



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CAP 50/70
MODIFICADO POR POLITEREFTALATO DE ETILENO**

MARIA ALINNE PIRES MATIAS

Orientadores: Carina Silvani
Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

Campina Grande-PB, 13/12/2018

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CAP 50/70
MODIFICADO POR POLITEREFTALATO DE ETILENO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB, 13/12/2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**

MARIA ALINNE PIRES MATIAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Campina Grande como requisito para
obtenção do grau de bacharel em
Engenharia Civil.

Área de habilitação: Geotécnica

Sub-área: Pavimentação.

Orientadores: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça
Prof. Dr^a Carina Silvani

CAMPINA GRANDE – PB

Dezembro/2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

Maria Alinne Pires Matias

ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CAP 50/70 MODIFICADO POR POLITEREFTALATO DE ETILENO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 13/12/2018 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Prof. Dr^a. Ana Maria Gonçalves Duarte
Doutora em Ciências e Engenharia de Materiais
Universidade Federal de Campina Grande
Orientadora

Prof. Dr^a. Carina Silvani
Doutora em Engenharia Civil
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientadora

Christian Rafael Ziegler
Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental
Universidade Federal de Campina Grande
Examinador Interno

Erika Vitória de Negreiros Duarte
Mestre em Engenharia Civil e Ambiental
Universidade Federal de Campina Grande
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pois todo e qualquer passo que eu queira dar, só é permitido através dEle. Pela Sua infinita bondade, amor, graça e proteção.

Aos meus pais, Antônio Francisco e Maria Telismar, e ao meu irmão, Ramon, devo tudo a vocês. Meu muito obrigada por TUDO, por serem tão presentes, por me apoiarem, por todos os conselhos e consolos, por sempre acreditarem em mim, por todo suor derramado, não medindo esforços para me permitir viver esse sonho.

À todos meus familiares por todo incentivo e carinho.

Aos que ao longo do curso e, principalmente, nessa etapa final contribuíram com apoio moral, me ouvindo nos momentos difíceis e sempre me dando palavras de motivação, em especial, à Ronei e às irmãs de coração Larissa, Mila, Anne, Adriana, Luciene, Debora, Julia, Isabela e Renata.

À minha orientadora, Ana Maria, por toda atenção e disponibilidade para suprir minhas dúvidas a qualquer hora e dia, por todas as palavras de incentivo e apoio, muito obrigada por toda ajuda e oportunidades dadas a mim ao longo de toda minha graduação.

À minha banca avaliadora, Prof. Dr^a. Ana Maria, Prof. Dr^a. Carina Silvani, Christian Rafael e Msc. Erika Vitória, pela disponibilidade e por dividir esse momento tão importante comigo.

Ao doutorando Daniel, ao mestrando Christian e ao aluno de PIBIQ Conrado por terem ajudado na realização dos ensaios, além de repassar conhecimentos importantes para a realização da pesquisa.

Por fim, à todos que contribuíram de forma direta e indireta para a realização desta pesquisa e conclusão desta etapa da minha vida.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Maria Telismar e Antônio Francisco, por todo apoio e dedicação tornando assim possível a realização desse sonho.

EPÍGRAFE

“Satisfizeste-lhe o desejo do coração e não lhe negaste as súplicas dos seus lábios.” *Salmos 21:2*

“Não fui eu que ordenei a você? Seja forte e corajoso! Não se apavore nem desanime, pois o Senhor, o seu Deus, estará com você por onde você andar.” *Josué 1:9*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema da análise química do ligante asfáltico.....	21
Figura 2: Trincas Isoladas.	23
Figura 3: Trincas Intercaladas.	24
Figura 4: Deformação Permanente nas Trilhas de Roda.	25
Figura 5: Envelhecimento do ligante asfáltico nas etapas de construção e de utilização do pavimento.....	26
Figura 6: Comportamento dos materiais (a) elástico, (b) viscoso e (c) viscoelástico.....	29
Figura 7: Layout do procedimento utilizado no viscosímetro rotacional.	31
Figura 8: Esquema da aplicação de tensão de cisalhamento na amostra de ligante asfáltico.....	32
Figura 9: Defasagem entre tensão e deformação em amostras ensaiadas no DSR.....	33
Figura 10: Representação vetorial de parâmetros reológicos.	34
Figura 11: Princípio do teste de MSCR.	36
Figura 12: Localização das 3 leituras de tensões durante um ciclo de MSCR.	36
Figura 13: Misturador Mecânico - LEP/DEC/UFCG.	44
Figura 14: Estufa RTFO (Rolling Thin-Film Oven) do LEP/UFCG.....	45
Figura 15: Reômetro de Cisalhamento Dinâmico. Série DHR1 – TA Instruments	46
Figura 16: Perda de massa das amostras de ligante asfáltico modificado com politereftalato de etileno.	48
Figura 17: Grau de Desempenho (PG) do CAP puro e modificado.	50
Figura 18: Relação do parâmetro $G^* \cdot \text{sen} \delta$ em função da temperatura antes do RTFO.	51
Figura 19: Relação do parâmetro $G^* \cdot \text{sen} \delta$ em função da temperatura depois do RTFO.	51
Figura 20: parâmetro $G^*/ \text{sen} \delta$ em função da temperatura antes do RTFO.....	52
Figura 21: parâmetro $G^*/ \text{sen} \delta$ em função da temperatura depois do RTFO. ...	53
Figura 22: Parâmetro Módulo Complexo G^* em função da temperatura antes do RTFO.	54
Figura 23: Parâmetro Módulo Complexo δ em função da temperatura depois do RTFO.	54
Figura 24: Valores de Jnr diff (%) dos ligantes estudados.	57
Figura 25: Percentual de recuperação (%) em função da compliância não-recuperável.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação quanto ao valor de Jnr (AASHTO M320-09).....	37
Tabela 2: Percentual de recuperação recomendado pelo FHWA.	38
Tabela 3: Parâmetros obtidos no teste de fluência e recuperação.....	55

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AMP - Asfalto Modificado por Polímero

ASTM - American Society for Testing and Materials

BBR - Bending Beam Rheometer

CAP - Cimento Asfático de Petróleo

CNT - Confederação Nacional do Transporte

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DSR - Dynamic shear Rheometer

MSCR - Multiple Stress Creep Recovery

PET - Polietileno tereftalato

PG - Performance Grade

SARA - Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos

SBS - estireno-butadieno-estireno

SMA - Stone Matrix Asphalt

SHRP - Strategic Highway Research Program

SUPERPAVE - Superior Performing Asphalt Pavements

RCRT - Repeated Creep and Recovery Test

RTFO - Rolling Thin Film Oven

η_0 - Viscosidade inicial do ligante

η_a - Viscosidade numa dada condição de envelhecimento

G^* - Módulo Complexo

G' - Módulo elástico

G'' - Módulo viscoso

δ - ângulo de fase

RESUMO

O crescimento da quantidade de veículos em circulação nas rodovias associado ao aumento do peso e do número de eixos dos veículos comerciais tem originado trincas por fadiga e deformações permanentes em trilhas de rodas. Os primeiros relacionam-se às cargas repetidas de tráfego e, também, à elasticidade da mistura e os segundos desenvolvem-se gradualmente com o aumento de solicitações de cargas por eixo. Assim, para que o ligante asfáltico tenha um desempenho satisfatório no pavimento, ele deve apresentar propriedades diferenciadas em relação aos demais materiais asfálticos. Este deve apresentar maior coesão e adesão aos agregados, grande resistência ao envelhecimento, susceptibilidade térmica adequada a faixa de utilização de temperatura do pavimento, alta resistência à fadiga e à deformação térmica. Nesse sentido, este estudo visa estudar as propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado por PET. Serão realizados ensaios reológicos, a saber: MSCR (Multiple Stress Creep Recovery) e PG para o ligante com adição de 2% e 3% de PET antes e após envelhecimento a curto prazo-RTFO. A partir das análises dos resultados verificou-se ao realizar o procedimento de RTFO, que para o CAP modificado com 2% e 3% de PET houve uma menor susceptibilidade ao envelhecimento em relação ao CAP puro, pois a perda de massa de ambos foi menor comparado a perda do CAP puro. Quanto ao grau de desempenho ambos se mantiveram a 64°C tanto para o ligante modificado novo como para o envelhecido, demonstrando assim o efeito de antioxidante do PET, já o CAP puro apesar de ter o mesmo 64°C de desempenho novo, ao passar pelo processo de envelhecimento tem seu grau de desempenho reduzido para 58°C. Ainda no ensaio de PG ao analisar os parâmetros obtidos observou-se uma melhora nas propriedades do ligante, o aumento na resistência à deformação e à fadiga. No ensaio de MSCR o CAP modificado com teor de 2% não é indicado para pavimentação e com teor de 3% diminui o nível de tráfego em relação ao CAP puro de pesado para padrão. Além disso ambos teores apresentaram baixa elasticidade e, conseqüentemente, percentuais de recuperação bem baixos, não muito diferentes do CAP puro. Por fim, percebeu-se que o PET pode ser utilizado como agente modificador do CAP e, que o mesmo é capaz de promover ganhos nas propriedades mecânicas do ligante asfáltico.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimentação, Ligantes modificados, PET.

ABSTRACT

The growth in the amount of vehicles on road, associated with the increase in the weight and on the number of axles of the commercial vehicles, has caused cracks due to fatigue and permanent deformation in wheel tracks. The first relates to repeated traffic loads and also to the elasticity of the mixture and the last develop gradually with an increase on the load at each axle. Therefore, in order for the asphalt binder to perform satisfactorily on the pavement, it must have different properties with respect to the behavior of the other asphalt materials. This should present greater cohesion and adhesion to the aggregates, great resistance to aging, adequate thermal susceptibility to the pavement temperature range, high fatigue resistance and thermal deformation. In this sense, this study aims to study the rheological properties of the modified asphaltic binder by PET. Rheological tests, MSR (Multiple Stress Creep Recovery) and PG for the binder with addition of 2% and 3% of PET before and after short-term aging-RTFO. From the analysis of the results it was verified when carrying out the procedure of RTFO, that for the CAP modified with 2% and 3% of PET there was a lower susceptibility to aging in relation to the pure CAP, since the loss of mass of both was lower compared to loss of pure CAP. As for the degree of performance both remained at 64 ° C for both the virgin and aged modified binder, thus demonstrating the antioxidant effect of PET, while the pure CAP despite having the same 64 ° C virgin performance, when passing by the aging process has its degree of performance reduced to 58 ° C. Still in the PG test when analyzing the obtained parameters an improvement in the properties of the binder, the increase in the resistance to the deformation and the fatigue was observed. In the MSCR test the modified CAP with a 2% content is not indicated for paving and with a 3% content it decreases the level of traffic in relation to the pure CAP of heavy to standard. In addition, both levels presented low elasticity and, consequently, very low recovery percentages, not very different from pure CAP. Finally, it was realized that PET can be used as a modifying agent of CAP and that it is capable of promoting gains in the mechanical properties of the asphalt binder.

KEYWORDS: Paving, modified binders, PET.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	15
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo Geral.....	16
1.2.2 Objetivos Específicos.....	16
1.3 Organização do Trabalho de Conclusão de Curso - TCC.....	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Infraestrutura rodoviária	18
2.2 Ligante asfáltico	19
2.3 Composição química dos ligantes asfálticos.....	20
2.4 Defeitos em pavimentos flexíveis	22
2.5 Envelhecimento dos ligantes asfálticos.....	25
2.6 Reologia dos ligantes asfálticos	27
2.7 Ligantes asfálticos modificados.....	38
2.8 Politereftalato de etileno como modificador de ligantes asfálticos	40
3. MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1 Materiais.....	43
3.2 Métodos	43
3.2.1 Procedimento de mistura	43
3.2.2 Caracterização do ligante asfáltico	44
3.2.2.1 RTFO (Estufa de Filme Fino Rotativo).....	44
3.2.3 Caracterização reológica do ligante	45
3.2.3.1 PG - Performance Grade.....	46
3.2.3.2 MSCR (Multiple Stress Creep Recovery)	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 Envelhecimento a curto prazo – RTFO.....	47
4.2 PG - Performance Grade	49
4.3 Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)	55
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	59
5.1 Considerações Finais.....	59
5.2 Sugestões para futuras pesquisas	60
REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário brasileiro, historicamente, tem sido majoritário no transporte de pessoas e mercadorias. Isso implica dizer nas rodovias brasileiras ocorre a movimentação de aproximadamente 60% da carga e 90% dos passageiros. Contudo, dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) revelam uma infraestrutura rodoviária com apenas 12,2% das estradas de rodagem pavimentadas, valor consideravelmente inferior ao encontrado em países desenvolvidos, os quais variam de 50 a 80% (MEDINA e MOTTA, 2015).

