

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

Victória Nunes Ramos

**O USO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE COMO
MODIFICADOR DO CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO**

Santa Maria, RS
2022

Victória Nunes Ramos

**O USO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE COMO MODIFICADOR DO
CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO**

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

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

Santa Maria, RS
2022

Victória Nunes Ramos

**O USO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE COMO MODIFICADOR DO
CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO**

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

Aprovada em 27 de janeiro de 2022.

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

Deividi da Silva Pereira, Dr. (UFSM)

Évelyn Paniz Possebon, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2022

Dedico este trabalho à minha mãe, Neiva Teresinha Fiorin Nunes.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço à Universidade Federal de Santa Maria, que me acolheu e me proporcionou momentos e oportunidades que jamais imaginei receber.

À minha mãe, Neiva Teresinha Fiorin Nunes, que me apoiou e me deu suporte durante toda a minha caminhada. Agradeço por embarcar junto em cada escolha, vibrar a cada conquista, chorar a cada tropeço e por não me deixar jamais desistir!

Aos meus tios, Rita, Rudimar, Elomar e Elisete, por cuidarem de mim como uma filha e por terem contribuído tanto para que eu chegasse ao final dessa jornada! Aos meus avós, Assis e Liecir, por me ensinarem sobre meus valores, amor, simplicidade e família! Aos meus primos André e Andressa, por me mostrarem o que é amor de irmão e por todo o suporte incansável que recebi! Ao Joaquim e à Verônica, obrigada por todas as vezes que vibraram minhas conquistas como se fossem suas!

Ao meu namorado, João Francisco Pasqualoto Prior, não só pela paciência e suporte, mas por ter arrumado todo o equipamento que usei nesta pesquisa para fazer minhas misturas. Obrigada por ter caminhado ao meu lado! Ao Luís Adolfo Berni, do Núcleo de Automação e Processos de Fabricação (NAFA), pela fabricação de peças e auxílio também com o equipamento de mistura.

Ao meu orientador, professor Luciano Pivoto Specht, pela confiança no meu trabalho, por tudo que me ensinou durante a graduação e pela disponibilidade que sempre demonstrou. Lhe admiro muito e sou grata por toda a sua ajuda.

Agradeço a todos os integrantes do GEPPASV, em especial: Antônio Vieira, Chaveli Brondani, Fernando Boeira, Évelyn Paniz, Pablo Vestena, Cléber Faccin, Jéssica Souza, Fernando Zucchi e Bethania Correa. Com carinho também à Andressa Ambrós de Oliveira, por todas as dicas e pela amizade de sempre!

Meus sinceros agradecimentos ao Pedro Orlando Borges de Almeida Júnior e ao Sílvio Lisboa Schuster, pela paciência ao responderem todas as minhas dúvidas, pelas ajudas nos ensaios e pela amizade de vocês, sem dúvidas foram essenciais para esta pesquisa.

Agradeço à ANP/Petrobrás pelos investimentos realizados no GEPPASV, aos professores do laboratório, à Coordenação do curso de Engenharia Civil e ao LMCC, por todo o suporte que me deram durante toda a graduação.

À todos que de alguma forma fizeram parte dessa caminhada, meu muito obrigada. Cresci e aprendo a cada dia com cada um de vocês!

RESUMO

O USO DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE COMO MODIFICADOR DO CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO

AUTORA: Victória Nunes Ramos
ORIENTADOR: Luciano Pivoto Specht

O desempenho de um pavimento rodoviário possui forte dependência com as propriedades do cimento asfáltico de petróleo (CAP) utilizado. Para alcançar propriedades mecânicas superiores, diversos estudos propõem a modificação do mesmo, e recentemente utilizando resíduos plásticos, como forma de contribuir com a sustentabilidade. Este trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da adição de polietileno de alta densidade (PEAD) em formato de pellets no CAP. Foram avaliados os teores de 1, 3 e 5% de PEAD em relação à massa do CAP, incorporados por via úmida. Foram realizados os ensaios de Penetração, Ponto de Amolecimento e Recuperação Elástica, além de ser realizado o envelhecimento a curto prazo em RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*). Para caracterização reológica, foi verificada a Viscosidade Rotacional no viscosímetro *Brookfield*, o PG de alta e as curvas mestras de Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase, utilizando o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR). A modelagem 2S2P1D foi utilizada na análise dos dados. A caracterização do dano se deu pelos ensaios de MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*) e LAS (*Linear Amplitude Sweep*). Por fim, foi efetuado o ensaio de separação de fases para verificar a estabilidade à estocagem. A modificação do CAP 50/70 produziu o enrijecimento do mesmo, e o ensaio de recuperação elástica mostrou-se inadequado para esse tipo de ligante modificado. Foi observado um aumento considerável na viscosidade encontrada, sinalizando a necessidade de temperaturas mais elevadas para se obter a trabalhabilidade apropriada. A aplicação do princípio da superposição tempo-temperatura e da modelagem 2S2P1D mostrou-se eficaz no tratamento dos dados, embora tenham sido observadas algumas descontinuidades nas curvas dos maiores teores. A análise das curvas mestras indicou maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico e menores valores de ângulo de fase, especialmente nos teores de 3 e 5% de PEAD. Também houve um incremento no PG de alta, ampliando a faixa de aplicação do CAP modificado. Os maiores teores de PEAD, ainda, mostraram resultados superiores aos demais no que se refere ao ensaio de deformação permanente (MSCR). Os critérios de Fator de Fadiga do Ligante e C versus N indicaram que os maiores teores de PEAD melhoram o comportamento à fadiga, ao contrário do que sugeriu o critério da taxa de abertura da fissura. O protocolo de mistura provocou significativo envelhecimento e ainda precisa ser otimizado. Por fim, a análise das amostras mostrou excessiva separação das fases, reforçando a necessidade de agitação constante dos tanques de asfalto. Assim, entender a interação do plástico com a matriz asfáltica ainda carece de estudos, mas mostrou viabilidade comprovada para emprego em pavimentação.

Palavras-chave: Polietileno de Alta Densidade. PEAD. Ligantes asfálticos modificados. Reologia.

ABSTRACT

THE USE OF HIGH DENSITY POLYETHYLENE AS A MODIFIER OF PETROLEUM ASPHALT CEMENT

AUTHOR: Victória Nunes Ramos
ADVISOR: Luciano Pivoto Specht

The performance of a road pavement is strongly dependent on the properties of the petroleum asphalt cement (PAC) used. To achieve superior mechanical properties, several studies propose its modification, and recently using plastic waste, as a way to contribute to sustainability. This work aims to evaluate the effect of adding high density polyethylene (HDPE) in pellet format to conventional asphalt binder. The contents of 1, 3 and 5% of HDPE were evaluated in relation to the mass of CAP, incorporated by wet way. Penetration, Softening Point and Elastic Recovery tests were performed, in addition to short-term aging in RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test). For rheological characterization, it was verified the Rotational Viscosity using Brookfield viscometer, the high PG and the master curves of Dynamic Modulus and Phase Angle, using the Dynamic Shear Rheometer (DSR). The 2S2P1D modeling was used in data analysis. Damage characterization was performed by MSCR (Multiple Stress Creep Recovery) and LAS (Linear Amplitude Sweep) tests. Finally, the phase separation test was carried out to verify storage stability. The modification of CAP 50/70 produced its stiffening, and the Elastic Recovery test proved to be inadequate for this type of modified binder. A considerable increase in the viscosity found was observed, signaling the need for higher temperatures to obtain the appropriate workability. The application of the time-temperature superposition principle and the 2S2P1D modeling proved to be effective in the data analysis, although some discontinuities were observed in the curves with the highest contents. The analysis of the master curves indicated higher values of dynamic shear modulus and lower values of phase angle, especially in the contents of 3 and 5% of HDPE. There was also an increase of the high PG, expanding the application range of the modified binder. The highest contents of HDPE also showed better results with regard to the permanent deformation test (MSCR). The Binder Fatigue Factor and C versus N criteria indicated that the higher contents of HDPE improve the fatigue behavior, contrary to what the crack opening rate criterion suggested. The mixing protocol caused significant aging and still needs to be optimized. Finally, the analysis of the samples showed excessive phase separation, reinforcing the need for constant agitation of the asphalt tanks. Thus, understanding the interaction of plastic with the asphalt matrix still needs to be studied, but it has shown a proven feasibility for use in paving.

Keywords: High density polyethylene; HDPE; Modified asphalt binders. Rheology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática da distribuição dos grupos químicos no asfalto (a) normal e (b) envelhecido.....	21
Figura 2 - Defasagem entre tensão e deformação	29
Figura 3 - Distribuição dos resíduos reciclados entre os diversos tipos de plástico. .	34
Figura 4 - Distribuição da reciclagem de plásticos entre as regiões brasileiras.	35
Figura 5 - Resíduos de polietileno tipo flocos: (a) PEBD e (b) PEAD.....	38
Figura 6 - Processamento do resíduo de PEAD.....	40
Figura 7 - Esquema do programa experimental.	43
Figura 8 - Pellets de Polietileno de Alta Densidade.....	45
Figura 9 - Parafusadeira adaptada para o procedimento de mistura.	46
Figura 10 - Ensaio de Penetração. (a) Penetrômetro manual. (b) Amostras do ensaio.	48
Figura 11 - Ensaio de Ponto de Amolecimento.	49
Figura 12 - Ensaio de Recuperação Elástica.	49
Figura 13 - Esquema de funcionamento de um viscosímetro Brookfield.....	50
Figura 14 - Viscosímetro Brookfield utilizado na pesquisa.	51
Figura 15 - Estufa de filme fino rotativo (RTFOT).....	52
Figura 16 - Reômetro de Cisalhamento Dinâmico. (a) Equipamento em funcionamento. (b) Amostra entre as placas paralelas.....	52
Figura 17 - Momento da falha por fadiga pelo critério C versus N.	56
Figura 18 - Tubos metálicos do ensaio de separação de fases.	57
Figura 19 - CAP + PEAD (a) Ao final da mistura com a parafusadeira. (b) Finalizada com agitação manual.	59
Figura 20 - Resultados de penetração.	60
Figura 21 - Resultados de Ponto de Amolecimento.	61
Figura 22 - Resultados de Recuperação Elástica.	62
Figura 23 - Heterogeneidade das amostras no ensaio de Recuperação Elástica. (a) 3% de PEAD. (b) 5% de PEAD.	63
Figura 24 - Resultados de Viscosidade Brookfield.	64
Figura 25 - Resultados de Perda de Massa.	65
Figura 26 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico - pontos experimentais.....	66

Figura 27 - Curvas Mestras de Ângulo de Fase - pontos experimentais.....	69
Figura 28 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico - modelagem 2S2P1D.....	72
Figura 29 - Curvas mestras de Ângulo de Fase - modelagem 2S2P1D.....	74
Figura 30 - Espaço Black (a) Condição virgem. (b) Condição pós RTFOT.....	75
Figura 31 - Plano Cole-Cole pela modelagem 2S2P1D.....	76
Figura 32 - Efeito do protocolo de mistura nos valores de rigidez encontrados.....	78
Figura 33 - Resultados de PG.....	80
Figura 34 - Resultados de Jnr a 64°C (kPa ⁻¹).....	81
Figura 35 - Resultados de percentual de recuperação (%).	82
Figura 36 - Curva de deformações cisalhantes versus tempo do ensaio MSCR a 64°C	84
Figura 37 - Curvas características de dano.....	85
Figura 38 - Curvas de fadiga para todos os ligantes.....	86
Figura 39 - Fator de Fadiga do Ligante (FFL _{19°C}) para todos os CAP's.....	86
Figura 40 - N _f pelos critérios C versus N e ar.....	88
Figura 41 - Amostras após a preparação das amostras no ensaio de separação de fases.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificação brasileira para CAP 30/45 e CAP 50/70.	25
Tabela 2 - Especificação brasileira para CAP TLA.....	26
Tabela 3 - Especificação brasileira para asfalto borracha.	27
Tabela 4 - Especificação brasileira para asfalto polímero.	27
Tabela 5 – Elementos considerados na modificação dos CAP's.....	37
Tabela 6 - Propriedades do CAP 50/70 utilizado.....	45
Tabela 7 - Classificação MSCR quanto às classes de tráfego.	54
Tabela 8 - Classificação de Nascimento (2021) de acordo com o FFL _{19°C}	56
Tabela 9 - Parâmetros 2S2P1D, C1 e C2	73
Tabela 10 - Resultado das classes de tráfego segundo o Jnr a 64°C.....	82
Tabela 11 - Resultados de MSCR e classificação PG segundo a AASHTO M 332 - 21.	83
Tabela 12 - Resultados de MSCR para o CAP 0% PEAD no PG 58°C.	84
Tabela 13 - Parâmetros do modelo VECD para obtenção das curvas de fadiga.	86
Tabela 14 - Classificação de Nascimento (2021) para os ligantes modificados com PEAD.	87
Tabela 15 - Resultados de separação de fases.	88

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
Abiplast	Associação Brasileira da Indústria do Plástico
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Copolímero de Acrilonitrila-Butadieno-Estireno
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
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes
DP	Desvio Padrão
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
DTT	<i>Direct Tension Test</i>
E*	Módulo Complexo
E*	Módulo Dinâmico
EAP	Emulsão Asfáltica de Petróleo
EPS	Poliestireno Expandido
EVA	Etileno-acetato de Polivinila
FFL	Fator de Fadiga do Ligante
GEPPASV	Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária
HDPE	<i>High Density Polyethylene</i>
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
LDPE	<i>Low Density Polyethylene</i>
LLDPE	<i>Linear Low Density Polyethylene</i>
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
MDPE	<i>Medium Density Polyethylene</i>
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>

N	Número de Ciclos
NBR	Norma Brasileira
PAV	<i>Pressure Aging Vessel</i>
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEBDL	Polietileno de Baixa Densidade Linear
PEMD	Polietileno de Média Densidade
PG	<i>Performance Grade</i>
PICPlast	Plano de Incentivo à Cadeia do Plástico
PP Homo	Polipropileno homopolímero
PP Copo	Polipropileno copolímero
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila
REFAP	Refinaria Alberto Pasqualini
RV	<i>Rotational Viscometer</i>
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
SBR	<i>Styrene Butadiene Rubber</i>
SBS	<i>Styrene-Butadiene-Styrene</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
Superpave	<i>Superior Performance Asphalt Pavements</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	16
1.1	OBJETIVO GERAL.....	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1	LIGANTES ASFÁLTICOS	19
2.1.1	Composição química dos ligantes asfálticos	20
2.1.2	Comportamento dos ligantes asfálticos	21
2.1.3	Ligantes asfálticos modificados por polímeros	23
2.1.4	Especificação dos ligantes asfálticos	24
2.1.4.1	Especificação brasileira para cimentos asfálticos de petróleo.....	24
2.1.4.2	Especificação segundo a metodologia Superpave	28
2.2	POLÍMEROS	31
2.2.1	Processo de incorporação de resíduos plásticos em misturas asfálticas	35
2.2.2	Resíduos plásticos incorporados em misturas asfálticas.....	36
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	43
3.1	PLANEJAMENTO DA PESQUISA	43
3.2	MATERIAIS UTILIZADOS	44
3.3	PROCEDIMENTO DE MISTURA	46
3.4	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CAP MODIFICADO	47
3.4.1	Ensaio Convencionais	47
3.4.1.1	Penetração	47
3.4.1.2	Ponto de Amolecimento	48
3.4.1.3	Recuperação Elástica.....	49
3.4.2	Ensaio Reológicos	50
3.4.2.1	Viscosidade Rotacional <i>Brookfield</i>	50

3.4.2.2	Envelhecimento de curto prazo e perda de massa	51
3.4.2.3	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)	52
3.4.2.3.1	<i>Curvas Mestras, Espaço Black e plano Cole-Cole</i>	53
3.4.2.3.2	<i>Performance Grade (PG)</i>	53
3.4.2.3.3	<i>Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)</i>	53
3.4.2.3.4	<i>Linear Amplitude Sweep (LAS)</i>	54
3.4.3	Ensaio de separação de fases	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1	PROCESSO DE INCORPORAÇÃO DO PEAD.....	58
4.2	ENSAIOS CONVENCIONAIS	59
4.2.1	Penetração	59
4.2.2	Ponto de Amolecimento	61
4.2.3	Recuperação Elástica	62
4.3	ENSAIOS REOLÓGICOS	63
4.3.1	Viscosidade Rotacional Brookfield.....	63
4.3.2	Perda de massa	65
4.3.3	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)	65
4.3.3.1	Curvas Mestras, Espaço Black e plano Cole-Cole	65
4.3.3.2	Performance Grade (PG)	79
4.3.3.3	Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)	80
4.3.3.4	Linear Amplitude Sweep (LAS)	85
4.4	ENSAIO DE SEPARAÇÃO DE FASES	88
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
5.1	SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92
	REFERÊNCIAS.....	93

1 INTRODUÇÃO

O modal rodoviário é um dos principais agentes promotores do desenvolvimento econômico brasileiro, visto que é responsável por uma grande parcela do transporte de cargas e passageiros. Ainda assim, apenas 12,4% da malha rodoviária é pavimentada e 52,2% dos trechos avaliados pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) são classificados como regulares, ruins ou péssimos (CNT, 2021). As rodovias estão sujeitas à deterioração após a construção, quando da passagem do tráfego e devido às condições climáticas, e a seleção de bons materiais pode retardar esse processo (MEDINA e MOTTA, 2015). Além disso, a crescente frota de veículos pesados e a carência de matéria-prima em algumas regiões desafiam a indústria de pavimentação rodoviária a avaliar os recursos existentes para garantir um desempenho mecânico adequado (POULIKAKOS et al., 2017).

O desempenho de um pavimento flexível está diretamente atrelado às especificidades de seus componentes, dependendo, portanto, do tipo de material utilizado e sua dosagem, da compactação, do processo construtivo, do tráfego atuante e de fatores climáticos (SILVA et al., 2002), sendo que os principais defeitos encontrados são deformação permanente e formação de trincas por fadiga e baixas temperaturas. O concreto asfáltico é um material trifásico que contém agregados, aglutinante e vazios de ar, podendo conter, ainda, aditivos melhoradores de desempenho, como fibras e polímeros (POULIKAKOS et al., 2017).

Atualmente a maioria das rodovias possuem um revestimento flexível que contém em torno de 5% de ligantes asfálticos em massa. No entanto, segundo González et al. (2002), apesar do baixo teor de betume, o desempenho do pavimento rodoviário possui forte dependência com as propriedades do ligante, tendo em vista que é o único componente deformável. Sua função vai além de aglutinar os agregados e, além de ser o componente de maior custo das misturas, confere a elas características de resistência e durabilidade, daí a importância de ser alvo de diversos estudos.

Paralelo a isso, no ano de 2010, por meio da Lei nº 12.305, foi sancionada a Política Nacional de Resíduos Sólidos, regulamentada pelo decreto 7.404/10, objetivando, dentre outros itens, a “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (BRASIL, 2010). A demanda pelo uso de recursos naturais

escassos é crescente na sociedade contemporânea, visto que é estimulada pelo consumo, resultando na produção de grandes quantidades de resíduos. Esse cenário também pode ser observado no setor de infraestrutura rodoviária com os resíduos de construção e demolição (COSTA et al., 2017).

Esses materiais muitas vezes não possuem qualidade ou requisitos técnicos para que sejam reciclados no mesmo produto, sendo conduzidos para aterros ou para locais onde são incinerados, promovendo um excessivo consumo de energia e liberação de gases nocivos para a atmosfera. Diante dessas preocupações, as sociedades estão migrando de processos lineares de produção, em que as mercadorias são descartadas ao fim do processo, para uma economia circular, na qual os resíduos retornam à cadeia produtiva e auxiliam, ainda, na redução da extração de matérias-primas virgens (TOMASZEWSKA, 2020).

Em 2018, o Brasil produziu cerca de 11,3 milhões de toneladas de resíduo plástico, tornando o país o quarto maior produtor do mundo (WWF, 2019), mas a maioria desses resíduos ainda é descartada de maneira inadequada. O uso de resíduos plásticos no setor de pavimentação asfáltica tem apresentado grande potencial de contribuir para a sustentabilidade ambiental e econômica da infraestrutura rodoviária, mas ainda carece de estudos e diretrizes para sua efetivação.

O Polietileno de Alta Densidade está entre os tipos de plásticos mais encontrados nos resíduos sólidos, e estima-se que seu consumo global alcance aproximadamente 100 milhões de toneladas por ano. No entanto, podem gerar prejuízos quando descartados inadequadamente na natureza, pois levam anos para se decompor. Assim, o uso desse material na pavimentação pode contribuir na redução de toneladas de resíduos abandonados em locais impróprios ou ainda limitar o crescimento de aterros sanitários, proporcionando uma solução ambientalmente mais sustentável.

A incorporação de resíduos plásticos no setor pode ser considerada recente, especialmente no que se refere a estudos mais intensivos na busca pelo entendimento do efeito do plástico no comportamento das misturas asfálticas. A realização desse estudo no Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) é pioneiro e constitui um grande desafio, mas justifica-se tendo em vista o potencial de colaborar para o avanço no conhecimento dessas interações e do processo de incorporação. Além disso, contribui para dar início nesse laboratório a

uma linha de pesquisa em ascensão em diversos centros de pesquisa ao redor do mundo.

1.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade e os efeitos da adição de *pellets* polietileno de alta densidade (PEAD) em um ligante asfáltico 50/70 convencional em três teores diferentes.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Considerando a variação de teor adotada, são objetivos específicos da pesquisa:

- Aferir a eficiência das variáveis adotadas no procedimento de mistura (temperatura, rotação e tempo).
- Avaliar propriedades físicas por meio dos ensaios de Penetração, Ponto de Amolecimento e Recuperação Elástica, bem como a resistência ao fluxo com o ensaio de Viscosidade Rotacional;
- Analisar as mudanças na rigidez e no comportamento viscoelástico dos ligantes modificados utilizando curvas com os pontos experimentais e também com a modelagem 2S2P1D;
- Classificar os ligantes segundo o PG (*Performance Grade*) de alta temperatura utilizando a metodologia *Superpave* (*Superior Performing Asphalt Pavements*);
- Obter dados de resistência à deformação permanente utilizando o ensaio de MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*);
- Estudar o comportamento à fadiga dos CAP's utilizando o ensaio de LAS (*Linear Amplitude Sweep*) e três critérios de falha;
- Avaliar se houve a separação das fases entre o asfalto e o polietileno.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são abordados conceitos referentes aos ligantes asfálticos, sua composição e comportamento, além de suas especificações. Já a segunda parte apresenta as concepções a respeito dos polímeros, suas classificações, métodos de incorporação dos plásticos e utilização dos mesmos na área de pavimentação asfáltica.

2.1 LIGANTES ASFÁLTICOS

Os ligantes asfálticos utilizados em pavimentação são, em sua maioria, hidrocarbonetos produzidos pela remoção das frações mais leves (como gás liquefeito de petróleo, diesel e gasolina) do petróleo bruto durante um processo conhecido como refino (HUNTER; SELF; READ, 2015), e são compostos basicamente por moléculas de hidrogênio, carbono, nitrogênio e oxigênio. A composição exata pode variar com a origem do petróleo cru a ser refinado.

Os ligantes asfálticos possuem diversos usos, desde a agricultura até a indústria. No entanto, destaca-se seu uso na pavimentação asfáltica, tendo em vista que a maioria dos países do mundo utiliza essa forma de revestimento. São materiais com propriedades decisivas na composição das misturas asfálticas, já que unem os agregados e permitem que sua flexibilidade seja controlada, são impermeabilizantes, duráveis e resistentes à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais (BERNUCCI et al., 2010). Sua versatilidade também reside no fato de que podem se encontrar desde o estado sólido até um líquido viscoso, quando diluído ou aquecido, e é chamado de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) quando apresenta qualidade e consistência para aplicação nas obras de pavimentação rodoviária.

Conforme Bernucci et al., (2010), comercialmente os ligantes são encontrados nas formas de cimentos asfálticos de petróleo (CAP), asfaltos diluídos (ADP), emulsões asfálticas (EAP), asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial, asfaltos modificados por polímero (AMP) ou por borracha de pneus (AMB) e agentes rejuvenescedores (AR e ARE). Além disso, são materiais sensíveis à temperatura, a variações de velocidade, tempo e intensidade de carregamento, e possuem diversas especificações para seu correto uso em pavimentação.

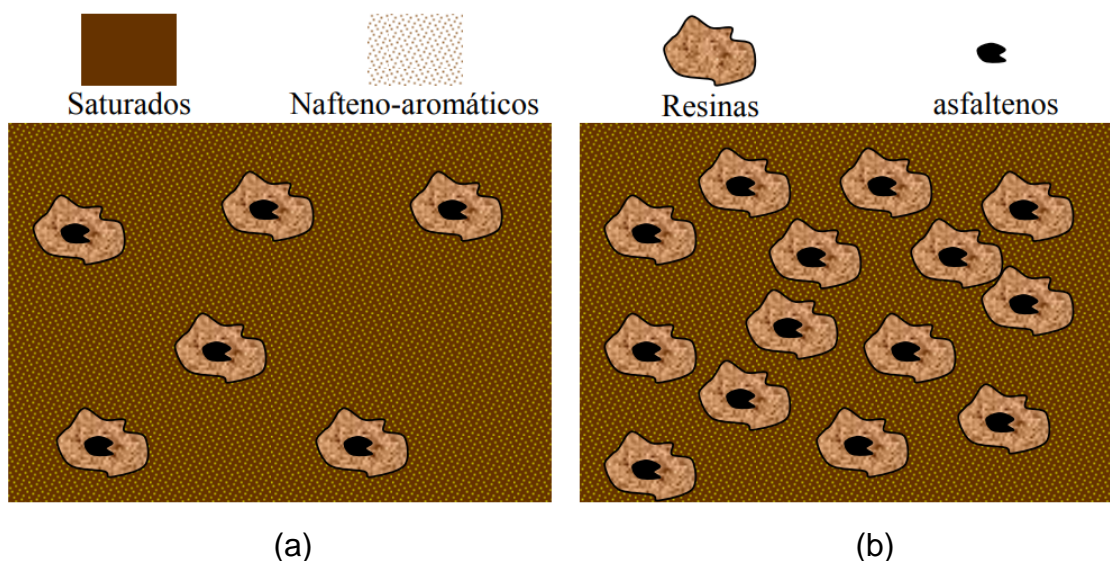
2.1.1 Composição química dos ligantes asfálticos

Os ligantes asfálticos possuem um complexo arranjo atômico, que pode variar de acordo com o petróleo que lhe deu origem, e a maneira como esses átomos interagem entre si tem grande influência no comportamento final da mistura e nos processos de incorporação de agentes modificadores (GARCÍA-MORALES et al., 2004). Segundo Leite (1990), os ligantes asfálticos são hidrocarbonetos (90 a 95%) que contém teores significativos de heteroátomos (5 a 10%), como nitrogênio, oxigênio, enxofre, vanádio, níquel e ferro, os quais exercem um papel importante nas propriedades físicas dos CAP. Além disso, são constituídos por compostos polares e polarizáveis, capazes de se associarem e modificarem o ponto de ebulição, a solubilidade e a viscosidade, e compostos não polares (hidrocarbonetos aromáticos e saturados).

