temperature. The highlight in these results was in charge of the higher rubber levels (21%), indicating a performance improvement of rutting and fatigue resistance with the addiction of rubber, evidenced by MSCR and LAS analysis. Still the variation in digestion time produced little significant improvements in behavior. Finally, the mixing protocol caused the samples to stiffen with an increase in the dynamic shear modulus, indicating a certain degree of aging. For this reason, it is still necessary to understand the interaction between the rubber and the asphalt matrix to optimize the mixing process and obtain modified binders in the laboratory more efficiently.

Keywords: Recycled tires rubber. modified asphalt binders with rubber. Bitumen-rubber. Rheology. Rheological evaluation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação do equipamento reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR).	25
Figura 2 - Dimensões das partículas de borracha trituradas.	28
Figura 3 - Amostras de diferentes borrachas estudadas por Specht, 2004.	29
Figura 4 - Esquema do programa experimental.	31
Figura 5 - Borracha triturada de pneu utilizada para a modificação do CAP.	34
Figura 6 - Ensaio de análise visual de limalhas de ferro - (a) amostra aprovada - (b) amostra reprovada.	35
Figura 7 – (a) Conjunto misturador de alto cisalhamento, caixa de isolamento térmico e chapa de aquecimento (b) Geometria do crivo utilizado.	36
Figura 8 - 2ª etapa do processo de mistura (tempo de digestão).	37
Figura 9 - Ensaio de Penetração.....	39
Figura 10 - Ensaio Ponto de Amolecimento.	40
Figura 11 - Ensaio de Recuperação elástica.....	41
Figura 12 - Equipamento RTFOT.....	42
Figura 13 - Equipamento PAV.	43
Figura 14 - Amostra no reômetro - Geometria 25mm.....	44
Figura 15 - Ensaio Separação de fases - (a) Amostras base e topo separadas (b) - Ponto de amolecimento base e topo.....	48
Figura 16 - Ensaio de Penetração – Teores de borracha diferentes.	51
Figura 17 - Ensaio Penetração – Tempo de mistura diferentes.....	51
Figura 18 - Resultados Ponto de Amolecimento – (a) Diferentes teores - (b) Diferentes tempos de mistura.....	52
Figura 19 - Resultados Recuperação Elástica – Teores de borracha diferentes.	53
Figura 20 - Resultados Recuperação Elástica - Tempo de mistura diferentes.	54
Figura 21 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico – Mistura 15% 4h.....	56
Figura 22 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico – Mistura 18% 4h.....	56
Figura 23 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico – Mistura 21% 4h.....	57
Figura 24 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico – Mistura TYREFLEX. .	57
Figura 25 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico – Mistura AGITADO 4h.	58
Figura 26 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico – Mistura REFÊRENCIA.	58
Figura 27 - Diferença da variação de rigidez entre condições de envelhecimento.	59

Figura 28 - Fórmula adotada para calcular a variação de rigidez das misturas na condição VG.	60
Figura 29 - Fórmula adotada para calcular a variação de rigidez das misturas na condição RTFOT.....	60
Figura 30 - Fórmula adotada para calcular a variação de rigidez das misturas na condição PAV.	60
Figura 31 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico – Diferentes tempos de mistura.....	61
Figura 32 - Curvas Mestras de Ângulo de Fase - Pontos experimentais e Modelagem 2S2P1D.	62
Figura 33 – (a) - Ângulo de fase a 65°C e 1Hz para cada teor de borracha e condição de envelhecimento (b) – Porcentagem de redução do ângulo de fase em relação a mistura AGITADA 4h.....	63
Figura 34 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico - modelagem 2S2P1D – Diferentes Teores de borracha.	64
Figura 35 - (a) Modelagem 2S2P1D - Baixas frequências e (b) Modelagem 2S2P1D - Altas Frequências - Diferentes teores de mistura.	65
Figura 36 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico - modelagem 2S2P1D – Diferentes tempos de mistura.	66
Figura 37 - (a) Modelagem 2S2P1D - Baixas frequências e (b) Modelagem 2S2P1D - Altas Frequências - Diferentes tempos de mistura.....	67
Figura 38 - Curvas mestras de Ângulo de Fase - Modelagem 2S2P1D – Diferentes teores e borracha e diferentes tempos de mistura.....	68
Figura 39 - Resultados PG: (a) – teores de borracha diferentes. (b) – tempos de mistura diferentes.....	70
Figura 40 - Resultados Jnr a 64°C.....	71
Figura 41 - Resultados Percentual de Recuperação.....	72
Figura 42 - Deformação cisalhante versus tempo - MSCR 64°C.....	73
Figura 43- Curvas de dano características – (a) Diferentes teores de borracha - (b) diferentes tempos de mistura.	74
Figura 44 - Curvas de fadiga – (a) Diferentes teores de borracha – (b) diferentes tempos de mistura.....	75
Figura 45 - Fator de Fadiga dos ligantes – (a) Diferentes teores – (b) Diferentes tempos de mistura.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificação dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por penetração.	22
Tabela 2 - Especificação para asfalto-borracha.	23
Tabela 3 - Materiais contidos nos pneus.	30
Tabela 4 - Propriedades CAP REFAP 50/70.	33
Tabela 5 - Análise granulométrica do pó de borracha.	35
Tabela 6 - Especificação dos componentes da borracha - Ensaio TGA (ASTM E 1131).	35
Tabela 7 - Classificação quanto às classes de tráfego.	46
Tabela 8 - Classificação a partir do Fator de Fadiga dos Ligantes - Possebon (2021).	47
Tabela 9 - Parâmetros 2S2P1D, C1 e C2.	69
Tabela 10 - Classes de tráfego segundo o Jnr 64°C.	72
Tabela 11 – Classificação de Possebon (2021).	77
Tabela 12 - Parâmetros do modelo VECD para obtenção da curva de fadiga.	77
Tabela 13 - Resultados Separação de fases - (a) Diferentes teores de borracha - (b) diferentes tempos de mistura.	78

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	Asfalto Diluído de Petróleo
ANP	Agência Nacional do Petróleo
AMB	Asfalto Modificado por Borracha
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
ARE	Agentes Rejuvenescedores Emulsionados
AR	Agentes Rejuvenescedores
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional de Transportes
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
DTT	<i>Direct Tension Test</i>
$ G^* $	Módulo de Cisalhamento Complexo
EAP	Emulsão Asfáltica de Petróleo
FFL	Fator de Fadiga do Ligante
GEPPASV	Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
Jnr	Compliance não retornável
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
N	Número de Ciclos
NBR	Norma Brasileira
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>

PG	<i>Performance Grade</i>
REFAP	Refinaria Alberto Pasqualini
RV	<i>Rotational Viscometer</i>
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
Superpave	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</i>
TGA	<i>Thermogravimetric Analysis</i>
VECD	<i>Viscoelastic Continuum Damage</i>
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
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 química do ligantes asfálticos	18
2.1.2	Comportamento dos ligantes asfálticos	20
2.1.3	Especificação dos ligantes asfálticos	21
2.1.4	Ligantes asfálticos modificados por borracha de pneu reciclada	26
2.2	BORRACHAS DE PNEUS.....	28
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	31
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA	31
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS.....	33
3.3	PROCEDIMENTO DE MISTURA	36
3.4	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CAP MODIFICADO	38
3.4.1	Ensaio Convencionais	38
3.4.2	Ensaio Reológicos	41
3.4.3	Separação de fases	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1	PROCESSO DE INCORPORAÇÃO DA BORRACHA.....	49
4.2	ENSAIOS CONVENCIONAIS	50
4.2.1	Penetração	50
4.2.2	Ponto de Amolecimento	52
4.2.3	Recuperação Elástica	53
4.3	ENSAIOS REOLÓGICOS	55
4.3.1	Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico (G^*)	55
4.3.2	Curvas mestras de Ângulo de Fase (Φ)	61
4.3.3	Performance Grade (PG)	69
4.3.4	Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)	71

4.3.5	<i>Linear Amplitude Sweep (LAS)</i>	73
4.4	SEPARAÇÃO DE FASES.....	78
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	81
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

1 INTRODUÇÃO

A história do Brasil com o modal rodoviário começou a partir dos anos 1920, com o plano nacional para a implantação das primeiras rodovias ligando as regiões do País. Logo depois, a partir da década de 1950, com Juscelino Kubitschek na presidência, o Brasil teve seu grande avanço nos investimentos de infraestrutura rodoviária em comparação com os demais modais. Assim, se tornou o principal meio de transporte de passageiros e cargas do país. Hoje, segundo a Confederação Nacional dos Transportes (CNT) a malha rodoviária do Brasil possui uma extensão de cerca de 1,720 milhões de quilômetros, onde apenas 12% são pavimentadas e 9,1% são rodovias planejadas (CNT, 2021). Também, sabe-se que após implementação, as rodovias estão sujeitas a sofrer danos com a passagem do tráfego e devido às intempéries climáticas. Tendo em vista a porcentagem de rodovias a serem pavimentadas e a quantidade que estão em más condições, a seleção de materiais adequados auxilia na minimização desse processo de deterioração. (MEDINA e MOTTA, 2015).

Além disso, segundo dados do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), em seu Relatório de pneumáticos, no ano de 2017 foram comercializados no mercado brasileiro, entre importadores e fabricantes nacionais, cerca de 60.424.080 unidades de pneus novos, o que equivale a 839.863,47 toneladas de borracha de pneu. Em paralelo a isso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos busca mitigar os impactos negativos da geração excessiva e disposição inadequada de resíduos sancionou a Lei nº 12.305, com o intuito, dentre outros itens, de não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como a disposição final adequada. Frente a quantidade de pneu comercializados no país, assume-se que a quantidade descartada irregularmente seja de tamanha intensidade, por isso o propósito da política de resíduos sólidos vem ao encontro da reciclagem de pneus para uso em pavimentação asfáltica, visto a grande quantidade presente no país.

Segundo Nascimento (2015) pelo fato de a fabricação de borracha de pneus ser uma mistura de diferentes componentes, como borracha de estireno-butadieno, borracha natural, borracha sintética, negro de fumo, entre outros, alguns desses materiais quando misturados com o ligante asfáltico podem melhorar

significativamente suas propriedades. Portanto, unido a demanda por materiais de boa qualidade, a grande quantidade de pneus presente no país, a necessidade ambiental de reutilizar materiais e a possível melhora frente ao desempenho do ligantes asfáltico, conseqüentemente, das rodovias brasileiras, o presente trabalho tem o intuito de apresentar um estudo da adição de borracha triturada de pneus reciclados como modificador de ligante asfáltico convencional. Para então, a partir de ensaios laboratoriais, feitos no Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV), avaliar as propriedades físicas e reológicas das misturas asfálticas não envelhecidas e envelhecidas, bem como seus desempenhos frente aos principais defeitos da pavimentação brasileira: deformação permanente e fadiga.

1.1 Objetivo geral

O trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade e os efeitos da adição de borracha triturada de pneus reciclados em um cimento asfáltico de petróleo convencional do tipo 50/70, variando-se os teores de borracha incorporada e o tempo de mistura.

1.2 Objetivos específicos

Considerando a variação de teor e de tempo de mistura adotados, são objetivos específicos da pesquisa:

- Aferir a eficiência do processo de mistura frente as variáveis adotadas (temperatura, rotação e tempo) para produção de um bom ligante asfalto-borracha;
- Avaliar as propriedades físicas por meio dos ensaios de Penetração, Ponto de Amolecimento e Recuperação elástica;
- Avaliar as mudanças no comportamento da viscoelasticidade dos ligantes modificados com o auxílio de ensaios reológicos e da modelagem 2S2P1D;
- Avaliar o efeito causado pela borracha frente ao envelhecimento do ligante asfáltico;

- Classificar os ligantes segundo classificação da metodologia *Superpave* (*Superior Performing Asphalt Pavements*) em relação ao PG (*Performance Grade*) de alta temperatura;
- Analisar o desempenho das misturas quanto a resistência à deformação permanente através do ensaio de MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*);
- Avaliar o desempenho à fadiga dos asfaltos-borracha produzidos utilizando o ensaio LAS (*Linear Amplitude Sweep*);
- Aferir a estabilidade à estocagem através do ensaio de separação de fases;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa seção são apresentados conceitos a respeito dos ligantes asfálticos, sua composição e comportamento, tanto convencionais como modificados com borracha. Além disso as especificações segundo normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e segundo a metodologia Superpave. Na sequência é abordado aspectos sobre a borracha reciclada, métodos de incorporação no ligante, variáveis que influenciam no processo de mistura e a utilização desse material na área da pavimentação.

2.1 LIGANTES ASFÁLTICOS

Há espalhados pelo mundo cerca de 1500 tipos de petróleo explorados pelo homem, entretanto apenas uma pequena porção é considerada adequada para a produção de ligante asfáltico para a pavimentação (Shell, 2003). E para ser utilizado como ligante asfáltico, após a destilação do petróleo, é esperado que o asfalto possua boas propriedades de adesão termoviscoplastica, seja impermeável à água e pouco reativo quimicamente.(BERNUCCI et al., 2010), então dá-se o nome de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).

Comercialmente existem alguns tipos de ligantes asfálticos derivados de petróleo, sendo eles: asfaltos diluídos (ADP), emulsões asfálticas (EAP), agentes rejuvenescedores (AR e ARE), asfaltos modificados por polímero (AMP), asfaltos modificados por borracha (AMB) e o já citado anteriormente, cimento asfáltico de petróleo (CAP) (BERNUCCI et al., 2010).

2.1.1 Composição química do ligantes asfálticos

O ligante asfáltico é uma mistura química complexa, formado por, predominantemente, hidrocarbonetos com uma pequena quantidade de heteroátomos estruturalmente ligados à cadeia. E sua configuração estrutural interna é diretamente

determinada pela origem geográfica de onde é formado (READ; WHITEOAK, 2003). Desse modo a composição química dos ligantes asfálticos podem variar de 90 a 95% de hidrocarbonetos e 10 a 15% de heteroátomos, sendo, Enxofre, Oxigênio, Nitrogênio e alguns metais presentes nas cadeias de ligações covalentes dos hidrocarbonetos (LEITE, 1990).

Através do fracionamento SARA (S de saturados, A de aromáticos, R de resinas e A e asfaltenos) do ligante asfáltico é identificado seus principais componentes: Saturados, Aromáticos, Asfaltenos e Resinas. Os asfaltenos são compostos polares e polarizáveis com cadeias saturadas curtas e são sólidos amorfos pretos, quanto maior for sua presença na composição do asfalto, maior a característica viscosa e mais duro será o CAP. Além disso a presença dos asfaltenos na composição varia de 5 a 25% do CAP (READ; WHITEOAK, 2003).

As resinas são semissólidos marrons que são compostas por hidrogênio e carbono, com alguns heteroátomos de oxigênio, enxofre e nitrogênio presentes. Possuem natureza polar e tem características adesivas forte, são responsáveis por dispersarem os asfaltenos nos óleos. A proporção de resinas e asfaltenos comandam o comportamento de solução ou gelatinoso do CAP.

A maior concentração na composição dos asfaltos é por conta dos componentes aromáticos, que possuem também uma baixa massa molar. Eles são líquidos amarelados polares com um comportamento viscoso e apenas com ligações simples entre si, por serem não-saturadas. A concentração desse componente pode variar de 40% chegando a valores próximos de 60% do total do asfalto. Já os saturados constituem cadeias retas e ramificadas de hidrocarbonetos. São óleos, também viscosos, não polares e incolores, compõem cerca de 5 a 20% da massa do asfalto (BERNUCCI et al., 2010). A união em um único grupo das resinas e dos óleos, saturados e aromáticos, é denominado maltenos. Durante a oxidação do CAP as resinas se transformam em asfaltenos, e os óleos podem se converter em resinas ou asfaltenos (PINHEIRO; SOARES, 2004).

Segundo Bernucci et al. (2010) toda heterogeneidade na composição química do CAP influencia no desempenho físico e mecânico dos ligantes asfálticos, entretanto a incorporação de polímeros, como a borracha, tem ainda maior influência.

2.1.2 Comportamento dos ligantes asfálticos

Para (GIRDLER, 1965) o CAP é considerado uma dispersão coloidal onde os asfaltenos são dispersos nos óleos, saturados e aromáticos, ou seja, é uma dispersão de moléculas polares em meio não polar. Frente a isso, as propriedades físicas do asfalto estão associadas à sua temperatura. Em baixas temperaturas, há uma resistência ao movimento interno das moléculas o que eleva sua viscosidade e faz com que o ligante se comporte como um sólido. Ao passo que a temperatura aumenta, as moléculas conseguem se movimentar gradativamente diminuindo a viscosidade do material. A partir desse momento o ligante asfáltico começa a se comportar com um líquido (BERNUCCI et al., 2010).

Por essa influência é possível caracterizar os ligantes asfálticos como materiais temossensíveis e viscoelastoplásticos devido ao comportamento depender das condições impostas. Denominam-se materiais elásticos aqueles que deformam conforme são solicitados e retornam instantaneamente a forma natural com o alívio da solicitação, já matérias plásticos ao serem submetidos a esforços deformam permanentemente mesmo com o alívio da carga. Há, ainda, outro tipo de comportamento que pode ser justificado pela característica de viscosidade, definida como a resistência ao fluxo de um fluido. Essa resistência provoca um atraso nas deformações conforme o material é submetido a esforços, bem como acontece a mesma situação contrária, onde há um retardo no retorno das deformações com o alívio das cargas. (READ; WHITEOAK, 2003).

O estudo do comportamento e deformabilidade dos materiais betuminosos quando submetidos a carregamentos, tempos de aplicação de carga e temperaturas diferentes denomina-se reologia. Frente a isso é possível analisar o comportamento elástico, viscoelástico e viscoso do ligante betuminoso, uma vez que são funções da temperatura e do tempo de aplicação de carga (SPECHELT, 2004).

Para a melhor análise possível do comportamento viscoelástico dos ligantes asfálticos é utilizado o método 2S2P1D (*2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot*). O método utiliza um amortecedor linear em série com dois elementos parabólicos e uma mola, e todo esse conjunto em paralelo com uma segunda mola (OLARD; DI BENEDETTO, 2003). É feito uso de modelagem matemática através de parâmetros que possibilitam aproximar as curvas com os dados obtidos nos experimentos de reologia.

A partir da modelagem é possível gerar gráficos de curvas ajustadas aos dados experimentais, como plano Cole-Cole, Espaço Black, Curvas Mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase. O plano Cole-Cole auxilia na análise do comportamento viscoso *versus* o comportamento elástico representado, respectivamente, em escala aritmética a parcela imaginária (E2) e a parcela real (E1). Já o espaço Black possibilita a análise do ângulo de fase e com isso, visualizar diferenças entre asfaltos convencionais e modificados. Por fim, para avaliar a rigidez é utilizado as curvas mestras de módulo de rigidez nas diferentes temperaturas e frequências de carga, bem como o mesmo processo de análise da rigidez é feito para o ângulo de fase. Onde valores próximos de 90° indicam grande atuação da parcela viscosa do material, e ângulos que se aproximam de 0° representam o comportamento elástico (OLARD; DI BENEDETTO, 2003).

2.1.3 Especificação dos ligantes asfálticos

Levando em conta a grande heterogeneidade, variabilidade de características, diferença de comportamento frente a condições impostas já citadas anteriormente, é de suma importância que haja especificações que classificação quanto ao uso e desempenho dos diversos cimentos asfálticos de petróleo comercializados. Devido a sua termossensibilidade a avaliação da suscetibilidade térmica é um dos principais critérios de classificação, é por esse fator que muitos dos ensaios simples que medem as propriedades físicas dos CAPs possuem temperaturas fixadas, assim como outros definem o tempo e a velocidade de carregamento (BERNUCCI et al., 2010).

2.1.3.1 Especificação brasileira para cimentos asfálticos de petróleo

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é o órgão público brasileiro responsável pela classificação dos ligantes asfálticos. Através da Norma DNIT 095/2006 – EM: Cimentos asfálticos de petróleo – Especificação de material, são fixados os parâmetros e características dos cimentos asfálticos de petróleo. Também, a norma DNIT 155/2010 – ME: determinação a penetração –

método de ensaio, os ligantes convencionais são classificados e nomeados conforme os limites suportados pela norma. A seguir é apresentado na Tabela 1 os ensaios de caracterização e resultados mínimos preconizados pela norma.

Tabela 1 - Especificação dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) - Classificação por penetração.

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	-
Varição 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.

A Tabela 2 apresenta a especificação brasileira para asfalto modificado por borracha de pneus. A norma de especificação desse material também é estabelecida

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

Tabela 2 - Especificação 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 DNIT 111/2009 – EM.

2.1.3.2 Caracterização avançada de ligantes asfálticos

O ano de 1987 foi de extrema importância na história da pavimentação americana, foi dado início, nos Estados Unidos, no *Strategic Highway Research Program* (Programa SHRP). O objetivo do programa foi desenvolver métodos capazes de analisar materiais e misturas betuminosas baseados nas principais propriedades de desempenho, estudadas na época, (módulo, fadiga e deformação permanente). Dando origem a metodologia SUPERPAVE (*Superior Performing Asphalt Pavement*), suas especificações a respeito dos ligantes asfálticos são baseadas nas propriedades

que influenciam diretamente no desempenho dos pavimentos em serviço. Como buscam simular a realidade, para cada zona climática do país estabeleceram-se temperaturas máximas e mínimas de projeto (DA LUZ FONTES, 2009).

A partir dessa classificação de temperatura, originou-se o PG (*Performance grade*), o grau de desempenho determina a temperatura máxima e mínima que os ligantes asfálticos apresentam boas propriedades físicas, assegurando o desempenho em campo. São representados, por exemplo, PG 64-22 e PG 70-22, indicando o grau de desempenho nas altas e baixas temperaturas, respectivamente.

Como a metodologia foi criada a fim de medir as propriedades físicas no período de serviço de um pavimento, o comportamento dos ligantes são avaliados em estado virgem, durante a usinagem, transporte e compactação, e também após o envelhecimento em pista. Por isso os seguintes ensaios são utilizados para simular as condições citadas.