De acordo com a pesquisa realizada pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) em 2017, 61,8% da extensão das rodovias pesquisadas tiveram o estado geral considerado regular, ruim ou péssimo.

Segundo Lavasani et al. (2015) o revestimento do pavimento é responsável pela transferência de cargas das rodas para camadas inferiores (base, sub-base e subleito), sendo considerada uma parte crítica da estrutura das rodovias visto que além de receber as solicitações do tráfego, está submetida diretamente aos fatores ambientais.

Leal (2013) afirma que o crescimento da quantidade de veículos em circulação nas rodovias associado ao aumento do peso e do número de eixos dos veículos comerciais têm levado à deterioração precoce dos revestimentos asfálticos, e assim gerando as trincas por fadiga e as deformações permanentes em trilhas de rodas.

As trincas por fadiga estão relacionadas às cargas repetidas de tráfego e, também, à elasticidade da mistura. Já as deformações permanentes desenvolvem-se gradualmente com o aumento de solicitações de cargas por eixo. Além disso, os defeitos têm origem no mau uso da via devido a grandes solicitações para as quais o pavimento não foi projetado, na má execução do

processo construtivo, no emprego de materiais com propriedades insuficientes para atender à necessidade, nas condições climáticas atuantes, entre outras causas (CRAVO, 2016; ARAO,2014).

Sendo assim, cada vez mais são indispensáveis soluções e desenvolvimento de tecnologias de materiais para pavimentação. É nesse contexto que surgem os asfaltos modificados e como alternativa para melhoria das propriedades dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP), a modificação por polímeros tem se mostrado eficaz em vários estudos que vem sendo realizados (LUCENA, 2005; BRINGEL, 2007; LIMA, 2008a; SOBREIRO, 2014; NASCIMENTO, 2015).

Specht (2004) evidencia que, a principal razão de se combinar CAP com polímeros é prevenir a degradação prematura do revestimento e, desta forma, estender sua vida útil. De acordo com o autor, a adição dos polímeros promove a redução na susceptibilidade térmica e aumento da ductilidade do CAP e recuperação elástica, levando a uma maior resistência à deformação plástica e elástica sob temperaturas elevadas e suprimindo o aparecimento de fissuras de retração térmica e por fadiga prematura.

Tendo em vista o exposto acima, essa proposta busca contribuir para a melhoria da infraestrutura rodoviária brasileira através de um estudo que tem como objetivo avaliar o efeito da adição do politereftalato de etileno (pet) no ligante asfáltico (CAP 50/70) por meio de ensaios reológicos, com o intuito de verificar possíveis melhorias no comportamento de misturas asfálticas.

1.1 Justificativa

As rodovias constituem um dos principais sistemas de transporte utilizados para o deslocamento de pessoas e bens. Entretanto, nas últimas décadas, o aumento do volume de tráfego, das cargas transportadas por eixo e

da pressão dos pneus, tem ocasionado a degradação prematura dos revestimentos asfálticos.

A pavimentação asfáltica brasileira, assim como de outros países, necessita constantemente de avaliação e renovação devido à deterioração dos pavimentos, notadamente dos pavimentos asfálticos. As patologias existentes são originárias do mau uso da via devido a grandes solicitações para as quais o pavimento não foi projetado, de deficiências na execução do processo construtivo, do emprego de materiais com propriedades insuficientes para atender à necessidade, e ainda das condições climáticas atuantes.

Assim, a modificação do ligante asfáltico com PET visa aumentar a resistência às deformações permanentes, trincas ocasionadas por fadiga ou por variações térmicas e aumentar a resistência ao envelhecimento, além de, conseqüentemente, melhorar as condições de segurança e conforto das rodovias e reduzir custos com manutenções.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este projeto tem como principal objetivo estudar as propriedades reológicas do CAP 50/70 modificado por adição do Politereftalato de etileno.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o comportamento reológico, através do ensaio de PG (performance grade), do ligante asfáltico CAP 50/70 com adições de 2% e 3% de Politereftalato de etileno antes do envelhecimento a curto prazo –RTFO;
- Avaliar o comportamento reológico, através dos ensaios de PG (performance grade) e do MSCR (multiple stress creep recovery) do

ligante asfáltico CAP 50/70 com adições de 2% e 3% de Politereftalato de etileno após envelhecimento a curto prazo –RTFO;

- Comparar a perda de massa do ligante asfáltico CAP 50/70 puro e a perda de massa do ligante asfáltico CAP 50/70 com adições de 2% e 3% de Politereftalato de etileno após envelhecimento a curto prazo –RTFO.

1.3 Organização do Trabalho de Conclusão de Curso - TCC

O texto deste Trabalho de Conclusão de Curso encontra-se em um volume único distribuído da seguinte forma:

- Introdução – Introdução, Justificativa, Objetivos da Pesquisa e Organização do Projeto.
- Fundamentação Teórica – São abordados assuntos relacionados a infraestrutura rodoviária, ligante asfáltico, composição química dos ligantes asfálticos, envelhecimento dos ligantes asfáltico, reologia dos ligantes asfálticos, defeitos em pavimentos flexíveis, ligantes asfálticos modificados e politereftalato de etileno como modificador de ligantes asfálticos.
- Materiais e Métodos – São apresentados os materiais utilizados na pesquisa e relatados aspectos considerados importantes sobre os procedimentos da etapa experimental.
- Resultados Esperados – Neste tópico estão apresentados os resultados que pretende-se obter com a adição do modificados Politereftalato de etileno quando adicionado ao CAP.
- Considerações finais e sugestões para pesquisas futuras.

Por fim, estão as Referências, onde serão listadas as pesquisas citadas no Projeto.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a melhor compreensão da presente pesquisa são indispensáveis a apresentação de algumas definições no contexto da pavimentação e das principais características de ligantes asfálticos puros e modificados, bem como aspectos relacionados à reologia e composição química destes. Além disso, este tópico traz uma abordagem geral do modificador natural em estudo, o politereftalato de etileno (PET).

2.1 Infraestrutura rodoviária

O relatório gerencial da CNT (2017) verificou que existem no país 1.735.621 km de rodovias, dos quais apenas 212.886 km são pavimentados, isto é, 12,3% da malha, das quais 64.825 km são federais. Destas, apenas 9,8% são de pista dupla (6.351 Km), 2,1% (1.378 km) são vias em fase de duplicação e 88,1% (57.096 km) são pista simples.

O Brasil, no que se refere à infraestrutura rodoviária, teve um ínfimo crescimento da sua malha no período de 2007 a 2017, em comparação com o crescimento da frota de veículos e do número de acidentes. Comparativamente, nos últimos 10 anos, a frota de veículos no Brasil cresceu 102,4%, enquanto as rodovias federais pavimentadas cresceram somente 11,3%. (CNT, 2017).

O índice de competitividade global do Fórum Econômico Mundial, divulgado em 2017 no Relatório gerencial CNT de rodovias, classifica a qualidade das rodovias brasileiras, estas encontram-se na 103ª posição de 137 países analisados atrás de países como o Chile (24ª), Uruguai (95ª) e Argentina (96ª), todos situados na América do Sul.

A má qualidade das rodovias, motivada em parte por uma insuficiente manutenção, oferece riscos a todos os usuários. Implica também em custos

elevados para a restauração dos pavimentos, o que decorre de um processo de deterioração que requer soluções técnicas mais robustas e onerosas para a reversão deste cenário.

2.2 Ligante asfáltico

O asfalto é um produto derivado do petróleo, sendo assim, constituído predominantemente por betume, que por sua vez, é definido como uma mistura de hidrocarbonetos (LUCENA, 2005). É um material aglutinante, não volátil, de cor escura e que pode ser obtido de forma natural (asfalto natural) ou a partir do processamento do petróleo (asfalto de petróleo) (SOBREIRO, 2014). O ligante asfáltico mais usual é o asfalto de petróleo com propriedades que atendem a especificações mínimas de uso em pavimentação. É obtido do processo de destilação do petróleo, sendo também denominado Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).

No Brasil utiliza-se a denominação CAP para designar esse produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelásticoplástico à temperatura ambiente e viscoso a altas temperaturas, e que se enquadra em limites de consistência para determinadas temperaturas. A característica de termoviscoelasticidade desse material manifesta-se no comportamento mecânico, sendo suscetível à velocidade, ao tempo, à intensidade de carregamento, e à temperatura de serviço. O comportamento termoviscoelástico é mais comumente assumido do que o termoviscoplastico, com suficiente aproximação do real comportamento do material (BERNUCCI et al, 2007).

O revestimento asfáltico é constituído geralmente por agregados, fíler e ligantes asfálticos, que possui função aglomerante e impermeabilizante. A função aglomerante garante a ligação e envolvimento com os agregados, evitando a desagregação causada pelo efeito do tráfego, enquanto sua função

impermeabilizante impede a entrada de água, que pode comprometer toda a estrutura do pavimento (SOBREIRO, 2014).

O pavimento é uma estrutura formada basicamente pelo revestimento, base, sub-base e reforço do subleito. O revestimento asfáltico, ou a mistura asfáltica quando aplicada, tem o papel de resistir diretamente aos esforços do tráfego, distribuindo as tensões para as demais camadas de forma reduzida, resistir aos efeitos das condições climáticas, impermeabilizar o pavimento, garantir conforto, segurança e economia aos usuários (BERNUCCI et al., 2008).

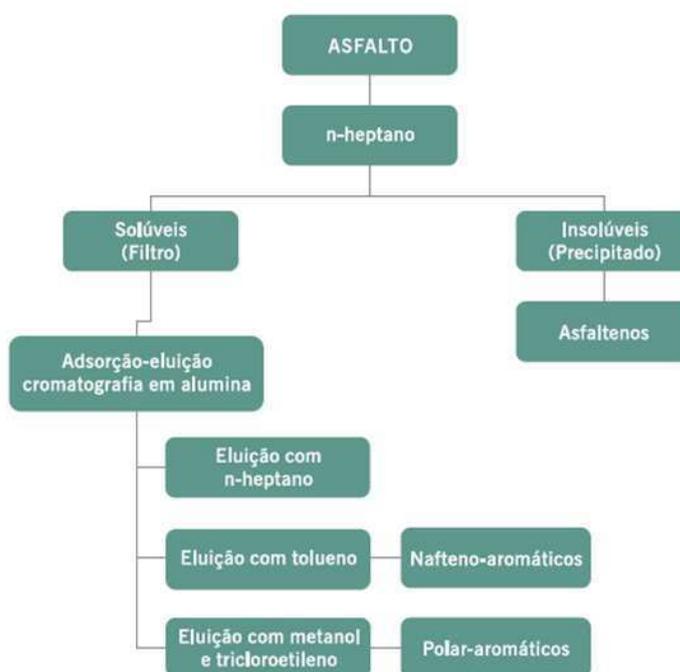
A redução da vida útil dos pavimentos tem impulsionado a busca por cimentos asfálticos de petróleo de melhor qualidade. A adição de modificadores com a finalidade de melhorar a qualidade do CAP e o desempenho da mistura asfáltica está sendo uma prática comum atualmente. A modificação de ligantes asfálticos visa melhorar o comportamento mecânico e em consequência, o desempenho funcional dos pavimentos. O melhoramento superando algumas desvantagens do ligante puro, pois podem proporcionar principalmente o aumento da resistência ao acúmulo de deformações permanentes, resistência ao aparecimento de trincas por fadiga e contração térmica, mas também retardar o envelhecimento prematuro do CAP e melhorar a interação com os agregados (ROSA JÚNIOR, 2015; GAMA, 2016).

2.3 Composição química dos ligantes asfálticos

A composição química do ligante asfáltico tem influência no desempenho físico e mecânico das misturas asfálticas, mas sua maior influência será nos processos de incorporação de agentes modificadores. O tipo de fracionamento pelo qual o ligante é submetido também é fator que influencia na sua composição química (BERNUCCI, 2010).

O método empregado para separar os constituintes é conhecido como SARA (S de saturados, A de aromáticos, R de resinas e A de asfaltenos). Na cromatografia, o ligante é diluído em n-heptano e um filtro capta a parte solúvel, genericamente denominada maltenos que compreendem os saturados, aromáticos e resinas, enquanto que a parte insolúvel precipitada são os asfaltenos. A Figura 1 mostra a representação esquemática desses componentes do ligante asfáltico (SHELL, 2003).