As ligações químicas observadas nos ligantes asfálticos são fracas e podem ser facilmente quebradas pela ação da temperatura e de esforços cisalhantes, conferindo propriedades viscoelásticas ao material. Os ligantes podem ser divididos basicamente em asfaltenos e maltenos (PINHEIRO, 2004). Os asfaltenos são compostos aromáticos com mais de 5 anéis benzênicos condensados de grande polaridade, e consistem em componentes cíclicos e parafínicos ao redor de anéis aromáticos. Como mencionado anteriormente, compostos polares possuem tendência de associação e aumentam a viscosidade do CAP. Já os maltenos são constituídos de resinas e óleos. As resinas são agentes peptizantes que dispersam os asfaltenos nos óleos que, por sua vez, são compostos saturados e aromáticos possuem estrutura parafínica-aromática.

Durante os processos oxidativos dos ligantes asfálticos, as resinas transformam-se em asfaltenos, enquanto os óleos podem se converter resinas ou asfaltenos. A fase que circunda os asfaltenos dá ao asfalto um comportamento newtoniano e mantém os asfaltenos em uma solução chamada de coloidal (LEWANDOWSKI, 1994). Os compostos e suas modificações devido ao processo de envelhecimento podem ser observados na Figura 1.

Figura 1 – Representação esquemática da distribuição dos grupos químicos no asfalto (a) normal e (b) envelhecido.



Fonte: Pinheiro (2004).

2.1.2 Comportamento dos ligantes asfálticos

A dispersão das moléculas polares em meio não-polar no ligante asfáltico condiciona seu comportamento quando da ação da temperatura. Nas baixas temperaturas, a dificuldade de movimentação das moléculas confere ao ligante o comportamento de um sólido, enquanto que o movimento relativo entre elas nas temperaturas mais elevadas garantem um comportamento de líquido viscoso, dentro de um processo reversível (BERNUCCI et al., 2010).

Em vista dessas condições, os ligantes asfálticos podem ser considerados materiais termossensíveis, porque se comportam de maneiras diferentes quando aquecidos ou em baixa temperatura, e viscoelastoplásticos, com comportamentos altamente dependentes das condições impostas. Materiais puramente elásticos são capazes de retomar sua forma original instantaneamente depois de cessado o carregamento, ao passo que materiais plásticos mantêm níveis de deformação residual. A esses comportamentos, pode ser associada a parcela de viscosidade do material, definida como a resistência ao fluxo de um líquido, provocando um retardo no retorno das deformações, quando esse retorno existir (HUNTER; SELF; READ, 2015).

Assim, nas condições de temperatura e níveis de carregamento impostos durante a vida útil dos pavimentos rodoviários, pode-se considerar que o ligante asfáltico se comporta como um material viscoelástico, ou seja, no domínio das pequenas deformações (HUNTER; SELF; READ, 2015). Esse comportamento também pode ser analisado sob a ótica do Princípio da Superposição Tempo-Temperatura, que propõe uma equivalência nos comportamentos em altas temperaturas e baixas taxas de carregamento, com o material se comportando como um líquido viscoso. Por outro lado, também há uma correspondência nas baixas temperaturas e altas frequências de solicitação, quando o material se assemelha a um sólido elástico, podendo tornar-se frágil (FERRY, 1980). As menores taxas de carregamento referem-se a veículos trafegando a baixas velocidades ou cargas estacionadas, e o contrário também é válido. Nas temperaturas intermediárias apresentam comportamento tanto viscoso quanto elástico.

Esse princípio se aplica a materiais termoreologicamente simples, nos quais as equações constitutivas obtidas em condições não isotérmicas são muito semelhantes às equações no caso isotérmico (MORLAND; LEE, 1960). Ou seja, realizando-se testes em diferentes temperaturas, é possível construir um gráfico logarítmico da propriedade analisada em função do tempo. Se a superposição das curvas em diferentes temperaturas permitir a geração de uma curva única, o material pode ser considerado termoreologicamente simples, obtendo-se uma curva mais completa sem necessitar de ensaios muito demorados (SCHWARZL; STAVERMAN, 1952).

Os cimentos asfálticos comportam-se, ainda, como fluídos Newtonianos, nos quais a tensão e a taxa de cisalhamento relacionam-se linearmente. Por outro lado, asfaltos modificados por polímeros e o asfalto-borracha não seguem esse padrão, visto que a viscosidade passa a depender da taxa de cisalhamento aplicada, sendo chamados de Fluídos Não-Newtonianos (SPECHT, 2004).

O modelo que melhor representa o comportamento viscoelástico dos materiais betuminosos é chamado de 2S2P1D (*2 Springs, 2 Parabolic, 1 Dashpot*), e utiliza um amortecedor linear em série com dois elementos parabólicos e uma mola, e esse conjunto em paralelo com uma segunda mola (OLARD; DI BENEDETTO, 2003). A modelagem matemática conforme esse modelo fornece parâmetros que permitem ajustar curvas aos dados obtidos em experimentos laboratoriais.

A incorporação desses resultados no 2S2P1D, permite gerar curvas no plano Cole-Cole, Espaço Black, curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase. O

plano Cole-Cole apresenta em escala aritmética a parte imaginária (E2), representando o comportamento viscoso, *versus* a parte real (E1), que representa o comportamento elástico. O Espaço Black reúne dados de módulo e ângulo de fase, e é uma curva que possibilita, entre outras questões, visualizar claramente a diferença entre ligantes convencionais e modificados.

Para análise de rigidez são geradas as curvas mestras de módulo ao longo da varredura de frequência. Além disso, podem ser obtidas as curvas mestras de ângulo de fase, sendo que valores próximos a 90° indicam uma maior parcela viscosa, e ângulos próximos a 0° representam um comportamento mais elástico.

2.1.3 Ligantes asfálticos modificados por polímeros

O uso polímeros como modificadores de ligantes asfálticos vem sendo feito desde 1970 na Europa e Estados Unidos (SILVA et al., 2002), visto que, embora na maioria das obras rodoviárias os CAP's convencionais possuam um desempenho satisfatório, existem algumas condições que exigem performances superiores. Em rodovias com intenso volume de tráfego, aeroportos, corredores de tráfego pesado canalizado e para condições de grandes amplitudes térmicas, é necessário o uso de um agente modificador e melhorador das propriedades dos ligantes asfálticos (BERNUCCI et al., 2010).

Os polímeros são utilizados normalmente em teores de 3 a 8% em relação à massa do CAP, objetivando minimizar falhas por deformações permanentes (afundamento de trilha de roda) e trincamento por fadiga ou por baixas temperaturas. A incorporação de um ou mais polímeros ao CAP pode promover ou não uma reação química, sendo que, quando ocorre, pode ser observada com as porções maltênicas, asfaltênicas ou com os heteroátomos (CERATTI; BERNUCCI; SOARES, 2015). A resistência ao envelhecimento oxidativo e a melhora da adesividade entre o CAP e os agregados também podem ser observadas em muitos casos de modificação com polímeros (ROBINSON, 2004).

Como já mencionado, o ligante betuminoso é responsável pelo comportamento viscoelástico das misturas, e as deformações induzidas que são atribuíveis ao fluxo viscoso (ou seja, fluxo não recuperável), aumentam com o carregamento, tempo e temperatura. Um dos principais objetivos da incorporação de polímeros é aumentar a resistência das misturas à deformação em altas temperaturas sem afetá-las em outras

temperaturas. Isso ocorre pelo endurecimento do betume, de modo a diminuir a resposta viscoelástica total, ou pelo incremento da componente elástica do ligante, reduzindo a componente viscosa. Com isso, obtém-se uma melhor distribuição de carga do material, aumentando a resistência da estrutura e prolongando a vida útil esperada do pavimento, permitindo que seja possível atingir a mesma resistência estrutural com camadas menos espessas (HUNTER; SELF; READ, 2015).

Essa melhora no desempenho das misturas pode ser justificada devido ao fenômeno de inchamento do polímero em parte dos maltenos do ligante, aumentando a elasticidade e a resistência ao estiramento do CAP (LEITE, 1999). Diversos polímeros podem ser utilizados para a modificação das misturas asfálticas, como borracha de estireno-butadieno (SBR), copolímero tribloco de estireno-butadieno-estireno (SBS), etileno-acetato de polivinila (EVA), poliuretanas, entre outros (SILVA et al., 2002). Mais detalhes sobre esses materiais serão abordados em uma seção posterior.

2.1.4 Especificação dos ligantes asfálticos

Tendo em vista a termossensibilidade dos ligantes, muitos ensaios simples são realizados para classificá-los quando à sua consistência ou viscosidade em diferentes temperaturas, permitindo a avaliação da suscetibilidade térmica. Assim, pela termoviscoelasticidade dos ligantes, os ensaios que medem suas propriedades físicas possuem temperatura especificada e alguns também definem o tempo e a velocidade de carregamento.

A adequação dos CAP's na pavimentação baseia-se largamente em parâmetros físicos, como "dureza" e resistência ao fluxo, por serem de fácil execução. A "dureza" é medida por meio da penetração de uma agulha padrão na amostra de ligante, e a resistência ao fluxo, por ensaios de viscosidade (BERNUCCI et al., 2010).

2.1.4.1 Especificação brasileira para cimentos asfálticos de petróleo

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) é o atual responsável por classificar os ligantes asfálticos. Segundo a norma DNIT 155/2010 - ME: determinação da penetração – método de ensaio, os ligantes convencionais são

classificados em: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200. Os ensaios e resultados limites estão apresentados na Tabela 1 para os CAP's 30/45 e 50/70.

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

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES		MÉTODOS		
		CAP 30/45	CAP 50/70	ABNT	ASTM	DNER
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 - 45	50 - 70	NBR 6576	D 5	ME 003/99
Ponto de Amolecimento, mín.	°C	52	46	NBR 6560	D 36	
Viscosidade Saybolt Furol	s			NBR 14950	E 102	ME 004/94
a 135°C, mín		192	141			
a 150°C, mín		90	50			
a 177°C		40 - 150	30 - 150			
OU						
Viscosidade Brookfield	cP			NBR 15184	D 4402	
a 135°C, SP 21, 20rpm, mín		374	274			
a 150°C, SP 21, mín.		203	112			
a 177°C, SP 21		76 - 285	57 - 285			
Índice de susceptibilidade térmica	-	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)			
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	NBR 11341	D 92	ME 149/94
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042	ME 153/94
Ductilidade a 25°C, mín	cm	60	60	NBR 6293	D 113	ME 163/98
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85min				-	D 2872	-
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 traz a especificação brasileira para o cimento asfáltico de petróleo modificado por asfalto natural do tipo TLA (Trinidad Lake Asphalt). O TLA é um asfalto natural que pode ser encontrado no *Pitch Lake* de Trinidad e Tobago. Eles são

formados principalmente pela infiltração de óleo mineral no solo, ou ocorrerem sob a forma de rochas, que, por serem muito porosas, acabam ficando impregnadas pelo material (COSTA et al., 2008). Os ligantes naturais são caracterizados por sua elevada viscosidade e densidade, daí serem utilizados na fabricação do CAP TLA, resultante da união do asfalto natural de Trinidad e Tobago com um ligante comercial.

Tabela 2 - Especificação brasileira para CAP TLA.

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

Fonte: Adaptado de DNIT 168/2013 – EM.

A Tabela 3 apresenta a especificação brasileira para asfalto modificado por borracha de pneus por via úmida. O inchamento e interação física da borracha com a matriz asfáltica torna o CAP mais dúctil, mais viscoso e com menor suscetibilidade térmica. Além disso, o AMP torna-se mais resistente ao envelhecimento e à fissuração, contribuindo para a durabilidade do pavimento (SPECHT, 2004). Já a Tabela 4 traz a especificação de asfalto modificado por polímero elastomérico, dos tipos 55/75 e 60/85.

Tabela 3 - Especificação brasileira para asfalto borracha.

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

Fonte: Adaptado de DNIT 111/2009 – EM.

Tabela 4 - Especificação brasileira para asfalto polímero.

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

Fonte: Adaptado de DNIT 129/2011 – EM.

2.1.4.2 Especificação segundo a metodologia Superpave

O *Strategic Highway Research Program* (SHRP) foi um plano de estudos estabelecido pelo Congresso dos Estados Unidos em 1987, com o objetivo de propor novos métodos para avaliar os ligantes asfálticos, dando origem à metodologia Superpave (*Superior Performing Asphalt Pavements*). As análises baseiam-se em propriedades reológicas, que são avaliadas em uma ampla faixa de temperaturas, para que estas representem etapas de mistura, espalhamento, compactação e ao longo da vida útil do pavimento (BERNUCCI et al., 2010).

A nova classificação dos ligantes asfálticos ficou conhecida como “grau de desempenho” (PG – performance grade em inglês), na qual é determinada a temperatura máxima e mínima em que os CAP’s apresentam determinadas propriedades, representando, por exemplo, por PG 64-22, PG 70-22, PG 76-22, entre outros. Os intervalos entre classes são de 6°C nas temperaturas. Os ensaios utilizados nessa metodologia são:

- Estufa de Película Delgada Rotacional – RTFOT (AASHTO T 240 - 21 e ABNT NBR 15235/2009):

O *Rolling Thin Film Oven Test* – estufa de filme fino rotativo (RTFOT) é um ensaio que simula o envelhecimento do ligante a curto prazo, representando as etapas de usinagem, transporte e compactação. Uma fina película de CAP é submetida ao efeito do calor e do ar, sendo mantido a 163°C por 85 minutos, com uma injeção de ar a cada 3 a 4 segundos. Ao fim, obtém-se um endurecimento do asfalto, redução da penetração e aumento no ponto de amolecimento.

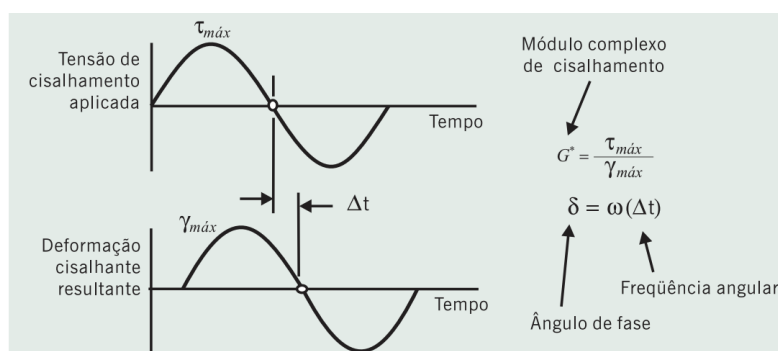
- Vaso de Pressão de Envelhecimento – PAV (AASHTO R 28 - 21).

O *Pressure Aging Vessel* (PAV) é um equipamento que busca simular o envelhecimento oxidativo do ligante asfáltico em no período de serviço (cerca de 10 anos). Para isso, utiliza as amostras que já passaram pelo envelhecimento de curto prazo no RTFOT. As amostras são submetidas a 20 horas de 2,1MPa de pressão de ar. A temperatura de envelhecimento é selecionada de acordo com o tipo de CAP e o local onde serão empregados, e posteriormente são realizados ensaios de caracterização reológica.

- Reômetro de Cisalhamento Dinâmico – DSR (AASHTO T 315 - 20):

O reômetro de cisalhamento dinâmico (*dynamical shear rheometer – DSR*) é utilizado para obter parâmetros de viscoelasticidade do ligante. Por meio desse ensaio mede-se módulo complexo de cisalhamento (G^*) e o ângulo de fase (δ) do material quando submetido a tensões oscilatórias entre duas placas paralelas. O ângulo de fase representa a razão entre a resposta elástica e a viscosa durante o processo de cisalhamento, como ilustrado na Figura 2. Amostras virgens e envelhecidas no RTFOT possuem 1mm de espessura e são ensaiadas em placas de 25mm e em temperaturas mais altas, ao passo que amostras envelhecidas no PAV têm 2mm de espessura e utiliza-se a geometria de 8mm, além de temperaturas mais baixas.

Figura 2 - Defasagem entre tensão e deformação



Fonte: BERNUCCI et al., 2010.

- Reômetro de Fluência em Viga – BBR (AASHTO T313 - 19):

O reômetro de fluência de viga (*bending beam rheometer – BBR*) é usado na caracterização da temperatura inferior do PG na qual pode ocorrer o trincamento térmico. O ensaio se dá pelo carregamento de uma viga de 6.25 x 12.5 x 127mm, e sua flexão é medida nos tempos 8, 15, 30, 60, 120 e 240 segundos, permitindo o cálculo da rigidez estática (*creep stiffness*) para esses tempos.

- Viscosímetro Rotacional – RV (ABNT NBR 15184 - 2021 e AASHTO T 316 - 19):

O viscosímetro rotacional chamado Brookfield permite obter a curva viscosidade-temperatura em ampla faixa de determinação com a mesma amostra, medindo propriedades de consistência relacionadas ao bombeamento e à estocagem do material. É uma medida da viscosidade dinâmica obtida pela rotação de cilindros coaxiais que ficam mergulhados na amostra.

- Ensaio de Tração Direta – DTT (AASHTO T 314 - 12):

O ensaio de tração direta (direct tension test – DTT) permite avaliar quais ligantes possuem a capacidade de não trincar e sim se deformar sem romper a baixas temperaturas, mesmo que possuam uma rigidez estática a baixa temperatura maior do que a desejada. O ensaio utiliza amostras envelhecidas após RTFOT e PAV e é realizado nas temperaturas de -36°C a 0°C.

Atualmente, dois novos ensaios têm sido executados para a caracterização dos ligantes asfálticos. São eles:

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

O ensaio de Fluência e Recuperação sob Múltipla Tensão tem o objetivo de caracterizar os ligantes asfálticos quanto à deformação permanente. As amostras são inseridas no DSR e sofrem a aplicação de uma carga constante de 1s e repouso de 9s. O ciclo é repetido dez vezes em onze níveis de tensão, sem intervalos de tempo entre ciclos.

- LAS - *Linear Amplitude Sweep* (AASHTO TP 101 - 12):

Esse é um ensaio de estimativa da tolerância ao dano de ligantes asfálticos utilizando a varredura linear de amplitude e deformação. Esse ensaio permite classificar os ligantes quanto à fadiga através do dano em 3100 ciclos, 10Hz e 310 segundos, calculando a evolução do dano pela área não trincada. Determinando posteriormente o comprimento da trinca na falha, é possível determinar os parâmetros da equação de fadiga.

2.2 POLÍMEROS

Ao redor do mundo são gerados em média 0,74kg de resíduos per capita por dia, variando entre os diversos países de 0,11 a 4,54kg per capita por dia, sendo que esses valores são fortemente correlacionados com os níveis de renda e taxas de urbanização. Dentre os resíduos totais, estima-se que a porcentagem dos reciclados, como papel, papelão, plástico, metal e vidro, variem de 16% nos países de baixa renda a cerca de 50% nos países de alta renda (KAZA et al., 2018).

Os polímeros são moléculas grandes constituídas pela repetição de unidades químicas mais simples, e são considerados macromoléculas por possuírem elevado peso molecular. Sua origem pode ser natural (madeira, óleo lubrificante, cortiça, etc), ou artificial, por meio de processos de união sequenciada de moléculas chamadas monômeros. As diferentes combinações entre esses monômeros dá origem aos mais diversos produtos, partindo, para isso, de diferentes graus de polimerização.

Os polímeros possuem dois grandes grupos: as borrachas (elastômeros sintéticos) e os plásticos (termossensíveis ou termofixos e os termoplásticos). Abrindo ainda mais esse conceito, Leite (1999) considera que os polímeros podem ser classificados em quatro grupos distintos:

- a) Termorrígidos: endurecem de maneira irreversível com a ação do calor, como resina epóxi, poliuretano e poliéster;
- b) Termoplásticos: são aqueles que amolecem quando aquecidos e endurecem quando resfriados, e em geral possuem cadeias lineares ou com algumas ramificações, como EVA, polietileno, polipropileno atático, policloreto de vinila;
- c) Elastômeros: quando estão sob efeito do calor, se decompõem antes de amolecer, além de apresentarem propriedades elásticas que lembram a borracha natural, como a borracha de estireno-butadieno (SBR);
- d) Elastômero-termoplástico: ao serem aquecidos se comportam como termoplásticos, mas em temperaturas mais baixas apresentam propriedades elásticas, como o estireno-butadieno-estireno (SBS).

O plástico é uma invenção da indústria que oferece ao mercado excelentes propriedades, e que quando manufaturado pode dar origem a diversos produtos. Sua produção e uso em grande escala datam apenas de 1950 (GEYER; JAMBECK; LAW,

2017). Possui características como baixo custo, alta durabilidade e facilidade de operação e modelagem (BAJRACHARYA et al., 2014).

Diferentes estudos já estão sendo realizados para entender o efeito da adição de resíduos plásticos em misturas asfálticas. Para isso, é necessário conhecer o polímero utilizado, qual sua cadeia química, como se comportam em diferentes temperaturas e como se dispersa no CAP. Segundo o Sindicato da Indústria de Material Plástico, Transformação e Reciclagem de Material Plástico do Estado de São Paulo (Sindiplast), os principais tipos de plástico são:

- Polietileno tereftalato – PET

É um material amorfo, rígido e transparente que sofre lenta cristalização. Além disso, absorve muita umidade (por ser um éster) e funde sob temperaturas próximas a 265°C. Possui ótima resistência ao impacto, baixa permeabilidade aos gases (CO₂). Pode ser aplicado em fitas magnéticas, filamentos (fios para tecelagem), laminados para impressão, filmes para radiografias, frascos para alimentos, embalagens para cozimento de alimentos, garrafas para bebidas carbonatadas, cosméticos e produtos de limpeza.

- Polietileno de baixa densidade e Polietileno de baixa densidade linear – PEBD e PEBDL (LDPE e LLDPE)

Esse é um material que possui baixa condutividade elétrica e térmica, e é resistente ao ataque de produtos químicos. Além disso, é considerado atóxico, flexível, leve e transparente (quando estiver com baixa espessura). É bastante utilizado em embalagens para alimentos e produtos de higiene pessoal, tubos para irrigação, isolamento de fios, etc. Cabe ressaltar que o PEBDL é principalmente utilizado na produção de embalagens flexíveis para alimentos, sacolas de supermercados e de lixo.

- Polietileno de alta densidade – PEAD (HDPE)

É um material opaco devido à sua maior densidade e alto grau de cristalinidade. Possui melhores propriedades mecânicas que o PEBD e PEBDL. É resistente às baixas temperaturas, além de ser leve, impermeável e rígido. Possui ótima resistência química, permitindo sua aplicação em embalagens de produtos de limpeza e produtos químicos. Pode ainda ser utilizado na fabricação de autopeças.

- Policloreto de Vinila – PVC

Este é um dos materiais plásticos de maior versatilidade, pois pode gerar produtos muito diferentes dependendo da adição aditivos como plastificantes,

lubrificantes, estabilizantes, pigmentos e corantes, entre outros. O PVC é utilizado em embalagens de alimentos, cosméticos e medicamentos; como “couro sintético” para indústria de calçados, bolsas e estofados; em acessórios médico-hospitalares; mangueiras em geral; na construção civil em tubos e conexões, em conduítes, em recobrimento de fios e cabos, em forração, em revestimento de pisos, em esquadrias e janelas;

- Polipropileno Homopolímero – PP Homo

Esse material é capaz de resistir a altas temperaturas, o que permite sua esterilização quando necessário. Possui boa resistência química e poucos solventes orgânicos podem solubilizá-lo à temperatura ambiente. Possui uma densidade inferior à densidade do PEAD, maior ponto de amolecimento, maior dureza superficial, maior rigidez, maior sensibilidade à oxidação, porém possui menor resistência ao impacto e maior fragilidade a baixas temperaturas. É utilizado na fabricação de peças com dobradiças, autopeças, embalagens para alimentos, fibras e monofilamentos, entre outros.

- Polipropileno Copolímero – PP Copo

É um material transparente, mais flexível e resistente (exceto com relação à resistência química) que o homopolímero. Quando modificado com elastômeros, torna-se mais resistente ao impacto. Possui alta resistência mecânica a baixas temperaturas e é bastante empregado em utilidades domésticas, frascos e embalagens em geral.

- Poliestireno - PS

É um material rígido, leve, transparente e brilhante. Possui baixas resistências química, térmica e às intempéries. Possui baixa resistência mecânica pois é rígido e quebradiço. É bastante utilizado em copos, pratos e talheres descartáveis, brinquedos, produtos para escritório, entre outros.

- Poliestireno Expandido – EPS (Isopor®)

Consiste na incorporação de um agente de expansão ao PS (geralmente o pentano), tornando-o uma espuma com excelentes propriedades acústica e térmica, e baixa absorção de água. Ainda, dependendo da espessura e densidade, possui boa resistência mecânica. É utilizado em embalagens para alimentos, lajes e isolamento acústico/térmico para construção civil, boias, entre outros.

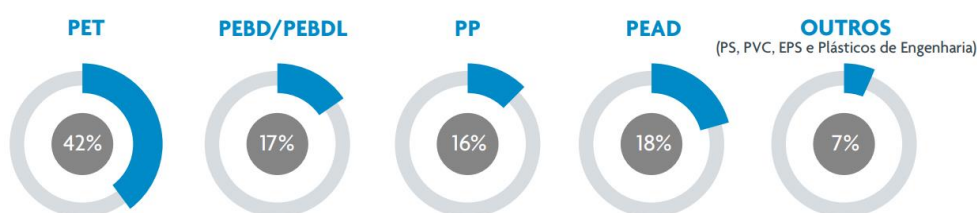
- ABS – (Copolímero de Acrilonitrila-Butadieno-Estireno)

É um material cuja presença do butadieno lhe confere boa resistência ao impacto. Possui boa resistência à tração, e sua dureza está relacionada com a quantidade existente de butadieno e acrilonitrila. Pode ser usado sob temperaturas de até 80°C, possui baixa resistência às intempéries e maior resistência química que o PS (devido à acrilonitrila). Utilizado em autopeças, eletrodomésticos e eletroeletrônicos.