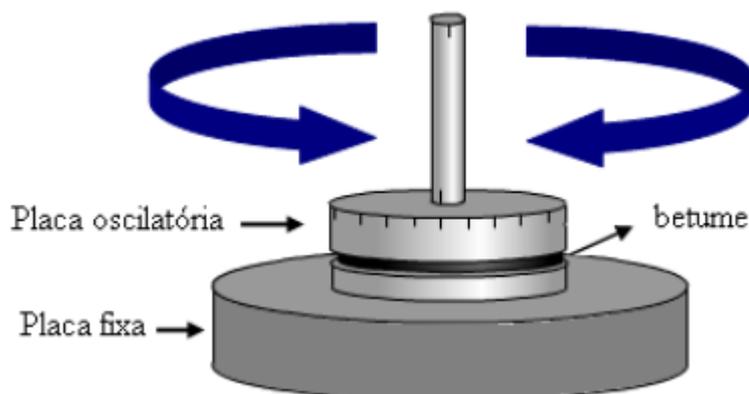
- RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*), o qual reproduz o envelhecimento do ligante durante o processo de usinagem e aplicação;
- PAV (*Pressure Aging Vessel*), utilizado para representar o envelhecimento dos ligantes durante a vida de serviço do pavimento.

Os ensaios são reproduzidos seguindo normas AASHTO T 240 – 22 e ABNT NBR 15235/2009 para o RTFOT e a AASHTO R 28 – 22 normatiza o procedimento de ensaio PAV.

- reômetro de cisalhamento dinâmico – DSR (*Dynamical Shear Reometer*)

É utilizado para obter os parâmetros de viscosidade do CAP. A norma AASHTO T 315 – 20 descreve a metodologia de ensaio para medir o módulo complexo de cisalhamento (G^*) e o ângulo de fase (Φ) ao submeter o material a tensões com diferentes frequências de aplicação de carga entre duas placas paralelas. Onde o parâmetro ângulo de fase representa a razão entre a resposta elástica e a viscosa durante a aplicação de tensões cisalhantes.

Figura 1 - Representação do equipamento reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR).



Fonte: Da Luz Fontes, 2009.

- Reômetro de Fluência em Viga – BBR (*Bending Beam Rheometer*)

A AASHTO T 313 – 22 apresenta o protocolo de ensaio para obter a temperatura inferior do PG, ou seja, a menor temperatura que um cimento asfáltico pode assegurar seu desempenho sem que haja a ocorrência de trincamento térmico. No ensaio é feita a medição da deflexão de um corpo de prova prismático simplesmente apoiado, com carregamento constante no seu ponto médio após envelhecimento em PAV.

- Viscosímetro Rotacional Brookfield – RV

Utilizado para obter a curva de comportamento da viscosidade em relação a temperatura. O controle da viscosidade é feito para garantir propriedades relacionadas a estocagem e bombeamento do betume, garantindo sua fluidez. O ensaio mede a viscosidade através do torque que é necessário para girar o *spindle* que fica imerso na amostra (AASHTO T 316 – 22 e ABNT NBR 15184 – 2021).

- Ensaio de Tração Direta – DTT (*Direct tension test*)

Esse ensaio avalia a ductibilidade dos ligantes quando submetidos a baixas temperaturas (-36°C a 0°C) tracionando as amostras. O ensaio é realizado em estágio de envelhecimento pós RTFOT e pós PAV (AASHTO T 314 – 22).

- *Multiple Stress Creep Recovery* – MSCR

O ensaio consiste na aplicação de carga constante de 1s e repouso de 9s, repetindo isso ciclicamente por dez vezes, ao final do décimo ciclo aumenta-se a tensão e repete o processo. É feito para onze níveis de tensões, sem intervalos entre os ciclos a uma temperatura controlada de 64° C (AASHTO T 350 – 19 e DNIT 423/202 – ME). Com o ensaio é possível avaliar o desempenho do ligante frente a deformação permanente, visto que com os ciclos de carga o corpo tende a acumular deformações.

- LAS - *Linear Amplitude Sweep*

O ensaio aplica tensões com uma frequência de 10Hz por 310 segundos, totalizando 3100 ciclos de carga, afim de quantificar a tolerância ao dano dos ligantes asfálticos (AASHTO TP 101 – 12). É uma estimativa de resistência ao trincamento por fadiga.

2.1.4 Ligantes asfálticos modificados por borracha de pneu reciclada

A história das primeiras tentativas de utilizar borracha de pneus descartados em asfalto datam da década de 50, embora com resultados não muito satisfatórios (ZHU; CARLSON, 1999). Já a partir do ano de 1963, foram publicados pelo HRB (*Highway Research Board*) os primeiros estudos científicos sobre o tema. Onde foi relatado experiências, bem sucedidas, da aplicação de asfalto-borracha em ruas de baixo volume de tráfego (SCHNORMEIER, 1975). A partir daí a popularidade do estudo sobre esse material começou a ganhar força, visto que na década de 90, mais de 30 estados americanos desenvolveram pesquisas (SPECHT, 2004).

2.1.4.1 Processo de incorporação por via úmida

A partir da necessidade de reciclar os pneus inservíveis ao invés do descarte na natureza, alinhado com a necessidade de pavimentos que resistam mais ao tráfego, devido a utilização de veículos mais pesados, estudou-se a possibilidade de um melhoramento dos ligantes com adição de borracha oriundo do tritramento

desses pneus inservíveis (PINHEIRO; SOARES, 2004). Então deu-se origem ao processo de mistura onde a borracha é misturada com o ligante até sua incorporação denominado asfalto-borracha sendo definida pela ASTM D 6114-19 como uma mistura de cimento asfáltico, borracha de pneu reciclada sendo o percentual de borracha ser de no mínimo 15% da massa total da mistura.

O processo de incorporação por via úmida é onde o betume é misturado com a borracha em alta temperatura, para posteriormente a mistura produzida entre esses materiais serem incorporados aos agregados. Durante a incorporação por via úmida ocorre o fenômeno de inchamento da borracha, que por apresentar alto peso molecular aumentam seu volume quando misturados em materiais com baixo peso molecular, neste caso o ligante asfáltico. Segundo (RRL, 1962) os grãos de borracha triturados aumentam seu volume em cerca de cinco vezes pela absorção de óleos aromáticos presentes na composição do cimento asfáltico. Já a borracha libera para o betume, através do negro de fumo, inibidores de raios ultravioletas e antioxidantes, esses compostos conferem ao asfalto resistência ao envelhecimento, melhor desempenho frente a fissuração e com isso, aumentando a durabilidade dos pavimentos (SPECHT, 2004). A interação entre a borracha e o ligante são de natureza física, pois não há ligações livres nas borrachas para ocorrer uma ligação química entre ambos. Portanto, o comportamento do fenômeno de inchamento dos grãos trata-se de uma difusão.

2.1.4.2 Variáveis que influenciam no desempenho do asfalto-borracha

O processo de incorporação não segue uma receita pré-programada tendo em vista a variabilidade nas composições dos ligantes asfálticos e também das características das borrachas. Entretanto há algumas variáveis que podem melhorar ou piorar o procedimento de incorporação. Para (SPECHT, 2004) variáveis como teor de borracha, tempo de mistura, temperatura de mistura e a classificação do tipo de ligante utilizado são fatores a serem considerados no momento de produção do asfalto-borracha. Por outro lado, (LEITE, 1990) mostrou que para a produção de um ligante modificado com borracha com boa estabilidade a estocagem, deve-se elevar a temperatura acima de 190°C e também levar em conta a granulometria das

partículas de borracha. No caso dele, tornaram-se estocáveis os ligantes misturados com borrachas que possuíam 80% do seu peso passando na peneira #200 (0,075mm).

2.2 Borrachas de Pneus

Existem alguns destinos possíveis para os pneus reciclados, no Brasil eles podem ser empregados como combustível para a geração de energia (RODRIGUES JÚNIOR, 2006), na fabricação de produtos, como tijolos ecológicos (SILVA et al., 2017), na aplicação como revestimento de quadras poliesportivas (PISOLEVE®, 2019) e também na pavimentação rodoviária. Este último os pneus reciclados são reutilizados e misturados em misturas asfálticas após serem triturados (GUIMARÃES, 2019).

Os estudos produzidos por Dantas Neto (2004) a respeito de misturas de asfalto-borracha foram analisados a temperatura de mistura, os teores de incorporação, o tempo de mistura e a granulometria das borrachas. Indicando que as características e tamanho das partículas influenciam no produto final. A Figura 2 representa as dimensões das partículas de borrachas trituradas.

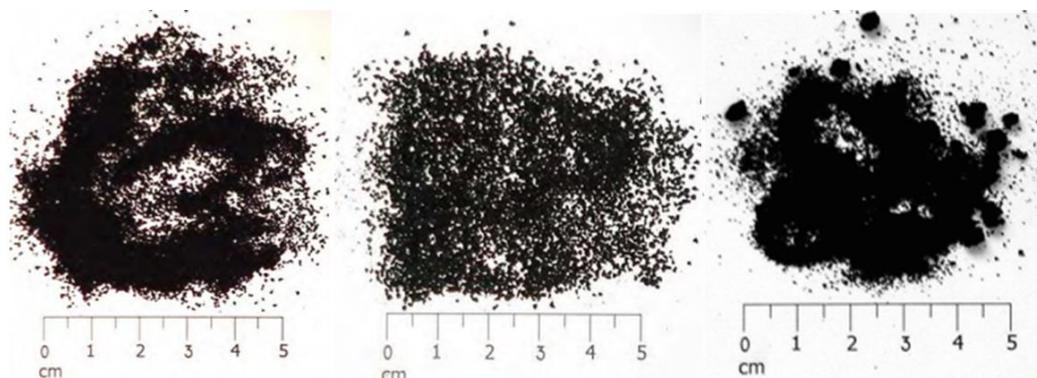
Figura 2 - Dimensões das partículas de borracha trituradas.



Fonte: DANTAS NETO, 2004.

Specht (2004) também evidenciou que a granulometria das borrachas influencia no tempo de mistura, uma vez que com maior tamanho maior o tempo necessário para a incorporação das partículas ao ligante e no comportamento da mistura final. Com isso, apresentou diferentes amostras de borrachas trituradas usadas como modificador, conforme Figura 3.

Figura 3 - Amostras de diferentes borrachas estudadas por Specht, 2004.



Fonte: Adaptado Specht, 2002.

Souza (2006) modificou ligante asfáltico com borracha moída de pneus onde variou a porcentagem de adição e tamanho. Em seu protocolo de mistura utilizou uma rotação de 660 rpm por 30 minutos e finalizou com o acondicionamento em estufa por uma hora para que ocorresse o tempo de digestão do asfalto-borracha, que pode ser conhecido também como tempo de maturação.

O tempo de digestão pode ser definido como o tempo que a mistura deve ser estocada a altas temperaturas logo após o procedimento de mistura para que ocorra uma maturação da interação entre o ligante asfáltico e os grânulos de borracha (Gallego et al. 2000), sendo fator determinante frente ao desempenho das misturas asfálticas modificadas com borracha. Além disso, autores indicam problemas de desagregação da mistura quando não há um tempo de digestão suficiente. Por outro lado, tempos muito elevados de estocagem em altas temperaturas podem acarretar em uma oxidação demasiada.

Os componentes presentes nas borrachas podem influenciar comportamentos nos cimentos asfálticos. O negro de fumo presente na composição das borrachas pode proteger os ligantes quanto ao envelhecimento, segundo Yamaguchi et al. (2005), a adição de negro de fumo em misturas asfálticas as protegeu de fotodegradação, causadas por irradiação ultravioleta, na superfície das amostras onde os danos são mais graves. A procedência dos pneus varia as quantidades das composições presentes, e conseqüentemente, as propriedades do asfalto-borracha. A seguir a variação dos materiais presentes nos pneus são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Materiais contidos nos pneus.

Material	Ligeiro (%)	Camião (%)
Borracha natural	14	27
Borracha sintética	27	14
Negro de fumo	28	28
Aço	14 a 15	14 a 15
Tecido e outros	16 a 17	16 a 17

Fonte: Adaptado Da Luz Fontes, 2009.

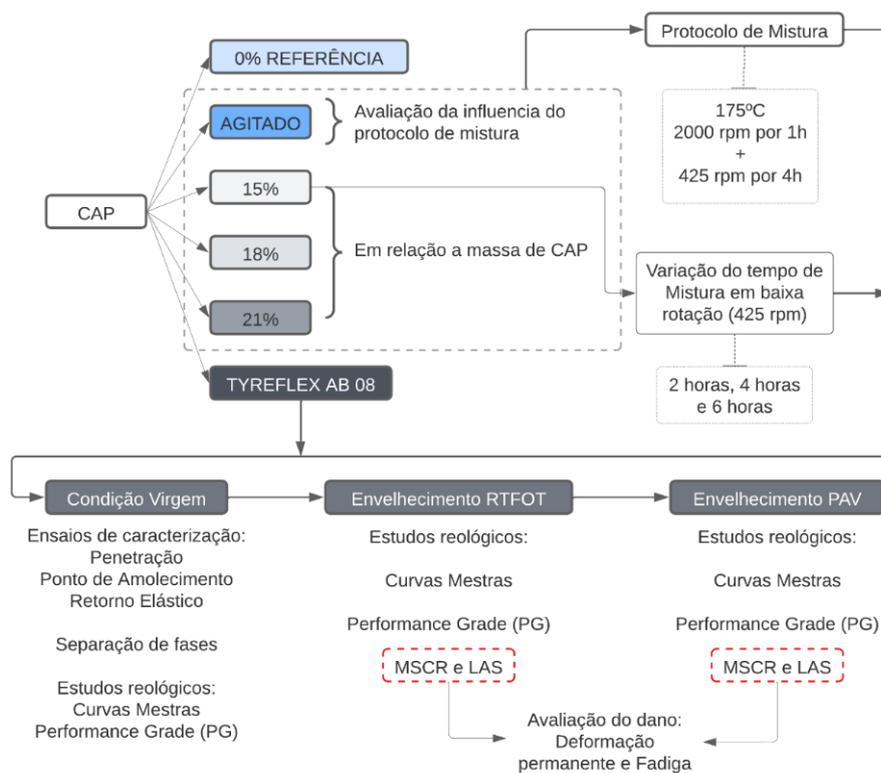
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Nesta parte do trabalho serão apresentados os materiais utilizados na pesquisa e suas características, assim como o a descrição do processo de modificação para obtenção do ligante asfáltico com borracha. Também serão apresentados os ensaios laboratoriais realizados para caracterização física e reológica, assim como os ensaios utilizados para a verificação de desempenho das misturas produzidas.

3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

A seguir, a metodologia do presente estudo pode ser observada pelo esquema da Figura 4. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório do Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Figura 4 - Esquema do programa experimental.



Para a realização do estudo foi solicitado à empresa CBB Asfaltos amostras de pó de borracha utilizado na modificação dos ligantes, bem como amostras do seu produto comercializado TYREFLEX AB 08. A partir disso foram estabelecidos os teores de borracha que seriam incorporados, uma vez que o produto da empresa é produzido com 15% de pó em relação à massa de CAP, portanto, os teores de incorporação estudados foram de 15%, 18% e 21%, também em relação à massa de ligante asfáltico. Levou-se em conta estudos produzidos por outros autores, no que se refere a resultados não significativos em teores muito abaixo de 15% e também a norma americana ASTM D 6114-19. Além disso, para o menor teor foi avaliado o, também, a variação do tempo de digestão em 2 horas, 4 horas e 6 horas. Por fim foi submetido a mesma quantidade CAP das amostras pelo processo de mistura, porém sem adicionar borracha, para que fosse possível quantificar a influência causada pelo protocolo de mistura proposto frente ao envelhecimento. Por isso, a amostra foi denominada de “AGITADO 4h”.

Na condição de misturas virgem, foram avaliadas as propriedades físicas por meio dos ensaios de caracterização como penetração, retorno elástico e ponto de amolecimento. Ademais sabe-se que o ligante asfáltico modificado pode ter seu comportamento alterado caso fique muito tempo estocado, por exemplo, pelo fenômeno de separação de fases da mistura. Para avaliar esse fenômeno foi executado o ensaio de separação de fases nas misturas virgens modificadas com borracha. Nesse estado, ainda foi realizado a caracterização da rigidez ao obter-se as curvas mestras de Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase, Espaço Black, plano Cole-cole e a primeira etapa do PG de alta (*Performance Grade*) segundo a metodologia *Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements)*. O tratamento dos dados seguiu a modelagem 2S2P1D e os ensaios foram executados no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR).

Adiante prosseguiu-se para o envelhecimento à curto prazo no qual foi utilizado a Estufa de Filme Fino Rotativo – RTFOT (*Rolling Film Oven Test – ASTM D 2872*). Nesta condição, foram replicadas as mesmas etapas de ensaios no Reômetro de cisalhamento Dinâmico para o ligante na condição virgem. Também foram executados os ensaios de caracterização de dano, o MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*) para a quantificação da deformação permanente e o LAS (*Linear Amplitude Sweep*) para a avaliação da fadiga.

Por fim, foi efetuado a simulação do envelhecimento de longo prazo, a fim de representar o envelhecimento durante a vida de serviço do pavimento. Esse processo é feito através de ar sob pressão e temperatura, dentro de um vaso resistente a alta pressão denominado PAV (*Pressure Aging Vassel* – ASTM D 6521). Após o procedimento foram moldados e ensaiados corpos de prova no DSR para a caracterização da rigidez, através das curvas mestras, conforme mencionado nas condições de envelhecimento anteriores, análise do comportamento frente a fadiga pelo ensaio LAS.

Após a execução de todos os ensaios de caracterização reológica, a modelagem 2S2P1D auxiliou na análise dos dados obtidos através da simulação matemática do comportamento dos cimentos asfálticos modificados. Para então, fazer análises comparativas de comportamento e desempenho entre os diferentes teores adicionados, bem como os diferentes tempos de mistura.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Um dos matérias utilizados para a elaboração desse estudo foi o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70, originado da Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP) localizada em Canoas-RS. Suas propriedades podem ser observadas na Tabela 4. Além disso, foi o mesmo material utilizado por Possebon (2018) e Nunes-Ramos (2022).

Tabela 4 - Propriedades CAP REFAP 50/70.

Propriedade	Método	Especificação	Resultado
Ponto de Amolecimento (°C)	DNIT 131/2010 - ME	46	48
Penetração (0,1mm)	DNIT 155/2010 - ME	50 - 70	52,3
Ductibilidade a 25° (cm)	DNER – ME 163/98	Min. 60	>147
Viscosidade Brookfield a 135°C (cP)	AASHTO T 316–19	Min. 274	327,5
Viscosidade Brookfield a 150°C (cP)	AASHTO T 316–19	Min. 112	166,3
Viscosidade Brookfield a 177°C (cP)	AASHTO T 316–19	57 - 285	62,7

Fonte: Adaptado Nunes-Ramos, 2022 e Possebon 2018.

Já o pó de borracha (Figura 5) utilizado na modificação do ligante asfáltico foi cedido pela empresa CBB Asfaltos, localizada na cidade de Curitiba-PR. O emprego da borracha triturada de pneus como agente modificante segue controles tecnológicos, sendo eles: controle de granulometria, análise Termogravimétrica (TGA) e a análise visual das limalhas através do imã de neodímio. No controle granulométrico o pó deve ser passante na peneira de nº 30 (Tabela 5), enquanto que a análise das limalhas é visual, consistindo no “mergulho” de uma haste magnética no recipiente onde a borracha está estocada seguido de sua remoção. Pouca quantidade de pó pode ficar aderida, após a remoção da haste, o que indica a presença de uma baixa quantidade de limalha de aço misturada (Figura 6). Por fim, o ensaio TGA, (*Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry - ASTM E 1131*), determina a quantidade polimérica e de negro de fumo presente na amostra. A seguir na Tabela 5 são apresentadas as especificações do pó de borracha cedidos pela empresa.

Figura 5 - Borracha triturada de pneu utilizada para a modificação do CAP.



Fonte: Autor, 2023.

Tabela 5 - Análise granulométrica do pó de borracha.

Peneiras	mm	Material Retido Acumulado (g)	Porcentagem Passante (%)
#16	1,18	0	100
#30	0,6	0	100
#40	0,42	10,6	65,15
#50	0,3	18	40,8
#80	0,28	25,8	15,1
#200	0,075	19,6	2,6
Fundo	-	30,4	1,6

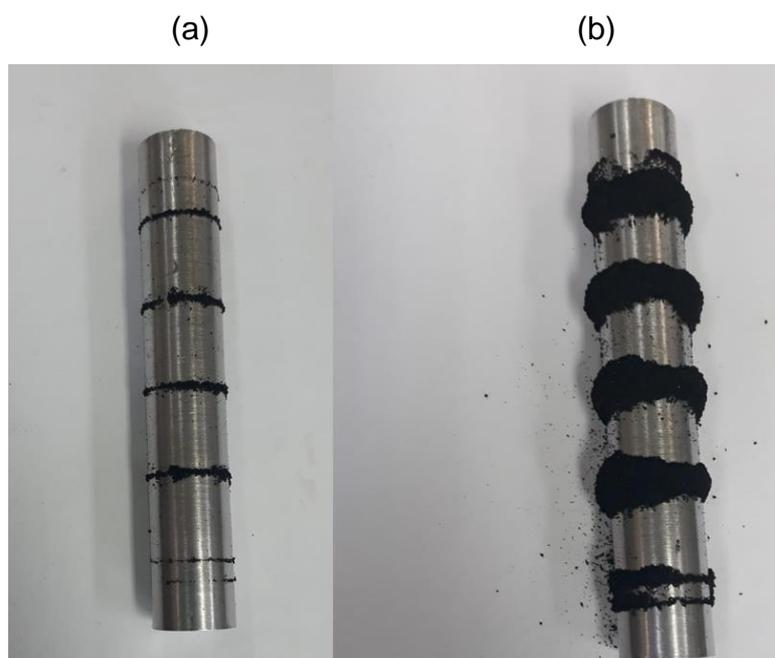
Fonte: Laudo fornecido pelo fabricante.

Tabela 6 - Especificação dos componentes da borracha - Ensaio TGA (ASTM E 1131).

Componentes da borracha	Especificação
Teor de material polimérico e voláteis:	Mín. 54%
Negro de fumo:	28 - 38%
Cinzas:	Máx. 8%

Fonte: Laudo fornecido pelo fabricante.

Figura 6 - Ensaio de análise visual de limalhas de ferro - (a) amostra aprovada - (b) amostra reprovada.