Figura 1: Esquema da análise química do ligante asfáltico.



Fonte: adaptado de Shell (2003).

Bernucci (2010) apresenta os quatro principais constituintes extraídos pelo SARA e os define da seguinte maneira:

a) asfaltenos: a coloração do ligante preto ou marrom escuro é conferida por esta parcela. Composição formada por aglomerados de compostos polares e polarizáveis formados por associações intermoleculares, constituídos de hidrocarbonetos naftênicos condensados e de cadeias saturadas curtas.

Constituem entre 5% a 25% do ligante asfáltico, refletindo na dureza e viscosidade (quanto maior o percentual de asfaltenos, mais duro e mais viscoso será o ligante).

b) resinas: responsáveis pelo comportamento como solução (Sol) ou como gelatina (Gel), são compostos de hidrogênio e carbono, com pequena proporção de oxigênio, enxofre e nitrogênio. São sólidos ou semissólidos marrom-escuros com natureza polar fortemente adesiva.

c) aromáticos: líquido viscoso amarelo polar, participando em maior proporção no asfalto (40 a 65%).

d) saturados: óleos viscosos não-polares transparentes, compondo de 5 a 20% dos asfaltos.

O ligante asfáltico é composto de 90% a 95% de hidrocarbonetos e de 5% a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes, e cujas propriedades físicas estão associadas à sua temperatura. Em temperaturas baixas, o ligante se comporta quase como um sólido e à medida que a temperatura aumenta, a viscosidade baixa e, em temperaturas altas, o ligante se comporta como um líquido. Esse comportamento o torna um material termoviscoelástico. Desta forma, a avaliação da susceptibilidade térmica dos ligantes é um dos critérios mais utilizados de classificação, fazendo a medição direta ou indiretamente da sua consistência ou viscosidade em diferentes temperaturas (BERNUCCI, 2010).

2.4 Defeitos em pavimentos flexíveis

Os pavimentos flexíveis devem ter condições que proporcionem aos usuários conforto, segurança e economia ao trafegar. Condições precárias dos pavimentos podem acontecer devido a falhas nas fases de projeto ou

construção, sejam elas no controle de qualidade dos materiais (tipo de ligante asfáltico, teor e quantidade de vazios bem como propriedade dos agregados como adesividade e granulometria), controle da fase de usinagem ou na compactação da mistura. Os defeitos mais frequentes nas estradas brasileiras são o desenvolvimento de trincas no revestimento asfáltico e o aparecimento de deformações permanentes nas trilhas de rodas (DNIT, 2003).

O trincamento por fadiga (fissuras) é um dos defeitos mais comuns, aparecendo em pavimentos envelhecidos, onde, após ser submetido às cargas cíclicas, já não oferece boa resposta às solicitações. As trincas por fadiga iniciam-se na parte inferior da camada asfáltica e propagam-se até a superfície do pavimento. Normalmente, elas surgem nas trilhas de roda de veículos pesados na direção longitudinal da via como mostrado na Figura 2, enquanto seu estágio final caracteriza-se por trincas do tipo pele de crocodilo (Figura 3) já que as trincas longitudinais isoladas evoluem pelas trincas ramificadas (FONTES, 2009).

Figura 2: Trincas Isoladas.



Fonte: Fontes (2009)

Figura 3: Trincas Intercaladas.



Fonte: Fontes (2009)

Outro defeito que influencia a vida útil do pavimento é a deformação permanente, que aparece após cessar a aplicação da carga no pavimento, isto é, possui caráter residual (PREUSSLER & PINTO, 2001 apud. FONTES, 2009). Segundo Fontes (2009) este fenômeno é influenciado pelas propriedades e proporções de cada um dos componentes de uma mistura asfáltica (agregados, ligante e volume de vazios) e acontece com mais frequência no verão, já que as altas temperaturas a viscosidade do ligante diminui e o carregamento do tráfego é suportado pelo agregado mineral.

Estas podem surgir, em alguns casos, como cordões laterais longitudinais de mistura asfáltica da camada de desgaste devido à fluência do material. À medida que as solicitações aumentam, depressões longitudinais aparecem gradualmente nas trilhas de roda (Figura 4) podendo ou não possuírem elevações laterais nas estradas (FONTES, 2009).

Figura 4: Deformação Permanente nas Trilhas de Roda.



Fonte: Fontes, (2009)

Em meio a estas problemáticas surge a reologia, que direciona para uma melhor escolha do ligante, tendo em vista as condições nas quais os pavimentos estarão sujeitos, através de uma maior compreensão das propriedades físico-químicas do ligante asfáltico, possibilitando uma maior vida útil do pavimento.

2.5 Envelhecimento dos ligantes asfálticos

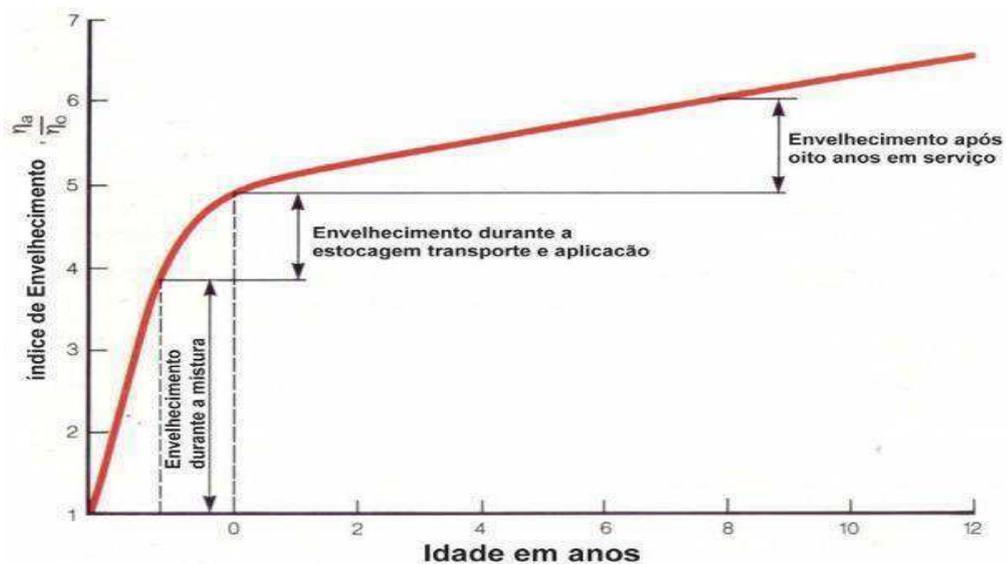
Atualmente, um dos grandes desafios da pavimentação é reduzir o envelhecimento do ligante asfáltico durante todo o seu ciclo de aplicação já que o mesmo oxida lentamente quando em contato com o ar.

O envelhecimento do ligante asfáltico do revestimento ocorre em três etapas: a primeira, de maior impacto, ocorre na usinagem da mistura asfáltica e representa cerca de 60% do envelhecimento; a segunda ocorre durante a estocagem, transporte, espalhamento e compactação, representando cerca de 20% do envelhecimento total; e a terceira etapa ocorre durante a vida útil do

revestimento e se dá devido a ação do meio ambiente, representando cerca de 20% do envelhecimento total sofrido pelo ligante (MORILHA, 2004).

Na Figura 5 está ilustrado um gráfico que representa o envelhecimento em cada etapa supracitada, onde no eixo das ordenadas tem-se o índice de envelhecimento, definido como a relação entre a viscosidade após o envelhecimento em cada instante (η_a) e a viscosidade original do ligante (η_0), e nas abcissas o tempo de vida do pavimento, em anos.

Figura 5: Envelhecimento do ligante asfáltico nas etapas de construção e de utilização do pavimento.



Fonte: Adaptado de Whiteoak (1991 apud MORILHA JUNIOR, 2004; AZEREDO, 2011).

Dessa forma, o desempenho e as características químicas, físicas e reológicas dos ligantes asfálticos são afetadas por este processo de envelhecimento, o qual influencia a durabilidade da mistura asfáltica em campo (MELLO, 2014; CAVALCANTE, 2016).

Nesse contexto, é indispensável a quantificação do envelhecimento no estudo do ligante. Sendo assim, o procedimento de ensaio denominado RTFO

simula o envelhecimento a curto prazo numa estufa com altas temperaturas e presença de jatos de ar, condição que corresponde ao que o ligante é submetido durante a usinagem, e expressa seu resultado através da verificação da perda de massa do ligante.

2.6 Reologia dos ligantes asfálticos

Reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação da matéria por meio da análise das respostas (na forma de deformações ou tensões) de um material a aplicação de uma tensão ou de uma deformação (BRETAS E D'AVILA, 2005).

A deformação de um corpo pode ser dividida em dois tipos: (1) deformação espontânea e reversível, conhecida também como elasticidade; e (2) deformação irreversível, conhecida como fluxo ou escoamento.

Os sólidos elásticos ideais respondem a aplicação de uma tensão através de uma deformação linearmente proporcional à força aplicada, que permanece enquanto a tensão é mantida. A razão entre a tensão e a deformação é a medida da elasticidade do sólido. Com a retirada da tensão de deformação, o corpo deformado retorna ao seu estado de forma original, anterior a aplicação da tensão. A interação entre forças e deformações é completamente reversível (BRINGEL, 2007).

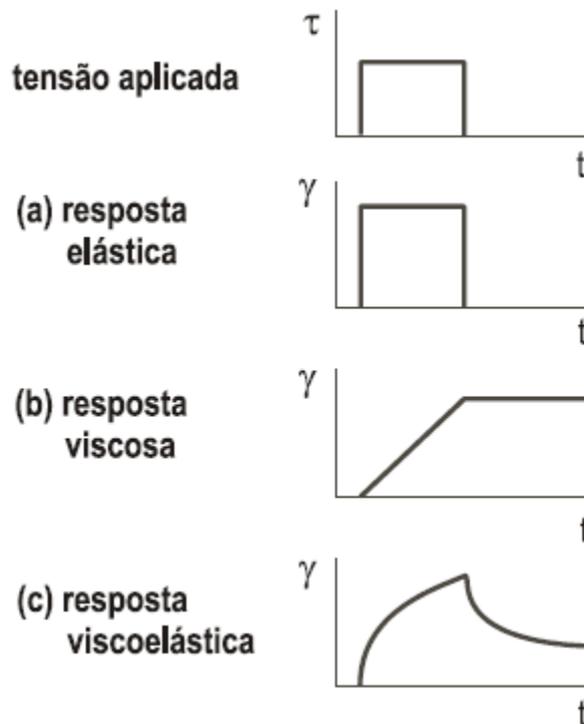
Já os fluidos viscosos ideais se deformam continua e irreversivelmente, sob a ação de um sistema de forças, sendo esta deformação também conhecida por escoamento. Portanto, corpos considerados idealmente viscosos exibem escoamento, onde a taxa de deformação é uma função da tensão. Um corpo viscoso ideal não pode sustentar uma tensão, uma vez que está é aliviada por intermédio do escoamento. A energia de deformação se dissipa no seio do fluido

viscoso, sob a forma de calor, isto é, não será recuperada ao se retirar o esforço (BRINGEL, 2007).

A maioria dos corpos reais, entretanto, não se comporta nem como sólidos nem como fluidos ideais (MACHADO, 2002). Estes são os chamados fluidos viscoelásticos, que apresentam um comportamento misto (viscoso e elástico), onde a tensão aplicada é parcialmente acumulada e parcialmente dissipada sob a forma de energia calorífica (BRINGEL, 2007).

Em um ensaio de fluência, como ilustrado na Figura 6, um material elástico se deforma à medida que se aumenta a tensão aplicada. Em seguida, sob um carregamento constante a deformação também se mantém constante independente do tempo e ao remover o carregamento, o material retorna à sua condição inicial (Figura 6.a). Quanto ao material viscoso (Figura 6.b), este deforma-se a uma taxa constante até que a tensão seja removida. Assim o material se manterá deformado, pois neste caso não há recuperação. Já para um material viscoelástico (Figura 6.c), este apresenta uma deformação imediata com a aplicação da tensão, em seguida, uma deformação gradual com o tempo e após cessar o carregamento, o material apresenta uma deformação residual que pode ou não ser recuperada, a depender do tempo e da intensidade da tensão aplicada (FAXINA, 2006).