A grande maioria dos monômeros usados para fazer plásticos, como etileno e propileno, são derivados de hidrocarbonetos fósseis e, portanto, os plásticos mais comuns não são biodegradáveis. Assim, ficam acumulados em aterros ou no meio ambiente natural sem se decompor (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017). Segundo dados do Plano de Incentivo à Cadeia do Plástico (PICPlast), uma parceria entre Associação Brasileira da Indústria do Plástico (Abiplast) e Braskem, o panorama de 2019 mostrou que o país gerou 838 mil toneladas de plásticos pós-consumo reciclados, divididos de acordo com a Figura 3. A região sul do Brasil obteve a segunda maior porcentagem de reciclagem desses resíduos (27%), ficando atrás somente da região sudeste (55,5%). A divisão completa entre as regiões é mostrada na Figura 4.

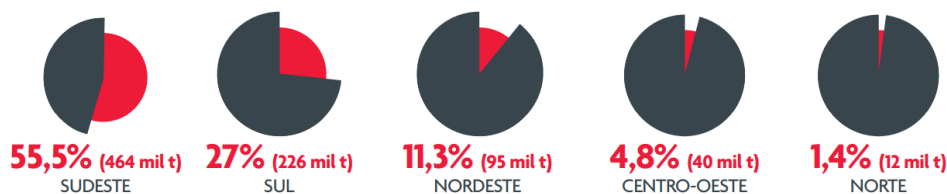
A maior parte dos resíduos plásticos recicláveis são as poliolefinas (material termoplástico, como o polietileno (PE) e o polipropileno (PP)), que são parcialmente cristalinas, combinando as vantagens da borracha e das fibras. Seu uso na pavimentação asfáltica pode ser bastante efetivo, pois os segmentos cristalinos de termoplásticos atuam como cargas de alta resistência nas misturas asfálticas. Além disso, a parte amorfa dos termoplásticos conferem aos asfaltos a capacidade de resistir à deformação permanente e aumentar o módulo de elasticidade.

Figura 3 - Distribuição dos resíduos reciclados entre os diversos tipos de plástico.



Fonte: PICPlast, 2019.

Figura 4 - Distribuição da reciclagem de plásticos entre as regiões brasileiras.



Fonte: PICPlast, 2019.

Como desvantagem da presença de partes cristalinas, pode-se citar o fato de que não são totalmente compatíveis com a matriz de asfalto, podendo haver a separação das fases em altas temperaturas (floculação dos asfaltenos). Por isso, podem ser necessários tempos de mistura estendidos ou a modificação química do polímero para aumentar a interação dessas regiões amorfas com o asfalto (YEH et al., 2005).

O polietileno de alta densidade (PEAD) é obtido pela polimerização do eteno ou etileno (C₂H₄), formando cadeias maiores sob condições de temperatura e pressão controladas, além da adição de um catalisador. Nesse caso, o PEAD forma cadeias lineares ou com poucas ramificações, formando um material rígido e denso, visto que as cadeias se agrupam paralelamente e permitem a ocorrência de interações intermoleculares. A densidade desse polímero fica entre 0,94g/cm³ e 0,97g/cm³. Sua cadeia linear e seu comportamento permitem que esse material seja enquadrado como um termoplástico, exigindo altas temperaturas para que possam ser incorporados à matriz asfáltica.

2.2.1 Processos de incorporação de resíduos plásticos em misturas asfálticas

A incorporação de resíduos de plástico nos ligantes asfálticos pode ser realizada com foco tanto em substituir parcialmente o CAP, quanto em modificá-lo (KAKAR et al., 2021), e pode ser usado ainda diretamente nos agregados, sendo que essa escolha depende do ponto de fusão do plástico a ser utilizado. As duas maneiras de incorporar os plásticos nas misturas asfálticas são chamadas de processo úmido e processo seco.

No processo úmido, o polímero sólido é misturado com o betume em alta temperatura, para posteriormente serem incorporados aos agregados. Nesse processo deve-se ter o cuidado com o superaquecimento do CAP, para evitar o

envelhecimento precoce do mesmo, e por isso a temperatura de fusão do plástico deve ser observada para que se obtenha uma dispersão satisfatória. Além disso, o método úmido requer uma mistura sob cisalhamento substancial para se atingir essa dispersão. Já no método seco, o polímero é misturado com os agregados, ainda na forma sólida, e só depois o ligante é adicionado (KALANTAR; KARIM; MAHREZ, 2012).

2.2.2 Resíduos plásticos incorporados em misturas asfálticas

Diversas experiências de incorporação de polímeros em trechos reais já vêm sendo reportadas na literatura. O uso de polietileno, em especial, foi introduzido na década de 1970 pela Itália, sendo adicionado diretamente na usina misturadora (BERNUCCI et al., 2010). No entanto, seu uso ainda carece de estudos para melhor entender essa interação.

Muitas pesquisas estão sendo desenvolvidas com o intuito de avaliar os efeitos da integração de plásticos às misturas asfálticas, bem como buscar métodos de incorporação que produzam misturas homogêneas e com boa estabilidade à estocagem. A Tabela 5 aborda alguns métodos utilizados nesses processos.

Ahmedzade et al. (2016) avaliaram a modificação do ligante com HDPE reciclado irradiado por feixe de elétrons (HDPERe), a partir de garrafas de plástico lavadas, secas e cortadas em pedaços por um triturador industrial. As análises químicas mostraram uma evidência de ligação química entre o betume e o modificador de polímero, promovendo enrijecimento, diminuição do ângulo de fase, incremento da resposta elástica e do PG de alta. Ligantes com mais de 3% de HDPERe eram mais viscosos que o ligante de referência. No entanto, os autores indicam o uso de no máximo 3% do modificador em regiões frias devido à diminuição no PG de baixa, que poderia levar ao aparecimento de trincas térmicas.

Casey et al. (2008) observaram que PET, PVC, ABS e MDPE não ofereciam compatibilidade com o ligante pesquisado. No caso do PET e do PVC, foi devido aos seus altos pontos de fusão. O ABS reciclado tinha um ponto de fusão relativamente baixo, mas a dureza do material dificultava a redução do tamanho das partículas, e precisava de muito tempo para derreter e se incorporar. Já o MDPE não derreteu na temperatura esperada e não foi possível sua adição ao ligante. O PP foi misturado com sucesso, mas posteriormente foi descoberto que oferece variação excessiva nos

testes de caracterização do ligante básico. LDPE e HDPE foram considerados os mais promissores e uma mistura baseada em 4% de HDPE foi otimizada. Os autores ainda sugeriram, para trabalhos futuros, aumentar a elasticidade do material durante os testes adicionando um pequeno teor de polímeros virgens.

Tabela 5 – Elementos considerados na modificação dos CAP's.

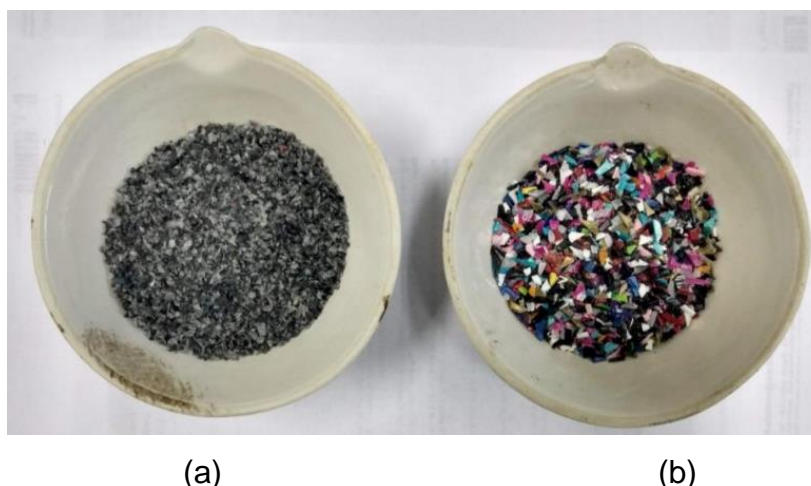
Autores	Resíduo Modificador	Teor em massa (%)	Temperatura de Mistura (°C)	Tempo de Mistura (min)	CAP base	Velocidade de rotação da mistura (rpm)
Ahmedzade et al. (2016)	HDPER	1, 3, 5, 7, 9 (total da mistura)	170	90 (CAP) + de 15 em 15 (HDPER)	160/220	500; 1300
Casey et al. (2008)	LDPE, HDPE, pó de PP e PP <i>mulch</i>	2 a 5	-	-	160	-
Cuadri et al. (2016)	LDPER	2 a 5	170	60	160/220 e 70/100	5000
Fontoura (2019)	PEAD, PEBD	0,5; 1; 2	180	90	50/70	4000
Fuentes-Audé et al. (2008)	RPE	2, 5, 15, 25, 50	180		150/200	-
García-Morales et al. (2007)	EVA/LDPE pellets	5	160, 180 150	- 20+150	60/70	120 150 + 9500 a 17500
Gibreil; Feng (2017)	HDPE + Borracha de pneu	HDPE – 4, 5, 6 Borracha – 5, 10, 15	185	15+90+15	60/70	1200+4000 +200
González et al. (2002)	HDPE, LDPE, etileno-propileno-dieno	5	180	360	60/70	1200
Guimarães (2019)	PEAD + Borracha de pneu	PEAD – 1, 2, 3 Borracha – 13, 15	180	10+30	50/70	500+1200
Kakar et al. (2021)	PE-pellets e PE-shreds	5	170	60	70/100	3500
Khan et al. (2016)	LDPE, HDPE e Borracha	2, 4, 8, 10	165	120	PG 64-10	-
Punith; Veeraragavan (2007)	LDPE-shreds	2,5; 5; 7,5; 10	170	20	80/100	3500
Silva et al. (2018)	PET micronizado	4, 5, 6	165	120	50/70	60
Yeh et al. (2005)	iPP, MPP	1, 3, 5	160	40	98	-

Fonte: Autora.

Cuadri et al. (2016), para prevenir a separação de polímeros e promover tecnologias de economia de energia, dispersaram os ligantes em emulsões de óleo em água com temperatura e pressão controladas, já que o LDPER era uma mistura de dois polímeros imiscíveis: polietileno de baixa densidade (LDPE) e polietileno linear de baixa densidade (LLDPE). As emulsões apresentaram um fluxo viscoso não newtoniano, com uma fase polimérica altamente dispersa, dilatada por alguns compostos maltênicos. Além disso, em comparação com ligantes não emulsificados, a distribuição mais homogênea de polímero LDPER pode melhorar o desempenho do betume em altas temperaturas em serviço, aumentando a resistência à deformação permanente.

Fontoura (2019) utilizou resíduos plásticos de polietileno de alta e baixa densidade (PEAD e PEBD) em formato de flocos, como mostrado na Figura 5, selecionando apenas o passante na peneira de 2,36mm. Os teores de 0,5% PEBD, 0,5% PEAD e 1,0% PEBD obtiveram valores mais adequados e próximos aos ligantes com os quais foram comparados. O teor de 2,0% PEAD/PEBD apresentou problemas de homogeneidade, o que impossibilitou a realização do ensaio de separação de fase. Os resíduos diminuíram a penetração do CAP, e o teor de 0,5% PEBD seria adequado por se enquadrar nos limites tanto do ligante convencional como nos modificados. Todos os teores apresentaram ponto de amolecimento superior a 46°C, mas não superiores aos valores estabelecidos para os AMP 60/85 e 55/75.

Figura 5 - Resíduos de polietileno tipo flocos: (a) PEBD e (b) PEAD.



Fonte: Fontoura (2019).

Fuentes-Audé et al. (2008) observaram que a adição de resíduo de polietileno (RPE) desloca a região vítrea para temperaturas mais baixas, produzindo características mecânicas aprimoradas, como maior resistência à deformação permanente. Além disso, recomendaram que sejam utilizados teores abaixo de 5% para pavimentação asfáltica, devido à dispersão mais homogênea do polímero no ligante.

García-morales et al. (2007), ao estudarem a incorporação de EVA/LDPE ao ligante por processamento de baixo e alto cisalhamento, perceberam que o cisalhamento elevado diminui o tempo necessário para a homogeneização. Além disso, houve um aumento de viscosidade do ligante, além de não parecer sofrer o chamado envelhecimento primário (oxidação durante a mistura em temperaturas muito altas). Os autores também observaram uma instabilidade durante o armazenamento em alta temperatura da mistura preparada sob cisalhamento elevado.

Gibreil e Feng (2017) avaliaram a modificação do ligante com polietileno de alta densidade (HDPE) em forma de pellets e borracha moída. Houve uma redução da penetração e aumento do ponto de amolecimento, indicando maior resistência à deformação em temperaturas moderadas e altas. Além disso, foi observada uma redução da sensibilidade do asfalto à temperatura, aumento da estabilidade Marshall e melhorias na resistência ao dano por umidade. Os teores ótimos encontrados foram 5% para HDPE e 10% para borracha em relação à massa do CAP.

González et al. (2002) estudaram a modificação do ligante com HDPE, LDPE, etileno-propileno-dieno (EPDM) e observaram que acima do pico de relaxação houve uma resposta viscosa, aumento do módulo de elasticidade e da viscosidade complexa. Ao contrário, abaixo do pico de relaxação, houve um comportamento elástico, apesar da fase malteno estar acima de sua temperatura de transição vítrea. O efeito da adição de polímero foi mais perceptível nas altas temperaturas.

Guimarães (2019) avaliou o uso de resíduo de polietileno de alta densidade, proveniente de sacolas plásticas, que foram trituradas com o auxílio de um fragmentador de papel, obtendo partículas de 2x8mm (passantes na peneira #10), como pode ser observado na Figura 6. Além disso, estudou o efeito da incorporação de borracha de pneu moída. Ambos agiram como redutores da perda de massa e do enrijecimento após o envelhecimento a curto prazo. Os CAP's modificados com menor teor de borracha e maiores teores de PEAD apresentaram menor envelhecimento e maior resistência às deformações permanentes em temperaturas altas comparadas

ao CAP 50/70 convencional, além de um aumento na viscosidade. O autor constatou que teores de até 3% de adição de PEAD particulado resultam em uma fusão efetiva entre o material asfáltico e o polímero. Ao final do estudo, o autor observou que o CAP 50/70 modificado com 13% de borracha + 3% de PEAD particulado apresentou o melhor desempenho para a maioria das propriedades analisadas.

Figura 6 - Processamento do resíduo de PEAD.



Fonte: Guimarães (2019).

Kakar et al. (2021) avaliaram duas formas de polietileno: o PE-pellets e PE-shreds, com cerca de 5 mm e 10 mm, respectivamente. Ambos foram moídos em um recipiente parcialmente preenchido com água fria a 15°C, a 5000rpm por 5 minutos. As duas formas foram incorporadas acima dos seus pontos de fusão, mas não houve modificação química. A análise das curvas mestras indicaram que o uso de dimensões de amostra que permitem menos movimento de partículas e, portanto, reduzem o problema de estabilidade de armazenamento, pode ser confiável em comparação com resultados de testes convencionais, como viscosidade e ponto de amolecimento. Além disso, os resíduos melhoraram o desempenho dos CAP's em altas temperaturas.

Khan et al. (2016) converteram os resíduos de PEBD, PEAD e borracha moída em pó (entre 0,15 mm a 0,75 mm), por meio de um moedor mecânico. Constatou-se que teores crescentes de LDPE, HDPE e borracha, em geral, possuem um efeito significativo no comportamento elástico do ligante modificado. A adição de 10% de LDPE ao aglutinante forneceu um valor ideal para o perímetro de afundamento em todas as temperaturas e aumentou 1 grau no PG de alta. A adição de 4% de HDPE produz o valor máximo do perímetro de afundamento em todas as temperaturas, e o

PG aumentou um grau nos teores de 4%, 8% e 10%. A adição de borracha fragmentada teve um bom desempenho em altas temperaturas.

Punith e Veeraragavan (2007) avaliaram misturas asfálticas modificadas com polietileno recuperado de sacolas plásticas de LDPE, que foram fragmentadas em tamanhos de aproximadamente 2x2mm. Os autores observaram que teores acima de 10% eram difíceis de misturar com o CAP utilizado por sua alta viscosidade. As análises mostraram que o desempenho das misturas asfálticas modificadas com PE foram superiores, com menor potencial de afundamento e suscetibilidade térmica. O teor recomendado para o concreto asfáltico estudado foi de 5% em relação à massa do CAP.

Silva et al. (2018) avaliou o comportamento mecânico de misturas modificadas com resíduos de PET micronizado. Foi observado um aumento no parâmetro de resistência à tração indireta, resistência a danos por umidade, vida de fadiga e módulo de resiliência. No entanto, constatou-se um aumento da deformação permanente com a adição de PET. Os autores assinalaram que a resistência a danos por umidade foi mínima em misturas com PET, provavelmente pela melhora da coesão do mastique.

Yeh et al. (2005) confirmaram que o uso de polipropileno maleado teve boa interação com o asfalto, tanto aumentando o conteúdo amorfo quanto intensificando a interação das regiões amorfas do polímero com a fase asfáltica. A matriz asfáltica comporta-se como um fluido newtoniano em temperaturas médias, mas as misturas contendo iPP e MPP ficaram longe desse comportamento em temperaturas mais altas. Ainda, as misturas de asfalto contendo iPP tiveram maior viscosidade, necessitando de temperaturas mais alta para obter comportamento newtoniano, além de maior resistência ao afundamento.

Dentre os autores que utilizaram o processo seco, pode-se citar Angelone et al. (2016), Shbeeb e Awwad (2007) e Zoorob e Suparma (2000). Shbeeb e Awwad (2007) avaliaram qual o melhor modificador para a mistura entre os polietilenos de alta e baixa densidade. Para isso, seguindo a metodologia Marshall, adicionaram teores de 6, 8, 10, 12, 14, 16 e 18% em relação ao peso do CAP, nos estados moídos e não moídos, e concluíram que o HDPE ofereceu melhores propriedades. A proporção indicada foi o teor de 12%. Além disso, as misturas com modificador tiveram melhor estabilidade, menor densidade e mais vazios de agregado mineral.

Angelone et al. (2016), realizaram um estudo utilizando silos de armazenamento que continham basicamente os polietilenos de alta e baixa

densidade, incorporando esses materiais em teores de 2, 4 e 6%, e em dois formatos, flakes (entre 6 e 10mm) e pellets (entre 2 e 5mm). Além disso, foram realizados testes com polipropileno em formato de chips. As misturas SBF eram dosadas em relação à massa total da mistura, e as SBP e PPC substituíram agregados de granulometria semelhante. Foi observado um incremento na resistência à deformação permanente. Os resultados das misturas com flakes foram melhores do que as com pellets, e a mistura com 2% de SBF apresentou melhor desempenho. As misturas com flakes e pellets apresentaram uma suscetibilidade térmica reduzida.

Zoorob e Suparna (2000) substituíram parte dos agregados por resíduos plásticos que continham predominantemente LDPE pellet. Essa mistura obteve uma redução na densidade, o que pode ser benéfico em termos de custos de transporte. Foi observado um aumento da estabilidade Marshall e uma redução no valor da rigidez à fluência, porém com maior porcentagem de recuperação que a mistura de referência. Ainda, foram obtidos menores valores do módulo de rigidez à tração indireta (ITSM) e maiores valores de resistência à tração indireta estática (ITS). Por fim, a reciclabilidade da mistura chamada de Plastiphalt foi possível, visto que obteve-se as mesmas propriedades mecânicas que a mistura original.

A partir dessa revisão da literatura foi possível perceber o grande potencial do uso de resíduos plásticos na pavimentação asfáltica. Muitos fatores podem influenciar no comportamento final dos ligantes modificados ou das misturas. No entanto, foi constatado que poucos autores identificaram o tamanho das partículas de plástico incorporadas, elemento que pode ser fundamental especialmente quando se trata de caracterização reológica, em que os ensaios possuem escala reduzida. Muitos estudos ainda precisam ser realizados, como indicado por alguns autores, principalmente no que se refere à estabilidade à estocagem dos ligantes modificados.

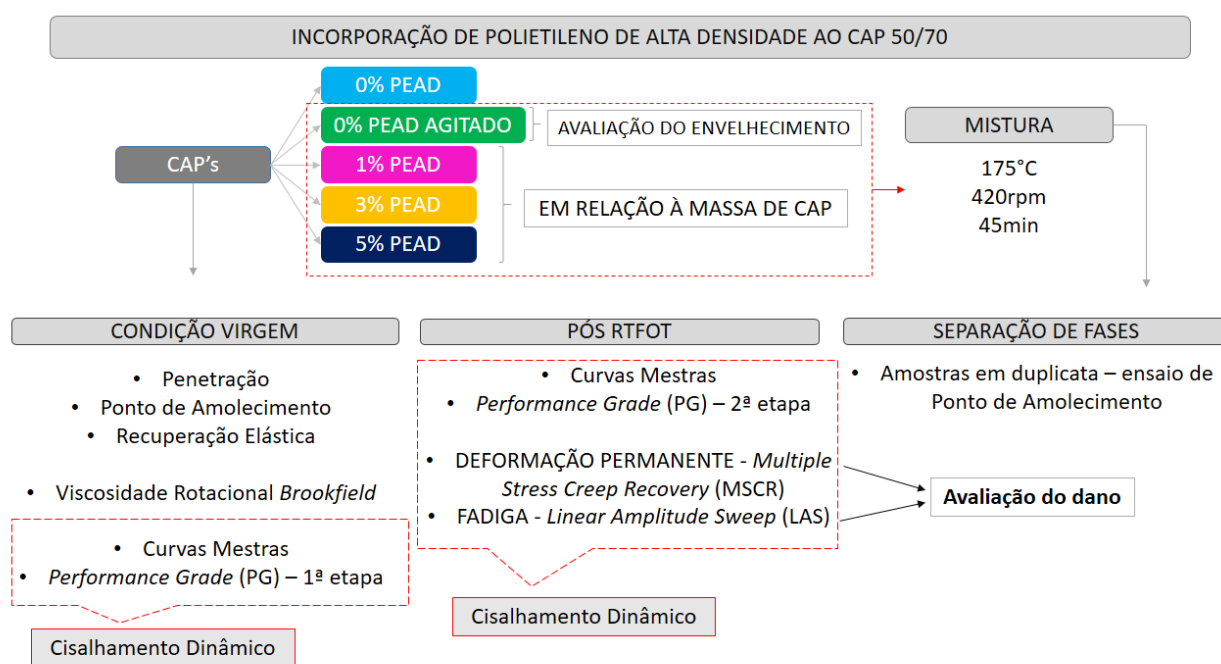
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo serão abordados os materiais utilizados na pesquisa, bem como o procedimento de obtenção do ligante modificado. Além disso, são apresentados os ensaios laboratoriais realizados para a caracterização do mesmo.

3.1 PLANEJAMENTO DA PESQUISA

A metodologia desta pesquisa pode ser observada pelo esquema da Figura 7. Todos os ensaios foram realizados no laboratório do Grupo de Estudos e Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV/UFSM).

Figura 7 - Esquema do programa experimental.



Fonte: Autora.

Foram estudados os teores de 1, 3 e 5% em relação à massa do CAP, levando em conta os resultados obtidos por outros autores, especialmente no que se refere aos problemas encontrados em teores muito elevados. Além disso, uma mesma quantidade de CAP foi submetida ao procedimento de mistura, sem a incorporação

de polietileno, para que pudesse ser observado o quão significativo era o envelhecimento causado pelo protocolo proposto. Nesta pesquisa, essa amostra foi denominada de “0% PEAD AGITADO”.

Na condição virgem, foram avaliadas propriedades físicas por meio de ensaios de Penetração, Ponto de Amolecimento e Recuperação Elástica. A resistência ao fluxo foi estudada a partir do ensaio de Viscosidade Rotacional utilizando o viscosímetro *Brookfield*. Ainda nessa condição, foi realizada a caracterização da rigidez obtendo-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 foi realizado utilizando a modelagem 2S2P1D e os ensaios foram feitos com auxílio do Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR).

O envelhecimento à curto prazo foi simulado utilizando a Estufa de Filme Fino Rotativo – RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*). Nessa condição, foram realizadas as mesmas etapas no reômetro descritas acima na condição virgem. Também foi avaliada a perda de massa, além dos ensaios de caracterização do dano: para deformação permanente, o ensaio de MSCR (*Multiple Stress Creep Recovery*) e para a fadiga, o ensaio de LAS (*Linear Amplitude Sweep*).

Por fim, sabe-se que o comportamento do ligante modificado pode ser alterado caso haja a separação das fases da mistura. Para avaliar esse fenômeno, foi executado o ensaio de separação de fases no CAP modificado virgem assim que este saía do processo de mistura, como será descrito em capítulos subsequentes.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste estudo foi utilizado o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70, proveniente da Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP), localizada na cidade de Canoas (RS). Esse foi o mesmo CAP utilizado por Possebon (2018) e Possebon (2021). As propriedades do CAP podem ser observadas na Tabela 6.

A modificação desse ligante foi realizada com o polietileno de alta densidade (PEAD) cedido pela empresa Videplast, com matriz localizada na cidade de Videira (SC). A pesquisa empregou o PEAD em formato de pellets (em torno de 4,6mm de diâmetro e 2,2mm de espessura), como pode ser observado na Figura 8.

O objetivo de utilizar essa forma de polietileno de alta densidade foi o de eliminar variáveis que pudessem provocar interferências no comportamento final do ligante modificado, como pigmentos ou resíduos em materiais reciclados pós-consumo. Não foi possível reduzir o tamanho das partículas de *pellets* utilizando equipamentos domésticos comuns, tão pouco com aquecimento em água, para tentativa de estudar granulometrias menores.

Tabela 6 - Propriedades do CAP 50/70 utilizado

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
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: Autora.

Figura 8 - *Pellets* de Polietileno de Alta Densidade.



(a)



(b)

Fonte: Autora.