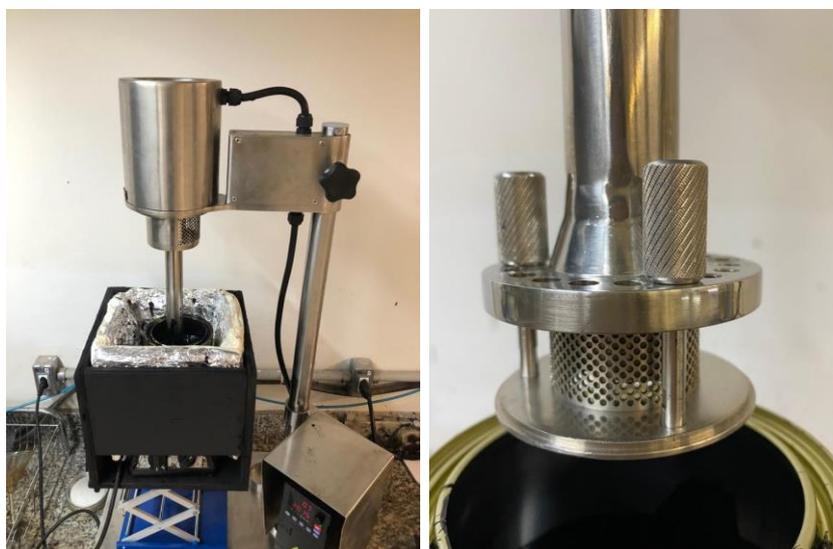
Fonte: CBB Asfaltos, 2023.

3.3 PROCEDIMENTO DE MISTURA

O cimento asfáltico foi vertido para dentro de latas, todas com a mesma quantidade de ligante, sendo produzidas uma lata para cada mistura a fim de diminuir diferenças, entre amostras com mesmo teor, oriundas do processo de mistura. A quantidade de CAP 50/70 adicionado nas latas foi estabelecido a partir de um dimensionamento da quantidade de total de ligante utilizado para produzir todos os ensaios em duplicata. E então estabeleceu-se a mesma quantidade em todos os procedimentos de mistura, a fim de garantir padronização. Além disso, as inserções das frações modificantes eram feitas com o cimento asfáltico já na temperatura de mistura (175°C) e dentro da estufa. Depois de adicionado, era feito uma homogeneização manual para o conjunto atingir a temperatura desejada, para então transferir a lata para dentro da caixa isolante e iniciar a 1ª etapa do processo de modificação.

A 1ª etapa consistiu na mistura do ligante asfáltico CAP 50/70 e do pó de borracha em um misturador de alto cisalhamento (Misturador emulsificador ME – 100L, marca SEMCO). Além disso, as amostras eram acondicionadas dentro de uma caixa, onde no fundo foi instalado uma fonte de calor (chapa de aquecimento) e envolvida em uma camada de lã de rocha revestida com alumínio para evitar perda de calor para o ambiente conforme mostra a Figura 7.

Figura 7 – (a) Conjunto misturador de alto cisalhamento, caixa de isolamento térmico e chapa de aquecimento (b) Geometria do crivo utilizado.



Fonte: Autor, 2023.

Após a transferência para a caixa isolante, também pré-aquecida, deu-se início no processo de mistura em alto cisalhamento, que durou 60 minutos com uma rotação constante de 2000rpm. Essa rotação foi estabelecida levando em conta as especificações do fabricante, já que um dos objetivos do presente estudo é tentar produzir um asfalto-borracha parecido com o cedido pela empresa. Ao término da 1ª etapa a lata com a mistura era transportada para a estufa aquecida a 175°C, onde Nunes-Ramos (2022) adaptou uma furadeira de bancada junto com uma haste usada para misturar os ligantes (Figura 8).

Figura 8 - 2ª etapa do processo de mistura (tempo de digestão).



Fonte: Autor, 2023.

A 2ª etapa consistiu na agitação em baixa rotação e na mesma temperatura da 1ª etapa, uma vez que após a mistura de cisalhamento, a borracha continua incorporando na matriz asfáltica se mantida em alta temperatura, esse fenômeno é denominado de digestão da borracha (SPECHT, 2004). Por isso, as amostras foram deixadas 4h a uma rotação de 420 rpm e 175°C. Como apresentado anteriormente, foi um dos objetivos de estudo é a variação do tempo de mistura, então os teores e 15% passaram por esse processo. Então variou-se em 2, 4 e 6 horas o tempo de digestão, dando origem às amostras 15% 2h, 15% 4h e 15% 6h.

3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CAP MODIFICADO

Adiante será apresentado os ensaios laboratoriais realizados para caracterização das amostras de ligante asfáltico modificado com borracha. A divisão desse capítulo foi feita separando ensaios convencionais, reológicos e por fim o ensaio de separação de fases.

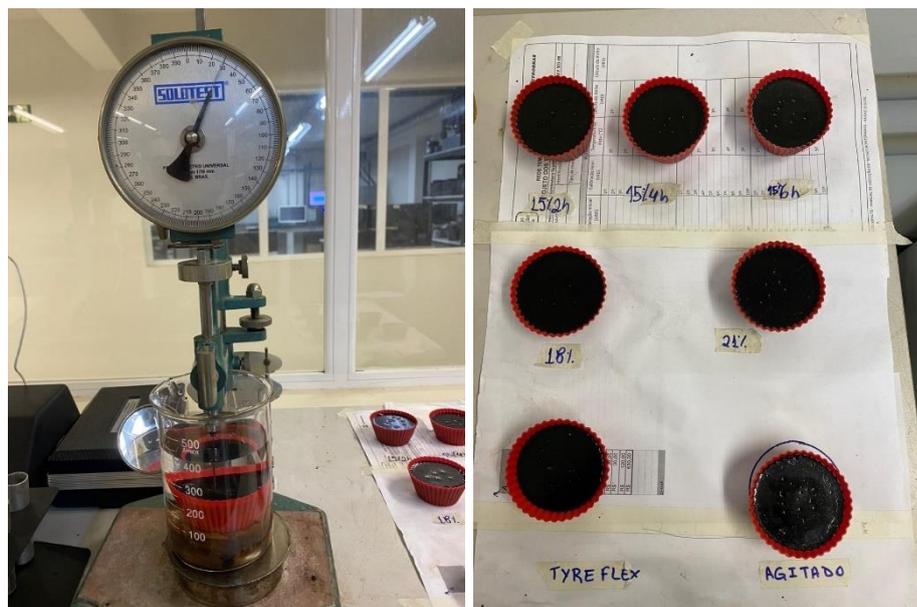
3.4.1 Ensaio Convencionais

Os ensaios convencionais foram utilizados para avaliar as propriedades físicas por meio da penetração, do ponto de amolecimento e da recuperação elástica, na condição virgem das misturas asfálticas de asfalto borracha produzidas e dos ligantes CAP 50/70 convencionais. A seguir os procedimentos de cada ensaio estão descritos e indicados, assim como suas respectivas normas de método de ensaio.

3.4.1.1 Penetração

Este ensaio foi realizado seguindo a normativa do DNIT 155/2010 – ME, consiste na penetração de uma agulha padronizada de 100g de massa em uma amostra sob condições prefixadas de temperatura (25°C), onde é medido a profundidade, em décimos de milímetro, em que essa agulha penetra na amostra. Ligantes com uma maior consistência apresentam menores valores de penetração, uma vez que a agulha não consegue penetrar tanto. Por fim, o resultado é lido através da média aritmética de 3 medições.

Figura 9 - Ensaio de Penetração.



Fonte: Autor, 2023.

3.4.1.2 Ponto de Amolecimento

Para o ensaio seguiu-se norma DNIT 131/2010 – ME. Onde duas amostras em formato de “moedas” são submersas em uma solução de monoetilenoglicol, e uma haste vazada faz com que elas fiquem em suspensão e uma esfera de metal é colocada em repouso sobre cada amostra. A partir disso, a solução é aquecida a uma taxa de 5°C/minuto e conforme o conjunto vai aquecendo a “moeda” de ligante asfáltico vai adquirindo fluidez, até o momento onde ela começa a não suportar o peso da esfera metálica. Por sua vez a esfera escoo entre a amostra e o ensaio termina quando ela toca o fundo. Após o final do ensaio anota-se o valor da temperatura do conjunto no momento do toque, sendo o resultado do Ponto de Amolecimento uma medida empírica onde correlaciona a temperatura em que o asfalto atinge uma determinada condição de escoamento.

Figura 10 - Ensaio Ponto de Amolecimento.



Fonte: Autor, 2023.

3.4.1.3 Recuperação Elástica

Já para o procedimento do ensaio de Recuperação Elástica a norma DNIT 130/2010 – ME foi utilizada como referência. Nesse ensaio amostras são submersas em um banho de água de temperatura controlada (25°C) e então submetidas a uma tração para produzir um estiramento na razão de 5cm/minuto, até atingirem 20cm de estiramento. Em sequência, com uma tesoura, cada amostra é cortada ao meio e mantida em repouso por 60 minutos. Ao final do período é medido o novo comprimento da amostra devido a recuperação após o estiramento.

Figura 11 - Ensaio de Recuperação elástica.



Fonte: Autor, 2023.

3.4.2 Ensaios Reológicos

Através do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) foram executados os ensaios deste capítulo, investigando a caracterização da rigidez e do dano. A seguir os ensaios serão descritos.

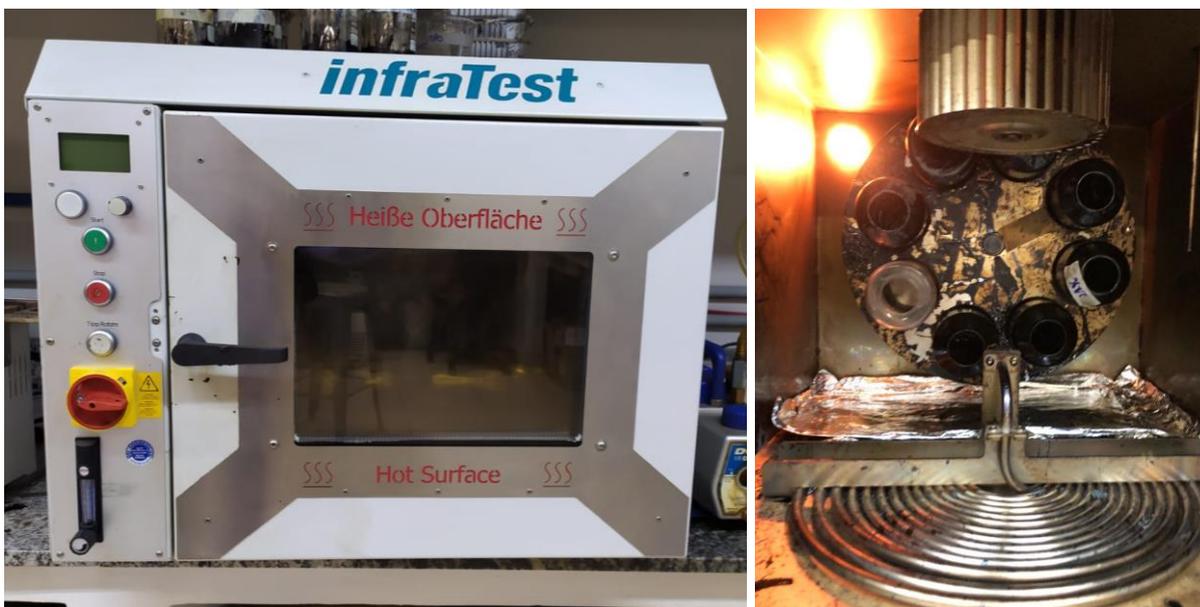
3.4.2.1 Envelhecimento de curto prazo

Como mencionado nos capítulos anteriores o envelhecimento de curto prazo foi simulado na Estufa de Filme Rotativo ou Película Delgada Rotacional (*Rolling Thin Oven Film Test - RTFOT*). Esse procedimento busca simular o envelhecimento por oxidação e evaporação oriundas do processo de mistura do concreto asfáltico nas usinas, transporte, aplicação e compactação. As normas seguidas regulamentadoras são AASHTO T 240-22 e ABNT NBR 15235/2009.

O ensaio é realizado em uma estufa própria, onde as amostras ficam rotacionando e jatos de ar são injetados para dentro dos frascos. Nesses frascos são vertidos 35 gramas de asfalto, com o intuito de formar uma fina película envolvendo

toda a parte interna dos recipientes. Além disso a estufa é aquecida a 163°C e os frascos são mantidos dentro por 85 minutos. Após o procedimento foi produzido as amostras para serem ensaiadas no DSR.

Figura 12 - Equipamento RTFOT.



Fonte: Autor, 2023.

3.4.2.2 Envelhecimento de longo prazo

A premissa desse procedimento é simular o envelhecimento acelerado do material asfáltico, ou seja, através de ar sob pressão e temperatura simular o envelhecimento em campo durante a vida útil de um pavimento. Então, a execução do ensaio consiste na exposição do ligante, já envelhecido em RTFOT, a pressões na ordem de 2070 kPa e temperaturas em torno dos 100°C durante 20 horas. Sendo que para a sua execução utilizou-se a norma AASHTO T 240 – 22 e após o término do procedimento, também foram moldadas amostras para serem ensaiadas no DSR.

Figura 13 - Equipamento PAV.



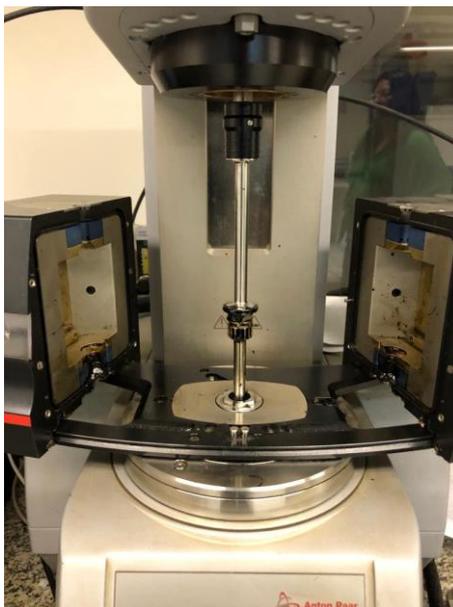
Fonte: Autor, 2023.

3.4.2.3 Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)

Através do equipamento DSR é possível realizar ensaios que permitem obter parâmetros que estão relacionados ao trincamento por fadiga e deformações permanentes. Bem como a caracterização viscoelástica dos ligantes ao submeter as amostras a tensões cisalhantes com diferentes frequências e temperaturas.

Os ensaios consistem em colocar uma amostra circular de ligante entre duas placas paralelas, onde uma é fixa e a outra oscilante. Há dois tamanhos diferentes de amostras, sendo uma com 25mm de diâmetro e 1mm de espessura e outra com 8mm de diâmetro e 2mm de espessura. Ao iniciar o teste a placa móvel oscila com uma frequência de 10 rad/s aplicando então uma tensão cisalhante à amostra.

Figura 14 - Amostra no reômetro - Geometria 25mm.



Fonte: Autor, 2023.

3.4.2.4 Curvas Mestras, Espaço Black e Plano Cole-Cole

Com a varredura de frequência executada pelo DSR, podem ser obtidos os valores de módulo de cisalhamento complexo (G^*) e de ângulo de fase (Φ) em diferentes temperaturas e então a construção das curvas mestras (AASHTO T 315-22). Ao ajustar as curvas mestras aos pontos experimentais pelo método 2S2P1D, também são ajustados o plano Cole-Cole e o Espaço Black.

As diferentes temperaturas de ensaio anteriormente citadas são 5, 15, 25, 35, 45, 55 e 65°C, e para altas temperaturas usou-se geometrias de 25mm, assim como para as baixas, 8mm. A faixa de temperatura foi escolhida levando em conta as condições térmicas que o pavimento pode ser submetido em campo na região sul do País. Já a varredura de frequências segue uma curva logarítmica crescente de 0,1 a 30Hz.

3.4.2.5 Performance Grade (PG)

A metodologia seguida foi a norma americana AASHTO R 29-15, sendo o procedimento de ensaio similar ao executado no item acima, porém nesse caso, a variação de temperatura é de 6 em 6°C tendo o início em 58°C. Para a obtenção do PG de alta foi utilizado uma segunda amostra de geometria 25mm, onde o critério de falha adotado difere entre as condições virgem e após envelhecimento em RTFOT, sendo o valor de $|G^*|/\text{sen}\Phi$ superior a 1,00kPa e 2,20kPa, respectivamente.

Com a execução do ensaio permitiu-se classificar as amostras de CAP modificadas de acordo com seu grau de desempenho descrito nas normas citadas. Com isso foi possível identificar a maior faixa de temperatura suportada em campo para cada tipo de ligante estudado pela avaliação das $|G^*|/\text{sen}\Phi$. Além disso, a classificação quanto ao tráfego foi classificada através do ensaio de MSCR descrito na seção a seguir.

3.4.2.6 Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)

Durante o ensaio a amostra é submetida a ciclos de carregamento durante 1 segundo e repouso de 9 segundos, esse ciclo é repetido 20 vezes com carregamento de 0,1kPa e 10 vezes com carregamento de 3,2kPa. Apesar da norma AASHTO T 350-19 indicar a temperatura de ensaio como a obtida no ensaio do grau PG, a temperatura ensaiada foi de 64°C para que fosse possível fazer uma comparação de desempenho entre as misturas em mesmas condições. Posteriormente calculou-se os valores de compliância não-recuperável (J_{nr}) em kPa^{-1} e os valores de recuperação (R%) para então classificar os asfaltos-borracha quanto as classes de tráfego indicado na Tabela 7. Por fim, gerou-se curvas de deformação cisalhante ao longo do tempo a fim de auxiliar na comparação entre as diferentes amostras estudadas. Neste ensaio as tensões aplicadas ultrapassam o domínio viscoelástico linear das amostras, com isso danificam o material e assim é possível avaliar o comportamento do ligante frente à deformação permanente.

Tabela 7 - Classificação quanto às classes de tráfego.

Limites (kPa⁻¹)	Classificação MSCR
$Jnr_{3,2} \leq 4,5$	S – <i>Standard</i> (tráfego padrão)
$Jnr_{3,2} \leq 2,0$	H – <i>Heavy</i> (tráfego pesado)
$Jnr_{3,2} \leq 1,0$	V – <i>Very Heavy</i> (tráfego muito pesado)
$Jnr_{3,2} \leq 0,5$	E – <i>Extreme</i> (tráfego extremamente pesado)

Fonte: Adaptado AASHTO M 332 - 21.

3.4.2.7 Linear Amplitude Sweep (LAS)

O ensaio é utilizado para avaliar o comportamento e desempenho dos ligantes frente ao trincamento por fadiga. Ao seguir os procedimentos indicados pela norma AASHTO T 391-20, o ensaio constituído por duas etapas, a primeira consiste em realizar o *frequency sweep* para analisar as propriedades reológicas da amostra, onde é empregado um carregamento capaz de produzir uma deformação de 0,1% a frequências variando de 0,2 a 30Hz. Já na segunda etapa, executada em sequência, foi realizado o teste de *amplitude sweep* que avaliou o dano causado à amostra. Foi aplicado carregamento em frequência de 10Hz e intensidade que segue uma rampa linear de 0 até 30% por 3100 ciclos. A avaliação para critério do cliço de falha foi utilizando o a máxima energia de pseudodeformação acumulada (W^R)_S (WANG et al. 2015).

O comportamento de fadiga indicado pelo ensaio requer o uso de modelos matemáticos que levem em conta a estrutura do pavimento, representada pela amplitude de carregamento e a quantidade de ciclos representa o tráfego da rodovia. O ajuste do modelo para cada material depende de parâmetros de fadiga encontrados ao executar ensaios com amplitudes de carregamento variadas. Então, para auxiliar na análise desse processo foi desenvolvida a teoria viscoelástica do dano contínuo (VECD), que permitiu prever a vida de fadiga de amostras simulando qualquer amplitude de carregamento ao utilizar apenas um ensaio (DANIEL; KIM, 2002; LEE; KIM, 1998; PARK; KIM; SCHAPERLY, 1996).

Entretanto o ensaio era utilizado para analisar o desempenho de misturas asfálticas. Posteriormente a teoria foi estendida para os cimentos asfálticos (HINTZ et al., 2011; JOHNSON, 2010). A teoria estendida aos ligantes utilizou o parâmetro

$|G^*|/\sin\delta$ como indicador de integridade do material e o relacionando com o dano sofrido. Através da relação entre integridade e dano é possível obter a curva de integridade *versus* dano do material e a curva de fadiga que compara o número de ciclos de carga com a deformação da amostra.

Além disso, para fins de comparação, foi calculado o Fator de Fadiga do Ligante ($FFL_{19^\circ C}$) proposto por (MARTINS, 2014) que representa a área dos gráficos de deformações, ou seja, quanto maior a área, e conseqüentemente, maior o valor maior é a resistência à fadiga da amostra ensaiada. Possebon (2021) propôs limites para a classificação dos ligantes de acordo com o valor de $FFL_{19^\circ C}$.

Tabela 8 - Classificação a partir do Fator de Fadiga dos Ligantes - Possebon (2021).

Classes	$FFL_{19^\circ C}$
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, 2021.

3.4.3 Separação de fases

O ensaio também é conhecido como estabilidade à estocagem, sua execução segue a norma ABNT NBR 15166:2004. Para seu procedimento foi adicionado 50 gramas de ligante em tubos metálico, dois por mistura, que permaneceram na vertical por 48 horas em estufa aquecida à $163^\circ C$ e em seguida foram transferidos para o congelador onde ficaram por 4 horas.

Ao término das 4 horas os tubos foram cortados em 3 partes iguais, sendo a do meio descartada e com as outras duas (topo e base) realizou-se o ensaio de ponto de amolecimento. Então ao final foi anotado as temperaturas em que cada esfera tocou a haste de metal e através da diferença de temperatura entre o topo e a base avaliou-se a ocorrência de separação das fases da mistura.

Figura 15 - Ensaio Separação de fases - (a) Amostras base e topo separadas (b) - Ponto de amolecimento base e topo.

(a)



(b)



Fonte: Autor, 2023.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROCESSO DE INCORPORAÇÃO DA BORRACHA

O primeiro obstáculo evidenciado para o processo de mistura foi o desafio de manter a temperatura da amostra, já que para o misturador de alto cisalhamento não estava previsto nenhum método de controle de temperatura. A solução inicial foi inserir a lata já aquecida na temperatura de ensaio para dentro de um becker de maior diâmetro envolto com lã-de-vidro na tentativa de isolar a mistura do contato com o meio exterior, porém sem sucesso. Então procedeu-se para a ideia de montar um recipiente com paredes isolantes e tampa, se necessário, com uma fonte de calor na base. Para o sistema de isolamento, as paredes e a tampa foram revestidas com lã-de-rocha, que possui maior eficiência que a anterior, e uma chapa de aquecimento foi instalada ao fundo como fonte de calor.