Figura 6: Comportamento dos materiais (a) elástico, (b) viscoso e (c) viscoelástico.



Fonte: Faxina (2006).

A importância do estudo das propriedades reológicas dos ligantes asfálticos é compreender a relação entre as tensões (ou carregamento dinâmico do tráfego), deformações, tempos de aplicação de carga (ou frequências de carregamento), variação de temperatura e envelhecimento a que são submetidos. Estes são os principais fatores, pois atuam desde o processo de usinagem até ao longo do tempo em serviço (BRINGEL et al., 2009; SOBREIRO, 2014).

Através da reologia é possível diferenciar os ligantes asfálticos obtidos de diferentes petróleos e processos de refino, definir as temperaturas de usinagem e aplicação da mistura asfáltica por meio da viscosidade e relacionar as propriedades reológicas com os defeitos do pavimento (MOTHÉ, 2009).

As propriedades reológicas dos ligantes asfálticos dividem-se em propriedades reológicas fundamentais e propriedades reológicas empíricas. As

fundamentais são fornecidas por ensaios que medem a viscosidade aparente (medida no viscosímetro rotacional), viscosidade cinemática (medida no viscosímetro capilar), módulo complexo, ângulo de fase, módulo de armazenamento, módulo de dissipação e viscosidade complexa (medidas no reômetro de cisalhamento dinâmico -DSR), rigidez sob baixas temperaturas e taxa de relaxação sob baixas temperaturas (medidas no reômetro de flexão em viga - BBR). Já as propriedades empíricas são obtidas por medidas de penetração (medido no penetrômetro), ponto de amolecimento (medido pelo “conjunto anel e bola”), viscosidade Saybolt-Furol (medido em viscosímetro Saybolt-Furol), resiliência (medido em “conjunto cuba e esfera”), ductilidade (medido no ductilômetro) e retorno elástico (medido no ductilômetro) (FAXINA, 2006).

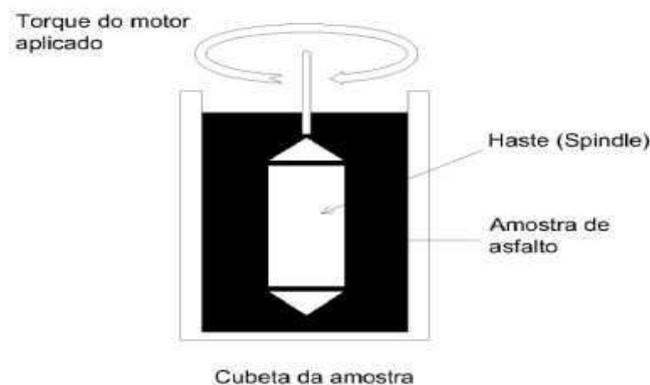
Com a evolução tecnológica e acadêmica, houve o aperfeiçoamento dos métodos de análises das propriedades reológicas e, com isso, o desenvolvimento de equipamentos mais precisos e eficientes. O Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR – Dynamic shear Rheometer) corresponde a esse avanço, onde este equipamento é utilizado para caracterizar as propriedades viscoelásticas do ligante asfáltico.

A avaliação de asfaltos puros e modificados após o desenvolvimento do SHRP, passou a seguir as especificações dele resultante, denominadas SUPERPAVE. Essas especificações, as quais passaram a denominar as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos de “fundamentais”, seguem uma nova linha de pesquisa baseada no clima e no tráfego local para se verificar o desempenho do ligante em campo a partir de ensaios reológicos (GAMA, 2016) e difere bastante das especificações anteriores, as quais baseavam-se apenas nos ensaios físicos convencionais de penetração, ponto de amolecimento, viscosidade Saybolt-Furol, entre outros, cujas propriedades reológicas são denominadas “empíricas” (FAXINA, 2006).

No método SUPERPAVE os equipamentos mais usuais são a estufa de filme fino rotativo (RTFO), para simular o envelhecimento do ligante que ocorre durante a usinagem e compactação da mistura, o viscosímetro rotacional Brookfield e o DSR, usados para a caracterização do comportamento viscoelástico do ligante e determinação de suas propriedades fundamentais.

O viscosímetro rotacional é um ensaio importante na medição do comportamento reológico dos ligantes asfálticos. Este procedimento, representado na Figura 7, é utilizado para mensurar a viscosidade de ligantes asfálticos submetido a altas temperaturas, comumente utilizadas nas fases de usinagem e compactação destes materiais.

Figura 7: Layout do procedimento utilizado no viscosímetro rotacional.

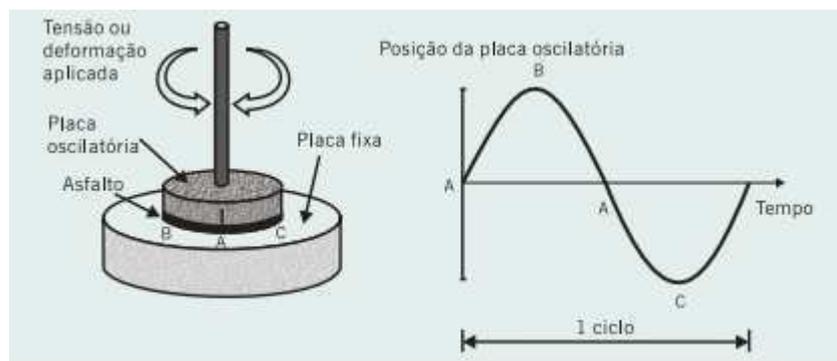


Fonte: NEGRÃO, adaptada de Gonzáles (2006)

A determinação da viscosidade dos ligantes asfálticos é importante para o controle das fases de bombeamento e mistura, permitindo determinar as temperaturas supracitadas sem comprometimento da trabalhabilidade. Portanto, a partir do gráfico temperatura versus viscosidade, obtido neste ensaio, pode-se extrair tais faixas de temperaturas.

Já o ensaio DSR é utilizado para avaliar as propriedades de rigidez e elasticidade de ligantes asfálticos às temperaturas intermediárias e altas. A estrutura do equipamento consiste de duas placas planas paralelas que atuam aplicando cisalhamento à amostra de ligante asfáltico, o procedimento baseia-se na prensagem de uma amostra de ligante entre uma placa fixa e outra giratória. Aplica-se um torque girando a placa de um ponto A para um ponto B, em seguida para um ponto C, retornando em fim para o ponto A, cada oscilação completa da placa superior corresponde a um ciclo, conforme ilustra a Figura 8.

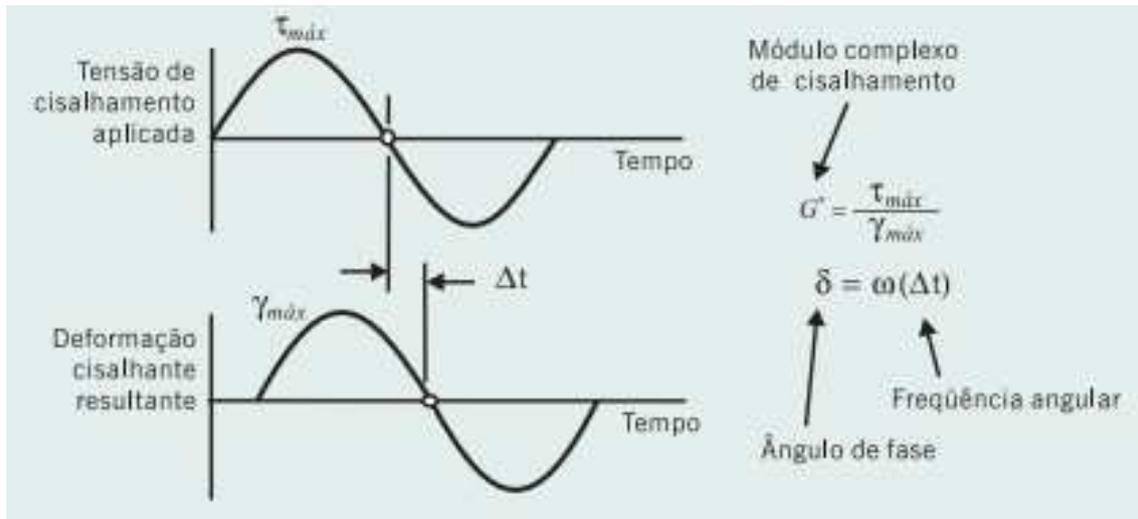
Figura 8: Esquema da aplicação de tensão de cisalhamento na amostra de ligante asfáltico.



Fonte: Bernucci et al. (2010)

O ângulo de fase indica o nível de defasagem no tempo entre a solicitação imposta e a resposta do ligante, este parâmetro pode ser utilizado para indicar o nível de elasticidade do material. A Figura 9 ilustra o ciclo de tensão, deformação e cálculo do ângulo de fase.

Figura 9: Defasagem entre tensão e deformação em amostras ensaiadas no DSR.



Fonte: Bernucci et al. (2010)

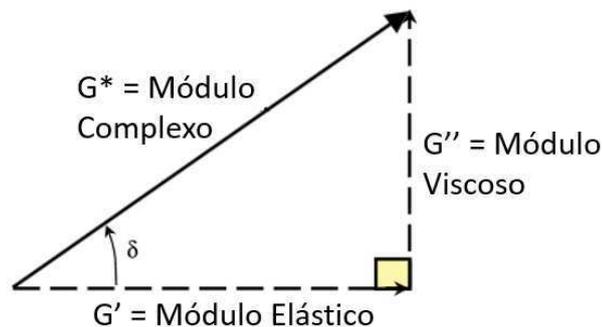
Segundo Fernandes (2009), por meio dos ensaios do DSR, é possível determinar parâmetros viscoelásticos como módulo dinâmico de cisalhamento, $|G^*|$, módulo de armazenamento, G' , módulo de perda, G'' , ângulo de fase (δ -delta) e viscosidade. O módulo dinâmico pode ser definido como a razão entre a máxima tensão de cisalhamento e a máxima deformação, podendo ser decomposto em componente elástica (G') (Equação 1) e componente viscosa (G'') (Equação 2) (Figura 10).

$$G' = G^* \cos \delta \quad (1)$$

$$G'' = G^* \sin \delta \quad (2)$$

Onde G^* : módulo dinâmico;
 G' : módulo elástico;
 G'' : módulo viscoso;
 δ : ângulo de fase;

Figura 10: Representação vetorial de parâmetros reológicos.



Fonte: Fernandes (2009)

Quando o ângulo de fase é zero, o material apresenta resposta imediata às solicitações, característica do comportamento completamente elástico. Enquanto que, quando o ângulo de fase é de 90° , o material apresenta comportamento semelhante a um líquido, ocorrendo maior defasagem entre a solicitação e a resposta. O ligante asfáltico apresenta valores intermediários do ângulo de fase, entre 0 e 90° , sendo denominado como material viscoelástico por nunca apresentar comportamento unicamente elástico ou viscoso. (MARINHO, 2017).

Na especificação SUPERPAVE o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ é utilizado para caracterizar a resistência dos ligantes asfálticos à deformação permanente. O reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) é utilizado para aplicar carregamentos em regime oscilatório em uma amostra de CAP e, desta maneira, o módulo complexo (G^*) e o ângulo de fase (δ) do material são obtidos. Embora este parâmetro represente adequadamente a resistência dos ligantes asfálticos não-modificados à deformação permanente, pesquisas tem mostrado que o mesmo não ocorre com os ligantes asfálticos modificados e, assim, alternativas foram propostas em estudos como os de Bahia et al., (2001), Bouldin et al.,

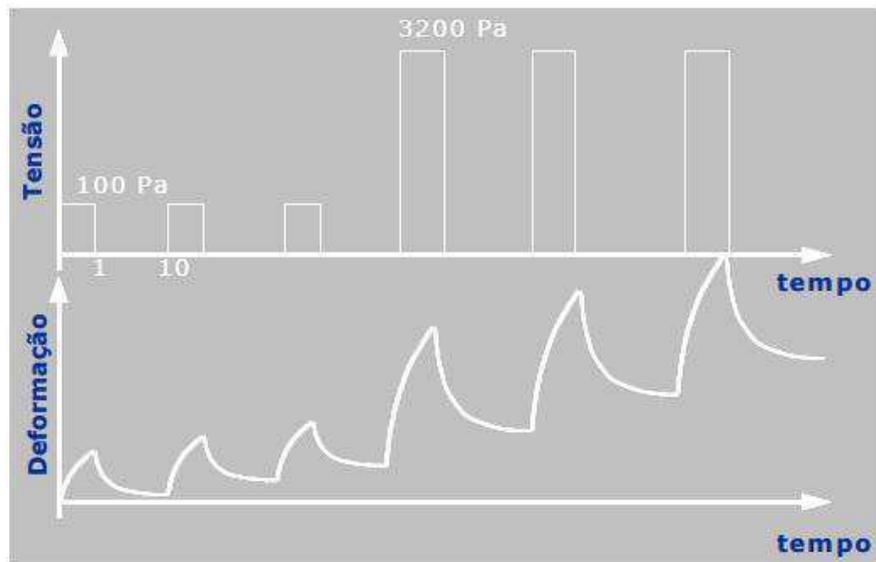
(2001) e Shenoy (2001), a fim de caracterizar, de maneira mais adequada, a resistência dos ligantes asfálticos modificados à deformação permanente.