3.3 PROCEDIMENTO DE MISTURA

A incorporação do polietileno de alta densidade no CAP 50/70 foi realizada por via úmida, por meio da adaptação de parafusadeira de bancada, conforme pode ser observado na Figura 9. Foi utilizada uma haste com tamanho suficiente para permitir que o processo de mistura fosse realizado na própria lata de ligante. Para melhor controle da temperatura, o procedimento foi realizado no interior da estufa aquecida.

Figura 9 - Parafusadeira adaptada para o procedimento de mistura.



Fonte: Autora.

A temperatura aplicada foi de 175°C, valor escolhido com base na literatura para misturas com o mesmo material, como forma de propiciar a fusão do polietileno, mas, ainda assim, não provocar excessivo envelhecimento do CAP. Para que esse valor fosse atingido, aproximadamente 600 gramas de ligante permaneceram por 2 horas em estufa a 175°C, após atingida a temperatura na mesma. Foi realizada a agitação manual de tempos em tempos durante esse período, para garantir que toda a massa de CAP atingisse a temperatura de 175°C.

Todos os teores foram misturados em 600 gramas de ligante como forma de obter-se uma padronização no processo de mistura, além de garantir que as

extremidades da haste fossem cobertas. Após o CAP atingir a temperatura, eram adicionados os *pellets* de PEAD com agitação manual, e a mistura permanecia por 20 minutos em estufa para reestabelecer o equilíbrio da temperatura.

A rotação foi mantida em 420rpm, valor obtido com o auxílio de um tacômetro a *laser*. Esse valor foi escolhido após tentativas em amostras de teste, na qual se buscava a rotação suficiente para promover a mistura satisfatória dos materiais sem provocar derramamento do ligante.

Inicialmente as amostras de teste foram submetidas a um tempo de mistura de 30 minutos, com o objetivo de minimizar o processo de envelhecimento, visto que a agitação do ligante a altas temperaturas faz com que uma maior parte da massa do CAP entre em contato com o ar e a temperatura, sofrendo oxidação e evaporação. No entanto, observou-se que o PEAD apenas havia sofrido um inchamento, não sendo suficiente para se misturar de maneira satisfatória ao CAP. Ao final dos testes, foi definido um tempo total de 45 minutos de mistura, já que tempos superiores visualmente não geraram mudanças. Previamente às moldagens, a mistura era finalizada manualmente para evitar a excessiva heterogeneidade das amostras.

3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CAP MODIFICADO

Os ensaios laboratoriais realizados para a caracterização do ligante modificado com polietileno de alta densidade são descritos nos itens subsequentes. Os capítulos estão divididos em ensaios convencionais, reológicos e ensaio de separação de fases, para melhor compreensão.

3.4.1 Ensaios Convencionais

As propriedades físicas foram avaliadas por meio dos ensaios de Penetração, Ponto de Amolecimento e Recuperação Elástica, todos na condição virgem, e os procedimentos estão descritos a seguir.

3.4.1.1 Penetração

O ensaio de Penetração foi realizado segundo a norma DNIT 155/2010 - ME, e representa uma medida de dureza do CAP. O ensaio mede a profundidade, em

décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra na amostra a 25°C, por 5 segundos, à temperatura de 25°C. O resultado final é a média aritmética de 3 medições. Ligantes mais consistentes apresentam menores valores de penetração. As amostras e o equipamento utilizado são apresentados na Figura 10.

Figura 10 - Ensaio de Penetração. (a) Penetrômetro manual. (b) Amostras do ensaio.



Fonte: Autora.

3.4.1.2 Ponto de Amolecimento

O ensaio de Ponto de Amolecimento, também conhecido como Anel e Bola, seguiu a norma DNIT 131/2010 – ME (Figura 11). Duas amostras do mesmo material foram colocadas em um banho de monoetilenoglicol, suportando pequenas esferas de aço. O conjunto é aquecido a uma taxa controlada de 5°C/minuto, e a temperatura é anotada quando a esfera atravessa a amostra e toca o suporte na parte inferior. O ponto de amolecimento é uma medida empírica que correlaciona a temperatura na qual o asfalto atinge uma determinada condição de escoamento.

Figura 11 - Ensaio de Ponto de Amolecimento.



Fonte: Autora.

3.4.1.3 Recuperação Elástica

O ensaio de recuperação elástica seguiu o procedimento descrito na norma DNIT 130/2010 - ME. Nesse ensaio uma amostra a 25°C é submetida a um estiramento de 5cm/min. Após atingir 20cm de estiramento, as amostras são cortadas no ponto médio e permanecem em repouso por 60 minutos. Ao final do período é medida a recuperação do material. Materiais modificados com polímeros possuem maiores valores de recuperação após o estiramento. O ensaio descrito é mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Ensaio de Recuperação Elástica.



Fonte: Autora.

3.4.2 Ensaios Reológicos

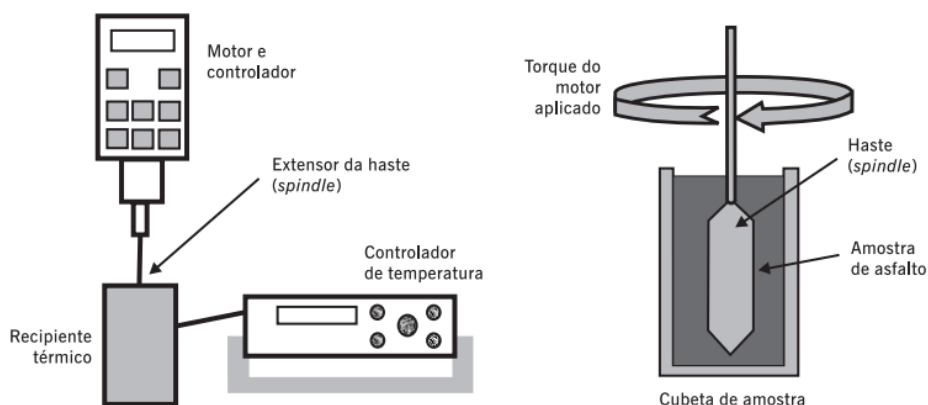
As propriedades reológicas foram avaliadas por meio da viscosidade rotacional e cisalhamento dinâmico (caracterização da rigidez e do dano). Os ensaios são descritos a seguir.

3.4.2.1 Viscosidade Rotacional *Brookfield*

Uma das características principais utilizadas na especificação de ligantes asfálticos é a resistência ao fluxo, medida por meio de ensaios de viscosidade. A determinação da consistência do CAP em diferentes temperaturas é necessária, visto que o mesmo deve ser estocado e manuseado sempre à temperatura mais baixa possível, para que possua apenas a fluidez suficiente para bombeamento, mistura e compactação adequados.

A medida da viscosidade *Brookfield* seguiu as normas AASHTO T 316–19 e ABNT NBR 15184 - 2021, sendo utilizado esse equipamento por permitir a obtenção da curva viscosidade-temperatura em ampla faixa de determinação com a mesma amostra, por meio do torque de uma haste (*spindle*) imersa no CAP (Figura 13). Foram utilizados *spindle* nº 21 para o CAP sem polietileno e *spindle* nº 27 para o CAP modificados. As rotações foram de 20, 50 e 100rpm para as temperaturas de 135, 150 e 177°C, respectivamente. O equipamento utilizado nesta pesquisa é mostrado na Figura 14.

Figura 13 - Esquema de funcionamento de um viscosímetro *Brookfield*.



Fonte: Bernucci et al., 2010.

Figura 14 - Viscosímetro *Brookfield* utilizado na pesquisa.



Fonte: Autora.

3.4.2.2 Envelhecimento de curto prazo e perda de massa

A estufa de filme fino rotativo ou película delgada rotacional (*Rolling Thin Film Oven Test*) busca simular o envelhecimento por oxidação e evaporação que ocorre durante as fases de usinagem, transporte, espalhamento e compactação das misturas asfálticas, sendo o ensaio realizado segundo as normas AASHTO T 240-21 e ABNT NBR 15235/2009.

Foram vertidos 35 gramas de asfalto em vidros padronizados, de maneira a formar uma fina película. As amostras continuamente giradas dentro da estufa (Figura 15) a 163°C por 85 minutos, com uma injeção de ar quente de 4000ml/min diretamente dentro do frasco. Também é possível obter a perda de massa do ligante por meio da equação:

$$\Delta M, \% = \frac{M_{\text{inicial}} - M_{\text{final}}}{M_{\text{inicial}}} * 100$$

Onde:

M_{inicial} = massa antes do ensaio RTFOT

M_{final} = massa após o ensaio RTFOT

Figura 15 - Estufa de filme fino rotativo (RTFOT) (a) fechada e (b) com as amostras.

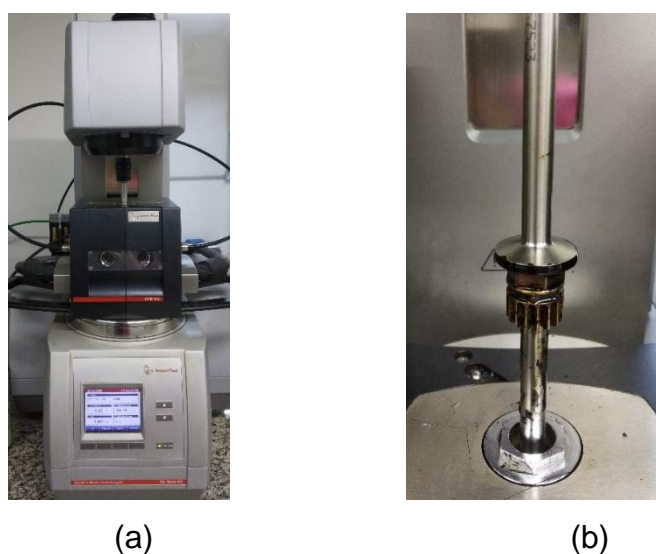


Fonte: Autora.

3.4.2.3 Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)

O reômetro de cisalhamento dinâmico (*dynamical shear rheometer – DSR*) é um equipamento que auxilia a caracterizar as propriedades viscoelásticas do ligante (Figura 16). Pequenas amostras de CAP são submetidas a tensões de cisalhamento oscilatórias entre duas placas paralelas, e a varredura de frequências e temperaturas predeterminadas permite a obtenção de parâmetros de rigidez e de dano do material.

Figura 16 - Reômetro de Cisalhamento Dinâmico. (a) Equipamento em funcionamento. (b) Amostra entre as placas paralelas.



Fonte: Autora.

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

Para obter as características de rigidez dos CAP's modificados com PEAD em diversas frequências, foram obtidos valores módulo complexo de cisalhamento (G^*) e de ângulo de fase (δ) por meio da construção das curvas mestras (AASHTO T 315-20). Além disso, foram gerados o plano Cole-Cole e o Espaço Black, como discutidos anteriormente.

Foram utilizadas as geometrias de 8 e 25mm para a execução do ensaio nas baixas e altas temperaturas, respectivamente. As temperaturas do teste são: 5, 15, 25, 35, 45, 55 e 65°C. Nos ligantes modificados com PEAD estendeu-se o teste até 75°C, como forma de captar a maior variação de comportamento nessa faixa. As frequências crescem em uma rampa logarítmica de 0,1 e 30Hz. A análise posterior foi feita a partir da frequência de 10rad/s (1,59Hz) simulando uma velocidade de tráfego de aproximadamente 90km/h.

3.4.2.3.2 *Performance Grade (PG)*

Executando procedimento similar ao descrito acima, em uma segunda amostra de 25mm, mas variando a temperatura em classes de 6°C, foi obtido o PG de alta segundo a metodologia descrita na norma AASHTO R 29-15 (2019). Também foi utilizada a classificação por classes de tráfego proposta na norma AASHTO M 332 - 21 (Tabela 7). Na condição virgem, o PG foi reportado como a menor temperatura em que o valor de $|G^*|/\text{sen}\delta$ supera 1,00kPa. Já após o envelhecimento em RTFOT, esse valor deve superar 2,20kPa.

Esse processo também caracteriza o estudo da rigidez do material, e permite classificar os ligantes de acordo com o seu grau de desempenho descrito nas referidas normas. Assim, é possível saber qual a maior temperatura suportada em campo pelos CAP's.

3.4.2.3.3 *Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)*

Após a caracterização da rigidez, foram realizados ensaios que saem do domínio viscoelástico linear e provocam dano no material. Com a amostra de 25mm e pós-envelhecimento, foi realizado o ensaio de MSCR (*Multiple Stress Creep*

Recovery) segundo as normas AASHTO T 350-19 e DNIT 423/2020 - ME, para entender o comportamento do ligante frente à deformação permanente.

Nesse ensaio, a amostra é submetida a ciclos de carregamento durante 1 segundo e repouso durante 9 segundos, repetindo esse processo em 20 ciclos a 0,1kPa e 10 ciclos a 3,2kPa. O ensaio foi realizado na temperatura do PG de alta de cada ligante, e também a 64°C como forma de permitir a comparação entre os teores. Foram posteriormente calculados os valores de compliância não-recuperável (J_{nr}) em kPa^{-1} e de percentual de recuperação (R). Por fim, foram geradas as curvas de deformação cisalhante ao longo do tempo para auxiliar na comparação entre os CAP's.

Tabela 7 - Classificação MSCR quanto às classes de tráfego.

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

Fonte: Adaptado da norma AASHTO M 332 - 21.

3.4.2.3.4 Linear Amplitude Sweep (LAS)

Seguindo os procedimentos descritos na norma AASHTO TP 101 - 12, foi realizado o ensaio de LAS (*Linear Amplitude Sweep*) para avaliar o comportamento dos ligantes frente ao fenômeno de fadiga, na temperatura de 19°C, ainda na fase de danificação do material. A primeira etapa do ensaio consistiu em realizar o *frequency sweep* para obter as propriedades reológicas, empregando um carregamento de 0,1% de deformação e uma varredura de frequências de 0,2 a 30Hz.

Em seguida, foi realizado o teste de *amplitude sweep* para avaliar propriamente as características de dano do material. Foi aplicada uma frequência de 10Hz e carregamento em uma rampa linear de zero a 30% ao longo de 3.100 ciclos. A avaliação da falha foi realizada utilizando três critérios distintos.

A compreensão do comportamento à fadiga dos materiais requer o uso de modelos que levem em consideração a estrutura do pavimento, representada pela amplitude de carregamento aplicada, e o tráfego, representado pelo número de ciclos necessários para que ocorra a falha (HINTZ, 2012). O ajuste desse modelo para cada

material depende de parâmetros de fadiga obtidos em ensaios com várias amplitudes de carregamento.

Para simplificar esse processo, foi desenvolvida a teoria viscoelástica do dano contínuo (VECD), que permitiu prever a vida de fadiga em qualquer amplitude de carregamento utilizando apenas um ensaio (DANIEL; KIM, 2002; LEE; KIM, 1998; PARK; KIM; SCHAPERLY, 1996).

Posteriormente a teoria antes utilizada em misturas foi estendida para ligantes asfálticos (HINTZ et al., 2011; JOHNSON, 2010). Por essa teoria, $|G^*|sen\delta$ é utilizado como o parâmetro de integridade do material, sendo que sua relação com o dano (D) é dada pelo modelo de potência:

$$|G^*|sen\delta = C_0 - C_1(D)^{C_2} \quad (1)$$

Onde C_0 , C_1 e C_2 são os coeficientes do modelo. Por meio do desenvolvimento dessa teoria, que se encontra detalhada nos trabalhos citados, encontra-se a vida de fadiga do material pela relação:

$$N_f = A(\gamma_{m\acute{a}x})^B \quad (2)$$

Onde:

N_f = Número de ciclos na ruptura, ciclos;

$\gamma_{m\acute{a}x}$ = Amplitude de deformação, %;

A, B = Parâmetros do ligante.

Com essa teoria, é possível obter a curva de integridade *versus* dano do material (Equação 1), e a curva de fadiga (Equação 2). Além disso, para comparação entre os ligantes, foi calculado o Fator de Fadiga do Ligante a 19°C (FFL_{19°C}) proposto por Martins (2014), representado pela área abaixo da curva de fadiga entre as deformações de 1,25% e 2,5%. Quanto maior esse valor, maior a resistência à fadiga do material.

Nascimento (2021) propôs limites para a classificação dos ligantes de acordo com o FFL_{19°C}, como pode ser observado na Tabela 8. Esses limites partiram da análise de uma considerável base de dados da Petrobras, e também foram utilizados

por Possebon (2021), ao realizar a caracterização avançada de misturas e ligantes asfálticos.

Tabela 8 - Classificação de Nascimento (2021) de acordo com o $FFL_{19^{\circ}C}$.

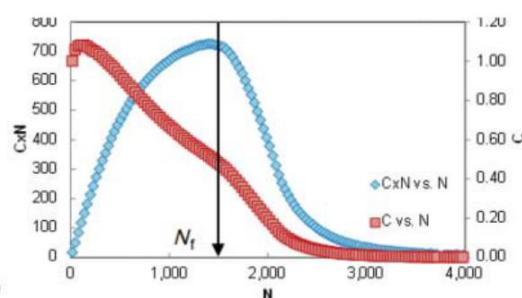
Classes	$FFL_{19^{\circ}C}$
1 - Pobre	$FFL < 1,22$
2 - Inferior	$1,22 < FFL < 1,31$
3 - Mediano	$1,31 < FFL < 1,48$
4 - Superior	$1,48 < FFL < 1,57$
5 - Excelente	$FFL > 1,57$

Fonte: Adaptado de NASCIMENTO (2021).

O segundo critério utilizado para comparar os CAP's foi a obtenção do parâmetro a_f , que representa o tamanho da fissura na ruptura. Esse valor é calculado por equações que levam em conta a variação do torque no ensaio e a redução do raio efetivo da amostra, além de considerar a rigidez inicial e a altura constantes (HINTZ; BAHIA, 2013; MARTINS, 2014). Em seguida é obtida a relação entre a taxa de crescimento da fissura a cada ciclo (da/dN) *versus* o tamanho da fissura (a). O valor de a_f é adotado no ponto mínimo entre os dois picos dessa curva. O primeiro pico representa a iniciação da fissura, e o segundo mostra a formação da macrotrinca. Nesse ponto também percebe-se que a resistência ao carregamento cai drasticamente (representada pelo torque).

Por fim, foi utilizado o critério de falha por fadiga proposto por Safari et al. (2014). Por esse critério, a falha em ligantes asfálticos é obtida pelo pico da curva $C*N$ *versus* N , na qual C é a integridade do material e N é o número de ciclos decorridos. Esse ponto marca uma redução acentuada na taxa de perda de integridade do material, sendo considerada pelos autores como uma definição de falha lógica. O momento da falha pode ser melhor observado na Figura 17.

Figura 17 - Momento da falha por fadiga pelo critério C *versus* N .



Fonte: Safari et al. (2014).

3.4.3 Ensaio de separação de fases

O ensaio de separação de fases foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 15166:2004, e é empregado para quantificar a estabilidade à estocagem de ligantes modificados. O ensaio foi realizado em duplicata, vertendo-se 50 gramas do CAP em tubos metálicos padronizados, que permaneceram na vertical por 48 horas no interior da estufa à 163°C.

Após esse período, o ligante foi imediatamente congelado por 4 horas. Realizou-se o ensaio de ponto de amolecimento do topo e da base das amostras, para verificar se houve diferença significativa. Os tubos utilizados podem ser observados na Figura 18.

Figura 18 - Tubos metálicos do ensaio de separação de fases.



Fonte: Autora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão abordados os resultados obtidos nas análises de propriedades físicas e reológicas dos CAP's convencional, agitado e modificado com 3 teores de polietileno de alta densidade.

4.1 PROCESSO DE INCORPORAÇÃO DO PEAD

Inicialmente, ao executar um tempo de mistura de 30 minutos nas condições já abordadas, observou-se apenas uma pequena dilatação do polietileno, que ainda permanecia em grande parte suspenso no CAP. Outra amostra de teste foi submetida a 45 minutos de mistura, e a análise visual mostrava que menos partículas de PEAD estavam em suspensão, indicando que parte do material havia se fundido à matriz do ligante. Essa verificação só foi confirmada com ensaios posteriores. Ainda assim, uma parcela do PEAD permaneceu em suspensão na amostra. A extensão do tempo de mistura para 1 hora não trouxe modificações visuais à mistura.

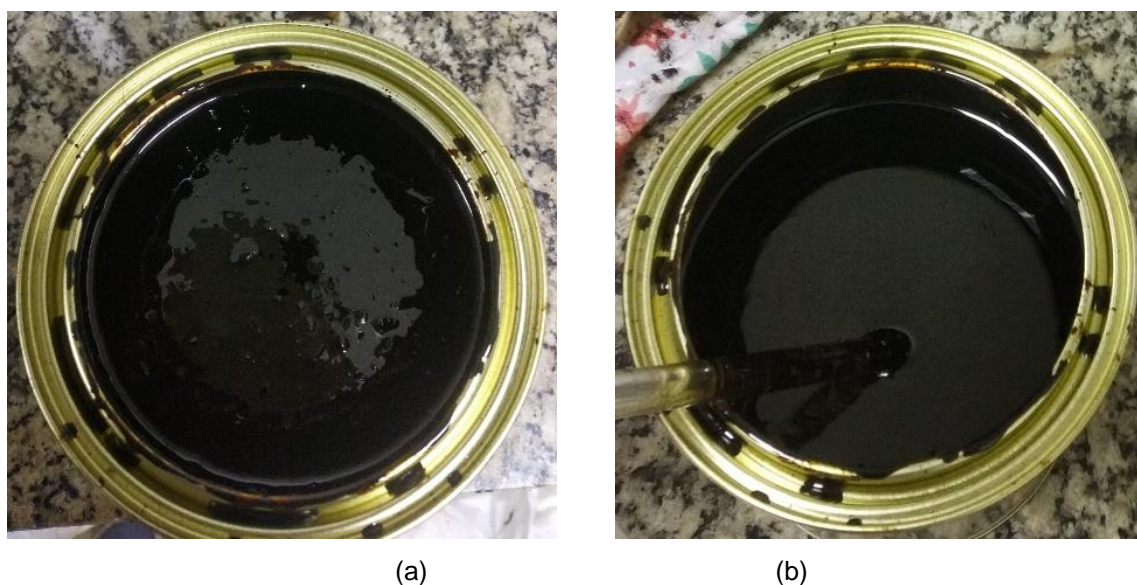
A parcela de PEAD que permaneceu apenas expandida poderia causar excessiva heterogeneidade nas amostras, principalmente levando em consideração a pequena escala das mesmas. Por esse motivo, a mistura foi finalizada com agitação manual (Figura 19). Para tornar a moldagem de amostras mais precisa, a mistura foi vertida da lata para um Becker. No entanto, foi observado que as misturas finais permaneciam com grande instabilidade, tanto pela segregação do material em alta temperatura, quanto pela característica apresentada pelo polietileno de agrupar-se em cadeias maiores com a queda da temperatura. Para contornar essa questão, o Becker foi mantido em alta temperatura para adiar o resfriamento do CAP modificado, além de ser mantida a agitação antes da moldagem de todas as amostras.

Além disso, as amostras para os ensaios no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico foram moldadas imediatamente após o desligamento do misturador, tendo em vista a grande importância dos ensaios realizados nesse equipamento, bem como buscando-se evitar nessas amostras o derramamento do polietileno expandido. As amostras, nesse caso, possuem apenas 8 e 25mm, e os pedaços de polietileno poderiam fornecer resultados distorcidos, como será discutido mais adiante.

Cabe ressaltar, ainda, que todas as moldagens foram realizadas imediatamente após a mistura do PEAD no ligante asfáltico. Não foi possível o aquecimento de

misturas previamente misturadas, pois não houve nova dispersão do polietileno. As cadeias do material formadas após o resfriamento permaneciam segregadas do CAP, o que poderia gerar amostras pouco representativas dos teores selecionados.

Figura 19 - CAP + PEAD (a) Ao final da mistura com a parafusadeira. (b) Finalizada com agitação manual.



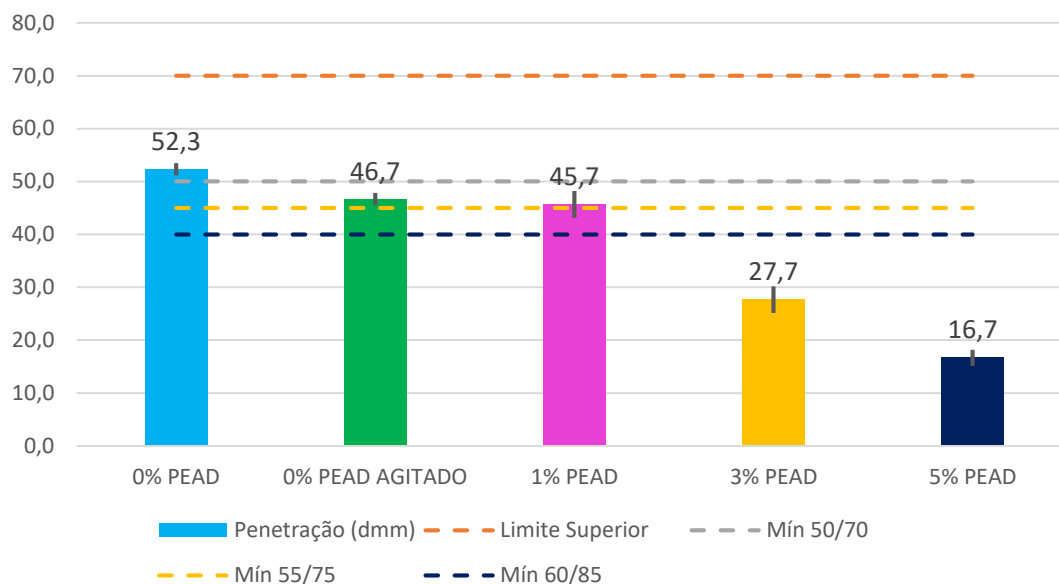
Fonte: Autora.

4.2 ENSAIOS CONVENCIONAIS

4.2.1 Penetração

A Figura 20 apresenta os valores encontrados para a penetração dos teores propostos. Os resultados foram comparados com os limites de asfaltos modificados por polímero elastômero, das classes 55/75 e 60/85 (DNIT 129/2011- EM). A incorporação de polietileno de alta densidade provocou significativa redução nos valores de penetração. Esse resultado era esperado, tendo em vista os resultados encontrados na literatura a respeito do enrijecimento desse tipo de CAP modificado.