Ao proceder com as misturas de testes, logo percebeu-se que a tampa não era necessária para manter a temperatura. O conjunto caixa isolante + chapa de aquecimento conseguia exercer sua função, porém ao decorrer do tempo o controle de temperatura indicou que a mistura estava ganhando calor devido ao atrito gerado pela agitação vigorosa do processo. Então para corrigir esse problema, visto que a temperatura de mistura é uma variável importante no comportamento dos ligantes evidenciado por Specht (2004), utilizou-se a chapa de aquecimento apenas para aquecer o conjunto antes de iniciar o processo de mistura. Com isso, foi possível perceber que a mistura em alta rotação auxilia no ganho de temperatura durante o processo.

Outro fator importante no protocolo foi a decisão de utilização do crivo com geometria de menor diâmetro, devido a borracha utilizada possuir uma granulometria fina. Embora a determinação da melhor geometria a ser utilizada não fazer parte do foco do trabalho, as misturas testes produzidas com o crivo de maior diâmetro apresentaram resultados visuais em que a proporção de borracha em suspensão estava mais evidente. O que poderia indicar uma mistura menos eficiente, por isso para um melhor entendimento desse processo recomenda-se estudos mais detalhados sobre o tema.

Já a variação do tempo de maturação julgou-se necessária uma vez que a borracha continua em processo de incorporação após o seu cisalhamento, e afim de produzir uma mistura parecida com a da indústria, onde também há esse processo, foi optado por avaliar sua influência. Para os ensaios convencionais foi possível perceber apenas uma alteração na recuperação elástica das amostras, o que pode indicar um aumento da incorporação da borracha no CAP, mas que precisa ser analisado reologicamente para uma melhor conclusão.

4.2 ENSAIOS CONVENCIONAIS

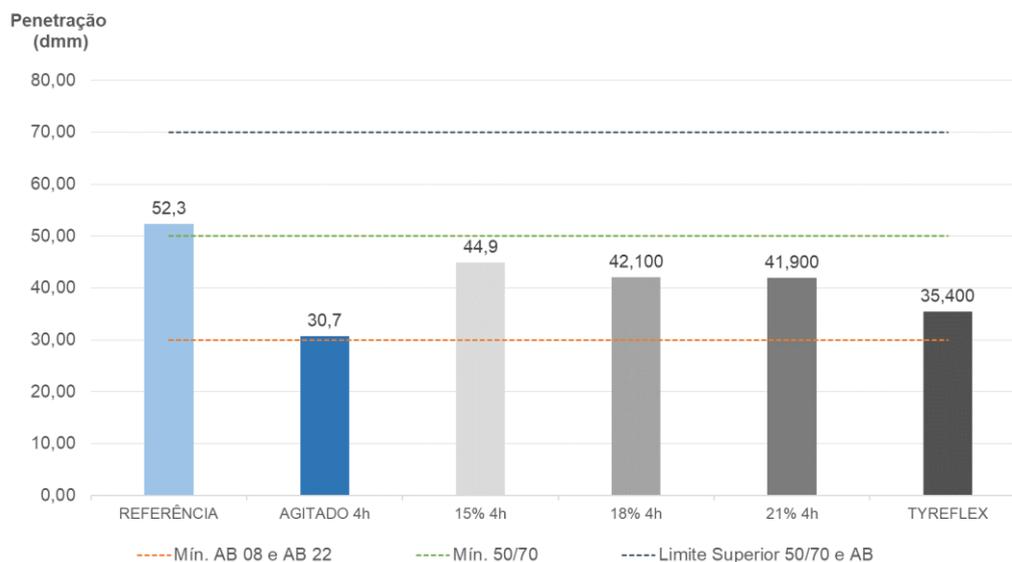
Os parâmetros dos resultados dos ensaios convencionais de caracterização física apresentados a seguir foram avaliados conforme a norma de especificação do asfalto-borracha (DNIT 111/2009 – EM) indicados na Tabela 2.

4.2.1 Penetração

A seguir o gráfico da Figura 16 apresenta os resultados do ensaio de penetração para as misturas propostas. Os valores encontrados foram comparados com os valores mínimos determinados pela norma para asfaltos modificados com borracha AB 08 e AB 22, e também com o CAP 50/70 convencional (DNIT 095/2006 – EM) pelo fato deste ter sido usado como referência para o estudo.

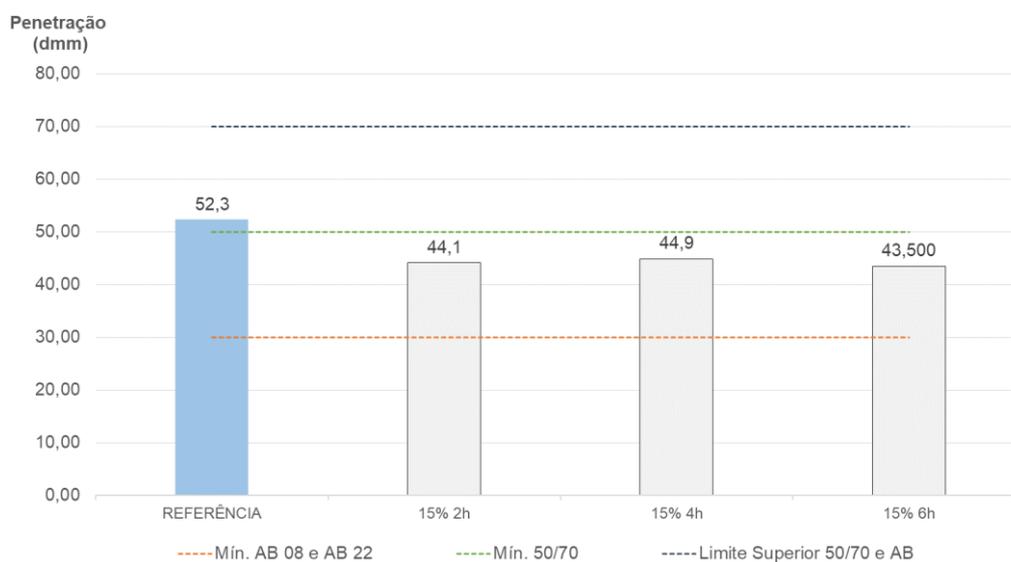
Ao analisar o gráfico da Figura 16 a informação mais visível é a diferença, para os demais, do resultado do ligante que passou pelo processo de mistura sem a adição de borracha, sugerindo uma influência no enrijecimento do ligante devido ao processo de mistura, por outro lado, é plausível argumentar a respeito da adição da borracha proteger a mistura contra esse aumento de “dureza”. Também é possível perceber, em comparação com o ligante referência, uma queda gradual nos valores de penetração conforme foi adicionado mais borracha na mistura.

Figura 16 - Ensaio de Penetração – Teores de borracha diferentes.



Fonte: Autor, 2023.

Figura 17 - Ensaio Penetração – Tempo de mistura diferentes.



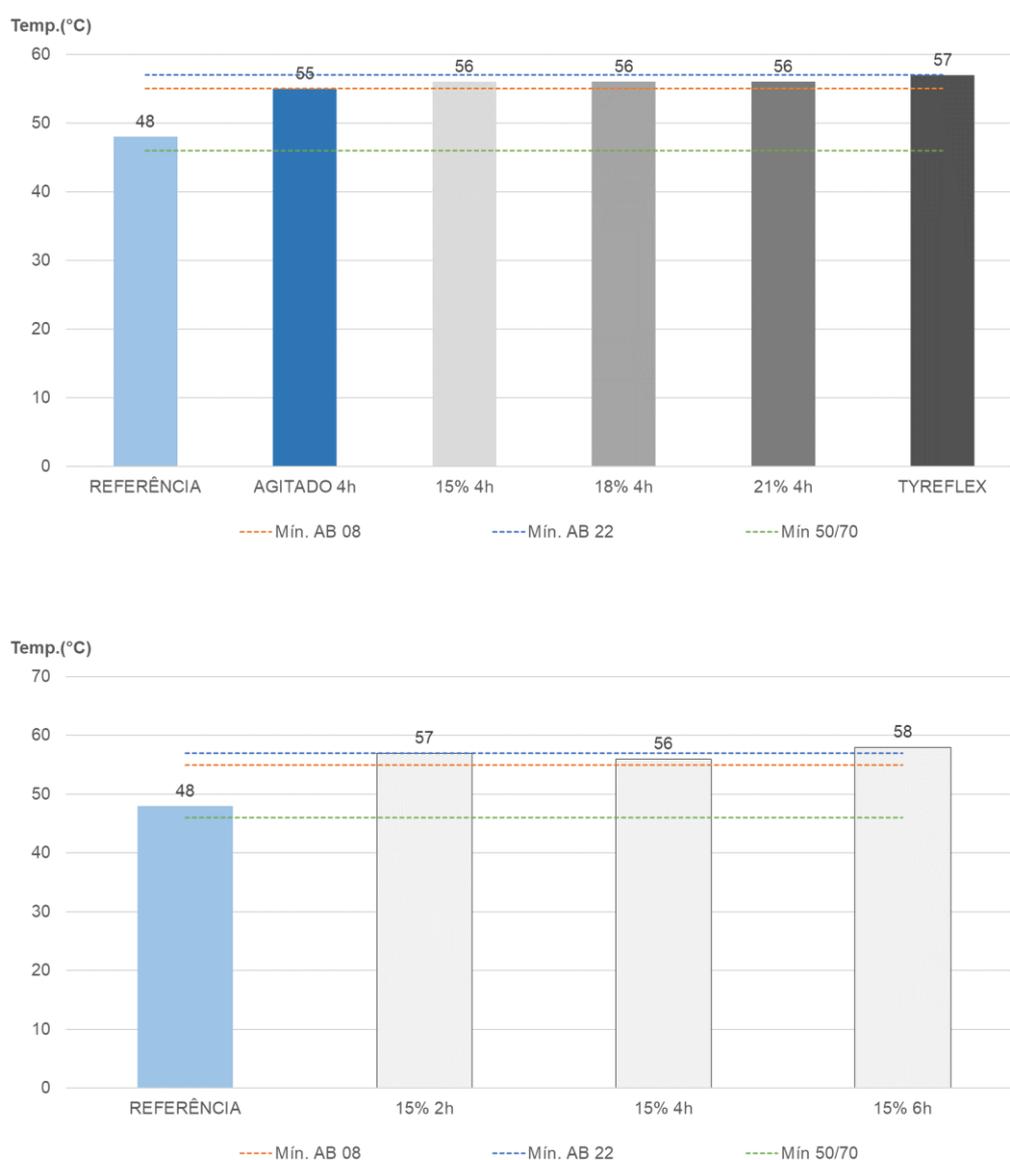
Fonte: Autor, 2023.

Já a variação do tempo de mistura pareceu não causar aumento no enrijecimento do ligantes como mostra a Figura 17. Por fim, os ligantes AB ficaram dentro dos parâmetros indicados pela norma de especificação de material do DNIT e também apresentaram comportamento semelhante ao ligante comercial.

4.2.2 Ponto de Amolecimento

A seguir, a Figura 18 indica os valores encontrados para o ensaio do Ponto de Amolecimento, podemos relacionar o ensaio como um parâmetro para inferir sobre a resistência a deformação plástica nos CAPs estudados. Os resultados obtidos foram comparados com os limites mínimos das especificações do DNIT para Ligantes modificados e convencionais citadas anteriormente.

Figura 18 - Resultados Ponto de Amolecimento – (a) Diferentes teores - (b) Diferentes tempos de mistura.



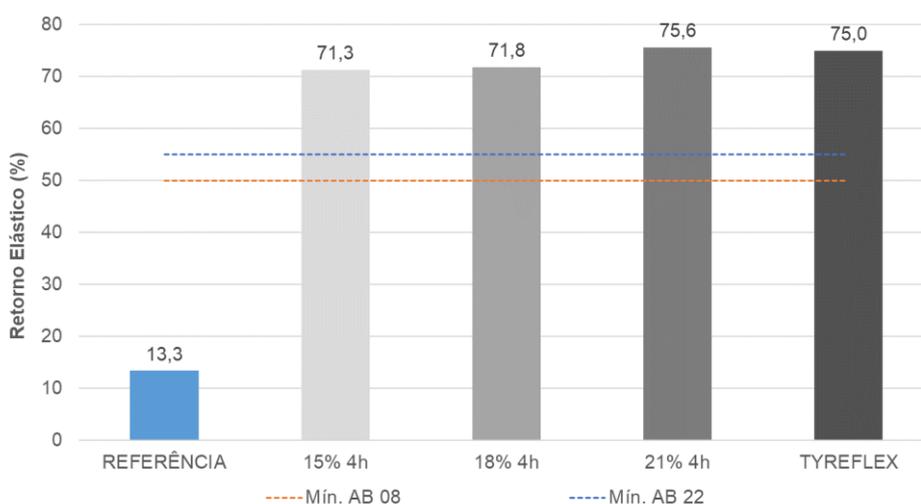
Fonte: Autor, 2023.

Percebeu-se, novamente, a influência do protocolo de mistura sobre o ligante asfáltico, uma vez que o resultado de ponto de amolecimento (PA) do “Agitado 4h” aumentou significativamente em relação com CAP 50/70 referência, tornando-o mais consistente. Por outro lado, a modificação com borracha não representou incremento considerável no desempenho do ensaio assim como a inserção de maiores teores, o que sugere que a interação física entre o ligante e a borracha não seja capaz de alterar a temperatura em que o CAP perde sua consistência e passa do estado viscoso para o líquido. Portanto, não altera uma propriedade química do material. Todas as amostras de ligante AB obtiveram resultado superior ao mínimo especificado pela norma de cimento asfáltico modificado por borracha indicando uma boa incorporação da borracha ao CAP.

4.2.3 Recuperação Elástica

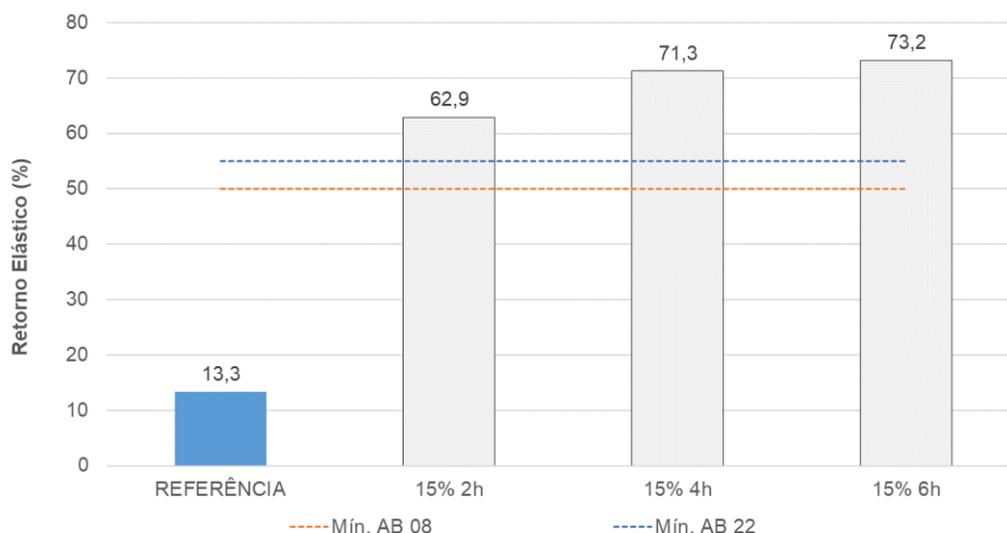
A resposta elástica ou retorno elástico quantifica a recuperação das amostras depois de serem alongadas. Os ensaios foram realizados e comparados com os valores mínimos propostos pela especificação, tanto para ligantes AB 08 quanto para AB 22. A seguir a Figura 19 apresenta os resultados obtidos para diferentes teores e a Figura 20 para diferentes tempos de mistura.

Figura 19 - Resultados Recuperação Elástica – Teores de borracha diferentes.



Fonte: Autor, 2023

Figura 20 - Resultados Recuperação Elástica - Tempo de mistura diferentes.



Fonte: Autor, 2023.

Sugere-se que o aumento no teor de borracha está diretamente ligado ao aumento do comportamento elástico dos ligantes AB ensaiados, como mostrou o gráfico da Figura 19, inclusive a amostra “21% 4h” apresentou comportamento muito semelhante ao enviado pela indústria. Além disso, aumentar o tempo de mistura também incrementou o comportamento elástico dos ligantes. Uma hipótese plausível para esse acontecimento é que com um maior tempo de digestão há uma maior incorporação da borracha a matriz asfáltica.

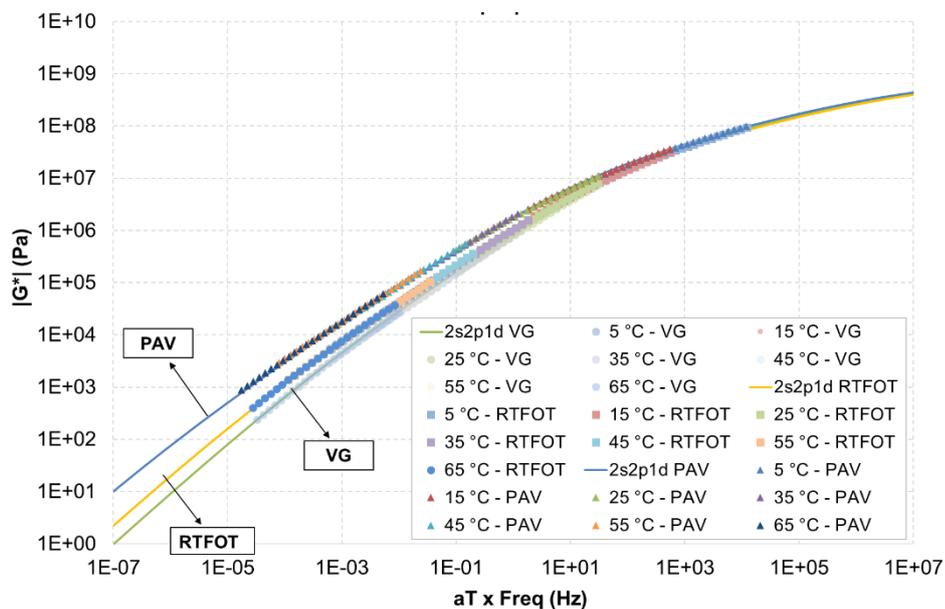
4.3 Ensaio Reológicos

Os ensaios de reologia foram executados com o auxílio do reômetro de cisalhamento dinâmico, com diferentes geometrias de amostras (8 e 25mm), sendo os resultados apresentados a seguir.

4.3.1 Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico ($|G^*|$)

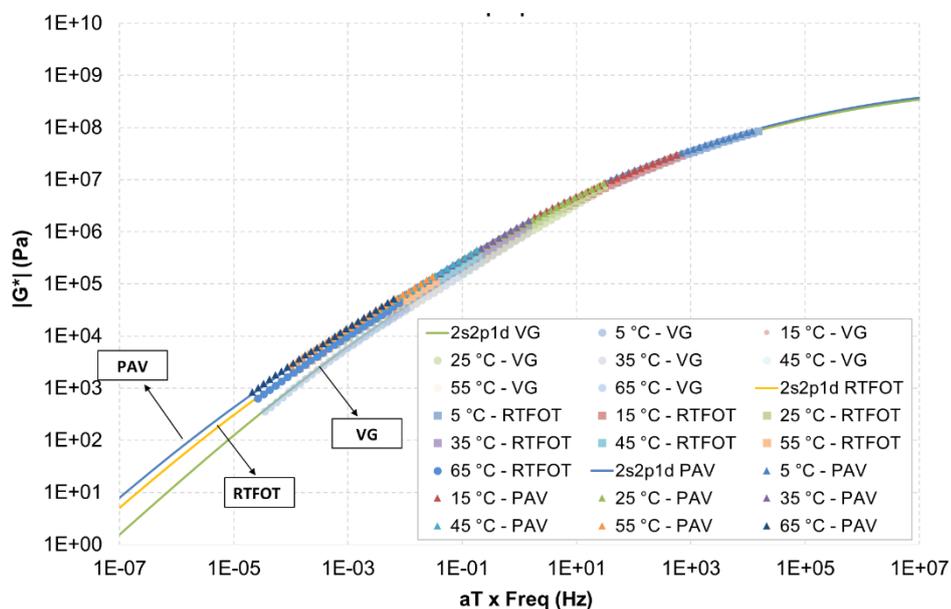
Com base no princípio da superposição tempo-temperatura e com auxílio da modelagem 2S2P1D foi possível iniciar o estudo reológico do efeito da inserção de borracha ao ligante asfáltico. Através da obtenção das curvas mestras (CM) e ângulos de fase, os quais são utilizadas para melhor compreender o comportamento do ligante frente a diferentes condições, de carregamento, de temperatura e de tempo de aplicação de cargas. Além disso através da análise dos gráficos é possível avaliar as parcelas de comportamento viscoelastoplástico das misturas. A seguir, os gráficos mostrados nas Figura 21 até Figura 26 apresentam as curvas mestras com os pontos experimentais e as curvas modeladas pelo 2S2P1D, o mesmo ocorre na Figura 32 com os ângulos de fase. Os gráficos apresentam cada mistura em seus diferentes estágios de envelhecimento.

Figura 21 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico – Mistura 15% 4h.