Na presente pesquisa com o DSR foram realizados os ensaios de grau de performance (PG) e o de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR - Multiple Stress Creep Recovery).

O Grau de Desempenho (PG) de um ligante asfáltico é definido por duas temperaturas que delimitam a faixa de utilização do mesmo, ou seja, intervalo de temperaturas em que o ligante asfáltico mantém certas propriedades reológicas de desempenho: uma indicando a temperatura máxima para uso, de forma a manter um desempenho satisfatório (baixa deformação permanente), e outra indicando a temperatura mínima de forma a evitar o trincamento por baixa temperatura.

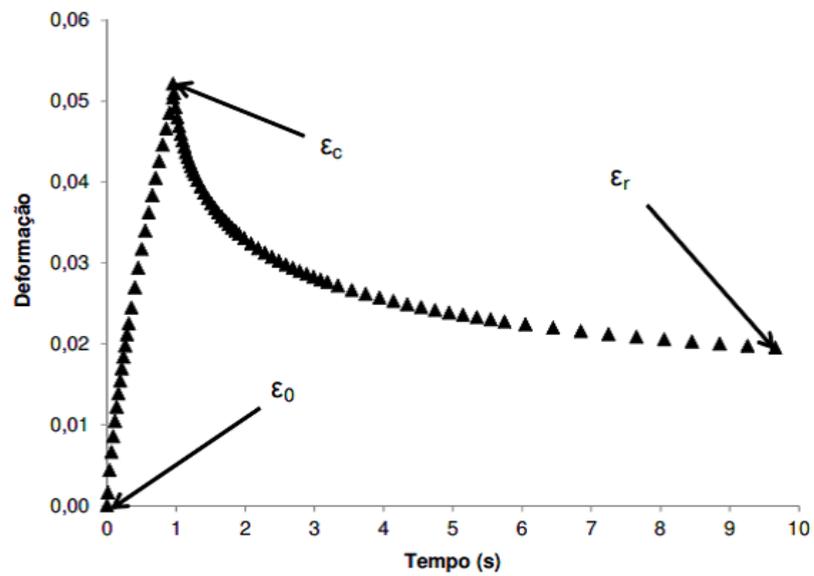
Na Figura 11, é apresentada o princípio do ensaio do MSCR com relação a tensão e deformação em função do tempo. Na primeira etapa do teste sob a tensão de 0,1 kPa é simulado a condição de tráfego normal e na segunda etapa sob a tensão de 3,2 kPa é simulado o tráfego mais intenso, com a finalidade de avaliação da capacidade do material em manter sua resposta elástica. Na Figura 12 é apresentada a deformação em função do tempo para um ciclo de creep.

Figura 11: Princípio do teste de MSCR.



Fonte: Fernandes, 2009

Figura 12: Localização das 3 leituras de tensões durante um ciclo de MSCR.



Fonte: Domingos (2011)

A cada ciclo de fluência e recuperação, são registradas as seguintes informações:

- início do período de fluência de cada ciclo (ϵ_0), no tempo 0 segundo;
- final do período de fluência de cada ciclo (ϵ_c), no tempo 1 segundo;
- final do período de recuperação de cada ciclo (ϵ_r), no tempo 10 segundos;

A compliância de fluência não-recuperável (J_{nr}) é o parâmetro para altas temperaturas obtido no ensaio MSCR. Cada nível representa um tipo de carregamento do tráfego (volume e/ou velocidade) adequado ao material e as designações são feitas pelas letras S (padrão), H (pesado), V (muito pesado) e E (extremamente pesado) (DOMINGOS, 2011).

A Tabela 1 apresenta a classificação do tráfego quanto ao valor do J_{nr} , baseada na norma AASHTO M320-09, a uma tensão de 3.200 Pa na temperatura de PG do pavimento. Segundo Domingos et al (2014), esta metodologia fornece ao usuário uma estimativa do número de passadas de eixo-padrão simples (ESALs – equivalente single-axle loads) que a mistura asfáltica pode suportar durante a vida útil de serviço. A Tabela 2 relaciona os valores mínimos do percentual recuperação para avaliar a resposta elástica retardada do CAP. Uma resposta elástica alta retardada é uma indicação de que o CAP tem uma componente elástica significativa à temperatura de ensaio (ANDERSON et al, 2010).

Tabela 1: Classificação quanto ao valor de J_{nr} (AASHTO M320-09).

Propriedade	J_{nr} (kPa^{-1})	Tipo de tráfego	Número de passadas em um eixo padrão
J _{nr} a 3,2 kPa na temperatura máxima de PG	2,0 – 4,0	Padrão (S)	<10 milhões
	1,0 – 2,0	Pesado (H)	>10 milhões
	0,5 – 1,0	Muito pesado (V)	>30 milhões
	0 – 0,5	Extremamente pesado (E)	>100 milhões

Fonte: AASHTO M320 (2016)

A alta elasticidade do CAP é dita quando o percentual de recuperação é superior ao mínimo recomendado para um determinado J_{nr} e a baixa elasticidade quando o percentual de recuperação encontra-se abaixo do mínimo recomendado para um determinado J_{nr} .

Tabela 2: Percentual de recuperação recomendado pelo FHWA.

<i>Jnr a 3.2 (kPa⁻¹)</i>	<i>% R mínimo</i>
2,0 – 1,01	30
1,0 – 0,51	35
0,50 – 0,251	45
0,25 – 0,125	50

Fonte: (D'Angelo, 2011) (Pamplona *et al*, 2012 – adaptado)

2.7 Ligantes asfálticos modificados

Para Zhang *et al.* (2015), o aumento das solicitações impostas pelo tráfego aliado às variações climáticas, provocadas pelos fenômenos meteorológicos, tem causado a deterioração prematura de pavimentos flexíveis construídos com ligantes asfálticos convencionais, tornando necessária a modificação destes a fim de melhorar as suas propriedades e desempenho.

Agentes modificadores ou aditivos são utilizados com a função de melhorar as propriedades elásticas e mecânicas dos ligantes asfálticos. Fang *et al.* (2013) afirma que a modificação do ligante tem como papel melhorar propriedades do material como adesividade, suscetibilidade térmica, resistência à oxidação, resistência ao envelhecimento e durabilidade. Segundo Azarhoosh (2015) as trincas por fadiga são um dos principais defeitos estruturais que ocorrem em misturas asfálticas à temperaturas ambientes. A utilização de agentes modificadores nos ligantes asfálticos fazem com que estes apresentem maior durabilidade quanto a vida de fadiga.

Xu & Huang (2012) afirmam que a deformação permanente está relacionada a pavimentos de espessura delgadas, portanto em projetos que apresentem tais dimensões é recomendado a utilização de ligantes asfálticos modificados para resistir a tais deformações.

A incorporação de aditivos em misturas asfálticas pode ser feita através de duas maneiras, conhecidas na literatura por processo úmido e processo seco. Basicamente, no processo úmido os aditivos são misturados com o ligante asfáltico, em temperatura e tempo especificados, antes de serem misturados com os agregados; enquanto que no processo seco os aditivos são adicionados diretamente na mistura (MOGHADDAM e KARIM, 2012; LYONS e PUTMAN, 2013).

Ambas as maneiras (úmido e seco) de incorporação de aditivos em misturas asfálticas apresentam vantagens. No caso da adição de polímeros ocorrerem diretamente no ligante asfáltico, há geralmente um aumento da rigidez e uma melhora em termos de suscetibilidade térmica do ligante, tornando as misturas asfálticas mais resistentes a deformações permanentes em climas quentes. Também é possível obter vantagens através da adição de polímeros diretamente nas misturas asfálticas, os quais atuam formando uma película em torno do agregado, aumentando a sua rugosidade, resultando em misturas asfálticas de boa qualidade (AWWAD e SHBEEB, 2007).

Um tipo de modificante comumente utilizados nos ligantes asfálticos são os polímeros. Pavimentos modificados por polímeros exibem melhor resistência ao craqueamento térmico e uma diminuição dos danos por fadiga, desgaste e susceptibilidade térmica (YILDIRIM, 2007), causados pela alta frequência de cargas e tráfego, aumentando assim a vida útil dos pavimentos em serviços (YILDIRIM, 2005; CORTIZO e col., 2004; LAMONTAGNE e col., 2001). A incorporação de polímeros ao ligante asfáltico reduz o envelhecimento oxidativo (OUYANG e col., 2006).

A adição de polímeros ao CAP tende a melhorar suas propriedades viscoelásticas proporcionando maior estabilidade ao material do revestimento (GONZALEZ e col., 2004). Estes modificadores, além de melhorar as propriedades reológicas e físicas dos ligantes asfálticos, devem apresentar resistência a temperatura de trabalho, facilidade de mistura com o ligante base, disponibilidade no mercado e custo compatível para se configurar em uma alternativa de desempenho, praticidade e economia (REIS, 2002).

2.8 Politereftalato de etileno como modificador de ligantes asfálticos

Polietileno tereftalato (PET) é uma resina de polímero termoplástico pertencente à família do poliéster. O PET é utilizado na fabricação de garrafas de bebidas, fibras sintéticas, pratos e talheres descartáveis e alguns recipientes de plástico (AHMADINIA *et al.*, 2011).

Moghaddam e Karim (2012) destacam o uso de resíduos de plásticos (polímeros) em misturas asfálticas, os quais podem ser aplicados como substitutos dos agregados, modificadores do ligante asfáltico ou aditivos na mistura. Ahmadinia *et al.* (2012) aplicaram resíduos de PET – passante 100% na peneira de 1,18mm - obtidos da trituração de garrafas plásticas como aditivos em misturas asfálticas do tipo Matriz Pétreo Asfáltica (do inglês *Stone Matrix Asphalt* - SMA), via processo seco. As misturas aditivadas com PET apresentaram melhor desempenho em relação à deformação permanente, verificado através de simuladores de tráfego em placas moldadas em laboratório ensaiadas a uma temperatura de 45°C, e ao escorrimento do ligante. As melhorias apresentadas em relação à deformação permanente, segundo esses autores, estão associadas a um aumento na rigidez das misturas, ocasionado pelas propriedades semicristalinas do PET, as quais permanecem inalteradas durante o processo de mistura. No caso do escorrimento do ligante, os resíduos de PET

utilizado, ao permanecerem na forma de cristais, provocam um aumento na área superficial que absorve o ligante excedente, resultando na redução do escorrimento do ligante, explicam os autores.

Moghaddam, Karim e Syammaun (2012), ao contrário de Ahmadinia *et al.* (2012), afirmam que o PET rígido pode tornar as misturas mais flexíveis e, conseqüentemente, mais deformáveis quando sob aplicação de carga. Tal afirmação é fundamentada nos resultados de módulo de resiliência de misturas asfálticas do tipo SMA com adição de PET passante na peneira de 2,36mm, nas proporções de 0, 0,2, 0,4, 0,6, 0,8 e 1%, em relação ao peso dos agregados, adicionado via processo seco. Moghaddam, Karim e Syammaun (2012), também verificaram que a adição de PET proporcionou uma melhora nas propriedades elásticas das misturas, resultando no aumento da vida de fadiga. Moghaddam e Karim (2012) explicam que para contribuir para o aumento da vida de fadiga, além da melhora nas propriedades elásticas das misturas, o PET absorve parte da energia oriunda da repetição de cargas, retardando o surgimento e a propagação de trincas nas misturas asfálticas.

Rahman e Wahab (2013), porém, substituíram os agregados retidos entre as peneiras 1,18 e 2,36mm por PET, de 5 a 25% em peso da mistura, e verificaram que a presença deste material reduziu a rigidez das mesmas e conferiu um bom comportamento frente à deformação permanente. Neste caso, a substituição de 20% foi a que gerou menor deformação permanente, metade da deformação encontrada para a mistura com CAP não modificado, para as condições ensaiadas.