Figura 20 - Resultados de penetração.



Fonte: Autora.

O ligante que passou pelo procedimento de mistura sem a incorporação de polietileno apresentou valor semelhante de penetração quando comparado ao teor de 1%. Esse resultado pode sugerir que a modificação do ligante com esse material pode retardar o processo de envelhecimento ou que o teor de 1% causa pouco efeito na penetração, conclusão que somente pode ser confirmada a partir de análises químicas mais detalhadas. Outro motivo para sustentar essa observação é de que o enrijecimento nesse teor pode ser devido predominantemente devido ao protocolo de mistura, como será analisado mais adiante neste trabalho. Esses mesmos materiais ficaram acima do limite sugerido para o AMP 55/75, indicando um comportamento semelhante quanto a essa medida de “dureza” do CAP.

Os teores de 3 e 5% ficaram significativamente abaixo do proposto para asfaltos modificados por polímero. No entanto não se pode afirmar que esse enrijecimento inviabilize o uso dos teores mais altos, visto que essa inferência depende de análises do comportamento reológico e de previsões de desempenho da mistura em campo (a depender, dentre outros fatores, da estrutura de pavimento empregada e do local de implantação da rodovia).

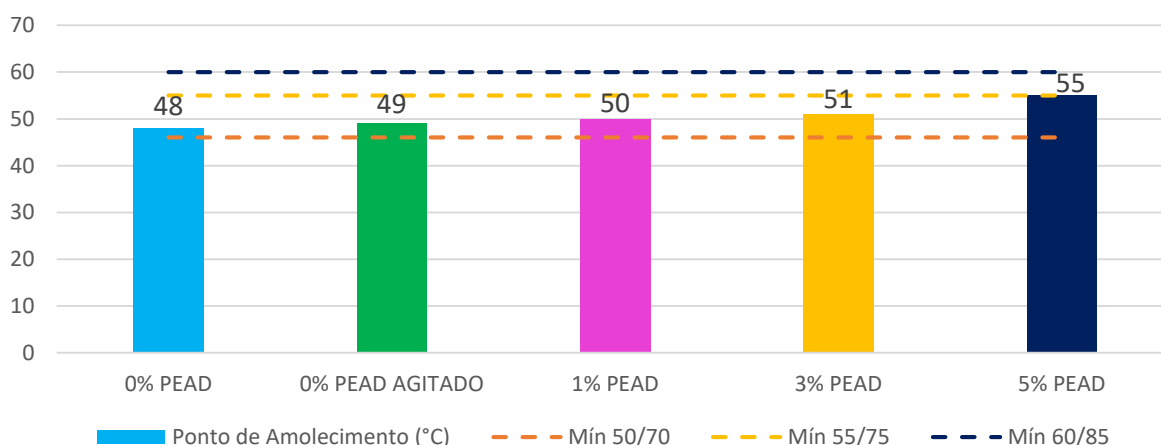
As barras de erro mostradas na Figura 20 foram calculadas considerando o desvio padrão dos resultados. Cabe ressaltar que no momento das medições buscou-

se evitar a penetração da agulha nos pedaços de polietileno que não haviam se fundido no CAP, tendo em vista que conduziam a valores excessivamente baixos e pouco representativos da penetração. Por esse motivo, todas as medidas ficaram bastante próximas à média.

4.2.2 Ponto de Amolecimento

Os resultados de ponto de amolecimento podem ser observados na Figura 21. Os resultados também foram comparados com os mínimos sugeridos para o CAP 50/70, AMP 55/75 e AMP 60/85. Esse é um ensaio que possui boa correlação com a resistência do CAP à deformação permanente em altas temperaturas.

Figura 21 - Resultados de Ponto de Amolecimento.



Fonte: Autora.

A análise dos resultados mostrou um leve aumento na temperatura do ponto de amolecimento com o aumento do teor de PEAD, sendo que, exceto o teor de 5%, o restante permaneceu acima do valor mínimo de 46°C para o CAP 50/70 e abaixo dos mínimos para os asfaltos modificados por polímero. O teor de 5% atingiu o valor de ponto de amolecimento do AMP 55/75, indicando possivelmente um melhor comportamento frente à deformação permanente nas altas temperaturas.

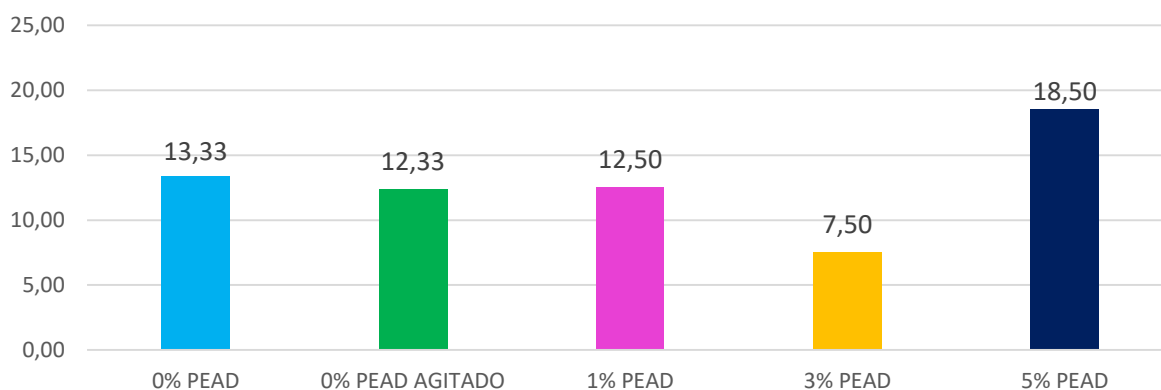
Novamente o CAP que apenas passou pelo processo de mistura se aproximou do teor de 1%, no entanto os teores apresentaram valores próximos inclusive ao CAP

convencional. Nesse ensaio também evitou-se a incorporação dos pedaços de polietileno em suspensão, tendo em vista a pequena escala da amostra. Por esse motivo, nenhum teor apresentou diferença de resultado entre as duas amostras utilizadas no ensaio.

4.2.3 Recuperação Elástica

O ensaio de recuperação elástica é uma medida empírica que permite rapidamente identificar a presença de polímero no CAP, e os resultados podem ser observados na Figura 22. Esse não foi um ensaio considerado adequado para as misturas com polietileno de alta densidade, tendo em vista que as amostras apresentaram grande heterogeneidade, especialmente pela presença dos pedaços de polietileno em suspensão. A situação descrita para os teores de 3 e 5% pode ser melhor observada na Figura 23.

Figura 22 - Resultados de Recuperação Elástica.

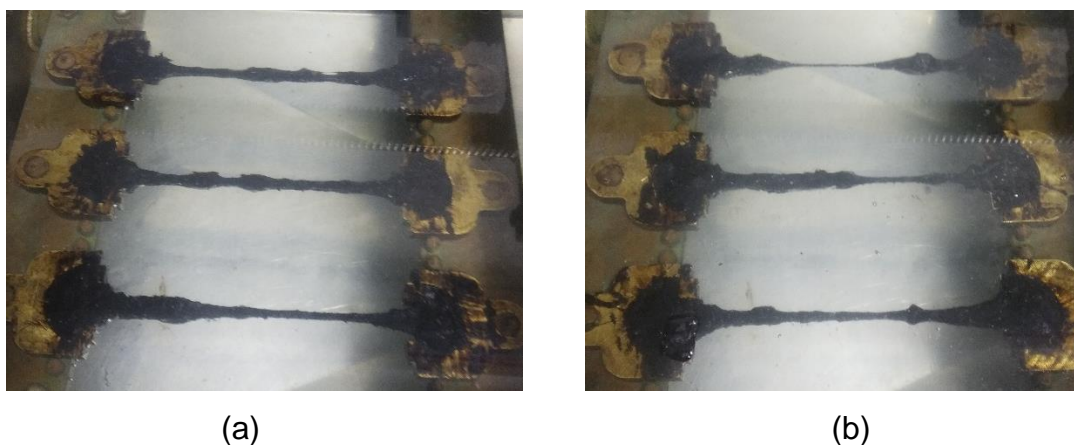


Fonte: Autora.

Não foi possível controlar a quantidade de pedaços de polietileno entre as três amostras para que mantivessem comportamentos similares, além de terem dificultado o processo de arrasamento do material nos moldes. O valor encontrado de recuperação elástica para o teor de 3% pode ser explicado por esses problemas. No entanto, o teor de 5% mostrou um salto significativo no valor da recuperação após o estiramento da amostra.

Esse resultado sugere que a inserção de polietileno confere maiores propriedades elásticas ao CAP modificado. No entanto, este é um ensaio que, como já reportado na literatura, tem apresentado pouca relação com o desempenho da mistura asfáltica final. Além disso, também já foram mencionadas dificuldades na execução do ensaio por outros autores, como Specht (2004) que utilizou um ductilômetro para ensaiar o CAP modificado por borracha.

Figura 23 - Heterogeneidade das amostras no ensaio de Recuperação Elástica. (a) 3% de PEAD. (b) 5% de PEAD.



Fonte: Autora.

4.3 ENSAIOS REOLÓGICOS

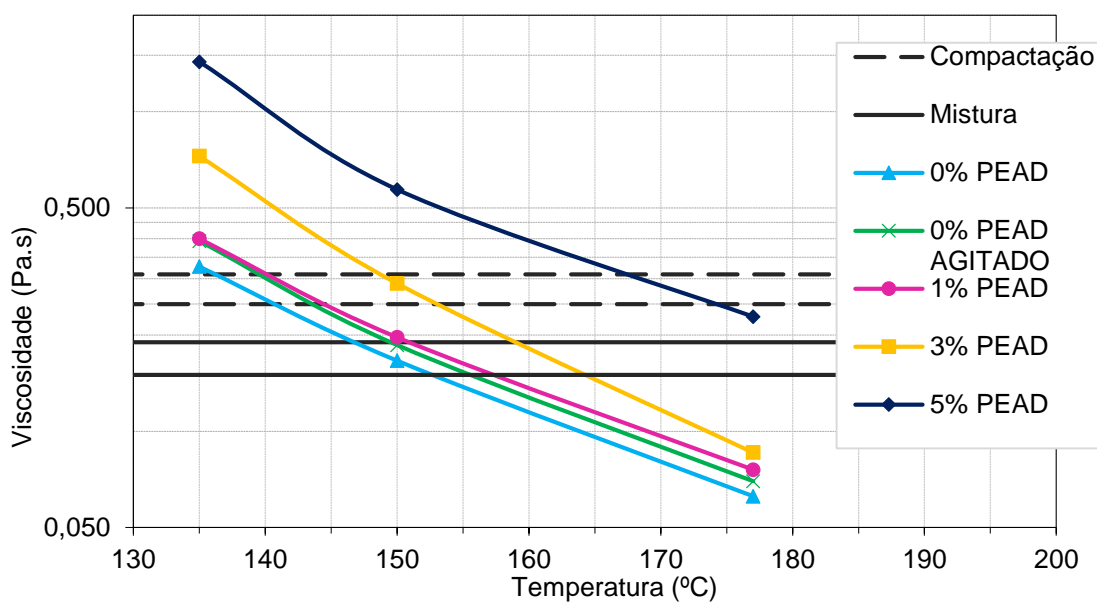
4.3.1 Viscosidade Rotacional Brookfield

A plotagem dos resultados de viscosidade em função das temperaturas testadas (135, 150 e 177°C) pode ser observada na Figura 24, em escala logarítmica para melhor visualização. A incorporação de 1% de polietileno de alta densidade não provocou significativo aumento de viscosidade. No entanto, os teores de 3 e 5% acarretaram em um salto nos valores observados, confirmando que a incorporação desse material ao CAP aumenta consideravelmente sua viscosidade.

As faixas de viscosidade adequadas para mistura e compactação estão assinaladas no gráfico. Sua análise indica que são necessárias temperaturas mais elevadas que as usuais para se obter a trabalhabilidade apropriada para o

envolvimento dos agregados na mistura asfáltica, bem como para garantir uma compactação satisfatória nos teores mais altos de polietileno.

Figura 24 - Resultados de Viscosidade Brookfield.



Fonte: Autora.

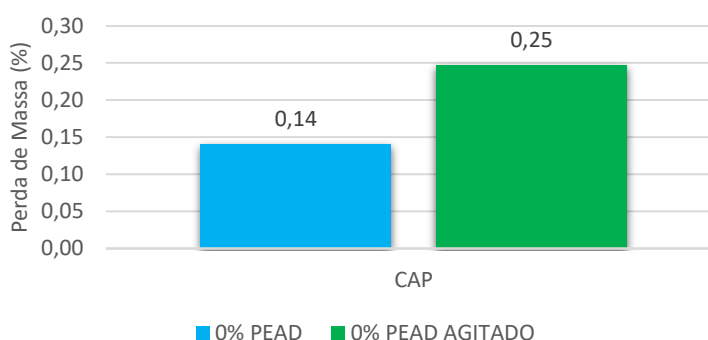
É importante destacar que, da mesma maneira que no restante dos ensaios, a maior ou menor presença de pedaços de polietileno expandido pode ter interferência na leitura dos resultados, o que pode explicar o salto encontrado no teor de 5%. O aumento do teor de PEAD também provocou grande variação nos valores de viscosidade lidos pelo equipamento. Esse fenômeno pode estar relacionado ao comportamento do polietileno frente ao resfriamento, como mencionado anteriormente. O reaquecimento, nesse caso, pode não ter garantido sua dispersão no CAP, impedindo a leitura precisa ao aplicar o torque no *spindle*.

As especificações para asfaltos modificados por polímero (AMP) indicam valores máximos de viscosidade de 3000, 2000 e 1000 centipoise para as temperaturas de 135, 150 e 177°C, respectivamente. Nesse sentido, todos os teores apresentaram valores abaixo dos especificados para AMP, sendo que 1 centipoise equivale a 0,001Pa.s.

4.3.2 Perda de massa

O envelhecimento de amostras na estufa de filme fino rotativo (RTFOT) para quantificar o efeito do calor e do ar na degradação e redução da matéria foi realizado em todas as amostras, pois esse efeito pode alterar a composição e as propriedades reológicas dos materiais. Nesse sentido, só foi possível avaliar com precisão os valores de perda de massa dos CAP's sem incorporação de polietileno. Os resultados podem ser observados na Figura 25.

Figura 25 - Resultados de Perda de Massa.



Fonte: Autora.

Os resultados encontrados foram comparados com a especificação do CAP 50/70 convencional da norma DNIT 095/2006 - EM. Ambos ficaram abaixo do valor de 0,5% de variação de massa sugerido pela mesma. No entanto, não foi possível realizar a pesagem precisa dos CAP's modificados com polietileno de alta densidade pois houve derramamento de material. Essa questão já tem sido reportada na literatura para ligantes altamente modificados por polímero ou por borracha (SHALABY, 2002).

4.3.3 Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR)

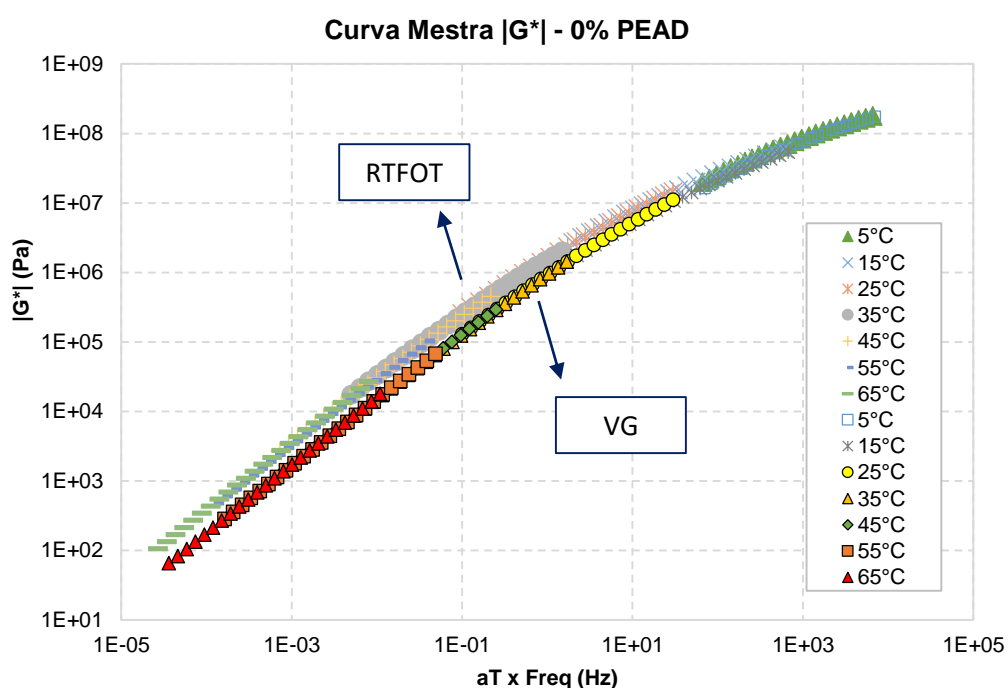
4.3.3.1 Curvas Mestras, Espaço Black e plano Cole-Cole

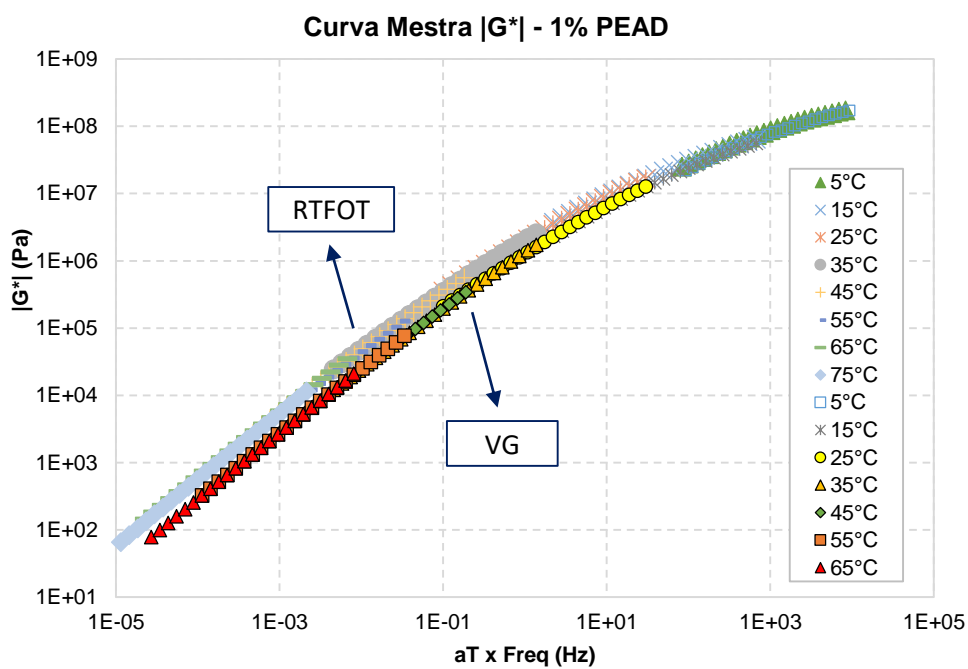
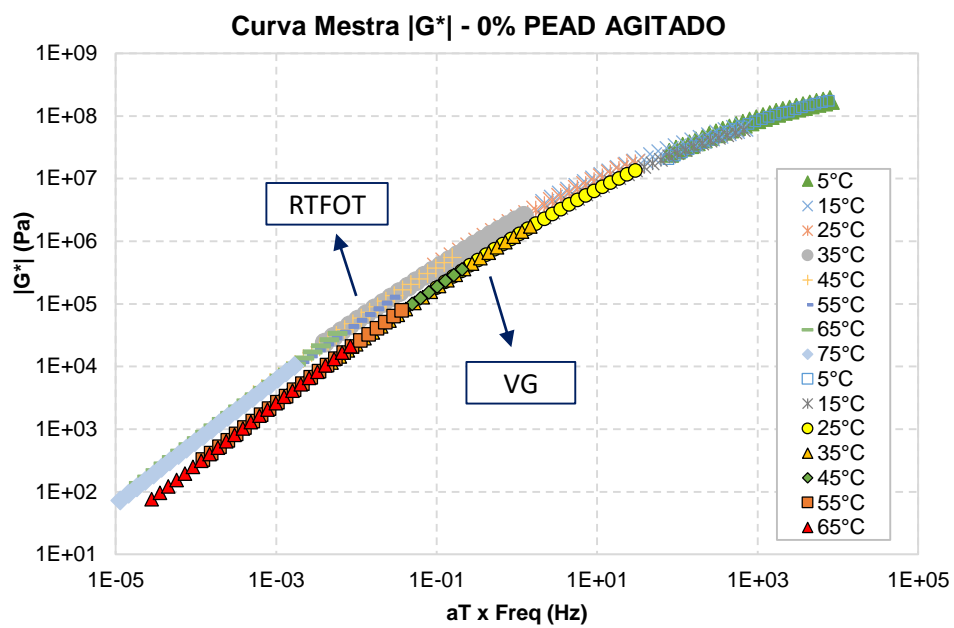
A análise do efeito da incorporação do polietileno de alta densidade na rigidez do ligante asfáltico iniciou com a obtenção das curvas mestras de cada material, com

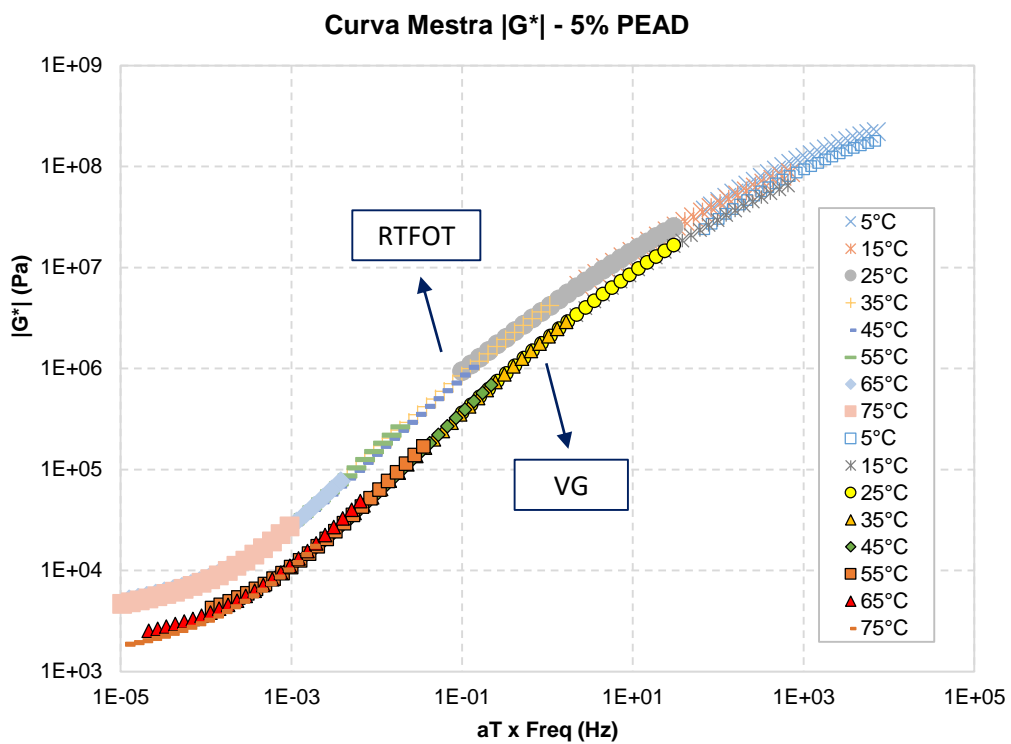
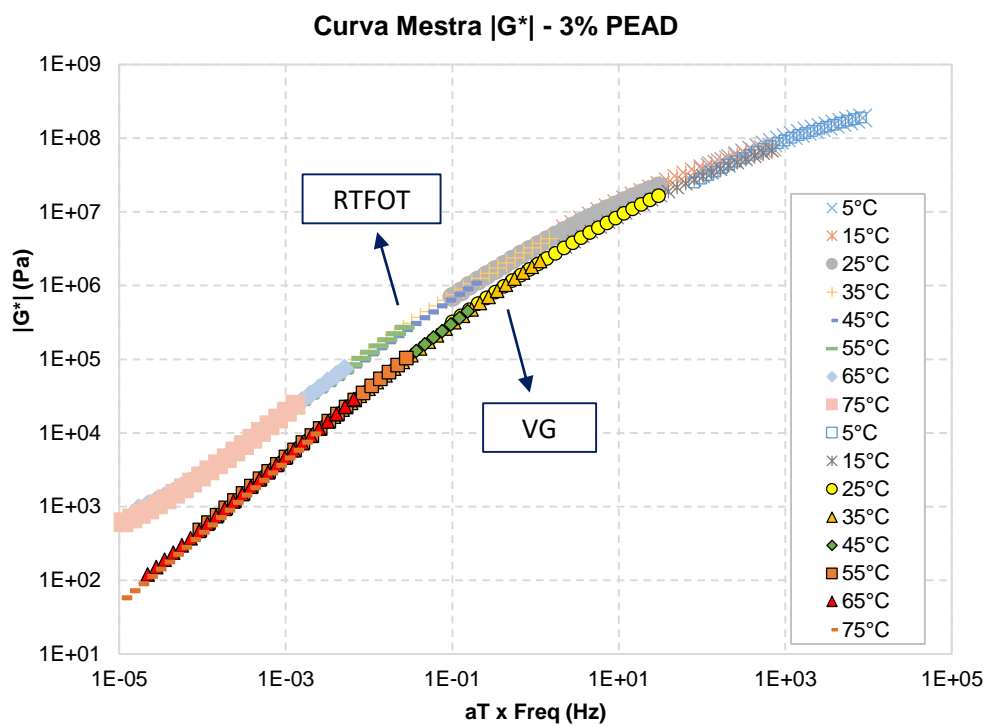
base no princípio da superposição tempo-temperatura. As frequências foram multiplicadas por *shift factors*, de maneira a transladar os dados de módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase até a temperatura de referência escolhida de 25°C.