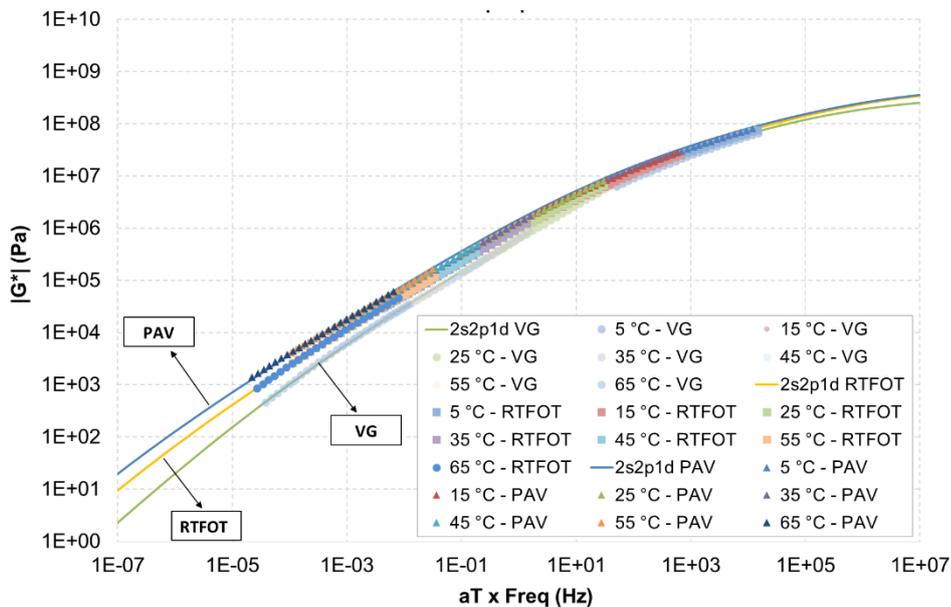
Fonte: Autor, 2023.

Figura 22 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico – Mistura 18% 4h.



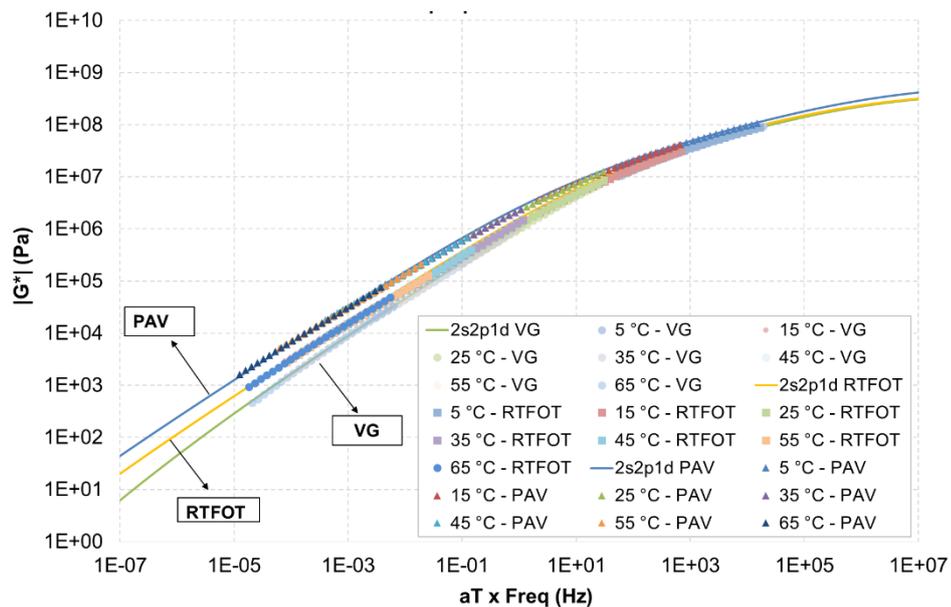
Fonte: Autor, 2023.

Figura 23 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico – Mistura 21% 4h.



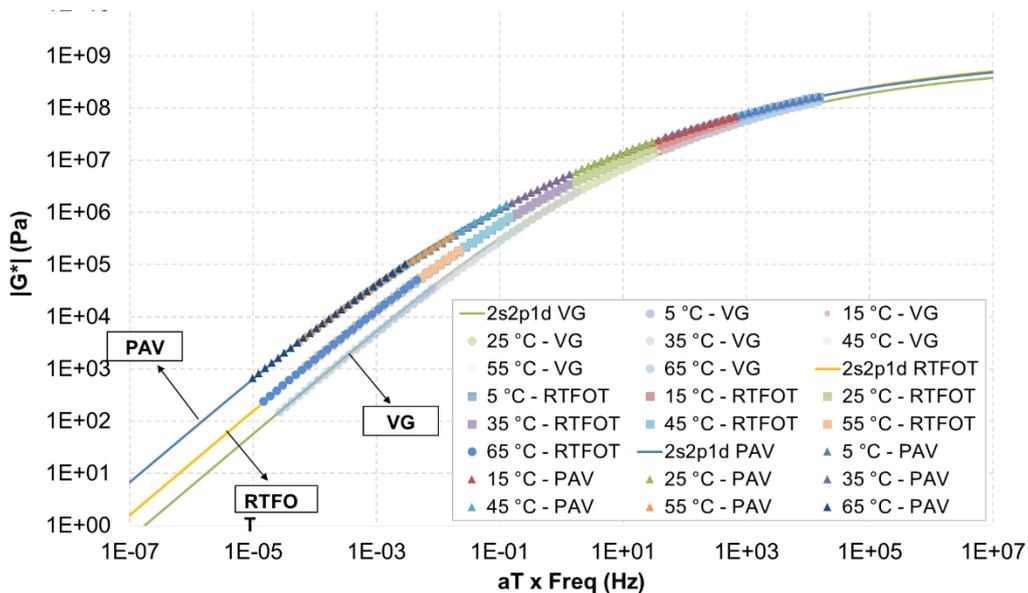
Fonte: Autor, 2023.

Figura 24 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico – Mistura TYREFLEX.



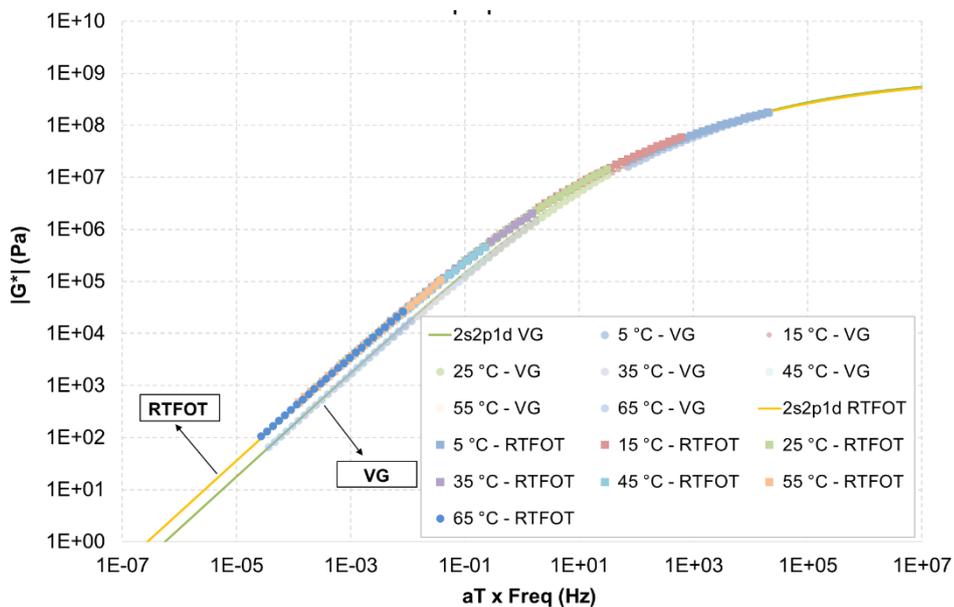
Fonte: Autor, 2023.

Figura 25 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico – Mistura AGITADO 4h.



Fonte: Autor, 2023.

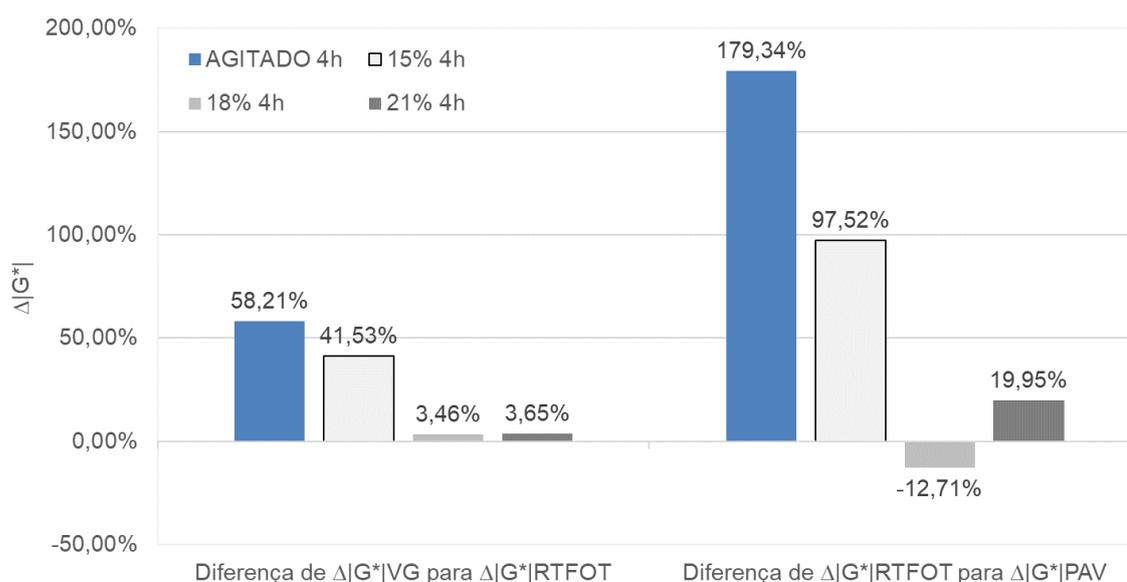
Figura 26 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico – Mistura REFÊRENCIA.



Fonte: Autor, 2023.

Ao fazer a primeira análise visual dos gráficos de CM para cada mistura é possível perceber um aumento significativo do módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) em altas temperaturas conforme submetidas ao envelhecimento. Por outro lado na região de baixas temperaturas e altas frequências ocorreu o contrário, a diminuição da rigidez com o aumento do teor de borracha, a Figura 35 detalha esse comportamento, que também foi observado por Schuster (2023) nos ligantes modificados com borracha. Para o mesmo autor o resultado de $|G^*|$, em temperatura de 65°C e frequência de 1Hz de carregamento, é um bom parâmetro para analisar o comportamento de envelhecimento do ligante asfáltico e o impacto de modificadores de ligante no comportamento reológico. Portanto, a Figura 27 apresenta o impacto na rigidez dos diferentes teores de borracha adicionados ao ligante no presente estudo.

Figura 27 - Diferença da variação de rigidez entre condições de envelhecimento.



Fonte: Autor, 2023.

Para chegar nos resultados apresentados acima (Figura 27) foram seguidos alguns passos de cálculos indicados a seguir. Os valores dos percentuais de variação de rigidez ($\Delta|G^*|$), para os teores na condição virgem, indicados pela sigla VG, foram feitos através do cálculo da variação do módulo de cisalhamento complexo ($|G^*|$) em relação ao valor de $|G^*|$ da mistura "AGITADO 4h" na condição virgem, para que fosse descontado a influência do protocolo de mistura no aumento da rigidez. Conforme indica a fórmula na imagem abaixo:

Figura 28 - Fórmula adotada para calcular a variação de rigidez das misturas na condição VG.

$$\Delta|G^*|_{VG} = \frac{|G^*|_{VG} - |G^*|_{AGT VG}}{|G^*|_{AGT VG}}$$

Fonte: Autor, 2023.

Na condição RTFOT, após o cálculo da variação, também, em relação ao “AGITADO 4h VG”, descontou-se o valor obtido de variação da rigidez na condição virgem, afim de tentar descontar o valor da rigidez proporcionada pela borracha no processo de modificação. A Figura 29 representa a fórmula utilizada para tentar isolar essa variação produzida pelo envelhecimento em RTFOT.

Figura 29 - Fórmula adotada para calcular a variação de rigidez das misturas na condição RTFOT.

$$\Delta|G^*|_{RTFOT} = \left(\frac{|G^*|_{RTFOT} - |G^*|_{AGT VG}}{|G^*|_{AGT VG}} \right) - \Delta|G^*|_{VG}$$

Fonte: Autor, 2023.

Por fim, na condição PAV o procedimento seguiu o passo-a-passo da condição anterior, com adição de uma etapa. Descontou-se a variação da rigidez obtida na etapa RTFOT da variação da rigidez encontrada na condição PAV, para também apresentar apenas o ganho de rigidez da amostra oriunda do envelhecimento de serviço (PAV).

Figura 30 - Fórmula adotada para calcular a variação de rigidez das misturas na condição PAV.

$$\Delta|G^*|_{PAV} = \left(\frac{|G^*|_{PAV} - |G^*|_{AGT VG}}{|G^*|_{AGT VG}} \right) - \Delta|G^*|_{VG} - \Delta|G^*|_{RTFOT}$$

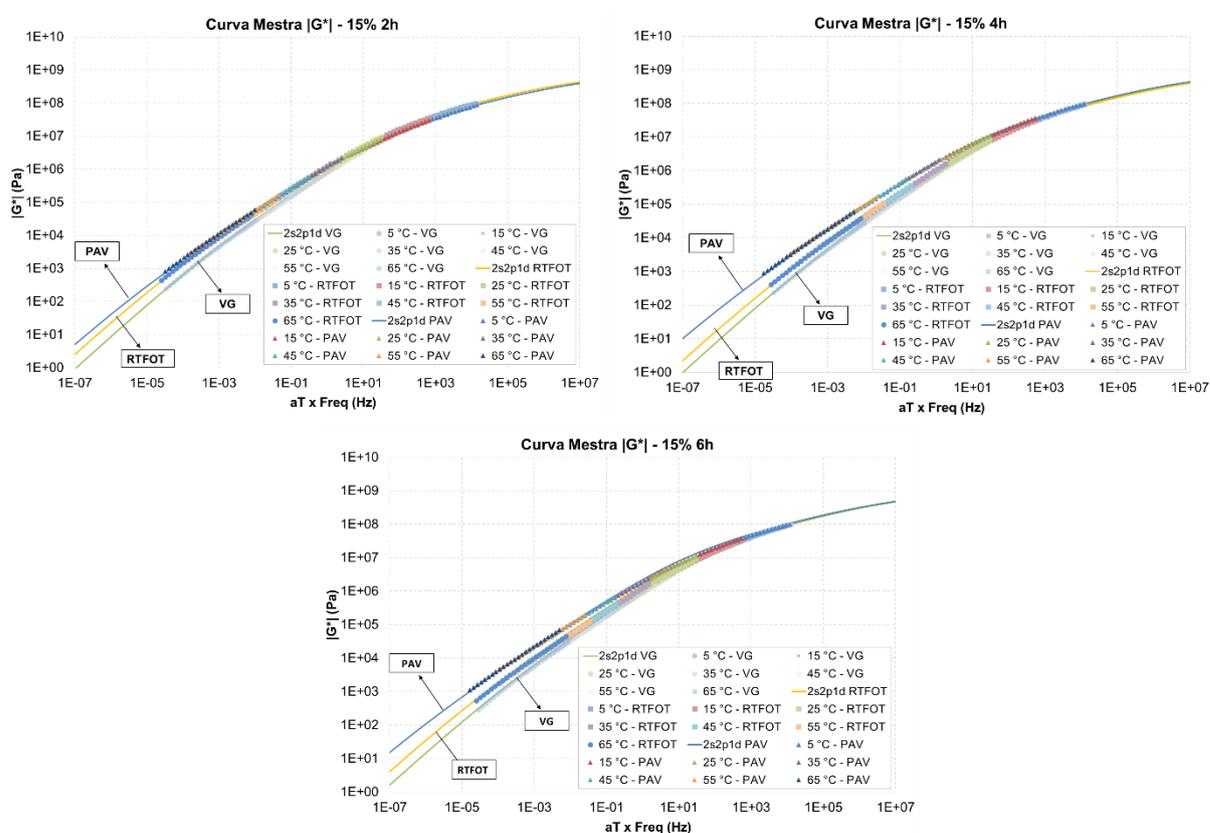
Fonte: Autor, 2023.

Depois de encontrados os dados das porcentagens de $\Delta|G^*|$ para cada estágio de envelhecimento de cada teor foi feita a diferença entre $\Delta|G^*|_{RTFOT}$ e $\Delta|G^*|_{VG}$, assim como $\Delta|G^*|_{PAV}$ e $\Delta|G^*|_{RTFOT}$, conforme Figura 27 para os valores encontrados. A partir disso acredita-se que caso a borracha apresente um fator protetivo frente ao

envelhecimento do CAP a diferença entre a variação entre os incrementos das rigidezes oriundas apenas do processo de envelhecimento diminuiria.

Portanto, a Figura 27 apresenta que esse comportamento se confirmou, já que a porcentagem de variação de rigidez ($\Delta|G^*|$) diminui quando comparados os valores obtidos com a variação de rigidez ($\Delta|G^*|$) do “AGITADO 4h” e conforme foi aumentado o teor de borracha a variação também diminui. Esse comportamento sugere que a incorporação de borracha pode proteger o CAP durante o processo de envelhecimento, intensificado com a elevação do teor.

Figura 31 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico – Diferentes tempos de mistura.



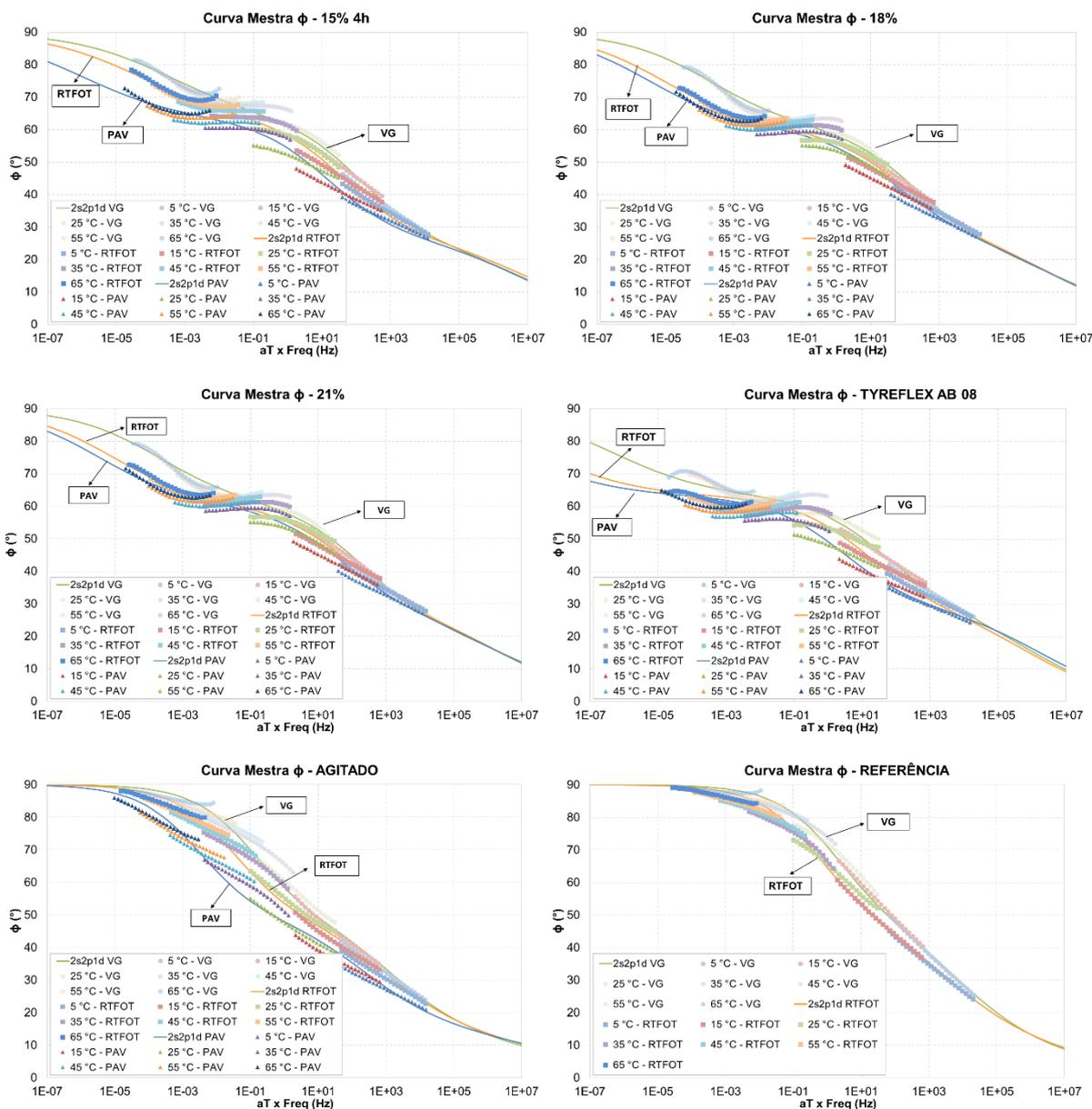
Fonte: Autor, 2023.

4.3.2 Curvas mestras de Ângulo de Fase (Φ)

A análise dos gráficos de ângulo de fase, sugere que ao aumentar o teor de borracha incorporada faz com que as curvas de diferentes temperaturas apresentem comportamentos irregulares. Em alguns casos ocorre descontinuidade entre fim de

uma isoterma e início de outra, gerando lacunas no gráfico, o que pode indicar que o comportamento do asfalto-borracha tende não obedecer fielmente, ao comportamento termoreologicamente simples e as curvaturas modeladas pelo método 2S2P1D. Fato que pode ser evidenciando em temperaturas intermediárias como mostra a Figura 32.

Figura 32 - Curvas Mestras de Ângulo de Fase - Pontos experimentais e Modelagem 2S2P1D.