Mohammed e Hussein (2014a) avaliaram o comportamento de misturas asfálticas compostas por asfalto modificado por partículas finas de PET – passante na peneira nº200. Os autores verificaram, que a polimerização do asfalto com PET elevou a rigidez da mistura e melhorou à adesão entre agregados e ligante, minimizando os danos induzidos pela umidade.

Outro aspecto de grande valia analisado por Mohammed e Hussein (2014a) foi à durabilidade das misturas asfálticas. Da mesma forma, a polimerização do asfalto com PET surtiu um efeito positivo sobre as misturas asfálticas, o que pode ser explicado pela melhora das propriedades de adesividade agregado-ligante promovida pela polimerização, conforme discutido anteriormente.

Por outro lado, a adição de PET em misturas asfálticas pelo processo seco não se mostrou uma alternativa eficiente para a melhora das propriedades de misturas asfálticas no tocante ao dano por umidade. A forma cristal adquirida pelo PET, após a mistura, retém parte do ligante, reduzindo a espessura do filme de ligante no entorno do agregado, deixando as misturas mais vulneráveis ao dano induzido pela umidade (AHMADINIA *et al.*, 2012).

Embora a polimerização do ligante asfáltico apresente vantagens, a exemplo das apresentadas por Mohammed e Hussein (2014a), existe a dificuldade de realizar este procedimento, relacionada à tendência de separação de fases em altas temperaturas devido à pouca compatibilidade entre polímero e ligante asfáltico. Mohammed e Hussein (2014b) sugerem uma adição máxima de 4% de PET, em relação ao peso do ligante, para produção de asfalto polímero, de modo a garantir uma boa homogeneidade e atender aos requisitos de estabilidade à estocagem e ductilidade.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar a influência do Politereftalato de etileno nos teores de 2% e 3% no CAP 50/70, foram realizados os ensaios reológicos MSCR após o envelhecimento a curto prazo e o grau de desempenho (PG – performance grade) antes e após o RTFO.

Os ensaios citados estão apresentados nos itens a seguir, evidenciando as análises a serem realizadas e a metodologia proposta.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados para realização desta pesquisa foram:

O CAP 50/70, obtido pelo processo de destilação do petróleo pela refinaria Duque de Caxias (REDUC), pertencente à Petrobras S/A, e distribuído, pela empresa Brasquímica Produtos Asfálticos Ltda, localizada no município de Candeias-BA.

O modificador politereftalato de etileno na forma triturada foi fornecido pela empresa DEPET, localizada no município de Campina Grande-PB.

3.2 Métodos

A metodologia utilizada para desenvolvimento desta pesquisa segue as normas da ASTM e da AASHTO, conforme ensaios descritos a seguir:

3.2.1 Procedimento de mistura

A mistura do ligante asfáltico com o politereftalato de etileno foi realizada em um misturador mecânico FISATOM, modelo 72 (Figura 13). O processo de modificação foi feito da seguinte forma:

- Rotação de 2000 rpm;
- Ligante asfáltico mantido a 160°C;

- Após a estabilização da temperatura, o politereftalato de etileno foi adicionado nos teores estabelecidos e misturado durante 30 minutos;

Figura 13: Misturador Mecânico - LEP/DEC/UFCG.



Fonte: Dados da pesquisa (2018)

3.2.2 Caracterização do ligante asfáltico

3.2.2.1 RTFO (Estufa de Filme Fino Rotativo)

O procedimento RTFO que segue a norma ASTM D 2872-97 condiciona o envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação e evaporação pelo efeito de calor e de jatos de ar sobre uma película de material asfáltico em movimento, simulando o efeito do envelhecimento do ligante que ocorre durante a usinagem e compactação da mistura. Sua aplicação é de suma importância visto que a deterioração de um pavimento está relacionada com o envelhecimento do ligante asfáltico.

Uma amostra de 35 gramas, já aquecida e completamente fluida, é colocada num cilindro de vidro que é fixado num sistema giratório no interior de uma estufa, ilustrada na Figura 14. Pode-se operar com até oito cilindros, nos quais com o movimento giratório o material forma uma fina película em seu interior, a qual passa a receber uma injeção de ar a cada 3 ou 4 segundos durante 85 minutos e a 163°C.

O resultado final do procedimento é a medida da variação de massa que o ligante sofreu decorrente do efeito do calor e do ar aplicados, indicando assim a volatilidade ou oxidação do asfalto. Mas tem sua principal contribuição na execução de outros ensaios, pois possibilita a identificação de mudanças nas propriedades do material submetido à essa condição de envelhecimento, além da condição normal do ligante.

Figura 14: Estufa RTFO (Rolling Thin-Film Oven) do LEP/UFCG.



Fonte: Dados da pesquisa (2018)

3.2.3 Caracterização reológica do ligante

A verificação de parâmetros reológicos dos ligantes asfálticos puro e modificados foram realizados por meio da utilização do DSR da série Discovery

Hybrid Rheometer (DHR–1) do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) apresentado na Figura 15. O reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) é utilizado na determinação de parâmetros viscoelásticos do ligante a temperaturas elevadas e intermediárias. O equipamento mede o módulo complexo de cisalhamento (G^*) e o ângulo de fase (δ) a temperaturas e frequências de carregamentos desejados.

Figura 15: Reômetro de Cisalhamento Dinâmico. Série DHR1 – TA Instruments



FONTE: Dados da pesquisa (2018)

3.2.3.1 PG - Performance Grade

A normatização do ensaio é descrita pela ASTM D6373-15.

Para se definir o PG de uma amostra de ligante asfáltico, é feita uma varredura em função da razão entre o módulo complexo (G^*) e o seno do ângulo de fase ($\text{sen}\delta$) para temperaturas partindo de 46°C e variando em uma faixa de 6°C entre cada leitura.

O PG corresponde à faixa de temperaturas na qual os valores de $G^*/\text{sen}\delta$ são superiores a 1,0 kPa e 2,2 kPa, respectivamente para as amostras antes e

após o envelhecimento a curto prazo. A temperatura máxima será obtida com a leitura imediatamente anterior ao ponto de falha determinado no ensaio. Sendo assim, estes valores são capazes de garantir a adequada resistência ao acúmulo de deformações permanentes (BERNUCCI et. al., 2007).

3.2.3.2 MSCR (Multiple Stress Creep Recovery)

O ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR - Multiple Stress Creep Recovery) busca avaliar o comportamento fluência-recuperação do ligante asfáltico, ou seja, é utilizado na identificação da presença de resposta elástica do ligante asfáltico e a mudança desta resposta sob dois níveis de tensão distintos a temperatura específica.

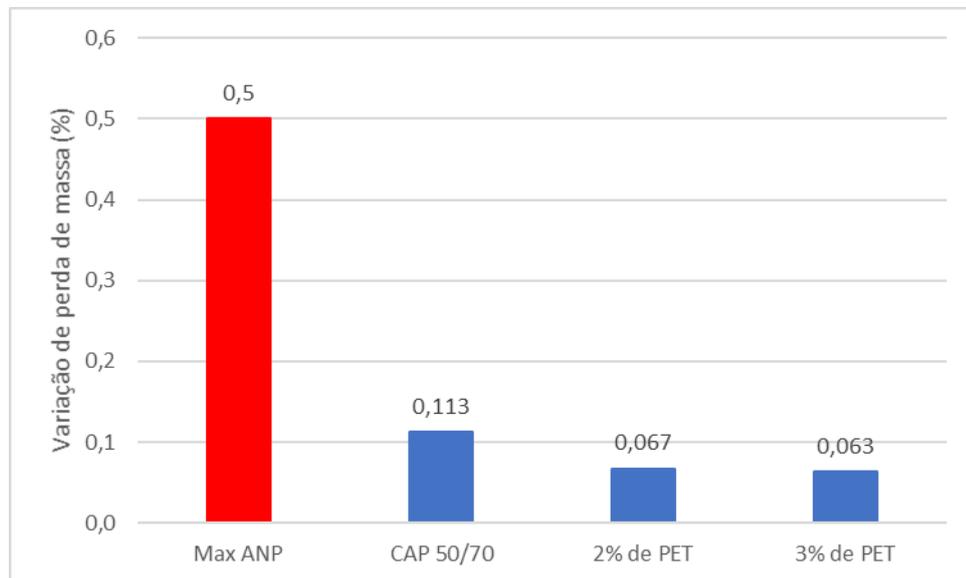
A execução do MSCR é feita com a amostra submetida ao envelhecimento de curto prazo no RTFO. O ensaio é regido pela norma ASTM D7405-15. De acordo com a norma, aplica-se uma carga constante durante o período de 1 segundo sobre uma amostra de ligante asfáltico, removendo-a logo em seguida para que o material repouse por 9 segundos. Primordialmente este ciclo era repetido por 10 vezes em 11 níveis diferentes de tensão controlada. Porém, posteriormente este número de níveis foi reduzido para 2 (a 100Pa e a 3200Pa), mantendo-se os 10 ciclos de fluência e recuperação, sem intervalos entre eles. Para este ensaio, a temperatura utilizada para cada amostra de CAP modificado pelo PET, correspondeu a sua temperatura do PG.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Envelhecimento a curto prazo – RTFO

A Figura 16 ilustra a perda de massa média, expressa em porcentagem, das amostras de ligante asfáltico modificado com politereftalato de etileno.

Figura 16: Perda de massa das amostras de ligante asfáltico modificado com politereftalato de etileno.



A perda de massa das amostras significa o quanto o material sofreu com a ação do calor e do ar aplicados durante o processo, ao ponto de causar a degradação e redução de parte da matéria presente, implicando em alterações na composição e nas propriedades reológicas do mesmo, como o aumento de sua viscosidade e rigidez (CRAVO, 2016).

Segundo as especificações SUPERPAVE, a perda de massa não pode exceder 1%. Enquanto na Resolução ANP nº 19/2005 essa perda para ligantes puros deve ser de no máximo 0,5%. Dessa forma, observa-se pelos resultados que todos os ligantes analisados se enquadraram nos critérios estabelecidos pelas normas supracitadas.

As perdas de massa para as amostras modificadas com o PET foram inferiores às perdas obtidas para o ligante puro, observando-se também que quanto maior o teor de PET menor a perda de massa obtida. Isto significa uma menor susceptibilidade ao envelhecimento causada pela presença do PET no ligante.

O resultado foi satisfatório, pois o PET proporcionou ao ligante uma maior estabilidade de suas propriedades quando sujeito à oxidação e temperatura elevada. Indicando um potencial antioxidante deste polímero.

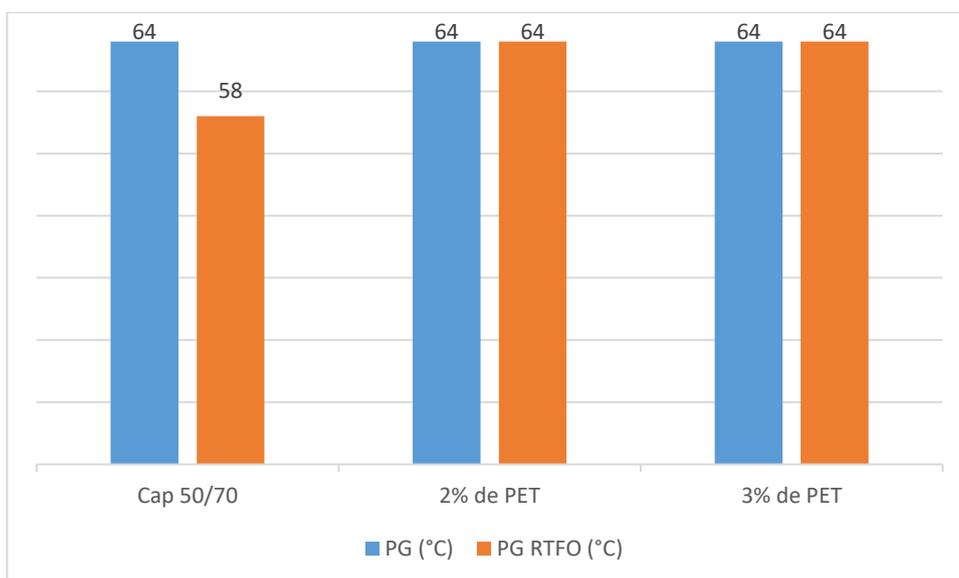
Cravo (2016) cita que o envelhecimento pode ser prejudicial ou benéfico desde que o enrijecimento causado tenha um certo limite, pois quando excessivo, pode levar a ocorrência de trincas térmicas e por fadiga e, quando atuante de maneira razoável, pode ser útil na resistência à deformação permanente.