A aplicação do princípio da superposição tempo-temperatura, como discutido anteriormente, é realizada para materiais termoreologicamente simples, de forma que é possível construir uma curva contínua ao deslocar lateralmente os resultados obtidos em cada temperatura. As curvas mestras com os pontos experimentais de módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase podem ser observadas nas Figuras 26 e 27. Para melhor visualização, as curvas mestras foram apresentadas separadamente entre os diferentes teores, sendo que as de ângulo de fase foram ainda divididas entre as condições virgem e após RTFOT.

Figura 26 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico - pontos experimentais.

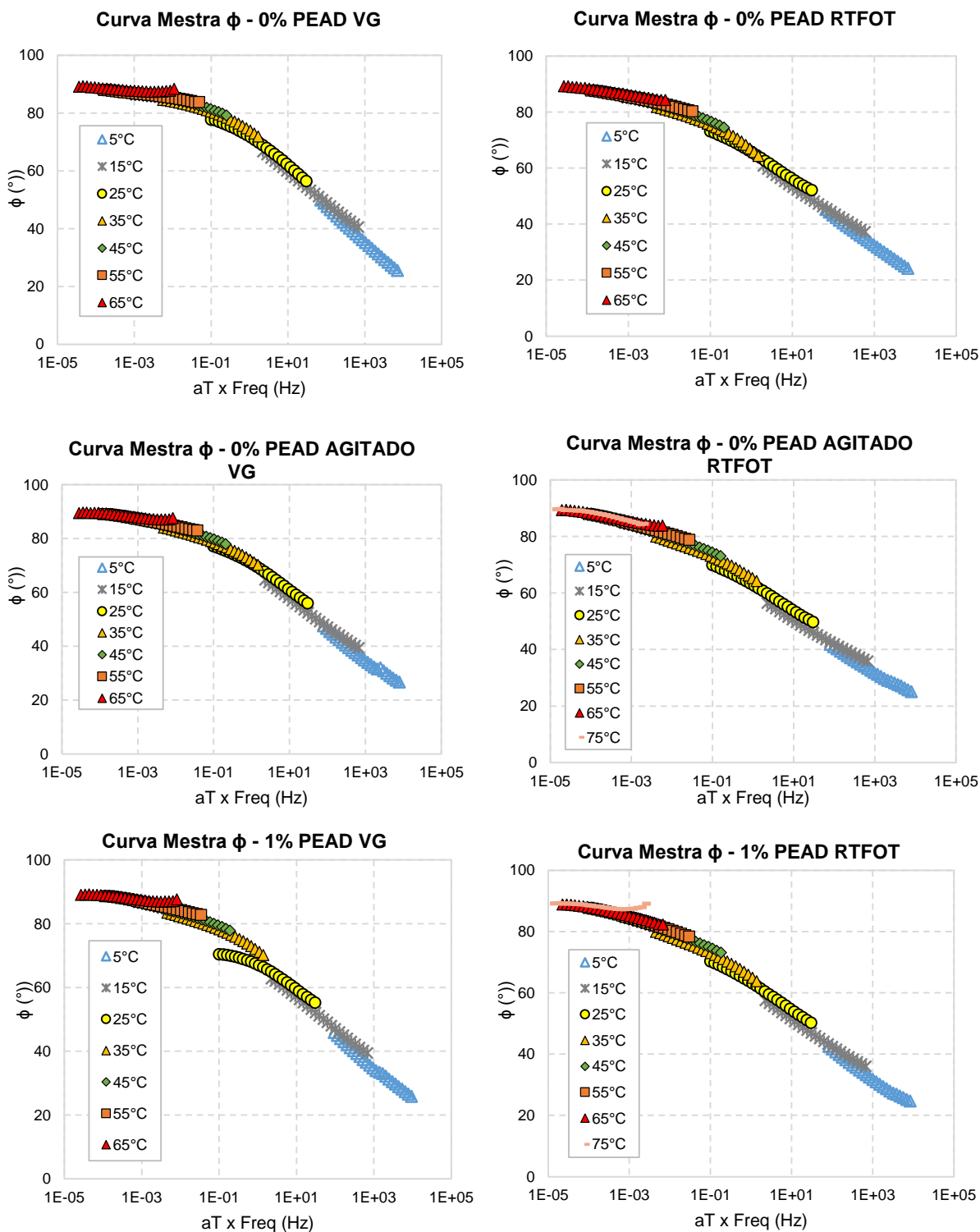


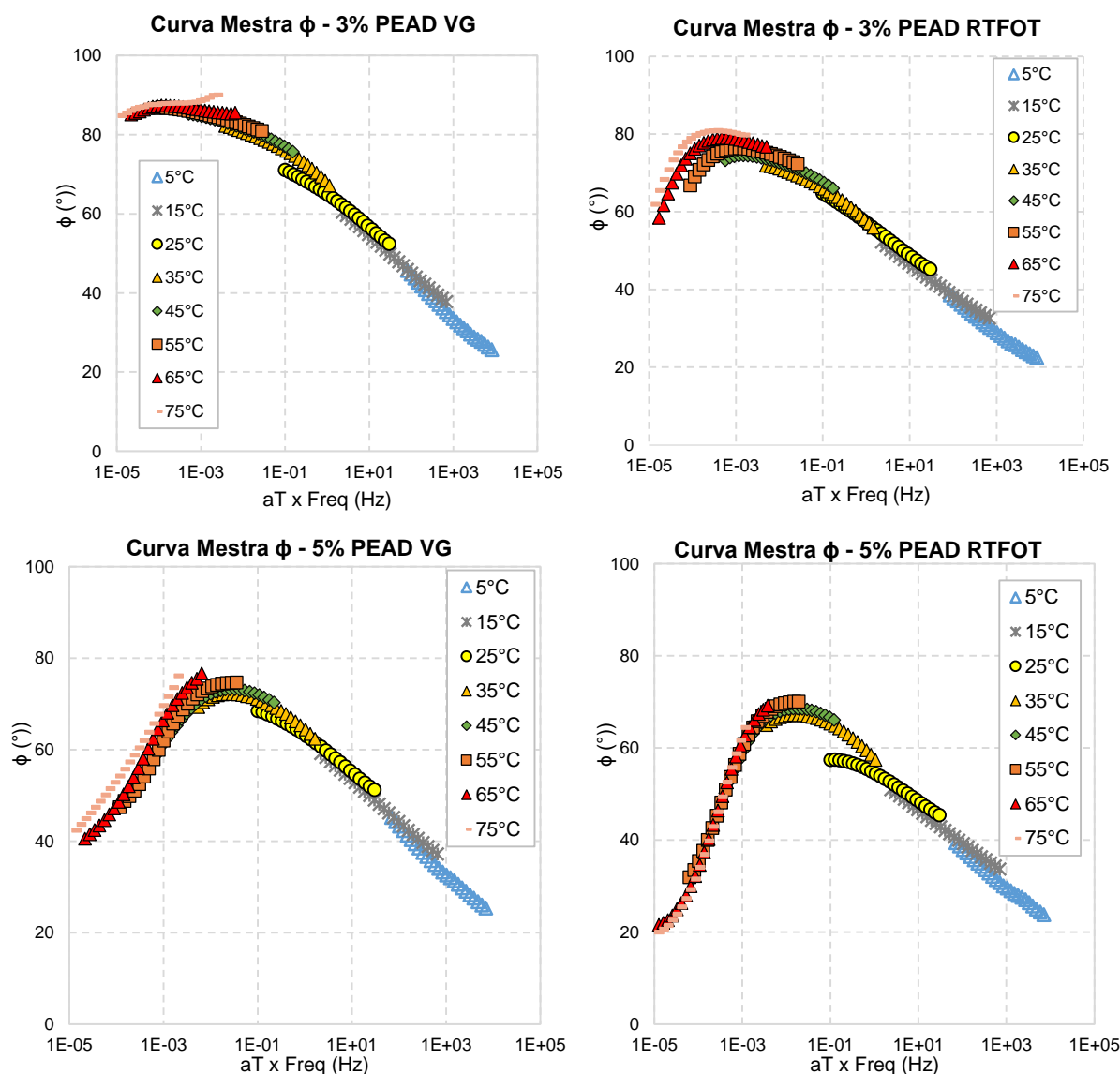




Fonte: Autora.

Figura 27 - Curvas Mestras de Ângulo de Fase - pontos experimentais.





Fonte: Autora.

A análise dos pontos experimentais permitiu observar que a crescente incorporação de PEAD ao CAP 50/70 provocou algumas discontinuidades nas curvas das diferentes temperaturas, podendo indicar que o ligante modificado com esse material se afasta parcialmente do comportamento dos materiais termoreologicamente simples. Esse fenômeno foi principalmente observado nas curvas mestras de ângulo de fase.

As curvaturas e formas particulares dos pontos de cada temperatura tornou menos precisa a modelagem 2S2P1D. Apesar disso, o princípio da superposição tempo-temperatura e o análogo mecânico proposto pelo 2S2P1D ainda se mostrou eficaz na análise do comportamento dos ligantes modificados com PEAD, e forneceu

resultados bastante conclusivos ao se realizar a comparação entre teores, como será discutido mais adiante.

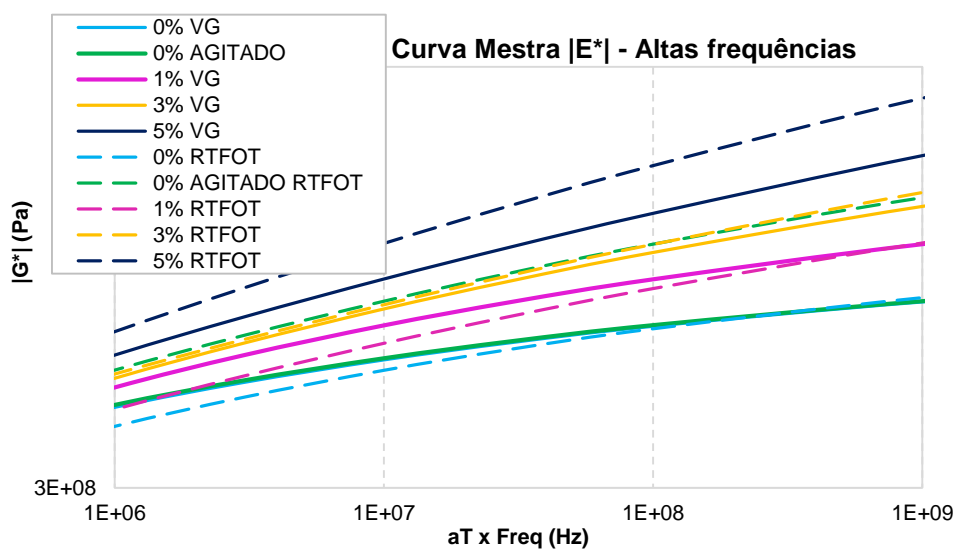
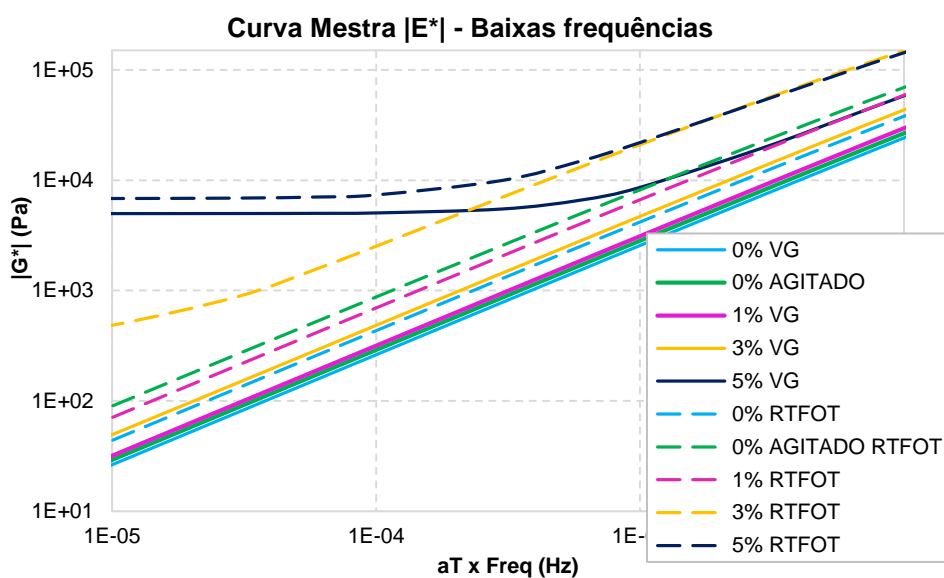
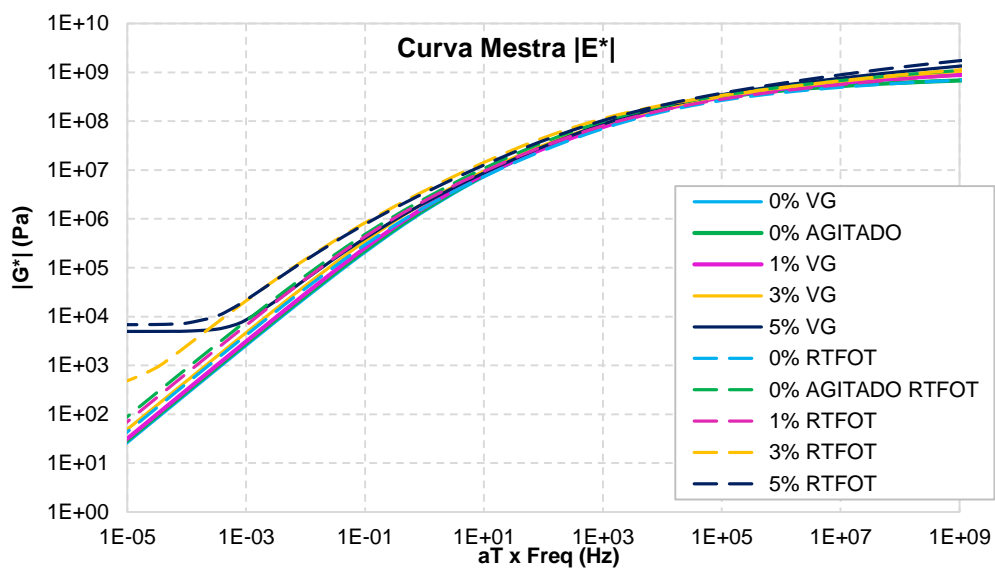
As curvas mestras de módulo de cisalhamento dinâmico modeladas matematicamente podem ser observadas na Figura 28. A partir da modelagem, são obtidos sete parâmetros e duas constantes C1 e C2 de WLF (WILLIAMS; LANDEL; FERRY, 1955), que estão apresentados na Tabela 9. Os ligantes modificados por polímero podem apresentar um comportamento bastante particular nas altas temperaturas. Para captar essa variação, realizou-se o ensaio até a temperatura de 75°C.

A análise da curva mestra nas baixas frequências (que correspondem ao comportamento nas altas temperaturas) indicou que, em termos de rigidez, a adição de apenas 1% de PEAD não provocou grandes mudanças em relação ao CAP convencional. No entanto, foi possível perceber um enrijecimento significativo nos maiores teores, especialmente com 5% de polietileno, mostrando que a modificação com esse material é capaz de manter valores elevados de rigidez mesmo em temperaturas mais altas.

O comportamento nas altas frequências (que correspondem às baixas temperaturas) mostrou-se mais alterado, incluindo o teor de 1%. Os saltos de rigidez com o aumento do teor de polietileno pode ser explicado pelo enrijecimento rápido do PEAD quando há queda de temperatura, como discutido anteriormente, podendo provocar maior influência nessas frequências.

Nas baixas e médias frequências é possível notar um ganho de rigidez no CAP que apenas passou pelo processo de mistura (0% PEAD agitado), pelos maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico em relação ao CAP convencional virgem. Esse enrijecimento era esperado, e será analisado com maiores detalhes posteriormente. Também como previsto, os valores de módulo após envelhecimento em RTFOT foram superiores aos resultados das misturas virgem, indicando que houve oxidação e evaporação das frações voláteis durante esse processo.

Figura 28 - Curvas Mestras de Módulo de Cisalhamento Dinâmico - modelagem 2S2P1D.



Fonte: Autora.

Tabela 9 - Parâmetros 2S2P1D, C1 e C2

CAP	Parâmetros 2S2P1D							WLF	
	E_{00} (Pa)	E_0 (Pa)	k	h	δ	τ_E (s)	β	C1	C2 (°C)
0% PEAD VG	0	8,90E+08	0,170	0,550	1,80	4,50E-06	105	15,58	137,52
0% PEAD RTFOT	0,00	1,00E+09	0,170	0,540	2,35	2,70E-06	260	16,02	135,13
0% PEAD AGITADO VG	0,00	8,90E+08	0,170	0,550	1,80	5,00E-06	105	15,37	128,49
0% PEAD AGITADO RTFOT	0,00	2,00E+09	0,180	0,580	4,90	2,90E-06	250	16,12	128,51
1% PEAD VG	0,00	1,40E+09	0,160	0,510	2,40	1,10E-06	330	15,08	123,32
1% PEAD RTFOT	0,00	1,80E+09	0,160	0,540	4,40	1,40E-06	450	15,62	126,21
3% PEAD VG	7,00	2,00E+09	0,170	0,540	4,20	1,30E-06	300	16,07	129,07
3% PEAD RTFOT	400,00	2,50E+09	0,170	0,590	6,80	3,50E-06	500	19,06	157,47
5% PEAD VG	5000,00	3,90E+09	0,160	0,560	6,80	4,00E-07	750	16,30	136,85
5% PEAD RTFOT	6800,00	4,50E+09	0,197	0,580	8,90	9,00E-07	1000	17,21	131,30

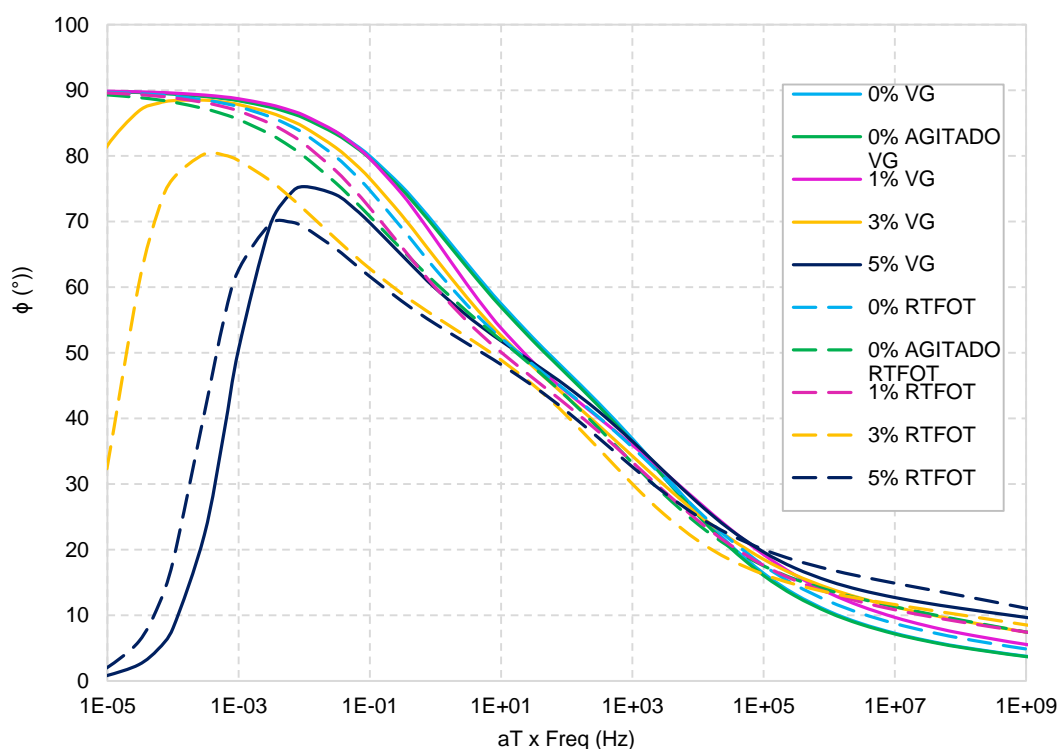
Fonte: Autora.

A Figura 29 mostra os resultados de ângulo de fase para todos os teores. A adição de polietileno de alta densidade ao CAP provocou uma redução nos valores de ângulo de fase em praticamente toda a faixa do ensaio. A análise do pico desse valor nas baixas frequências (altas temperaturas) permite observar que, assim como o CAP convencional, o teor de 1% chega a atingir 90°, e seu comportamento se assemelha ao de um líquido viscoso.

No entanto, os teores de 3 e 5% geraram redução nesse pico mesmo em temperaturas elevadas, garantindo que o CAP modificado ganhe comportamento elástico nessa faixa. Por esse motivo, e com base na literatura existente, é possível afirmar que esses teores produzem ligantes e misturas asfálticas menos suscetíveis à deformação permanente, por elevar a recuperação elástica da deformação após a

aplicação do carregamento. Além disso, os ligantes após envelhecimento resultaram em valores menores de ângulo de fase.

Figura 29 - Curvas mestras de Ângulo de Fase - modelagem 2S2P1D.



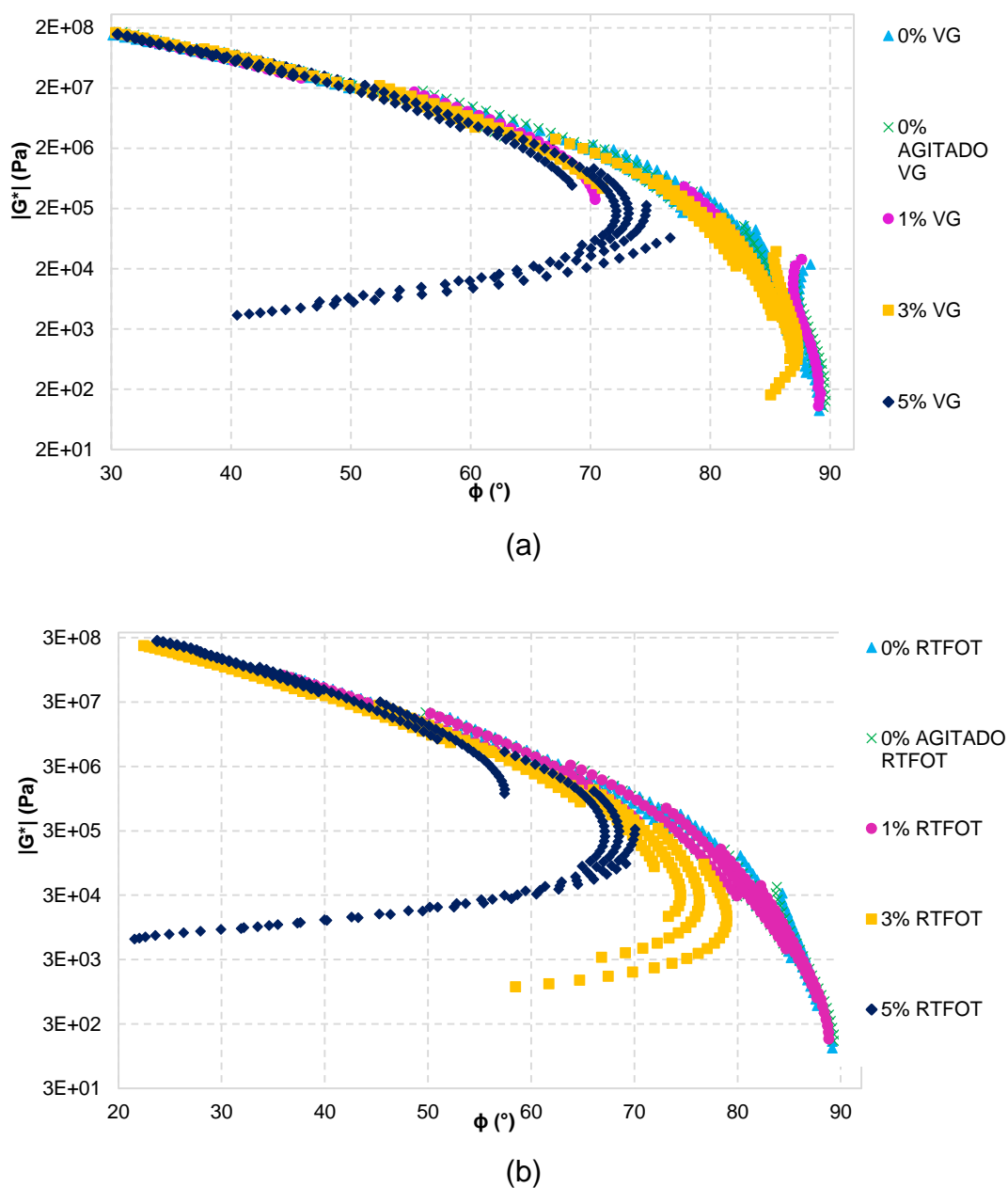
Fonte: Autora.

A diminuição do comportamento viscoso também se confirma ao serem plotados os dados de módulo de cisalhamento dinâmico (em escala logarítmica) *versus* ângulo de fase (em escala aritmética), gráfico conhecido como Espaço Black (Figura 30). Para uma análise mais precisa desse diagrama, serão apresentados os pontos experimentais.

O formato das curvas de ligantes convencionais tem sua recessão próxima ao ângulo de 90°, visto que nas altas temperaturas, como comentado, comportam-se como líquidos viscosos. Já nos ligantes modificados, há um retorno dessa curva, finalizando em ângulos menores que 90°, como foi observado especialmente no teor de 5%. Os teores de 3 e 5% mostraram valores inferiores de ângulo de fase quando comparados com o CAP convencional e até mesmo com o teor de 1%, confirmando que a adição de PEAD acentua a resposta elástica do material.

Essas observações podem ser melhor verificadas no Espaço Black após o envelhecimento de curto prazo. Nessa condição, o retorno da curva é mais acentuado, principalmente nos teores de 3 e 5% de PEAD, e o enrijecimento é acompanhado de menores valores de ângulo de fase. Tendo em vista a redução da defasagem entre a aplicação do carregamento e a deformação correspondente, fica evidente que a parcela do comportamento elástico é mais atuante que a viscosa.

Figura 30 - Espaço Black (a) Condição virgem. (b) Condição pós RTFOT.