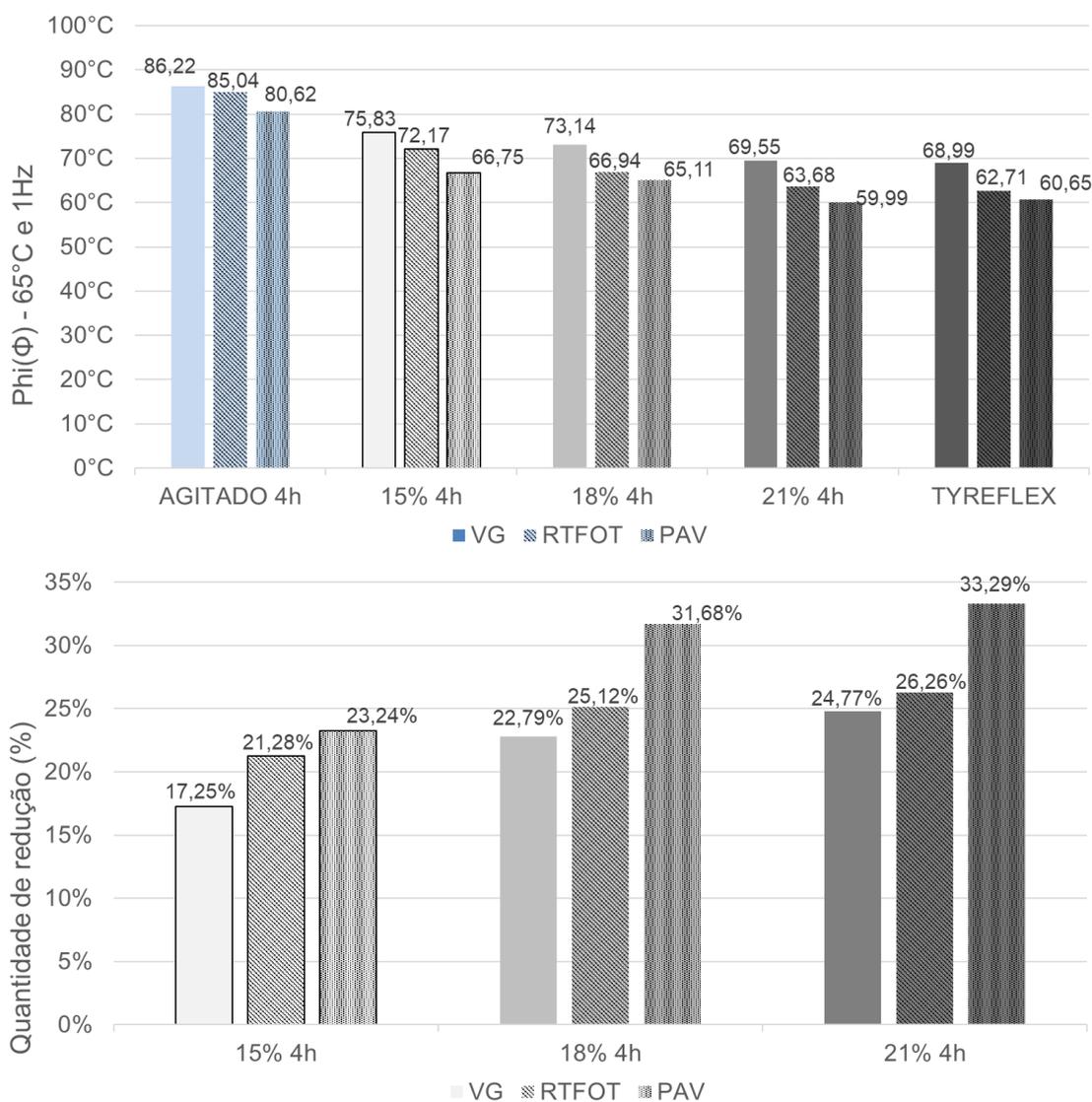


Fonte: Autor, 2023.

Ainda assim, nas altas temperaturas é visível a influência da borracha sobre o ângulo de fase, que provoca uma tendencia de queda nesses valores. A Figura 33

apresenta a variação dos ângulos de fases em altas temperaturas conforme os teores de borrachas incorporadas.

Figura 33 – (a) - Ângulo de fase a 65°C e 1Hz para cada teor de borracha e condição de envelhecimento (b) – Porcentagem de redução do ângulo de fase em relação a mistura AGITADA 4h.



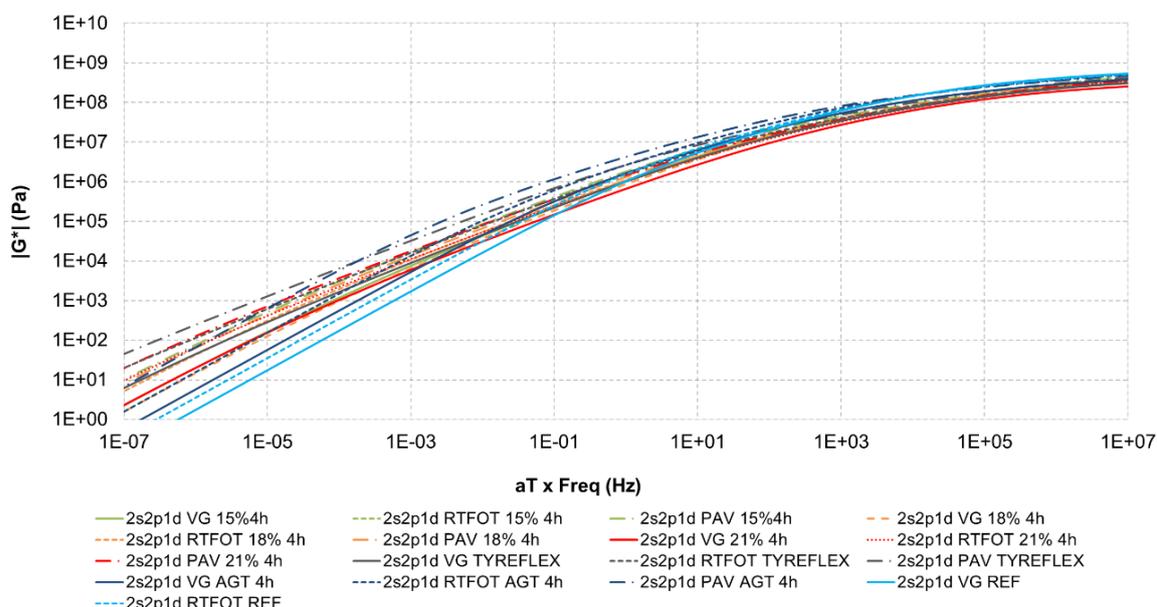
Fonte: Autor, 2023.

É possível perceber que o aumento do teor de borracha pode ter influência na diminuição do ângulo de fase dos ligantes, quando em altas temperaturas, uma vez que os ensaios apresentaram essa tendência para os três estágios de envelhecimento testados. Ainda foi possível verificar a porcentagem de redução de cada mistura em relação ao ângulo de fase da mistura agitada 4h em seus estágios de envelhecimento Figura 33 (b). A diminuição do Angulo de fase de cimentos asfálticos indica um melhor desempenho frente a deformação permanente conforme já apontados por outros

pesquisadores como Menegusso et al. (2022), o que sugere que a incorporação da borracha diminui o comportamento plástico dos ligantes asfálticos.

As Figuras a seguir apresentam a modelagem 2S2P1D para curvas mestras de módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e em seguida as de ângulo de fase também são apresentadas, optou-se por apresentar todas as misturas de diferentes teores e estágios de envelhecimento em conjunto (Figura 34, Figura 36 e Figura 38) e depois apresentar em detalhe (Figura 35 e Figura 37). A partir da modelagem são obtidos sete parâmetros, usados para encontrar as curvas, e duas constantes C1 e C2 de WLF (WILLIAMNS; LANDEL; FERRY, 1995), apresentados na Tabela 9.

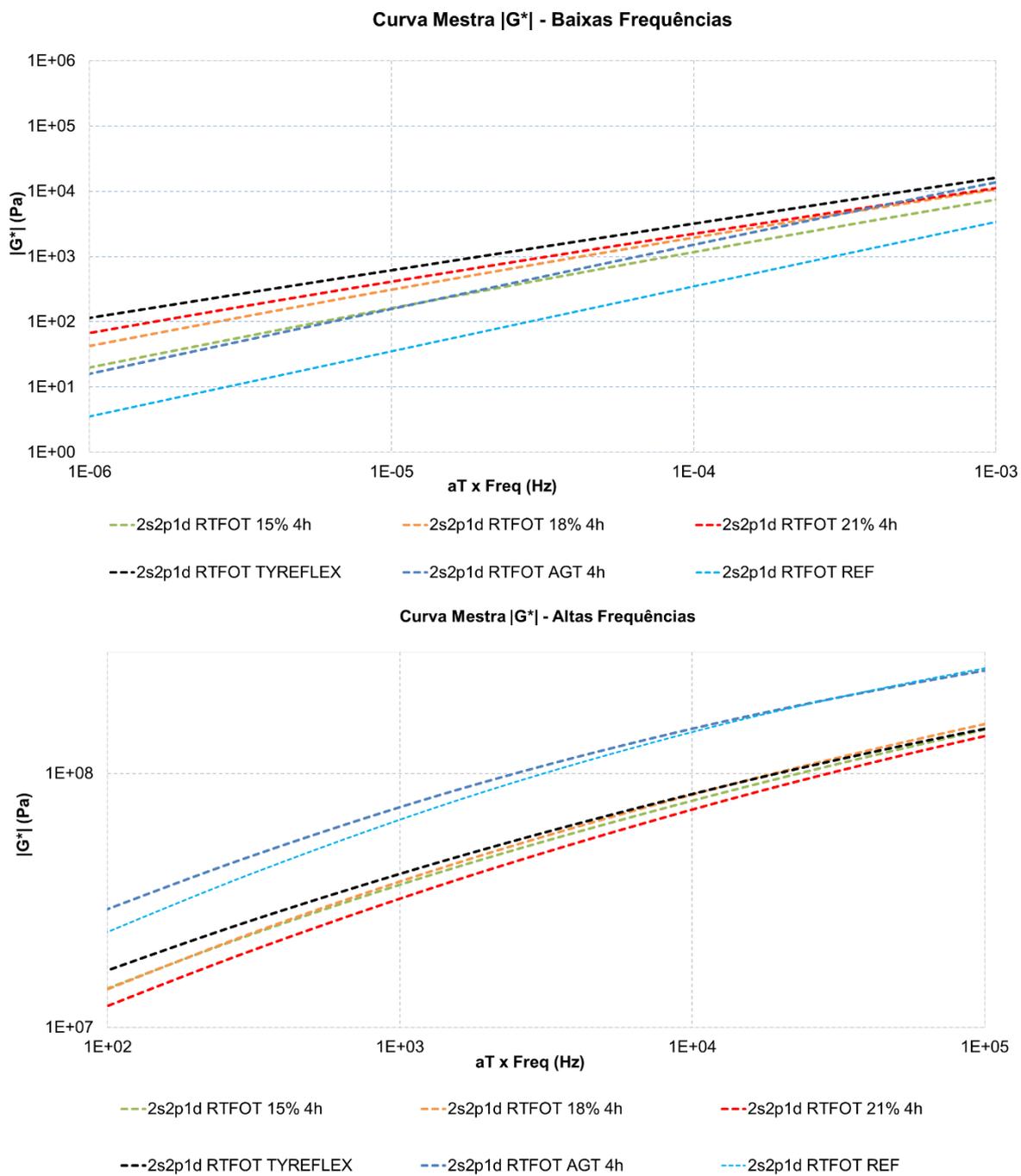
Figura 34 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico - modelagem 2S2P1D – Diferentes Teores de borracha.



Fonte: Autor, 2023.

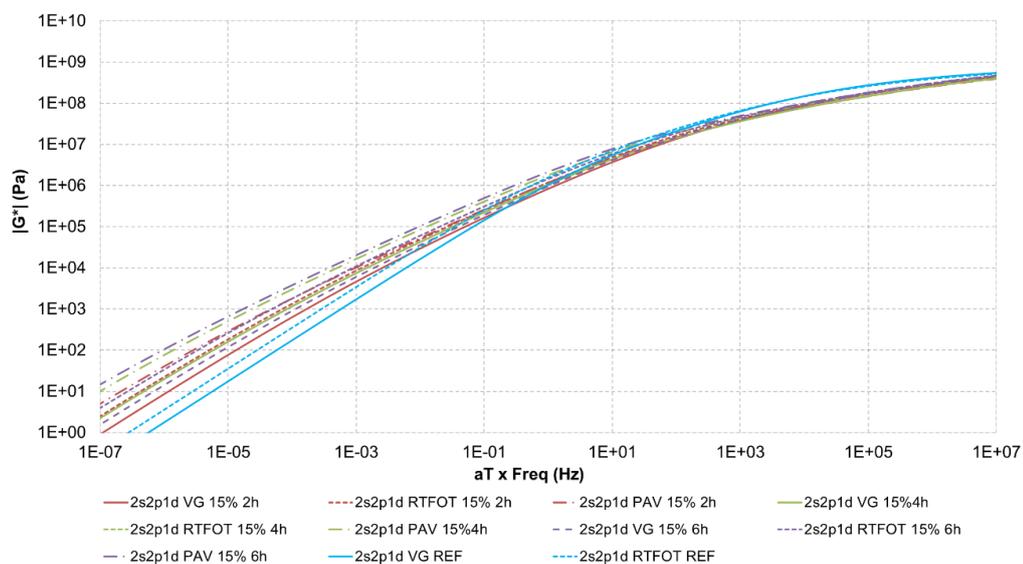
A seguir para melhor visualização do gráfico da Figura 34 foi dividido em dois, primeiramente aparece a modelagem com foco nas baixas frequências (a) e depois altas frequências (b), ambas apenas para a condição RTFOT na Figura 35.

Figura 35 - (a) Modelagem 2S2P1D - Baixas frequências e (b) Modelagem 2S2P1D - Altas Frequências - Diferentes teores de mistura.



Fonte: Autor, 2023.

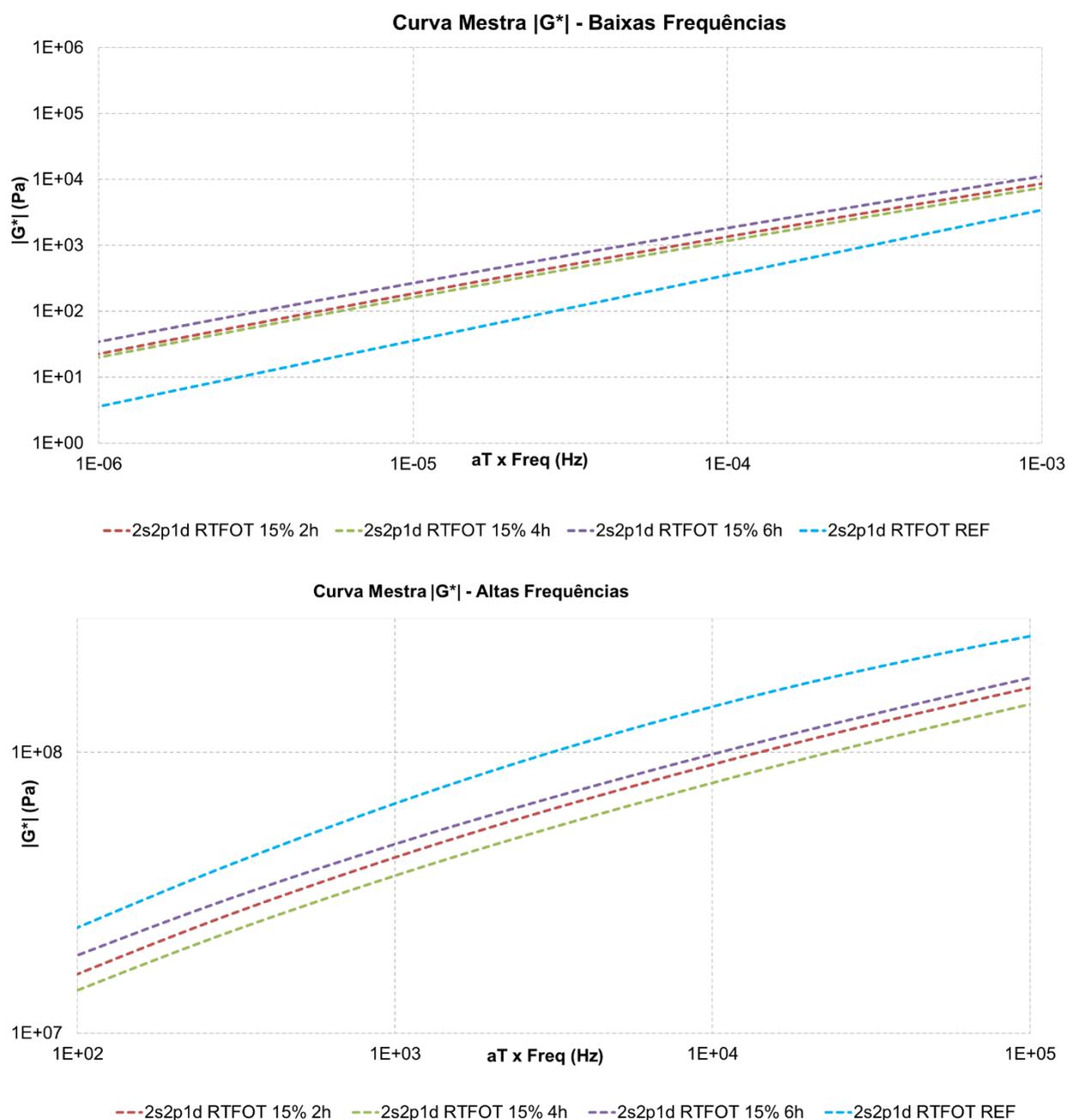
Figura 36 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico - modelagem 2S2P1D – Diferentes tempos de mistura.



Fonte: Autor, 2023.

O mesmo procedimento de demonstração dos gráficos descritos anteriormente foi apresentado para as modelagens das misturas com diferentes tempos de maturação. A Figura 37 (a) apresenta o comportamento modelado das amostras sobre baixas frequências, enquanto que a Figura 37 (b) apresenta o comportamento em altas frequências. A partir da visualização dos gráficos é possível apontar alguns comportamentos.

Figura 37 - (a) Modelagem 2S2P1D - Baixas frequências e (b) Modelagem 2S2P1D - Altas Frequências - Diferentes tempos de mistura.

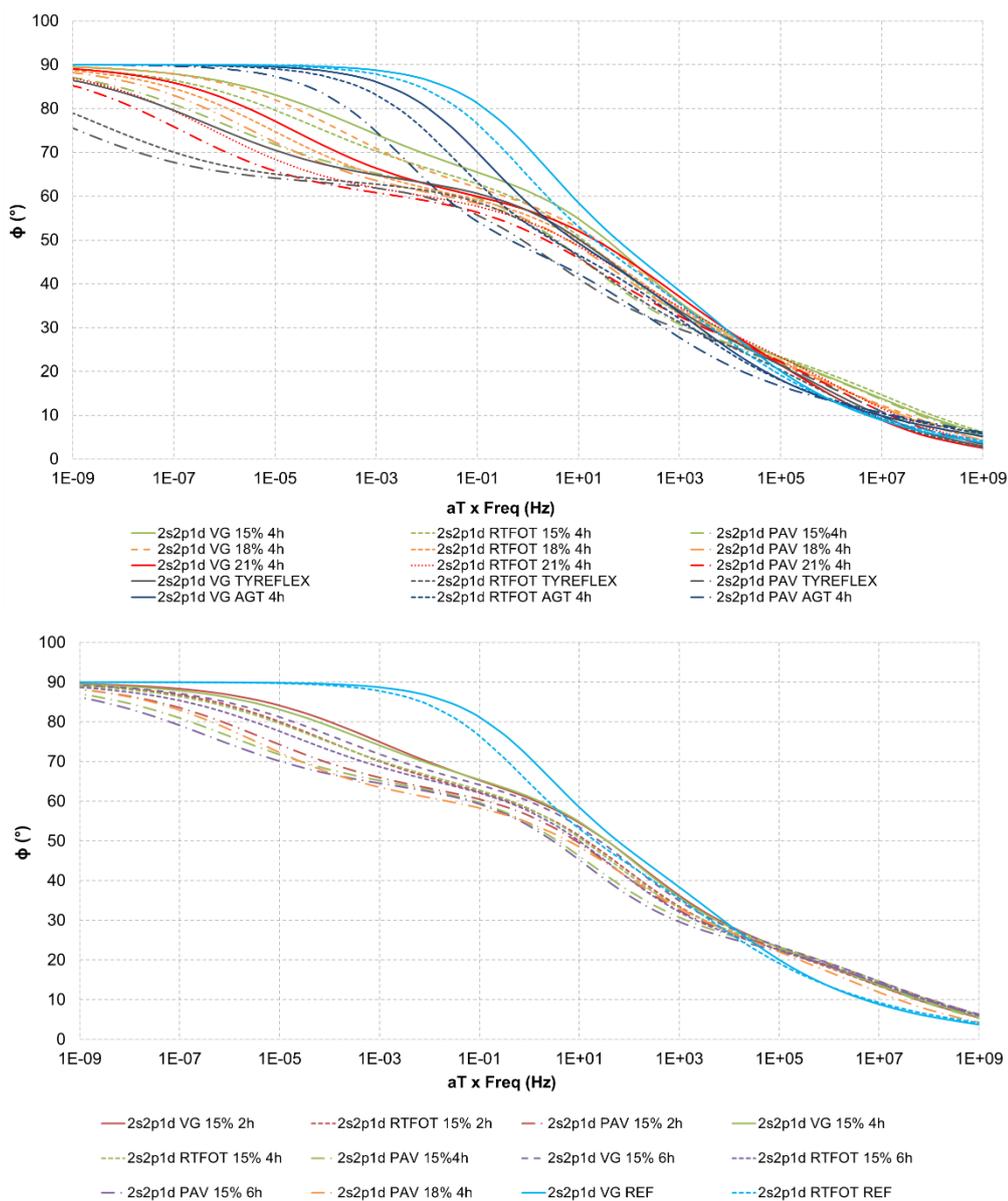


Fonte: Autor, 2023.

Através da repartição dos gráficos em baixa e alta frequência foi possível perceber a inversão de comportamento apresentado pelas curvas em relação ao ligante de referência (linha azul). Enquanto que nas altas frequências as misturas modificadas se colocam todas abaixo da linha azul, ao passo que a frequência diminui o comportamento se inverte, onde as linhas dos ligantes modificados agora se localizam acima da linha do CAP referência. Esse comportamento é um indicador do

aumento do $|G^*|$ em baixas frequências e altas temperaturas, o que pode indicar melhora no comportamento frente a deformação permanente, e diminuição nas altas frequências e baixas temperaturas, sugerindo um menor potencial de trincamento em baixas temperaturas em relação ao CAP referência, e pode ser evidenciado tanto com o aumento dos teores de borracha como com a variação do tempo de mistura.

Figura 38 - Curvas mestras de Ângulo de Fase - Modelagem 2S2P1D – Diferentes teores e borracha e diferentes tempos de mistura.



Fonte: Autor, 2023.