4.2 PG - Performance Grade

Através dos ensaios realizados no reômetro foram definidos os parâmetros reológicos para os ligantes puro e modificados por PET, antes e após RTFO, tais como o Módulo Complexo (G^*), que está relacionado à rigidez do ligante, o ângulo de fase (δ) que está relacionado à elasticidade, o parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ que reflete a deformabilidade do ligante asfáltico e, como resultado principal, o Grau de desempenho, que delimita a faixa de temperatura de uso mínima e máxima de utilização do ligante.

A Figura 17 ilustra o resultado das temperaturas máximas de utilização do ligante asfáltico antes e após o processo de envelhecimento a curto prazo (RTFO).

Figura 17: Grau de Desempenho (PG) do CAP puro e modificado.



Observa-se que o ligante asfáltico puro, CAP 50/70, apresenta uma redução na temperatura de PG após o envelhecimento, decrescendo de 64 para os 58 °C, ou seja, fica suscetível ao efeito da oxidação e perde suas propriedades de deformabilidade e rigidez frente a altas temperaturas.

Já com adição do PET, apesar de não haver um aumento no PG, a temperatura de PG manteve-se constante tanto para o ligante modificado antes do envelhecimento como para o ligante modificado após envelhecimento em 64 °C, corroborando com a premissa do potencial antioxidante do polímero, que impediu o efeito degenerativo. Resultado esse também obtido por Silva (2015).

Nas Figuras 18 e 19 são lançadas em gráficos os resultados inerentes a variação do parâmetro $G^* \cdot \sin \delta$ em função da temperatura, antes e depois do envelhecimento simulado (RTFO), para o CAP puro e o ligante modificado.

Figura 18: Relação do parâmetro $G^* \cdot \text{sen} \delta$ em função da temperatura antes do RTFO.

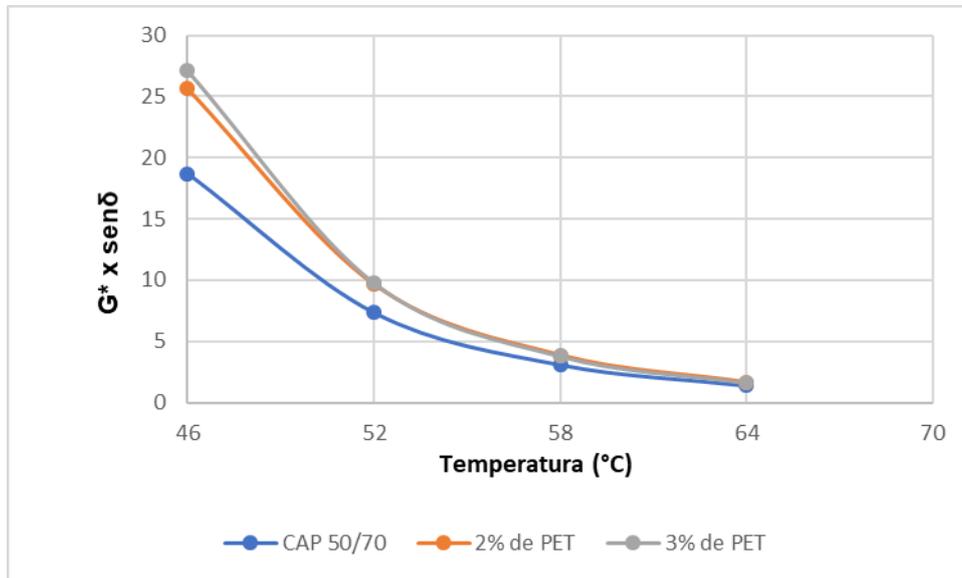
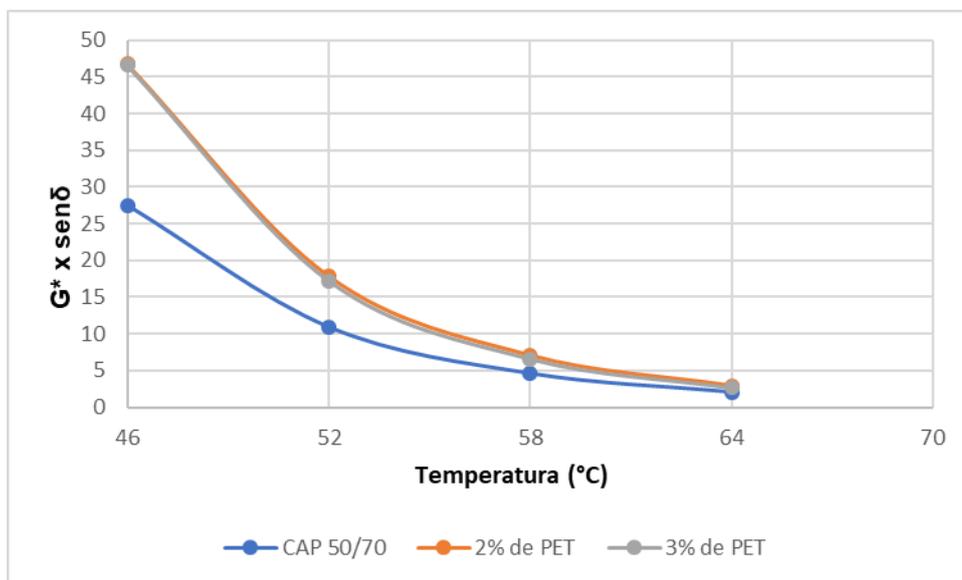


Figura 19: Relação do parâmetro $G^* \cdot \text{sen} \delta$ em função da temperatura depois do RTFO.



A associação do Módulo Complexo com o ângulo de fase ($G^* \cdot \text{sen } \delta$) é um critério de avaliação da resistência do ligante à vida de Fadiga (conforme adotado pelo SHRP). De acordo com o gráfico apresentado, o CAP puro sofreu uma perda na resistência à Fadiga maior do que o ligante modificado, com 2% e 3% de PET.

Silva (2015) em estudo também determina que CAP puro sofre uma perda na resistência à Fadiga maior do que o ligante modificado com PET.

Os resultados lançados em gráficos contidos nas Figuras 20 e 21 indicam a variação do parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$ em função da temperatura do ligante, antes e depois do envelhecimento simulado (RTFO), para o CAP puro e modificado.

Figura 20: parâmetro $G^*/\text{sen } \delta$ em função da temperatura antes do RTFO.

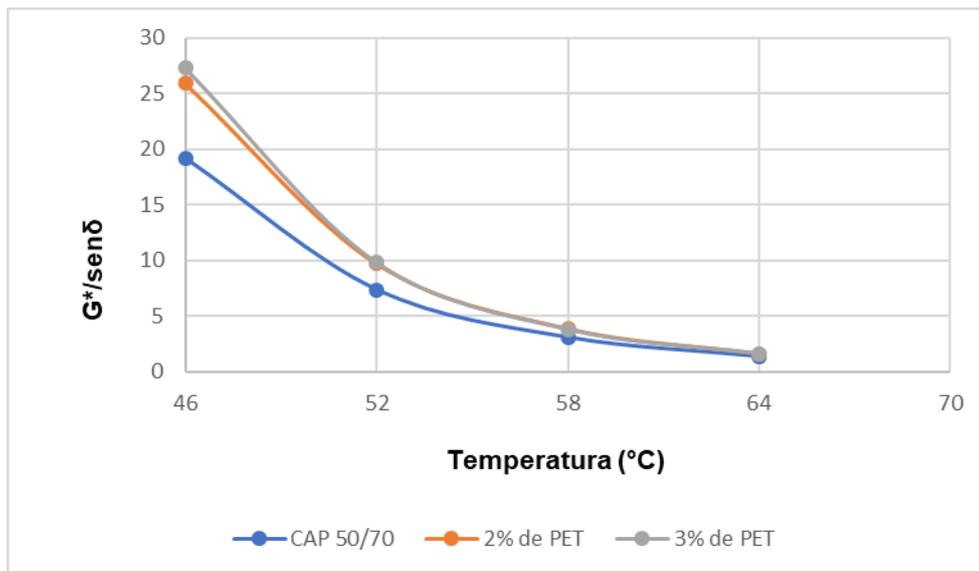
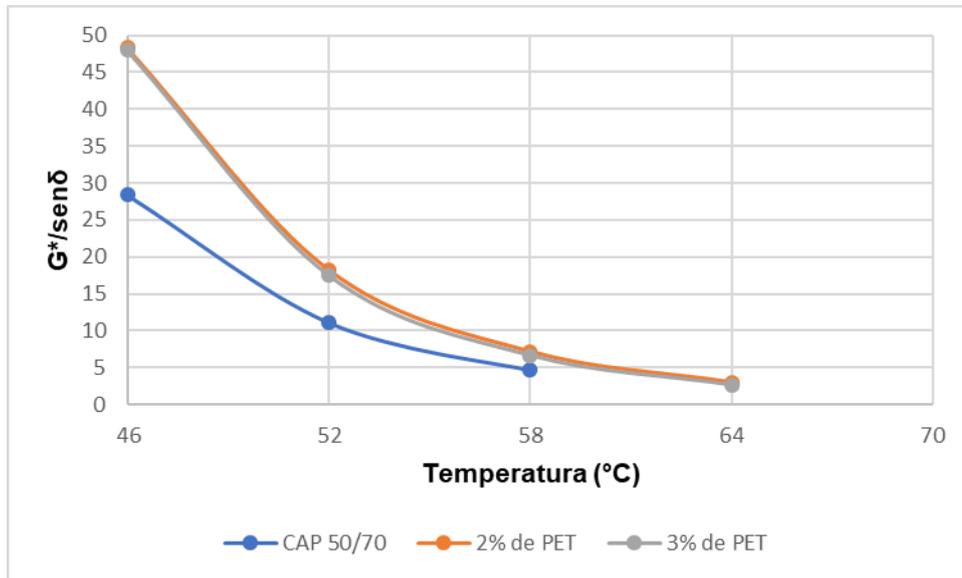


Figura 21: parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ em função da temperatura depois do RTFO.



A relação do Módulo Complexo com o ângulo de fase ($G^*/\text{sen}\delta$) é um critério de avaliação da resistência do ligante à deformação permanente (conforme adotado pelo SHRP). O CAP puro apresentou uma perda na resistência à deformação permanente maior do que o ligante modificado com 2% e 3% de PET. Pode-se inferir com isso, que o desempenho do ligante modificado foi superior ao CAP puro em termos reológicos de vida de Fadiga e Deformação Permanente.

De acordo com as Figuras 22 e 23 pode-se observar a variação do parâmetro Módulo Complexo G^* do CAP puro e modificado em função da temperatura, respectivamente.

Figura 22: Parâmetro Módulo Complexo G^* em função da temperatura antes do RTFO.