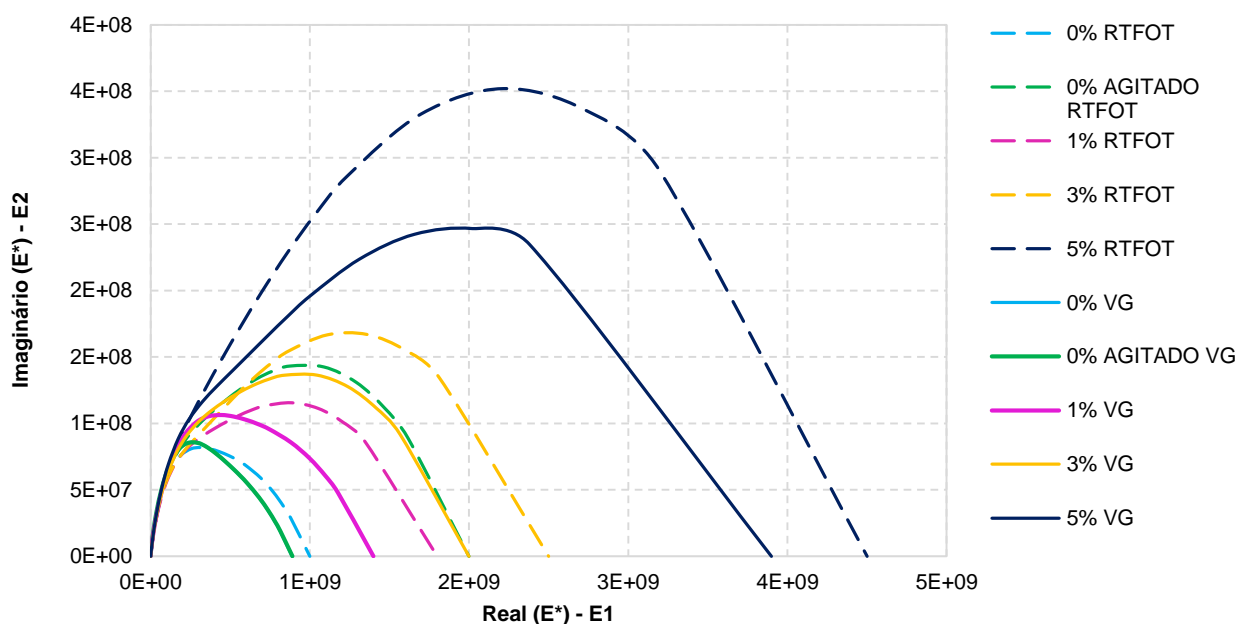
Fonte: Autora.

O plano Cole-Cole é indicado para observar o comportamento do material nas altas frequências (correspondentes às baixas temperaturas). Na Figura 31 pode ser observado o plano Cole-Cole obtido pela modelagem 2S2P1D para todos os teores e para as condições virgem e pós RTFOT.

A análise da Figura 29 indica maiores valores de E_1 (parte real) proporcionalmente ao aumento do teor de polietileno, ratificando que a adição de PEAD acentua o comportamento elástico dos CAP's modificados. Assim, possuem maior capacidade de dissipar os esforços e retornar às condições iniciais. Além disso, os ligantes envelhecidos possuem maiores valores de E_1 quando comparados com a condição virgem, e seu comportamento se aproxima cada vez mais dos sólidos elásticos.

No entanto, essa abordagem difere das anteriores ao se analisar a parcela viscosa no eixo imaginário (valores de E_2), pois indicaria que maiores teores de PEAD aumentariam o comportamento viscoso dos CAP's, reduzindo sua resistência à ocorrência de deformações não recuperáveis. Essa observação será melhor verificada posteriormente, na análise dos resultados do ensaio de dano proposto para a deformação permanente.

Figura 31 - Plano Cole-Cole pela modelagem 2S2P1D.



Fonte: Autora.

A análise desses resultados permitiu observar que, como esperado, o CAP que passou pelo processo de mistura sofreu certo envelhecimento. Com isso, buscou-se entender qual foi o efeito do protocolo de mistura escolhido nos resultados encontrados, em comparação com o efeito da adição do efeito do PEAD. Para isso, foram avaliados os valores de módulo de cisalhamento dinâmico para definir qual seria o percentual de influência de cada fator no ganho de rigidez do ligante asfáltico.

Para essa análise, foi observado o salto de rigidez do CAP “0% PEAD agitado” com relação ao CAP 50/70 virgem, significando a parcela devido ao protocolo de mistura, e também a variação entre os diferentes teores e o CAP 50/70 virgem, como sendo o ganho total de rigidez.

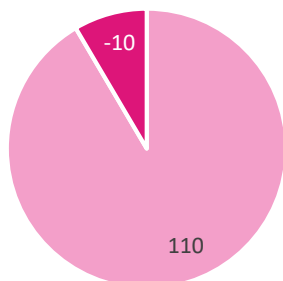
Observando as curvas mestras mostradas anteriormente é possível notar uma variação entre as distâncias entre as curvas nas baixas e altas temperaturas. Por esse motivo, os percentuais médios de influência dos dois fatores foram separados em temperaturas baixas (5 a 25°C) e altas (35 a 65°C). O ensaio no reômetro de cisalhamento dinâmico foi realizado com a temperatura de 35°C nas duas geometrias. No entanto, tendo em vista que as curvas mestras utilizaram os dados de módulo a 35°C das altas temperaturas (geometria de 25mm), essa análise seguiu o mesmo protocolo. Além disso, foram excluídos do estudo os valores de módulo a 75°C, já que nem todos os CAP's foram ensaiados nessa temperatura.

Os resultados são apresentados na Figura 32. Para a construção desses dados, inicialmente foi realizada a diferença entre os valores de módulo de cisalhamento dinâmico dos CAP's com polietileno e do CAP 50/70. Essa diferença representa o ganho total de rigidez (devido ao protocolo de mistura somado ao efeito da adição de PEAD). Na sequência, obteve-se a diferença dos valores de módulo do CAP 50/70 somente agitado, e o CAP 50/70 convencional virgem. Esse resultado representa o ganho de rigidez devido somente ao processo da mistura.

Assim, a razão entre o segundo valor e o primeiro é a proporção de ganho de rigidez devido ao protocolo de mistura adotado, enquanto que 100% menos essa porcentagem representa o incremento do módulo devido ao efeito da adição de PEAD. A incorporação de 1% de polietileno de alta densidade não foi responsável pela elevação nos valores de módulo do CAP modificado, ao invés, esse ganho foi devido apenas ao protocolo de mistura adotado. Nas baixas temperaturas, a figura sugere que a incorporação de 1% de PEAD provoca uma perda de 10% na rigidez.

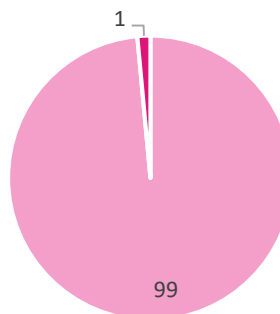
Figura 32 - Efeito do protocolo de mistura nos valores de rigidez encontrados.

Ganho de rigidez (%) - 1%
PEAD Baixas Temperaturas
(5 a 25°C)



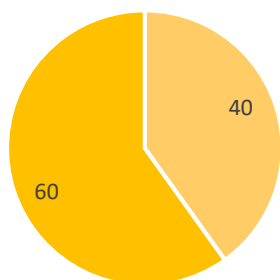
■ % mistura ■ % PEAD

Ganho de rigidez (%) - 1%
PEAD Altas Temperaturas
(35 a 65°C)



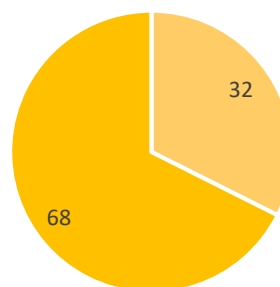
■ % mistura ■ % PEAD

Ganho de rigidez (%) - 3%
PEAD Baixas Temperaturas
(5 a 25°C)



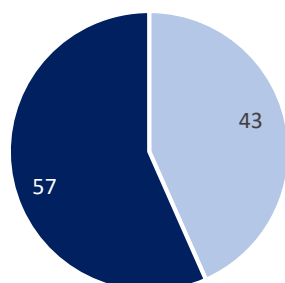
■ % mistura ■ % PEAD

Ganho de rigidez (%) - 3%
PEAD Altas Temperaturas
(35 a 65°C)



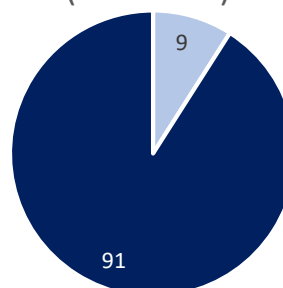
■ % mistura ■ % PEAD

Ganho de rigidez (%) - 5%
PEAD Baixas Temperaturas
(5 a 25°C)



■ % mistura ■ % PEAD

Ganho de rigidez (%) - 5%
PEAD Altas Temperaturas
(35 a 65°C)



■ % mistura ■ % PEAD

Fonte: Autora.

No caso desse protocolo, a incorporação de 1% de PEAD não se justifica. No entanto, ao analisar os resultados para os teores de 3 e 5%, é possível notar que a influência do plástico passa a ser predominante, confirmando que sua interação com o ligante, mesmo que apenas física, provoca aumentos significativos de rigidez dentro dos resultados encontrados.

Além disso, é preciso ressaltar que, mesmo nos maiores teores, o processo de mistura utilizado ainda teve um papel importante, sinalizando que esse não é o protocolo mais otimizado. A escolha desse processo gerou um envelhecimento considerável ao CAP, e por conseguinte o seu enrijecimento, fazendo com que não fosse possível extrair o máximo potencial do polietileno na modificação de suas propriedades. Assim, o procedimento de incorporação de PEAD pode ser aprimorado, por exemplo, aplicando rotações bastante superiores à utilizada nessa pesquisa, de maneira que seja possível aplicar tempos de mistura e inclusive temperaturas menores para se obter uma homogeneização dentro dos limites aceitáveis.

4.3.3.2 Performance Grade (PG)

A observação da Figura 33 indica que, na condição virgem, a incorporação de polietileno quase não impactou o valor do PG encontrado, excetuando-se o teor de 5% que aumentou uma classe nessa escala. No entanto, quando observados os valores do ligante envelhecido à curto prazo, é possível notar um aumento da classificação PG nos teores de 3 e 5%, para uma e duas classes acima, respectivamente.

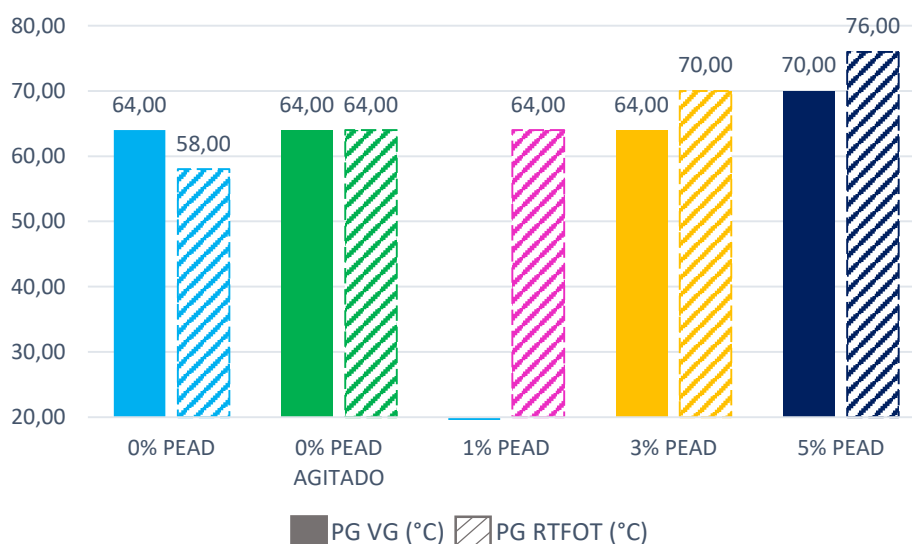
A norma AASHTO R 29-15 (2019) menciona que, nos casos em que haja diferença nos resultados entre as duas condições, escolhe-se a menor temperatura para classificar o ligante quanto ao PG de alta. Nesse sentido, os teores de 3 e 5% apresentaram valores acima na classificação, indicando que seria possível um limite superior de temperatura mais elevado em que esse ligante poderia ser utilizado de forma adequada.

Como mencionado, o processo de moldagem das amostras a serem ensaiadas no reômetro de cisalhamento dinâmico buscou evitar a queda de pedaços de polietileno que não haviam se fundido. Contudo, o resultado do PG para a amostra virgem contendo 1% de PEAD resultou acima de 100°C, indicando a presença desse

material. Por esse motivo, o resultado da amostra foi descartado por não ser considerado representativo. Apesar disso, a análise do restante dos resultados permite inferir que esse valor seria de 64°C, ainda acima do PG do ligante virgem.

O CAP 50/70 convencional costuma apresentar valores de PG na condição virgem superiores ao ligante envelhecido em RTFOT. Entretanto, a incorporação de PEAD mostrou o resultado inverso, podendo ser atribuído ao salto dos valores de módulo encontrados na condição envelhecida, bem como a significativa redução nos valores de ângulo de fase, principalmente nos teores mais elevados. Com isso, foram necessárias temperaturas mais elevadas para reduzir o valor de $|G^*|/\text{sen}\delta$ até o limite inferior de 2,20kPa.

Figura 33 - Resultados de PG.



Fonte: Autora.

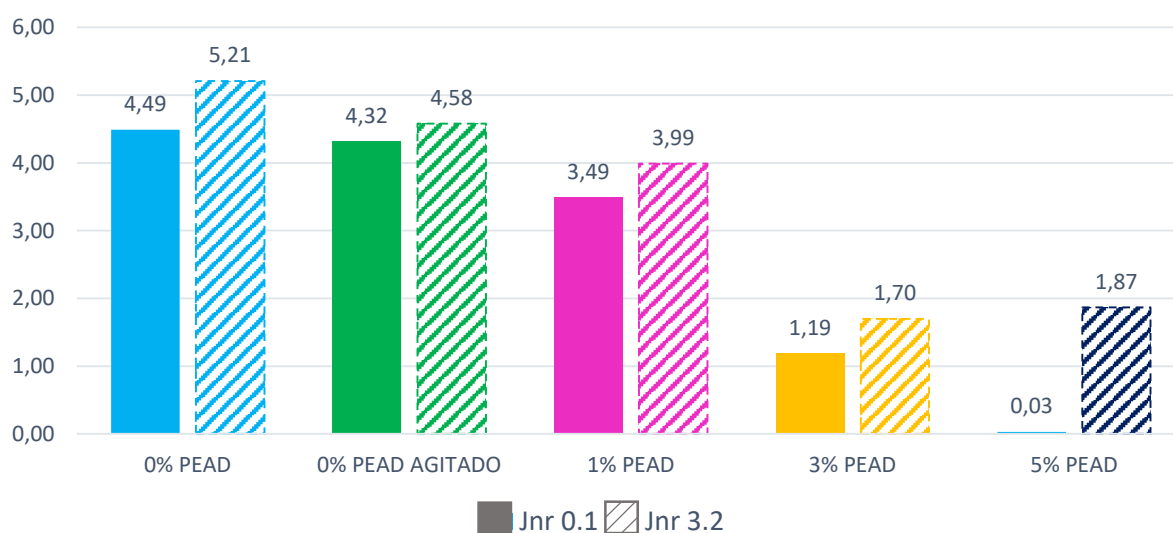
4.3.3.3 Multiple Stress Creep Recovery (MSCR)

O primeiro parâmetro analisado para avaliar o efeito do polietileno de alta densidade no comportamento frente à deformação permanente do CAP foi a compliância não-recuperável (J_{nr}), como pode ser observado na Figura 34. Esses valores, para efeito de comparação entre os CAP's, foram obtidos na temperatura de 64°C. O aumento crescente do teor de PEAD provocou uma redução do J_{nr} nos dois

patamares de tensão, mostrando que o enrijecimento antes mostrado pelas curvas mestras provocou uma redução na parcela de deformação irreversível.

Assim, é possível afirmar que a incorporação de polietileno atenua os problemas de afundamentos em trilha de roda. Além disso, os resultados de Jnr em 3,2kPa, como esperado, foram superiores aos de 0,1kPa, mas ainda assim bastante abaixo dos valores do CAP convencional, indicando uma melhora nesse comportamento mesmo sob maiores tensões.

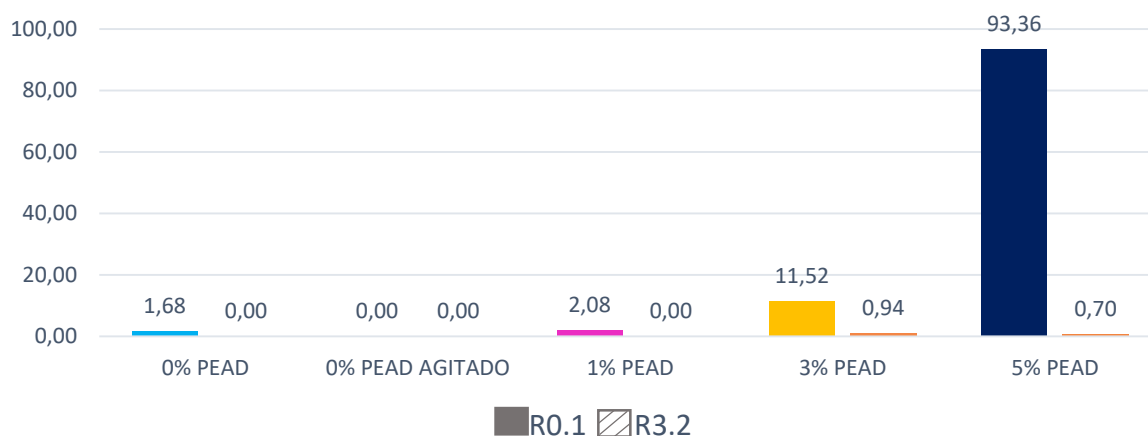
Figura 34 - Resultados de Jnr a 64°C (kPa⁻¹).



Fonte: Autora.

Esses resultados também se confirmam ao se analisar a Figura 35, que mostra os resultados de percentual de recuperação. Esses valores foram mais visíveis nos teores de 3 e 5%, mas ainda ratificam a capacidade do CAP modificado com PEAD de recuperar as deformações sofridas após ciclos repetidos de tensão e repouso, elevando sua capacidade de resistir a deformações permanentes.

Figura 35 - Resultados de percentual de recuperação (%).



Fonte: Autora.

Utilizando os valores de Jnr a 3,2kPa, a norma AASHTO M 332 - 21 classifica os ligantes quanto às classes de tráfego suportadas. Essa diferenciação é adicionada à classificação PG comentada anteriormente, e os resultados são apresentados na Tabela 10. Pela classificação proposta pela norma, é possível perceber que os teores de 3 e 5% de polietileno permitiriam que a mistura suportasse um tráfego pesado em campo (do inglês *Heavy*), enquanto que os demais apenas suportariam um tráfego padrão (do inglês *Standard*), confirmando o efeito positivo do PEAD no ligante convencional nesse sentido.

Tabela 10 - Resultado das classes de tráfego segundo o Jnr a 64°C.

CAP	$Jnr_{3,2kPa}$	Tráfego	Limites da classe (kPa^{-1})
0% PEAD	5,21	S	$2,0 < Jnr_{3,2} \leq 4,5$
0% PEAD AGITADO	4,58	S	$2,0 < Jnr_{3,2} \leq 4,5$
1% PEAD	3,99	S	$2,0 < Jnr_{3,2} \leq 4,5$
3% PEAD	1,70	H	$1,0 < Jnr_{3,2} \leq 2,0$
5% PEAD	1,87	H	$1,0 < Jnr_{3,2} \leq 2,0$

Fonte: Autora.

Os resultados apresentados anteriormente foram obtidos na temperatura de 64°C, como forma de permitir a comparação entre os diferentes ligantes. No entanto, o comportamento real deve ser obtido na temperatura do PG de alta. A Tabela 11

resume esses resultados. O PG indicado se refere ao valor encontrado na condição virgem, como sugere a norma AASHTO M 332 - 21, para que fosse incluído na classificação a letra referente às classes de tráfego. O resultado da condição virgem no teor de 1% não foi encontrado por problemas na amostra. No entanto, o valor de 64°C reportado na Tabela 10 foi baseado na análise dos demais resultados, como sendo a classe mais provável de acontecer.

Tabela 11 - Resultados de MSCR e classificação PG segundo a AASHTO M 332 - 21.

CAP	PG	Jnr _{0,1}	Jnr _{3,2}	R _{0,1}	R _{3,2}	Tráfego
0% PEAD	64	4,49	5,21	1,68	0,00	S
0% PEAD AGITADO	64	4,32	4,58	0,00	0,00	S
1% PEAD	64	3,49	3,99	2,08	0,00	S
3% PEAD	64	1,19	1,70	11,52	0,94	H
5% PEAD*	70	0,01	4,21	97,05	0,00	S

Fonte: Autora.

Nota:

*Para efeito de comparação, os resultados do CAP com 5% de PEAD a 64°C são: Jnr_{0,1} = 0,03kPa⁻¹; Jnr_{3,2} = 1,87kPa⁻¹; R_{0,1} = 93,36% e R_{3,2} = 0,7%.

Nesse caso, os únicos resultados que diferem de 64°C ocorreram no teor de 5% de PEAD, o qual foi ensaiado na temperatura de 70°C para captar esse comportamento. Nota-se que, caso esse ligante fosse utilizado em um pavimento cuja temperatura chegasse a 70°C, as parcelas de deformação residual seriam maiores (indicado pelo acréscimo no valor do Jnr), como era esperado. Daí a importância de ensaiar o ligante na real temperatura em que ele seria adequado para utilização. Além disso, nessa mesma temperatura o CAP com 5% de PEAD passa a suportar um tráfego padrão, e não mais um tráfego pesado como encontrado a 64°C.

A norma AASHTO R 29-15 (2019) sugere que o ligante seja ensaiado nas condições virgem e envelhecida à curto prazo para encontrar o PG de alta, e que esse valor seja reportado como o menor entre os dois. No caso da maioria dos ligantes, o menor valor de PG entre as duas condições foi justamente encontrada na condição virgem, e portanto os resultados não diferem dos apresentados na Tabela 11.

No entanto, o menor PG do CAP 50/70 convencional (0% PEAD) foi de 58°C, encontrado na condição envelhecida, e os resultados do MSCR nessa temperatura

são apresentados na Tabela 12. Nota-se, nesse caso, a redução da compliância não-recuperável e o aumento do percentual de recuperação, provocados pela maior rigidez do CAP aos 58°C em comparação aos valores a 64°C.

Tabela 12 - Resultados de MSCR para o CAP 0% PEAD no PG 58°C.

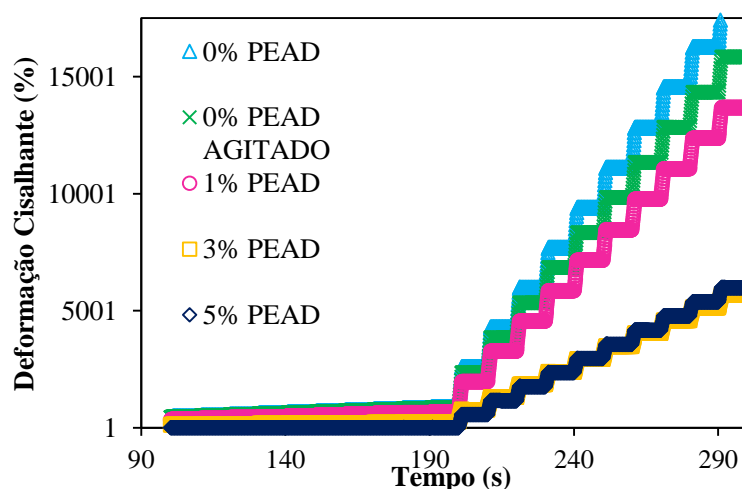
CAP	Jnr _{0,1}	Jnr _{3,2}	R _{0,1}	R _{3,2}
0% PEAD	1,51	1,71	4,33	0,25

Fonte: Autora.

A Figura 36 mostra as deformações cisalhantes que ocorreram ao longo do ensaio, durante períodos de carregamento e repouso, pelo tempo decorrido. Curvas mais íngremes indicam que foram atingidos valores maiores de deformação, em um dado tempo. Nesse sentido, o enrijecimento provocado pelo protocolo de mistura e a crescente incorporação de PEAD reduziu as deformações sofridas pelas amostras. Em especial, destacam-se os teores de 3 e 5%, que dentro do escopo dessa pesquisa, mostraram um comportamento mais adequado frente à deformação permanente.

Embora os valores de módulo de cisalhamento dinâmico do teor de 1% tenham sido quase idênticos aos do CAP somente agitado, sua curva do ensaio de MSCR ficou abaixo da curva do CAP agitado. Nesse sentido, é possível perceber que apesar do enrijecimento ter sido devido ao protocolo de mistura, a interação com o polietileno produziu uma pequena melhora na resistência à deformação permanente.

Figura 36 - Curva de deformações cisalhantes *versus* tempo do ensaio MSCR a 64°C



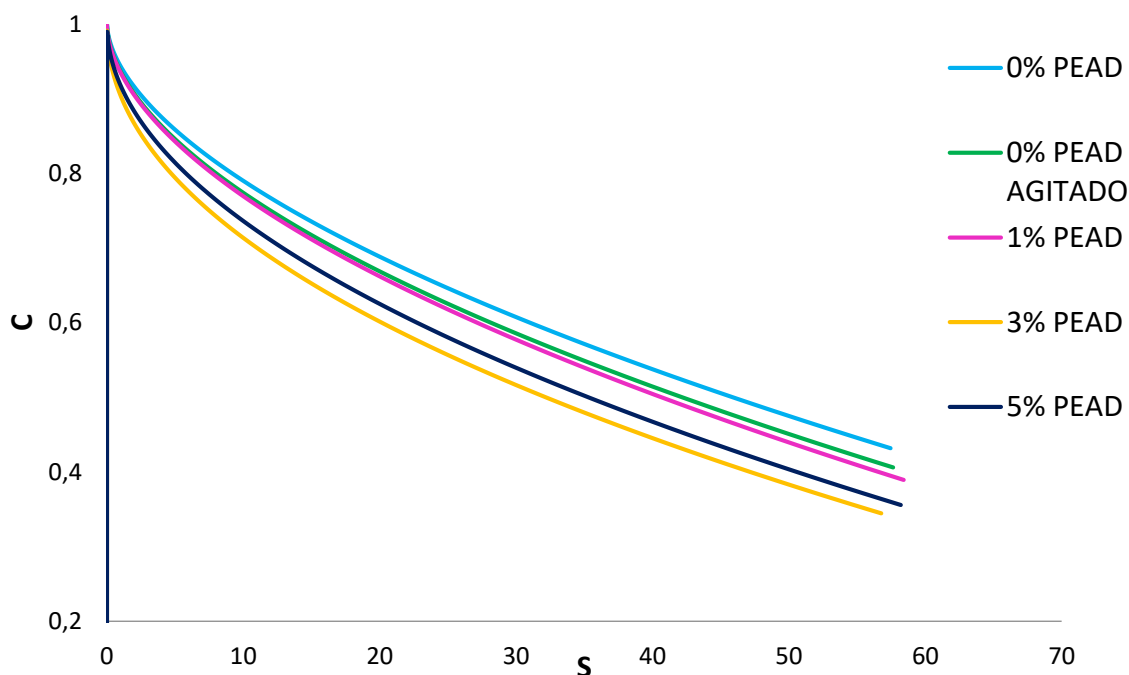
Fonte: Autora.