Os parâmetros utilizados para a modelagem das curvas seguiram algumas tendências, como o valor de β , δ e τ aumentando com o envelhecimento. Por outro lado, os valores de k e h se mantiveram quase constantes com a incorporação de borracha.

Tabela 9 - Parâmetros 2S2P1D, C1 e C2.

CAP	Condição	PARAMETROS 2S2P1D							WLF	
		G_{00} (Pa)	G_0 (Pa)	k	h	δ	τ_E	β	C1	C2
15%2h	VG	0	8,50E+08	0,29	0,69	6,5	9,00E-06	200	16,16	137,17
	RTFOT	0	8,50E+08	0,29	0,69	7,5	1,50E-05	350	16,16	133,77
	PAV	0	8,50E+08	0,29	0,69	9	1,50E-05	800	14,96	129,97
15%4h	VG	0	8,50E+08	0,29	0,7	7	1,00E-05	200	15,25	128,09
	RTFOT	0	8,50E+08	0,3	0,7	9	1,50E-05	320	15,34	126,59
	PAV	0	8,50E+08	0,3	0,7	10	3,50E-05	800	16,57	130,35
15%6h	VG	0	1,00E+09	0,29	0,7	8	1,00E-05	280	15,85	131,39
	RTFOT	0	1,00E+09	0,29	0,7	9	1,90E-05	400	15,35	125,70
	PAV	0	1,00E+09	0,29	0,7	11	3,70E-05	1050	16,52	130,88
18%	VG	0	6,50E+08	0,28	0,67	5,5	1,00E-05	410	16,13	138,62
	RTFOT	0	6,50E+08	0,3	0,67	6	1,50E-05	1000	15,86	131,26
	PAV	0	6,50E+08	0,3	0,67	6,5	2,00E-05	1250	15,87	128,74
21%	VG	0	3,50E+08	0,32	0,67	4	1,70E-05	700	15,66	137,16
	RTFOT	0	5,50E+08	0,32	0,67	6,2	1,80E-05	2300	15,86	131,26
	PAV	0	5,50E+08	0,32	0,67	7	3,50E-05	3000	15,82	129,27
TYREFLEX AB08	VG	0	4,50E+08	0,32	0,7	6	3,50E-05	1000	17,03	135,74
	RTFOT	0	4,50E+08	0,32	0,7	7	6,00E-05	3000	17,02	135,80
	PAV	0	6,50E+08	0,32	0,7	10,5	1,20E-04	5000	17,36	132,76
AGITADO	VG	0	7,70E+08	0,2	0,55	3	4,00E-06	300	15,62	130,35
	RTFOT	0	1,10E+09	0,2	0,55	3,5	4,20E-06	550	17,20	134,34
	PAV	0	1,10E+09	0,2	0,55	4,5	9,00E-06	1100	14,83	106,65
REFERÊNCIA	VG	0	8,90E+08	0,22	0,55	1,95	3,00E-06	105	13,73	117,65
	RTFOT	0	8,90E+08	0,22	0,55	2,4	4,00E-06	160	15,54	130,22

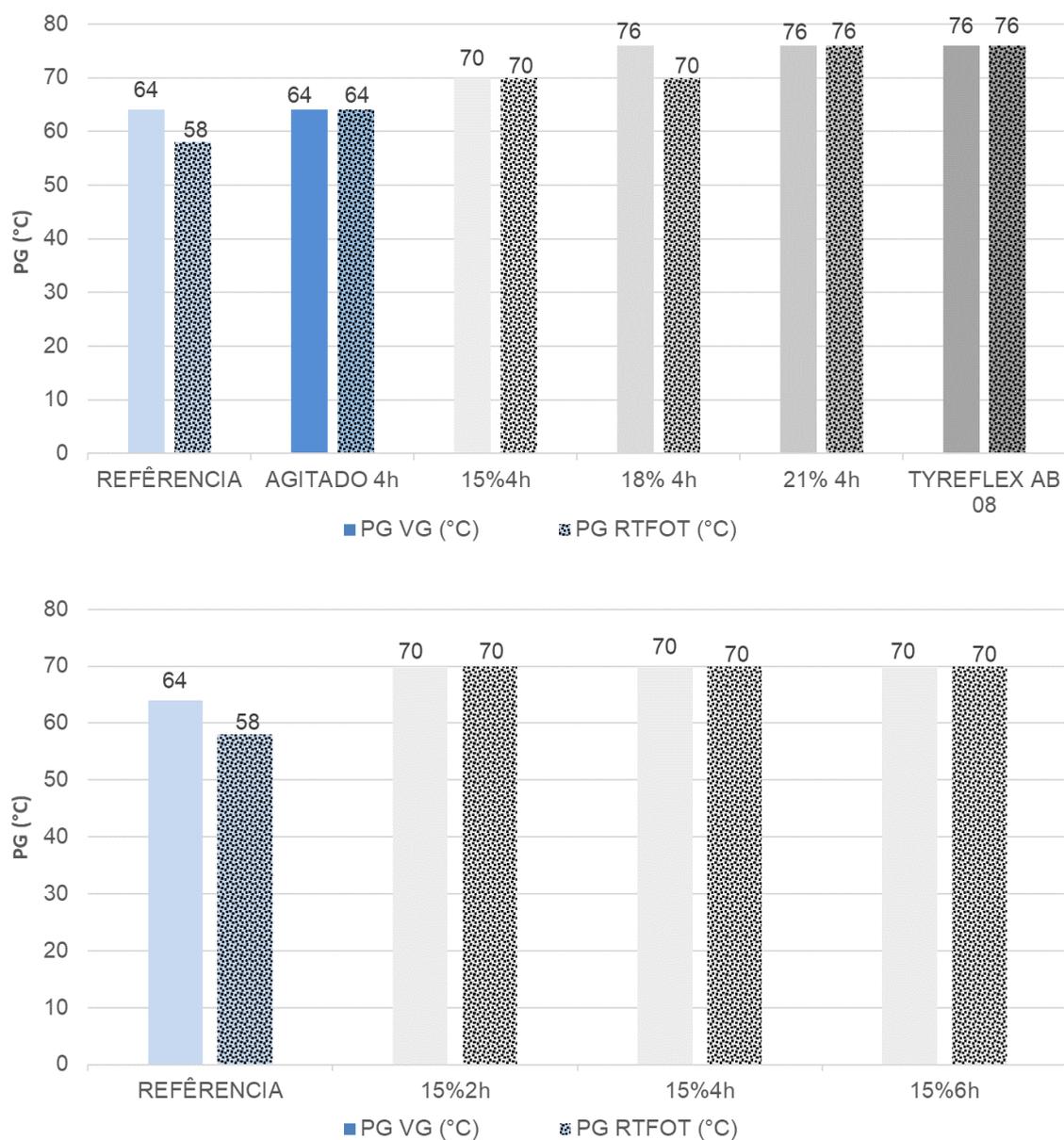
Fonte: Autor, 2023.

4.3.3 Performance Grade (PG)

A Figura 39 (a) indica os valores de PG de alta temperatura para condições virgem e RTFOT, onde foi possível avaliar que a incorporação de borracha tem influência no grau de *performance grade* dos ligantes, indicando uma melhora no desempenho das amostras com o aumento da adição de borracha. A norma AASHTO R 29-15 (2019), menciona que em caso de divergência no valor do PG para condições de envelhecimento diferentes, deve-se adotar menor resultado encontrado. Esse fato foi verificado apenas no ligante 18% 4h que devido ao protocolo RTFOT diminuiu o grau de desempenho. Por outro lado, a análise da Figura 39 (b) sugeriu que a variação

do tempo de mistura não teve influência significativa no PG das amostras, podendo ser um indicador de que o protocolo de mistura não afete o desempenho das misturas a ponto de alterar o grau PG. Ao comparar os valores da mistura Referência e agitado 4h pode-se evidenciar esse argumento.

Figura 39 - Resultados PG: (a) – teores de borracha diferentes. (b) – tempos de mistura diferentes.

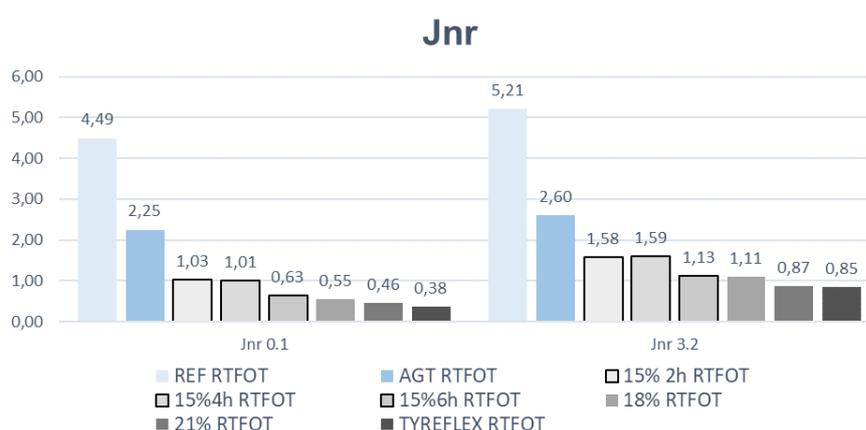


Fonte: Autor, 2023.

4.3.4 Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)

Os parâmetros dados pelo MSCR avaliam os comportamentos plásticos e viscoelásticos dos ligantes, tornando possível a análise do comportamento frente a deformação permanente. A compliancia não-recuperável (Jnr) observada na Figura 40 indica as porcentagens de deformações permanentes dos ligantes estudados em relação a tensão aplicada, onde o valor de Jnr 3,2kPa indica o percentual de deformações plásticas simulando uma elevada carga de tráfego sobre a amostra. É possível visualizar uma tendência de redução ao aumentar a quantidade de borracha e uma estabilização ao variar o tempo de mistura. Entretanto para resultados mais conclusivos quanto a variação do tempo de mistura recomenda-se uma análise mais detalhada devido a pequena variação, e pela amostra que passou pelo protocolo de mistura apresentar relativa redução no valor de Jnr. O que pode indicar a influência do protocolo de mistura frente a resistência contra deformação devido ao aumento da rigidez e redução do ângulo de fase em altas temperaturas verificadas na seção anterior.

Figura 40 - Resultados Jnr a 64°C.

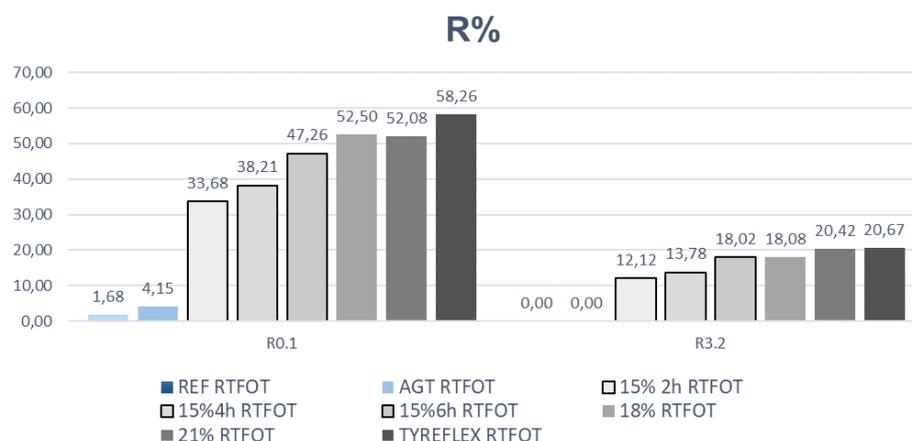


Fonte: Autor, 2023.

Por outro lado, os percentuais de recuperação (R%) simulam o comportamento da parcela viscoelástica, sendo possível a comparação entre materiais para avaliar qual possui maior capacidade de retornar ao estado normal após sofrer deformação. Na Figura 41 foi possível perceber que o percentual de retorno do ligante modificado com 21% de borracha apresentou maior resposta na recuperação de deformações.

Sugere-se que a amostra obteve um desempenho satisfatório frente a deformação permanente devido ao menor resultado da compliância não-recuperável (Jnr) e maior porcentagem de recuperação (R%) principalmente quando simuladas em alto carregamento (3,2kPa).

Figura 41 - Resultados Percentual de Recuperação.



Fonte: Autor, 2023.

A norma AASHTO M 332-18 utiliza os valores encontrados de Jnr no ensaio do MSCR a 64°C e carregamento de 3,2kPa para classificar os ligantes. Essa Classificação é utilizada para caracterizar a classe de tráfego suportada pelo material frente ao desempenho à deformação permanente. A Tabela 10 mostra a classificação indicada pela referida norma para cada tipo de mistura.

Tabela 10 - Classes de tráfego segundo o Jnr 64°C.

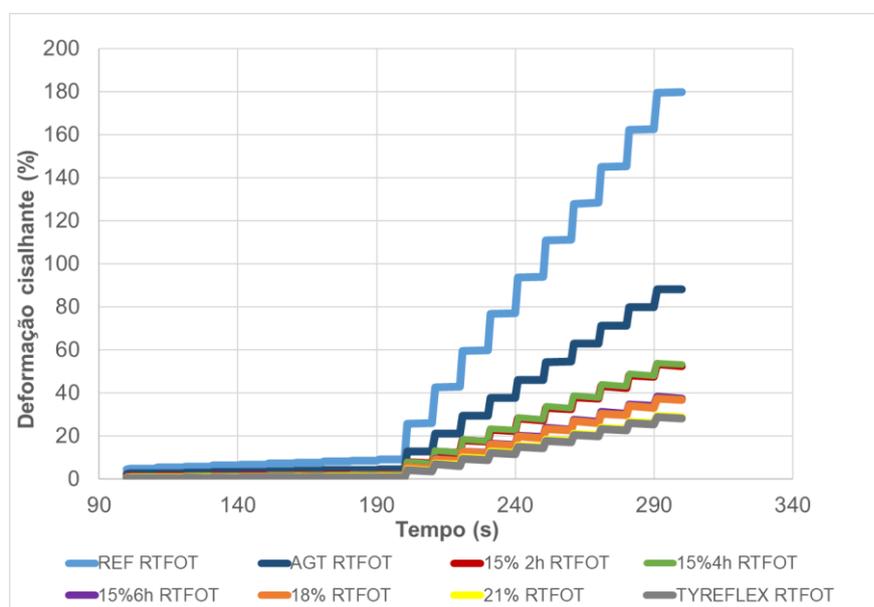
CAP	Jnr 3.2	Tráfego	Limites da classe (kPa-1)
AGT RTFOT	2,60	S	2,0 < Jnr3,2 ≤ 4,5
REF RTFOT	5,21	S	2,0 < Jnr3,2 ≤ 4,5
15% 2h RTFOT	1,58	H	1,0 < Jnr3,2 ≤ 2,0
15% 4h RTFOT	1,59	H	1,0 < Jnr3,2 ≤ 2,0
15% 6h RTFOT	1,13	H	1,0 < Jnr3,2 ≤ 2,0
18% RTFOT	1,11	H	1,0 < Jnr3,2 ≤ 2,0
21% RTFOT	0,87	V	0,5 < Jnr3,2 ≤ 1,0
TYREFLEX RTFOT	0,85	V	0,5 < Jnr3,2 ≤ 1,0

Fonte: Autor, 2023.

A seguir a Figura 42 apresenta o gráfico da deformação cisalhante versus o tempo é apresentado, onde é possível corroborar a influência do protocolo de mistura,

uma vez que a mistura Agitado 4h apresenta valores de deformações muito inferiores quando comparada com o Referência. Além de que o comportamento semelhante das amostras com diferentes tipos de mistura também fica evidenciado neste gráfico ocorrendo na maioria do tempo sobreposição das linhas no gráfico. Além disso, pode-se perceber que apesar da amostra 21% 4h ter apresentado melhor resultado quando analisados apenas os resultados percentuais de Jnr e R%, fica evidente o aumento da rigidez da amostra devido à baixa deformação. Precisando, então, analisar se em questões de fadiga esse ligante também sugere bom desempenho.

Figura 42 - Deformação cisalhante versus tempo - MSCR 64°C.



Fonte: Autor, 2023.

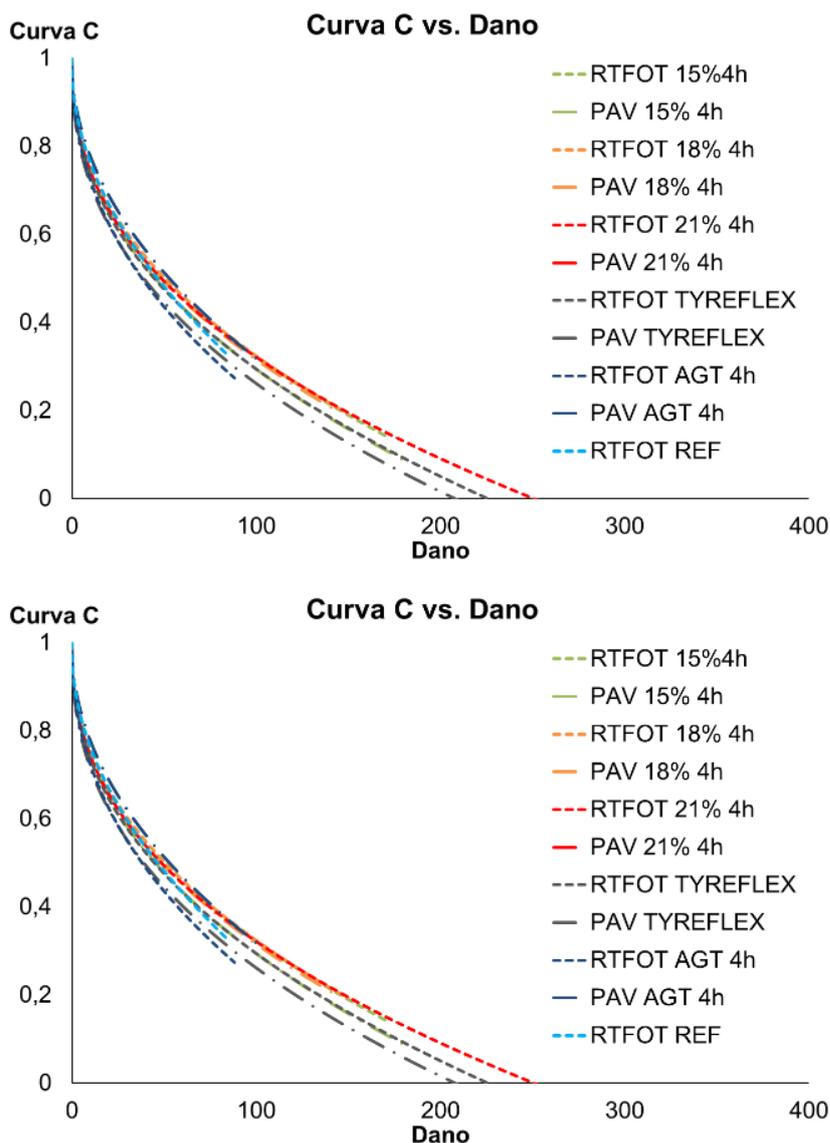
4.3.5 Linear Amplitude Sweep (LAS)

Para melhor análise das amostras frente ao desempenho a fadiga, através do ensaio LAS, foram obtidas as curvas de dano (C vs. S) Figura 43, para então obter as curvas de fadiga (Figura 44). É possível destacar no gráfico de fadiga o comportamento diretamente proporcional entre o aumento da adição de borracha e o aumento do número de ciclos de carregamento, destacando o teor de 21% que novamente apresentou bons resultados. Então, apesar do ganho de rigidez já mencionado durante a análise das curvas mestras e também na análise do MSCR,

sugere-se que esse aumento de $|G^*|$ não é o suficiente para comprometer a mistura frente a fadiga.

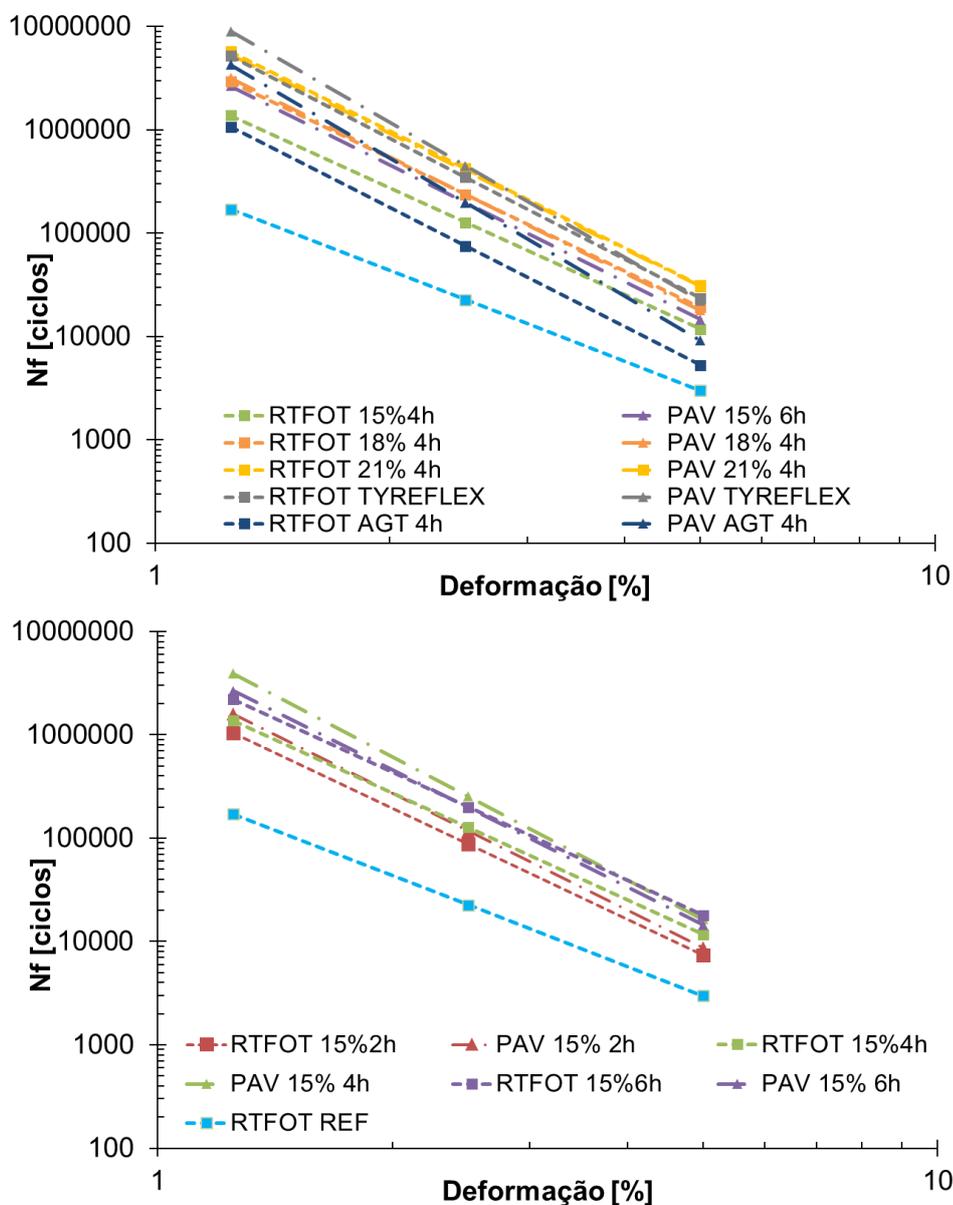
Além disso a análise do comportamento de fadiga das amostras em que foram variados os tempos de mistura apresentaram melhor resultado para a mistura com tempo intermediário. É plausível inferir que esse comportamento seja gerado pelo fator envelhecimento, uma vez que ao deixar muito tempo em mistura acentua o grau de oxidação do CAP. Já a diminuição do tempo pode causar uma mistura ineficaz, fazendo com que não ocorra o fenômeno de inchamento da borracha diminuindo a sua incorporação.