4.3.3.4 Linear Amplitude Sweep (LAS)

A Figura 37 traz as curvas características de dano (C vs. S) para todos os ligantes, que são utilizadas na obtenção das curvas de Wöhler e posteriores curvas de fadiga apresentadas na Figura 38. A Figura 39 mostra os Fatores de Fadiga dos Ligantes a 19°C calculados a partir das mesmas. Por essa análise é possível perceber que o enrijecimento do ligante com a adição de PEAD não prejudicou seu desempenho à fadiga. Ao contrário, os maiores teores geraram curvas acima das demais, representadas também pelos maiores valores de $FFL_{19^{\circ}C}$, indicando que o polietileno aumentou a vida de fadiga dos CAP's.

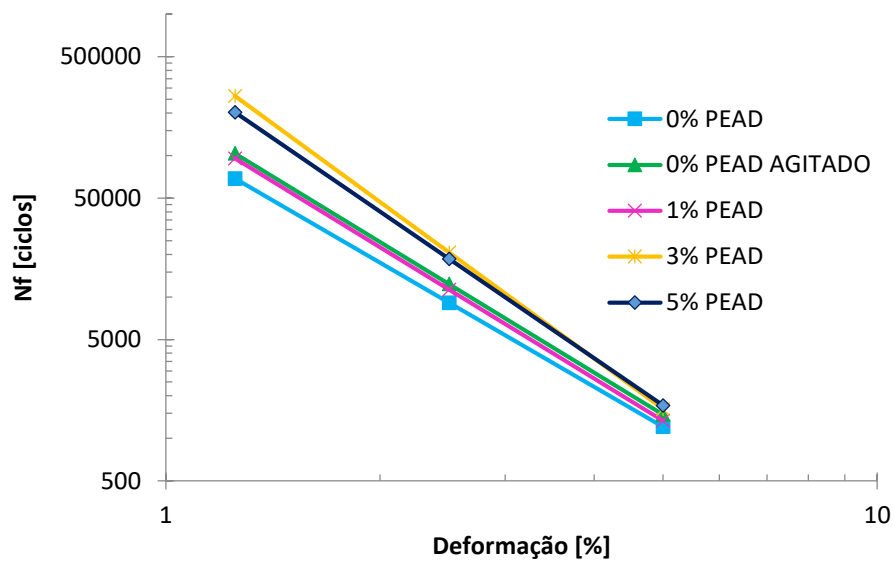
Merecem destaque, nesse sentido, os teores de 3 e 5%. Além, disso, observa-se que o maior teor não gerou o melhor comportamento à fadiga, e sim o teor intermediário deste estudo. Os parâmetros obtidos pelo VECD são apresentados na Tabela 13. Cabe ressaltar que os resultados para o CAP 50/70 estão similares aos encontrados por Possebon (2018), que utilizou o mesmo ligante em sua pesquisa, revelando que o ensaio possui boa reprodutibilidade e os resultados estão corretos.

Figura 37 - Curvas características de dano.

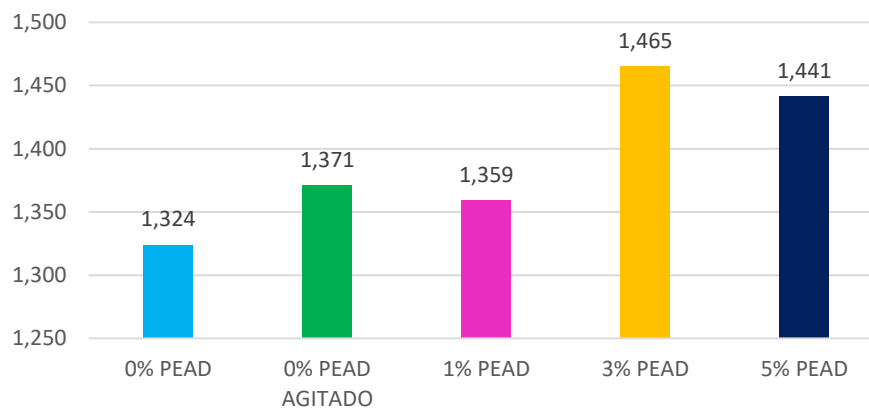


Fonte: Autora.

Figura 38 - Curvas de fadiga para todos os ligantes.



Fonte: Autora.

Figura 39 - Fator de Fadiga do Ligante ($F_{FL_{19^{\circ}C}}$) para todos os CAP's.

Fonte: Autora.

Tabela 13 - Parâmetros do modelo VECD para obtenção das curvas de fadiga.

CAP	C_0	C_1	C_2	A	B
0% PEAD	1,000	0,057	0,569	1,319E+05	-2,917
0% PEAD AGITADO	1,000	0,063	0,551	2,054E+05	-3,068
1% PEAD	1,000	0,065	0,552	1,897E+05	-3,080
3% PEAD	1,000	0,095	0,477	6,000E+05	-3,678
5% PEAD	1,000	0,082	0,507	4,368E+05	-3,446

Fonte: Autora.

A classificação dos ligantes de acordo com os limites de Nascimento (2021) está apresentada na Tabela 14. Nesse sentido, os limites utilizados pelo autor não possibilitaram a diferenciação do comportamento à fadiga dos ligantes desta pesquisa, visto que todos permaneceram dentro do intervalo de comportamento mediano, embora possuam diferenças no valor do $FFL_{19^{\circ}C}$.

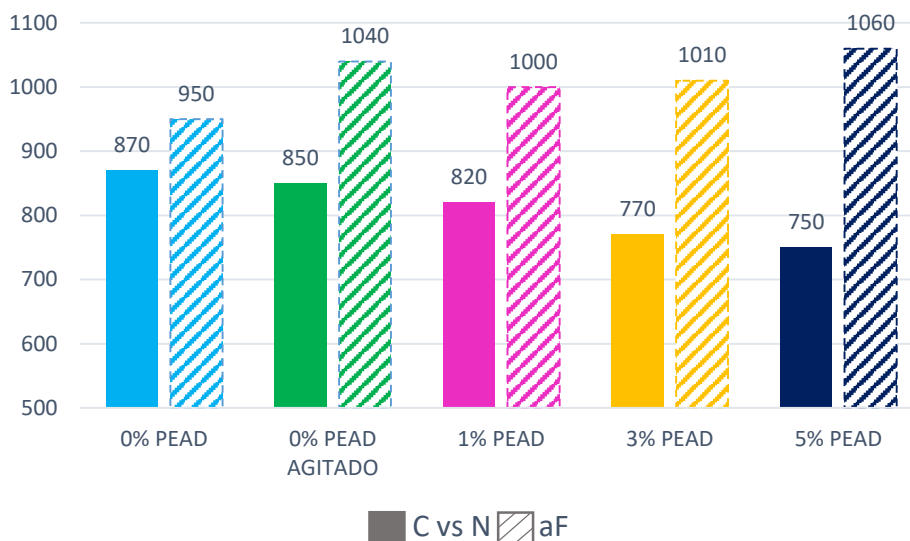
Tabela 14 - Classificação de Nascimento (2021) para os ligantes modificados com PEAD.

CAP	$FFL_{19^{\circ}C}$	Classificação Nascimento (2021)
0% PEAD	1,32	3 - Mediano
0% PEAD AGITADO	1,37	3 - Mediano
1% PEAD	1,36	3 - Mediano
3% PEAD	1,46	3 - Mediano
5% PEAD	1,44	3 - Mediano

Fonte: Autora.

A Figura 40 mostra o número de ciclos até a falha pelos critérios C *versus* N e a_f . O critério da abertura de fissura (a_f) mostrou convergência com o resultado utilizando a mecânica do dano contínuo (VECD), mas o acréscimo aqui observado foi bastante sutil. No entanto, cabe ressaltar que Nuñez (2013) não obteve sucesso com a análise baseada na fratura com alguns ligantes modificados.

Ao contrário, a metodologia de análise da queda na taxa de perda de integridade (C *versus* N) mostrou que a incorporação de polietileno fez com que o CAP suportasse menos ciclos até que ocorresse a ruptura. Nesse sentido, ainda não existe uma metodologia consolidada e normatizada no Brasil, sendo necessários maiores estudos para definir qual a melhor abordagem para classificar ligantes convencionais e modificados quanto à fadiga.

Figura 40 - N_f pelos critérios C versus N e aF.

Fonte: Autora.

4.4 ENSAIO DE SEPARAÇÃO DE FASES

A observação da Tabela 15 indica que a diferença entre os pontos de amolecimento do topo e da base da amostra não foi significativa. A NBR 15166:2004 não menciona valores toleráveis para essa diferença, mas os valores observados sugerem que não houve separação de fases.

Tabela 15 - Resultados de separação de fases.

CAP	Temperatura do Ponto de Amolecimento (°C)		
	Topo	Base	Diferença topo-base
1% PEAD	50,5	50,0	0,5
3% PEAD	51,0	51,0	0
5% PEAD	52,5	53,5	-1

Fonte: Autora.

No entanto, a Figura 41 indica que a análise visual mostrou claramente a separação entre as fases da amostra. Nesse caso, o PEAD ficou acumulado no topo, e não foi possível dissolvê-lo novamente no CAP, fazendo com que os resultados do ponto de amolecimento não fossem representativos. Nesse sentido, o ensaio mostrou

que deve ser observada a agitação permanente nos tanques de asfalto, sendo que essa configuração ainda precisa ser melhor estudada.

Figura 41 - Amostras após a preparação das amostras no ensaio de separação de fases.



Fonte: Autora.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A malha viária no Brasil ainda carece de pavimentação, e grande parte da parcela pavimentada já apresenta sinais de deterioração. A seleção de bons materiais pode retardar esse processo. No entanto, a crescente frota de veículos pesados e escassez de recursos naturais passaram a exigir novas soluções com desempenho mecânico adequado e ambientalmente mais sustentáveis. A modificação do ligante asfáltico é uma alternativa para atingir esses objetivos, mas ainda desafia a indústria da pavimentação a entender a interação com os modificadores e a encontrar as melhores relações custo-benefício.

Paralelo a isso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos buscou mitigar os impactos negativos da geração excessiva e disposição inadequada de resíduos, e seu uso em pavimentação vai de encontro com esses propósitos. Assim, este trabalho objetivou avaliar o efeito da variação do teor de *pellets* de polietileno de alta densidade (PEAD) em um ligante asfáltico 50/70, além de aferir a eficiência do protocolo de mistura adotado.

A modificação do CAP 50/70 com 1, 3 e 5% de PEAD indicou que o material produz o enrijecimento do ligante asfáltico, inicialmente representado pela queda nos valores de penetração. Os teores de 3 e 5% nesse ensaio ficaram abaixo do proposto para asfaltos modificados por polímero, mas a análise de viabilidade depende de análises reológicas e de desempenho. Além disso, o acréscimo no ponto de amolecimento, especialmente no teor de 5%, pode indicar um bom comportamento frente à deformação permanente, visto que esse teor atingiu o mínimo indicado para o AMP 55/75.

O ensaio de recuperação elástica mostrou-se inadequado para esse tipo de ligante modificado, visto que as amostras resultaram bastante heterogêneas devido aos pedaços de polietileno que não se fundiram à matriz asfáltica. No entanto, foi possível perceber um salto na recuperação no teor de 5%, indicando maiores propriedades elásticas nesse sentido. Ainda, o aumento considerável na viscosidade encontrada sinaliza a necessidade de temperaturas mais elevadas que as usuais para se obter a trabalhabilidade apropriada e para garantir uma compactação satisfatória da mistura asfáltica final.

A incorporação de polietileno de alta densidade provocou algumas descontinuidades nas curvas mestras dos pontos experimentais, mostrando que o

comportamento desse ligante se afasta parcialmente dos materiais termoreologicamente simples. No entanto, a aplicação do princípio da superposição tempo-temperatura e também da modelagem 2S2P1D ainda se mostrou eficaz no tratamento dos dados.

A análise das curvas mestras também indicou maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico com a elevação do teor, confirmando o enrijecimento, além de menores valores de ângulo de fase mesmo nas baixas frequências (altas temperaturas), indicando um ganho no comportamento elástico e melhor comportamento à deformação permanente. Os teores de 3 e 5% também elevaram a classificação PG de alta do CAP, ampliando sua faixa de aplicação.

Os maiores teores de PEAD, ainda, mostraram resultados superiores aos demais no que se refere ao ensaio de deformação permanente (MSCR), ratificando as observações anteriores. Quanto à fadiga, utilizando o ensaio de LAS, foi possível perceber que os teores de 3 e 5% forneceram maiores valores de Fator de Fadiga do Ligante ($FFL_{19^{\circ}C}$), o que representa melhor comportamento para esse defeito.

O critério C *versus* N também foi de encontro com a análise pelas curvas de fadiga e $FFL_{19^{\circ}C}$. No entanto, o estudo da taxa de abertura da fissura na amostra (critério do a_f) indicou que o enrijecimento do ligante proporciona um menor número de ciclos até a falha. Nesse sentido, ainda não há uma metodologia consolidada no Brasil, mas os resultados mostraram-se promissores na análise de fadiga.

Para garantir uma maior representatividade das amostras, foi adotado uma temperatura de 175°C, a 420rpm por 45 minutos. Entretanto, os maiores teores ainda apresentaram grande heterogeneidade, comprometendo a execução de amostras em pequena escala. Além disso, o protocolo adotado foi responsável por uma considerável parcela do enrijecimento observado, mostrando que não era o mais adequado.

Nesse sentido, a adoção de rotações superiores pode reduzir o tempo e até mesmo a temperatura necessária para homogeneização, a depender do modificador utilizado, minimizando o problema do envelhecimento. Por fim, foi observada significativa separação de fases do CAP modificado, sinalizando que são necessários tanques com agitação constante nas usinas para manter a estabilidade do material.

Ao final da pesquisa, foi possível observar que a modificação do ligante asfáltico convencional com polietileno de alta densidade mostrou resultados promissores, com comportamentos superiores frente aos principais defeitos

encontrados nas rodovias brasileiras. Destinar os resíduos plásticos para a indústria da pavimentação tem potencial para reduzir grandes quantidades desse material que é descartado inadequadamente, além de contribuir para o desempenho mecânico dos materiais asfálticos. Assim, entender a interação do plástico com a matriz asfáltica ainda carece de estudos, para que o material seja utilizado de forma correta e otimizada, mas mostra viabilidade comprovada para emprego em pavimentação.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante das análises realizadas e dos obstáculos encontrados, são desafios futuros:

- Entender qual a faixa de teor viável para uso em modificação de ligantes asfálticos (via úmida), encontrando teores ótimos a depender do local de aplicação e da estrutura do pavimento executada;
- Estudar qual a melhor granulometria a ser utilizada para reduzir a heterogeneidade do CAP modificado, bem como garantir um comportamento superior;
- Encontrar um protocolo de mistura mais eficiente;
- Avaliar a estabilidade à estocagem, entendendo qual a melhor configuração para os tanques de agitação nas usinas de asfalto;
- Entender a incorporação do plástico nas usinas, para que seja executada de forma mais otimizada e com boa relação custo-benefício;
- Incorporar o processo da reciclagem do plástico na produção de misturas asfálticas, entendendo como obter um resíduo que proporcione comportamento similar ao material virgem, sem contaminantes, e avaliar possíveis alterações de comportamento devido à pigmentos presentes;
- Estudar o efeito da adição de plástico quando realizada por via seca;
- Ampliar a escala do estudo para misturas asfálticas e análises químicas, para melhor compreender essa interação;
- Avaliar qual o melhor tipo de plástico para uso em ligantes asfálticos, segundo critérios preestabelecidos.

REFERÊNCIAS

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.

AHMEDZADE, P. et al. **Irradiated Recycled High Density Polyethylene Usage as a Modifier for Bitumen**. Journal of Materials in Civil Engineering. [s.l.], v. 29, n. 3, p.04016233-04016233, 2016.

American Society of Civil Engineers (ASCE). Disponível em:

[http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001757](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001757). Acesso em: 26 de Mar. de 2021.

ANGELONE, S. et al. **Green pavements: reuse of plastic waste in asphalt mixtures**. Materials and Structures, v. 49, n. 5, p. 1655–1665, 2016.

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.

BAJRACHARYA, R. M. et al. **An overview of mechanical properties and durability of glass-fibre reinforced recycled mixed plastic waste composites.** *Materials and Design*. Queensland, v. 62, p. 98-112, out. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.04.081>. Acesso em: 26 de Mar. de 2021.

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

BRASIL. **L12305.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 23 mar. 2021.

CASEY, D. et al. **Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt.** v. 52, p. 1167–1174, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.06.002>. Acesso em: 26 mar. 2021.

CERATTI, J. A. P.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B. **Utilização de ligantes asfálticos em serviços de pavimentação.** 1º Edição. Rio de Janeiro: ABEDA, 2015.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário CNT do Transporte: Estatísticas Consolidadas.** Brasília, DF, 2021. Disponível em: <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2021/Rodoviario/1-1-/Principais-dados>. Acesso em: 08 jan. 2022.

COSTA, C., NOGUEIRA, L., GIOIA, J.. **Mistura Asfáltica com o Uso de Modificador TLA (Trinidad Lake Asphalt).** 39ª Reunião Anual de Pavimentação – RAPv. Recife, Pernambuco, BRA, 2008.

COSTA, L. M. B. et al. **A New Life for Cross-Linked Plastic Waste as Aggregates and Binder Modifier for Asphalt Mixtures.** *Applied sciences*, v. 7, n. 6, p. 603, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app7060603>. Acesso em: 19 mar. 2021.

CUADRI, A. A. et al. **Formulation and processing of recycled-low-density-polyethylene-modified bitumen emulsions for reduced-temperature asphalt technologies.** *Chemical Engineering Science*, v. 156, p. 197, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2016.09.018>. Acesso em: 26 mar. 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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. DNIT

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

_____. 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.

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

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

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

_____. DNIT 168/2013 - EM. **Cimento asfáltico de petróleo modificado por asfalto natural do tipo TLA (Trinidad Lake Asphalt) – Especificação de Material** Rio de Janeiro, 2013.

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

FERRY, J. D. **Viscoelastic Properties of Polymers.** 3ª edição. Madison, 1980. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/Viscoelastic+Properties+of+Polymers%2C+3rd+Edition-p-9780471048947>. Acesso em: 24 mar. 2021.

FONTOURA, E. **Incorporação de flocos reciclados de polietileno em ligante asfáltico.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2019.

FUENTES-AUDÉ, C. et al. **Evaluation of thermal and mechanical properties of recycled polyethylene modified bitumen.** *Polymer Testing*, v. 27, p. 1005–1012, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2008.09.006>. Acesso em: 25 mar. 2021.

GARCÍA-MORALES, M. et al. **Viscous properties and microstructure of recycled EVA modified bitumen.** *Fuel*, v. 83, n. 1, p. 31-38, 2004. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(03\)00217-5](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00217-5). Acesso em: 29 mar. 2021

GARCÍA-MORALES, M. et al. **Processing, rheology, and storage stability of recycled EVA/LDPE modified bitumen.** *Polymer Engineering and Science*, v. 47, n. 2, p. 181–191, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pen.20697>. Acesso em: 26 mar. 2021

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. **Production, use, and fate of all plastics ever made**. *Science Advances*, v. 3, n. 7, p. 25–29, 2007. Disponível em: <http://advances.sciencemag.org/>. Acesso em: 26 mar. 2021.

GIBREIL, H. A. A.; FENG, C. P. **Effects of high-density polyethylene and crumb rubber powder as modifiers on properties of hot mix asphalt**. *Material Economics. Industrial Transformation 2050 - Pathways to Net-Zero Emissions from EU Heavy Industry*, 2017.

GONZÁLEZ, O. et al. **Rheological Techniques as a Tool To Analyze Polymer-Bitumen Interactions: Bitumen Modified with Polyethylene and Polyethylene-Based Blends**. *Energy and Fuels*, v. 16, n. 5, p. 1256-1263, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/ef020049l>. Acesso em: 20 mar. 2021.

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. Disponível em: <https://doi.org/10.3141%2F2207-13>. Acesso em: 08 dez. 2021.

HINTZ, C. **Understanding Mechanisms Leading to Asphalt Binder Fatigue**. 2012. PhD Dissertation. University of Wisconsin, Madison, Wisconsin, EUA, 2012.

HINTZ, C.; BAHIA, H. **Simplification of Linear Amplitude Sweep Test and Specification Parameter**. *Transportation Research Record*, n. n. 2370, p. 10–16, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.3141%2F2370-02>. Acesso em: 08 dez. 2021.

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

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

KAKAR, M. R. et al. **Analysis of waste polyethylene (PE) and its by-products in asphalt binder**. *Construction and Building Materials*, v. 280, 19 abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122492>. Acesso em: 20 mar. 2021.

KALANTAR, Z. N.; KARIM, M. R.; MAHREZ, A. **A review of using waste and virgin polymer in pavement**. *Construction and Building Materials*, v. 33, p. 55-62, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.009>. Acesso em: 21 mar. 2021.

KAZA, S. et al. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste**

Management to 2050. Washington, DC: World Bank: Urban Development Series., 2018.

KHAN, I. M. et al. **Asphalt Design Using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction.** Procedia Engineering, v. 145, p. 1557-1564, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.04.196>. Acesso em: 25 mar. 2021.

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. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:1\(32\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:1(32)). Acesso em: 08 dez. 2021.

LEITE, L. F. M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros.** 1999. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1999.

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

LEWANDOWSKI, L. H. **Polymer modification of paving asphalt binders.** Rubber Chemistry and Technology, v. 67, n. 3, p. 447–480, 1 jul. 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.5254/1.3538685>. Acesso em: 21 mar. 2021.

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.

MORLAND, L. W.; LEE, E. H. **Stress Analysis for Linear Viscoelastic Materials with Temperature Variation.** Transactions of the Society of Rheology, v. 4, n. 1, p. 233, 24 jul. 1960. Disponível em: <https://doi.org/10.1122/1.548856>. Acesso em: 19 dez. 2021.

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.

NUÑEZ, J. Y. M. **Caracterização à fadiga de ligantes asfálticos modificados envelhecidos a curto e longo prazo.** 2013. Dissertação de Mestrado. EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil, 2013.

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

PARK, S. W.; KIM, Y. R.; SCHAPERLY, 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. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(96\)00042-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(96)00042-7). Acesso em: 08 dez. 2021.

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.

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

POULIKAKOS, L. D. et al. **Harvesting the unexplored potential of European waste materials for road construction.** v. 116, p. 6161, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.09.008>. Acesso em: 20 mar. 2021.

PUNITH, V. S.; VEERARAGAVAN, A. **Behavior of Asphalt Concrete Mixtures with Reclaimed Polyethylene as Additive.** *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 19, n. 6, p. 500–507, 2007. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2007\)19:6\(500\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2007)19:6(500)). Acesso em: 26 mar. 2021.

ROBINSON, H. L. **Polymers in Asphalt.** *United Kingdom*, v. 15, n. 11, 2004.

SAFAEI, F. et al. **Implications of Warm-Mix asphalt on long term oxidative aging and fatigue performance of asphalt binders and mixtures.** *Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions*, v. 83, n. sup1, p. 143–169, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.927050>. Acesso em: 08 dez. 2021.

SCHWARZL, F.; STAVERMAN, A. J. **Time-Temperature Dependence of Linear Viscoelastic Behavior.** *Journal of Applied Physics*, v. 23, n. 8, p. 838, 15 jun. 1952. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.1702316>. Acesso em: 19 dez. 2021.

SHALABY, A. **Modelling short-term aging of asphalt binders using the rolling thin film oven test.** *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 29, n. 1, p. 135–144, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/l01-086>. Acesso em: 19 dez. 2021.

SHBEEB, L.; AWWAD, M. T. **The Use of Polyethylene in Hot Asphalt Mixtures.** *American Journal of Applied Sciences*, v. 4, n. 6, p. 390–396, 2007. Disponível em: <https://thescipub.com/pdf/ajassp.2007.390.396.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2021.

SILVA, L. S. DA et al. **Polímeros como modificadores asfálticos.** *Transportes*, v. 10, n. 1, 2 jul. 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/transportes.v10i1.164>. Acesso em: 22 mar. 2021.

SILVA, J. DE A. A. et al. **Mechanical performance of asphalt mixtures using polymer-micronized PET-modified binder.** *Road Materials and Pavement Design*, v. 19, n. 4, p. 1001–1009, 2018. Disponível em:

<https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1283353>. Acesso em: 27 mar. 2021.

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.

TOMASZEWSKA, J. **Polish Transition towards Circular Economy: Materials Management and Implications for the Construction Sector**. *Materials*, v. 13, n. 22, p. 5228, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13225228>. Acesso em: 29 mar. 2021.

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

WWF - Fundo Mundial para a Natureza. **Solucionar a poluição plástica: transparência e responsabilização**. Relatório elaborado por Dalberg Advisors. Gland, Suíça, 2019.

YEH, P. H. et al. **Thermal and rheological properties of maleated polypropylene modified asphalt**. *Polymer Engineering and Science*, v. 45, n. 8, p. 1152–1158, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/pen.20386>. Acesso em: 20 mar. 2021.

ZOOROB, S. E.; SUPARMA, L. B. **Composites Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt)**. *Cement & Concrete Composites*, v. 22, n.4, p. 233-242, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00026-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00026-3). Acesso em: 26 mar. 2021.