Figura 43- Curvas de dano características – (a) Diferentes teores de borracha - (b) diferentes tempos de mistura.



Fonte: Autor, 2023.

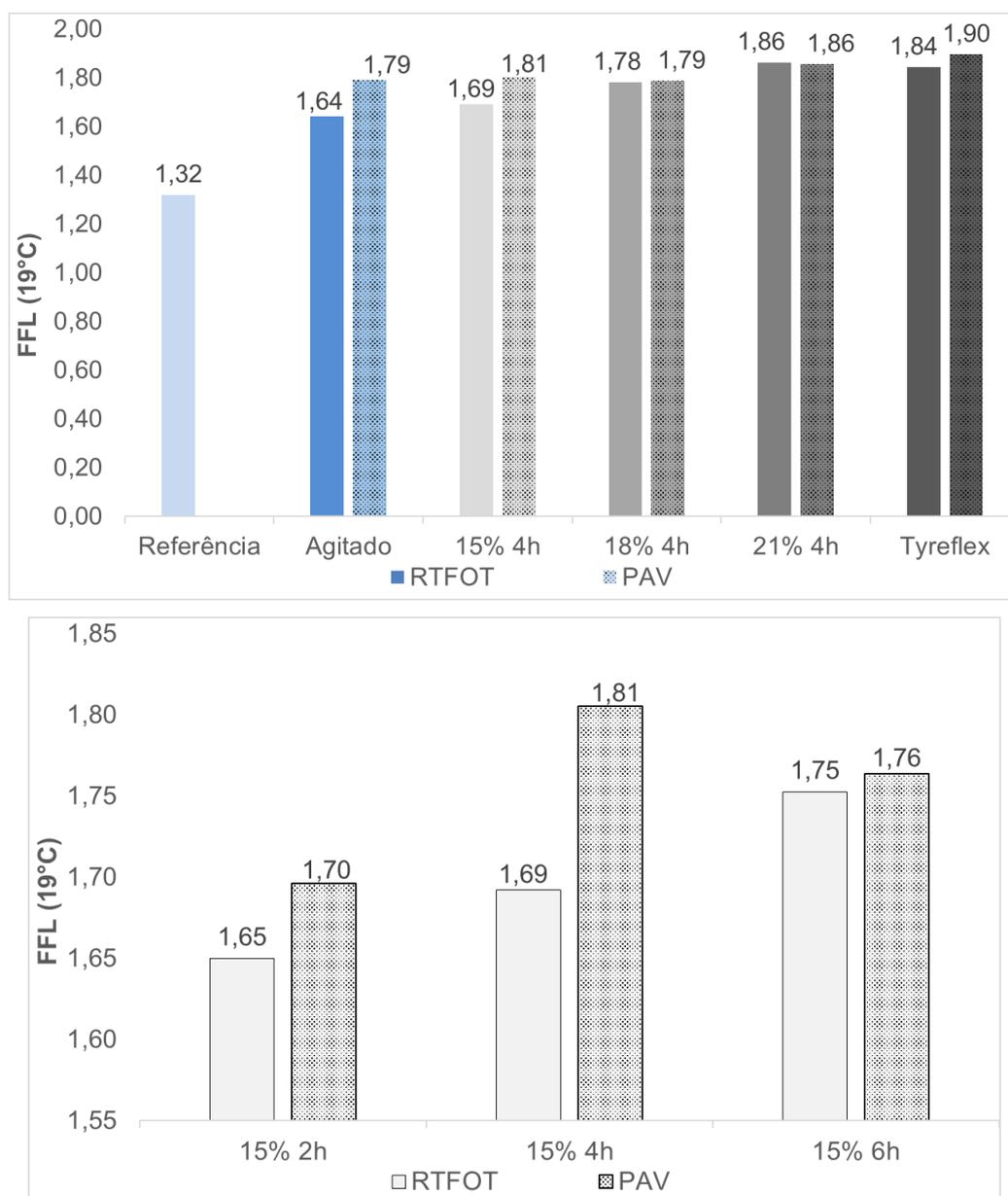
Figura 44 - Curvas de fadiga – (a) Diferentes teores de borracha – (b) diferentes tempos de mistura.



Fonte: Autor, 2023.

A Figura 45 corrobora o comportamento analisado nas curvas de fadiga. O Fator de fadiga dos ligantes (FFL) a 19°C é maior conforme aumenta o teor de borracha, e também é mais significativo em tempos de mistura intermediários. Anteriormente, Specht (2004), já havia relatado que as principais variáveis que influenciam no comportamento dos asfalto-borracha são os teores incorporados, a temperatura e o tempo de mistura. Sendo possível inferir esse comportamento para fadiga.

Figura 45 - Fator de Fadiga dos ligantes – (a) Diferentes teores – (b) Diferentes tempos de mistura.



Fonte: Autor, 2023.

A classificação dos ligantes de acordo com os limites de Possebom (2021) estão apresentadas na Tabela 11. Os limites utilizados pelos autores não possibilitaram uma diferenciação detalhada frente ao comportamento à fadiga dos ligantes estudados nessa pesquisa, uma vez que todas as misturas foram classificadas como excelente e apenas o ligante convencional apresentou classificação inferior. Nunes-Ramos (2022) também presenciou o mesmo problema ao estudar ligante modificado com diferentes teores de polietileno de alta densidade.

Tabela 11 – Classificação de Possebon (2021).

CAP	FFL_{19°C}	Classificação Possebon (2021)
REFÊRENCIA	1,32	3 – Mediano
AGITADO 4h	1,64	5 – Excelente
15% 2h	1,65	5 – Excelente
15% 4h	1,69	5 – Excelente
15% 6h	1,75	5 – Excelente
18% 4h	1,78	5 – Excelente
21% 4h	1,86	5 – Excelente
TYREFLEX	1,84	5 – Excelente

Fonte: Autor, 2023.

A Tabela 12 apresenta os valores dos parâmetros encontrados do modelo VECD, a partir deles é possível obter as curvas de fadiga apresentadas na Figura 44.

Tabela 12 - Parâmetros do modelo VECD para obtenção da curva de fadiga.

CAP	C0	C1	C2	A	B
RTFOT 15%2h	1,000	0,086	0,470	2,32E+06	-3,58E+00
PAV 15%2H	1,000	0,090	0,460	3,66E+06	-3,76E+00
RTFOT 15%4h	1,000	0,088	0,444	2,95E+06	-3,43E+00
PAV 15%4H	1,000	0,095	0,435	9,43E+06	-3,95E+00
RTFOT 15%6h	1,000	0,052	0,513	4,79E+06	-3,47E+00
PAV 15%6H	1,000	0,101	0,423	6,14E+06	-3,76E+00
RTFOT 18%	1,000	0,089	0,440	6,57E+06	-3,63E+00
PAV 18%	1,000	0,093	0,432	7,29E+06	-3,74E+00
RTFOT 21%	1,000	0,097	0,423	1,33E+07	-3,76E+00
PAV 21%	1,000	0,094	0,427	1,23E+07	-3,73E+00
RTFOT TYREFLEX	1,000	0,098	0,428	1,23E+07	-3,89E+00
PAV TYREFLEX	1,000	0,110	0,414	2,35E+07	-4,33E+00
RTFOT AGT	1,000	0,099	0,444	2,50E+06	-3,83E+00
PAV AGT	1,000	0,073	0,486	2,15E+07	-4,43E+00
RTFOT REF	1,000	0,069	0,508	3,27E+05	-2,92E+00

Fonte: Autor, 2023.

4.4 Separação de fases

A Tabela 2 presente na norma DNIT 111/2009 – EM indica os parâmetros para os ensaios de caracterização do Asfalto-borracha. Nela mostra que para não haver separação de fases a diferença máxima de temperatura encontrada no ensaio de ponto de amolecimento da base e do topo não pode ser maior que 9°C. A Tabela 13 indica a média dos valores encontrados nos ensaios de ponto de amolecimento bem como a diferença entre a base e o topo.

Tabela 13 - Resultados Separação de fases - (a) Diferentes teores de borracha - (b) diferentes tempos de mistura.

CAP	Temperatura do Ponto de Amolecimento (°C)		
	Topo	Base	Diferença topo-base
15%4h	56,5	53,2	3,3
18% 4h	59,1	53,6	5,5
21% 4h	60,2	55,15	5,05
TYREFLEX	64,15	59,4	4,75

CAP	Temperatura do Ponto de Amolecimento (°C)		
	Topo	Base	Diferença topo-base
15%2h	59	52,1	6,9
15%4h	56,5	53,2	3,3
15%6h	58,35	52,35	6

Fonte: Autor, 2023.

Portanto, é possível visualizar que todas as amostras apresentaram resultados satisfatórios segundo a norma de especificação de material do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Também percebe-se que mais incremento de borracha não indica maior diferença entre topo e base, bem como a variação do tempo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A malha rodoviária brasileira ainda carece de pavimentação, tanto a parcela já pavimentada, que se encontra com sinais de deterioração, bem como a porção que ainda será, pois o crescente tráfego de veículos pesados alinhados ao aumento da sua capacidade de carga exige dos pavimentos rodoviários mais desempenho. Então, a modificação do ligante asfáltico com borracha é uma alternativa para atingir esses objetivos, entretanto ainda desafia as indústrias de pavimentação na busca de produzir um material de boa qualidade entendendo a interação entre o CAP e a borracha reciclada.

A incorporação da borracha triturada de pneus inservíveis no CAP 50/70 apresentou alterações significativas no comportamento do material. Conforme elevou o teor até 21% da massa das amostras os valores encontrados para o ensaio de penetração diminuíram, indicando um enrijecimento, enquanto que o aumento no tempo de maturação não trouxe mudanças significativas aos resultados. Já na recuperação elástica os ensaios apresentaram aumento na recuperação para as duas variáveis testadas, mostrando que aumentar o tempo de digestão afeta na incorporação da borracha na mistura asfáltica. Porém o mesmo não se pode mencionar sobre o ensaio de Ponto de Amolecimento, pois a adição da borracha melhora sim seu desempenho frente a esse ensaio, mas tanto o aumento do teor quanto o aumento do tempo de mistura não apresentaram melhoras significativas. É plausível sugerir que o protocolo de mistura afetou mais as misturas frente ao aumento do ponto de amolecimento do que as variáveis estudadas.

Os ensaios reológicos foram indispensáveis na análise de comportamento e desempenho das misturas produzidas. Embora com a adição de borracha os pontos experimentais tenham apresentados algumas descontinuidades, a superposição tempo-temperatura e a modelagem 2S2P1D conseguiram tratar os dados e apresentar uma sequência de comportamento dos ligantes AB. A análise das curvas mestras mostrou um comportamento esperado frente a outros estudos já publicados. Indicou um aumento do módulo de cisalhamento dinâmico $|G^*|$ com o aumento do teor em baixas frequências, bem como a diminuição da rigidez nas baixas frequências, essas características inferem um aumento de rigidez em alta temperatura (baixa frequência), auxiliando na deformação permanente ao se deformar menos. O ângulo

de fase, por sua vez, diminuiu ao aumentar o teor indicando um aumento na parcela elástica do material, o qual novamente tende a melhorar o desempenho frente a deformação permanente. Já os maiores teores aumentaram o grau de desempenho na classificação do PG, com destaque para a amostra “21% 4h”, enquanto que a variação do tempo não alterou a classe.

Para os ensaios de avaliação de dano, o aumento do teor continuou melhorando o desempenho, aumentando a parcela elástica e diminuindo a plástica, conforme indicou o MSCR, a variação do tempo de mistura também apresentou melhora na parcela elástica analisada no ensaio citado. Quanto à fadiga, ao analisar o ensaio LAS, foi possível perceber que o teor 21% apresentou maior valor de Fator de Fadiga do Ligante ($FFL_{19^{\circ}C}$), o que representa melhor desempenho para esse defeito. Através do valor de N_f foi possível perceber o aumento do número de ciclos resistido pelas amostras conforme aumentou o teor incorporado. Fato curioso ocorreu com a amostra “agitado 4h”, pois evidenciou-se que o protocolo de mistura enrijece o ligante, entretanto o valor de N_f para a amostra citada foi maior do que a do ligante referência.

Outro ponto analisado foi a proteção que a borracha exerce sobre o cimento asfáltico frente ao ganho de rigidez ao envelhecer. Para evidenciar esse ponto tentou-se quantificar os ganhos de rigidezes do protocolo de mistura, da modificação e das etapas de envelhecimento ao comparar as variações de rigidez com a mistura “agitado 4h”. Depois de descobrir as parcelas de variação de rigidez para cada situação, pode-se perceber que a parcela de incremento de rigidez provocada pelos processos de envelhecimento diminuía conforme aumentou-se o teor de borracha. Dessa forma foi sugerido o comportamento de proteção ao envelhecimento da borracha sobre o CAP.

Ao final da pesquisa, foi possível observar que o protocolo de mistura utilizado foi capaz de produzir um asfalto-borracha que atende as especificações da norma do DNIT e que também apresentou desempenho parecido com o industrial, corroborando a qualidade do processo de mistura. Além disso, a modificação com borracha mostra-se cada vez mais promissora, pois os comportamentos analisados mostraram-se superiores frente ao CAP convencional na comparação dos principais defeitos presentes nas rodovias brasileiras. Por fim, a causa mais nobre do estudo é a destinação correta de pneus inservíveis, portanto destiná-los para a pavimentação acarreta na redução de grande quantidade desse material no meio ambiente, que além de melhorar a qualidade dos pavimentos brasileiros o dano mitiga os danos

causados à natureza. Nesse sentido, é de suma importância compreender a interação entre o asfalto e a borracha para otimizar processos de produção, utilização e desempenho em função do seu potencial de contribuição para a pavimentação brasileira.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Através das análises feitas e principalmente dos obstáculos encontrados, seguem alguns temas para estudos futuros:

- Procurar um teor ótimo para o uso da borracha como modificador ou a variação ideal a depender da estrutura do pavimento;
- Avaliar a influência da borracha sobre a viscosidade dos ligantes AB;
- Otimizar o processo de mistura, bem como buscar alternativas para melhorar os equipamentos de controle da temperatura de mistura;
- Estudo aprofundado para determinar a melhor geometria de crivo para produzir os ligantes modificados;
- Variar os tempos de digestão para diferentes teores, afim de compreender melhor o processo de incorporação da borracha;
- Analisar o comportamento dos ligantes produzidos na escala de misturas asfálticas;
- Intensificar a compreensão da interação entre a borracha o ligante através de análises químicas;
- Comparar o comportamento dos demais ligantes modificados conhecidos com o asfalto-borracha;
- Avaliar o Custo de Ciclo de Vida – *Lyfe Cycle Cost Analysis* (LCCA), da produção de ligantes asfalto-borracha;

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO R 28-21: **Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)**. Washington, D.C., 2021.

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

_____. AASHTO T 313-19: **Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)**. Washington, D.C., 2019.

_____. AASHTO M 332-21: **Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test**. Washington, D.C., 2021.

_____. AASHTO T 240-21: **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., 2021.

_____. AASHTO T 314-12: **Standard Method of Test for Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT)**. Washington, D.C., 2012.

_____. AASHTO T 315-20: **Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)**. Washington, D.C., 2020.

_____. AASHTO T 316-19: **Standard Method of Test for Viscosity Determination of Asphalt Binder Using Rotational Viscometer**. Washington, D.C., 2019.

_____. 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 TP 101-12: **Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep**. Washington, D.C., 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 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.

American Society for Testing and Materials. **Standard test method for compositional analysis by thermogravimetry**. ASTM International, 2003.

. _____. ASTM. **Standard specification for asphalt-rubber binder**. ASTM International, 2019.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. 3º reimpressão. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008 (reimpr. 2010).

CARLSON, D. D; ZHU, H. **A spray based crumb rubber technology in highway noise reduction application**. Tempe, 1999. 12p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas**. Brasília, DF, 2021.

DANIEL, J. S.; KIM, Y. R. **Development of a simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic, continuum damage model (with discussion)**. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, v. 71, 2002.

DANTAS NETO, S. A. **Avaliação das propriedades dos ligantes e das misturas asfálticas modificados com borracha granulada de pneus usados**. Tese (Doutorado) Geotecnia –Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. DNIT 155/2010 - ME. **Material asfáltico – Determinação da penetração**. Rio de Janeiro

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

_____. DNIT 095/2006 - EM. **Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material**. Rio de Janeiro, 2006.

Da luz Fontes, L.P.T. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos**. Tese de Doutorado. Universidade do Minho, Escola de engenharia, Minho. 2009.

Gallego, J.; Tomás, R.; Nosetti, R.A.; Daguerre, L.; Bianchetto, H.D., 2000. **Laboratory Performance of Several Spanish Asphalt Paving Mixes Produced with Asphalt-Rubber**. Asphalt Rubber 2000 – Proceedings. Vilamoura, Portugal.

GUIMARÃES, M. E. **Efeito da adição de resíduos de polietileno de alta densidade e borracha de pneus em ligante asfáltico 50/70**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, PR, 2019.

HINTZ, C. et al. **Modification and Validation of Linear Amplitude Sweep Test for Binder Fatigue Specification**. Transportation Research Record, v. 2207, n. 1, p. 99–106, 1 dez. 2011.

HUNTER, R. N.; SELF, A.; READ, J. **The Shell bitumen handbook**. 6ª edição. ICE Publishing, One Great George Street, Westminster, London, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS - IBAMA. **Relatório de pneumáticos**: Resolução Conama nº 416/09: 20178 (ano base 2017) / Diretoria de Qualidade Ambiental. – Brasília: Ibama, 2018.75 p.

JOHNSON, C. M. **Estimating Asphalt Binder Fatigue Resistance Using an Accelerated Test Method**. 2010. PhD Dissertation. University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, EUA, 2010.

LEE, H.-J.; KIM, Y. R. **Viscoelastic Constitutive Model for Asphalt Concrete under Cyclic Loading**. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 124, n. 1, p. 32–40, 1 jan. 1998

LEITE, L. F. M. **Estudos reológicos de cimentos asfálticos**. 1990. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1990.

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.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

MENEGUSSO, D. P., Schuster, S. L., Specht, L. P., da Silva Pereira, D., & Biancardo, S. A. (2022). **Study of the permanent deformation of asphalt mixtures in the field: A multiscale approach**. *Construction and Building Materials*, 325, 126763.

NASCIMENTO, T. C. B. **Efeito dos envelhecimentos termo-oxidativos e foto-oxidativo sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados**. 2015. **Dissertação de Mestrado**. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos. 2015.

NASCIMENTO, L. A. H. **Caracterização de Ligantes Asfálticos por meio do Ensaio LAS: Processamento dos Resultados**. Apresentação no Seminário do IBP. Evento Online, abril de 2021.

NUNES-RAMOS, Victória. **O uso de polietileno de alta densidade como modificador do cimento asfáltico de petróleo**. 2022. Universidade Federal de 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.

PARK, S. W.; KIM, Y. R.; SCHAPERY, R. A. **A viscoelastic continuum damage model and its application to uniaxial behavior of asphalt concrete**. Mechanics of Materials, v. 24, n. 4, p. 241–255, 1 dez. 1996

PINHEIRO, J. H. M. **Incorporação de borracha de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias (Processos Úmido e Seco)**. 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2004.

PISOLEVE®. **A ecologia por trás da Pisolleve®**. Site Pisolleve®, Disponível em: < <https://www.pisoleve.com.br/a-ecologia-por-tras-da-pisoleve/> >.

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

RODRIGUES JÚNIOR, F. **Obtenção e caracterização de blendas de CAP 20 modificadas com poliestireno reciclado e resíduos de pneu**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) -Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2006.

SCHNORMELER, R. H. **Use of asphalt rubber on low cost, low volume streets.** *Transportation research Record*. Special report: Low volume roads: Washinton, 1975.

SCHUSTER, S. L. **Investigation of the aging phenomenon in asphalt binders and asphalt mixtures: Linear viscoelastic behavior and performance properties.** 2023 Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2023.

SILVA, T. D.; MARTINS DE PAULA, H.; SILVA, D.; CARVALHO, M. I.; FONTE, J. T.; PEREIRA R. R. **Uso de granulado de borracha em substituição parcial ao agregado miúdo na produção de tijolos ecológicos.** *Matéria (rio de Janeiro)*, [s.l.], v. 22, n. 4, p.1- 2, 2 out. 2017. Fap UNIFESP (SciELO).

SPECHT, L. P. **Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus.** 2004. Tese de Doutorado. 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.

YAMAGUCHI, K.; SASAKI, I.; MEIARASHI, S. (2004). **Mechanism of asphalt binder aging by ultraviolet irradiation and aging resistance by adding carbon black.** *Journal of Japan Petroleum Institute*.

YAMAGUCHI, K.; SASAKI, I.; NISHIZAKI, I.; MEIARASHI, S.; MORIYOSHI, A. (2005). **Effects of film thickness, wavelength, and carbon black on photodegradation of asphalt.** *Journal of the Japan Petroleum Institute*.