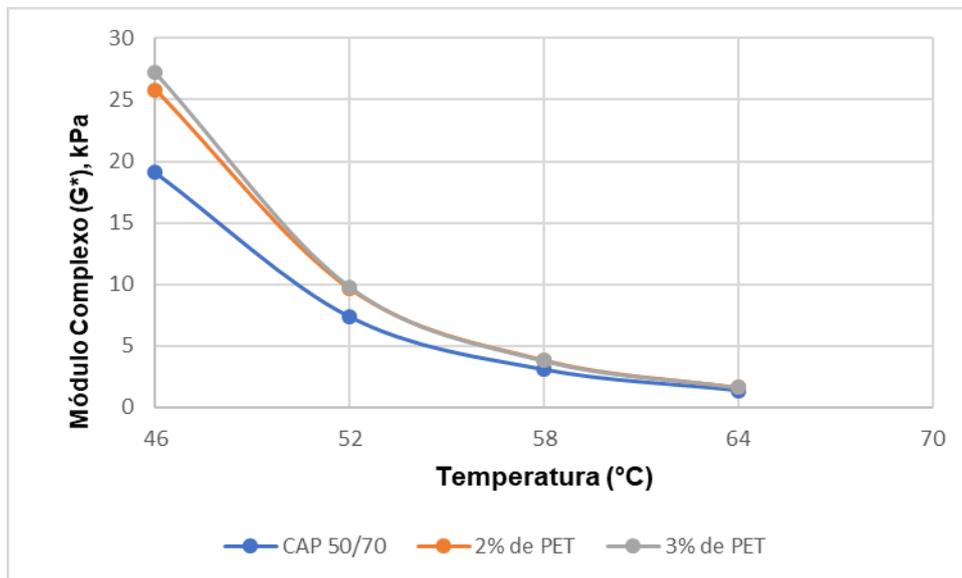
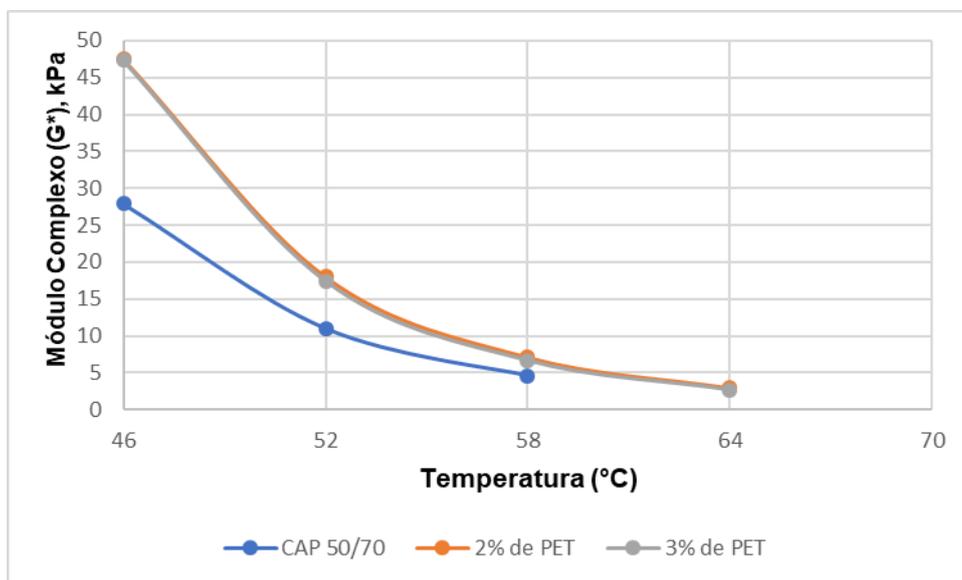


Figura 23: Parâmetro Módulo Complexo δ em função da temperatura depois do RTFO.



O ligante modificado apresentou módulo complexo maior com a elevação da temperatura quando comparado com o CAP puro. Estes resultados indicam

uma maior rigidez ao CAP com adição de 2% e 3% de PET, representa a resistência imposta pelo material à deformação permanente. Assim, o desempenho dos ligantes modificados, considerando o comportamento reológico, foi superior ao CAP puro.

A pesquisa de Silva (2015) corrobora novamente com os resultados desta pesquisa, ou seja, uma maior rigidez ao CAP com adição de PET e elevação da temperatura.

Após o envelhecimento à curto prazo, observa-se, em geral, um aumento no valor do Módulo Complexo das amostras estudadas. De forma clara, os valores do Módulo Complexo de todas as amostras de ligantes Modificados permaneceram com valores superiores aos da amostra de CAP Puro, indicando um ganho de rigidez, refletido e intensificado após envelhecimento.

4.3 Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)

A realização do ensaio MSCR possibilitou a avaliação do percentual de recuperação (%R - onde é fornecido dados da elasticidade), da compliância não-recuperável (J_{nr} - que apresenta dados da suscetibilidade ao acúmulo de deformação permanente, menores valores de J_{nr} indicam resistência do ligante a este efeito) e a diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis ($J_{nr, diff}$ - a qual fornece dados quanto a sensibilidade ao aumento do nível de tensão). Os resultados deste ensaio estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros obtidos no teste de fluência e recuperação.

PG RTFO (°C)	Amostra	Percentual de recuperação (%)		Compliância não recuperável J_{nr} (kPa-1)		$J_{nr, dif}$ (%)
		100Pa	3200Pa	100Pa	3200Pa	
58	CAP 50/70	1,80%	1,50%	1,8	1,8	3,80%
64	2% de PET	1,80%	0,30%	4,0	4,3	8,10%
64	3% de PET	1,30%	0,40%	3,3	3,5	5,60%

A partir da Tabela 3, avaliando o percentual de recuperação percebe-se que os resultados não foram expressivos devido à reduzida recuperação que os ligantes apresentaram tanto a 100 Pa quanto a 3200 Pa. Isso pode ser até de certa forma justificado pela natureza do próprio teste ao considerar a temperatura máxima do PG do ligante, que é a situação mais desfavorável, e a qual eleva o material a uma condição mais difícil de ter o retorno elástico detectado, pela característica fluida que o ligante passa a ter, mas também pela maneira como se comportou os ângulos de fase apresentados (SANTOS, 2017), os quais já deram indícios de que o ligante manteve-se sem característica elástica significativa com o acréscimo de PET ao mesmo.

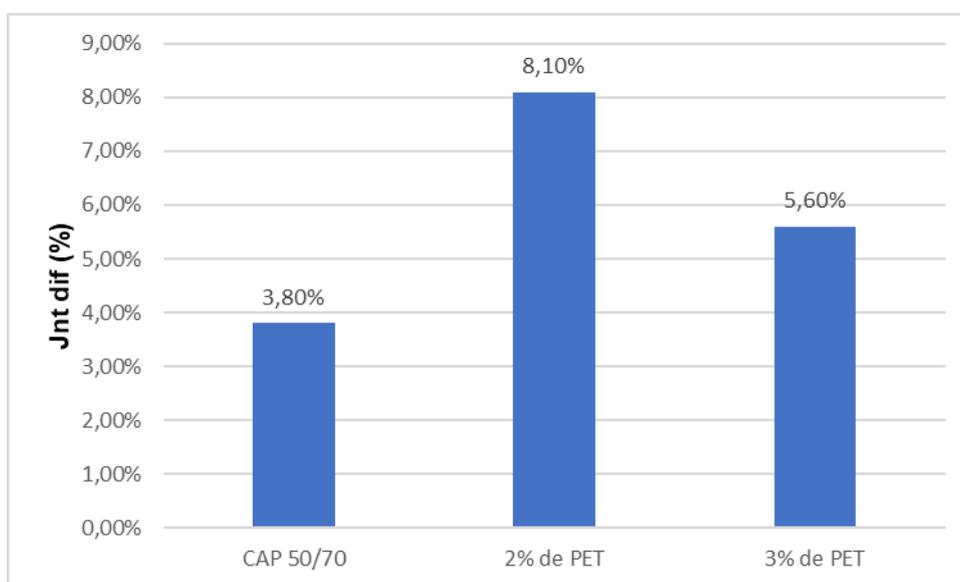
De acordo com a classificação AASHTOO M320, o ligante puro é indicado para tráfego pesado, ou seja, tem um número de solicitações acima de 10 milhões se utilizado na temperatura do PG, 58 °C. O ligante modificado com 2% de PET não é indicado para pavimentação, pois está muito acima do limite máximo estabelecido pela norma, que é de 4,0 kPa⁻¹. Tal fato é decorrente de que o ensaio foi realizado na temperatura de 64 °C, o que deixa o ligante bastante fluido e deformável. O ligante modificado com 3% de PET se enquadra na categoria de tráfego padrão, com número de solicitações menor que 10 milhões.

Quando menor o J_{nr}, maior a resistência a deformação, os J_{nr} das amostras modificadas com PET aumentaram, evidenciando redução na resistência as deformações permanentes, não corroborando assim com a análise de PG. Para melhorar a análise deveria ser feito o ensaio MSCR a uma temperatura de 58°C para melhor efeito de comparação.

Outro parâmetro importante de atentar no estudo do ensaio MSCR é o J_{nr} diferencial, que é a medida da diferença entre o J_{nr} a 100 e a 3200 Pa, expresso em porcentagem. Os resultados estão ilustrados na Figura 24.

Segundo SHRP, a diferença entre o J_{nr} sob tensão de 100 e 3200 Pa deve ser inferior a 75% para que se ateste a propriedade do ligante não ser demasiadamente sensível às mudanças de carregamento. Desta forma, todos os ligantes pesquisados atendem aos critérios estabelecidos e são adequados à pavimentação.

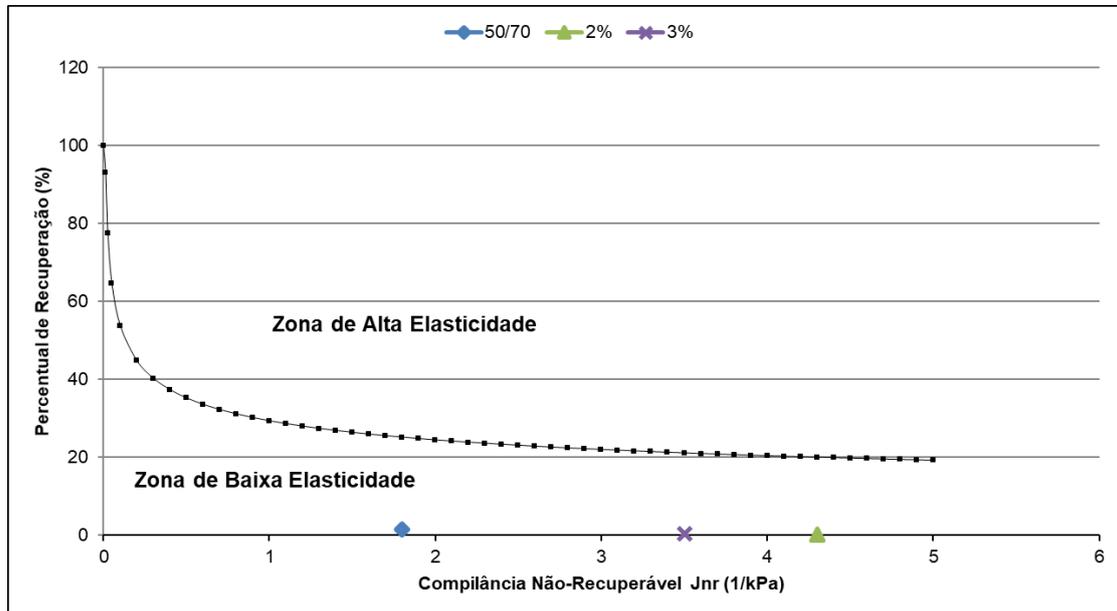
Figura 24: Valores de J_{nr} diff (%) dos ligantes estudados.



Com o objetivo de analisar o nível elasticidade das amostras estudadas é apresentado na Figura 25 os valores percentuais de recuperação em versus a compliância não-recuperável (J_{nr}).

Verificou-se que os pares ordenados (J_{nr} , %Rec) para todos os ligantes, localizaram-se na região abaixo da curva, configurando a baixa elasticidade dos materiais estudados.

Figura 25: Percentual de recuperação (%) em função da compliância não-recuperável.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 Considerações Finais

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios temos as seguintes considerações:

A influência da adição de PET ao CAP, após análise dos resultados obtidos com o ensaio de estufa de filme fino rotativo (Rolling Thin Film Oven – RTFO), indica que o PET tem um efeito antioxidante, pois quanto maior o teor de PET menor a perda de massa obtida dando uma maior estabilidade das suas propriedades quando sujeito à oxidação e temperatura elevada. Mostrando assim que é possível a obtenção de misturas asfálticas com este tipo de aditivo de forma que tenham um incremento da vida útil do revestimento asfáltico, desde que sejam consideradas a compatibilidade de deformações do pavimento.

O grau de performance mantém-se na mesma classe de temperatura de 64°C tanto para o ligante modificado novo como para o envelhecido, enquanto que o ligante puro sofreu redução de 64°C quando novo para 58°C quando envelhecido. Sendo assim, o efeito antioxidante do PET, confirmado no procedimento de envelhecimento a curto prazo (RTFO), é reforçado no ensaio de PG das amostras após envelhecimento.

Ainda sobre o PG podemos dizer que o desempenho do CAP modificado foi superior ao CAP puro em termos reológicos, representando um aumento na resistência à deformação permanente, bem como um aumento na resistência do ligante à fadiga. Após o envelhecimento à curto prazo, observa-se, em geral, um aumento nos valores dos parâmetros analisados das amostras estudadas, indicando um ganho de rigidez e resistências, refletido e intensificados pós envelhecimento.

O ensaio do MSCR demonstrou que a adição de 2% de PET não é indicada, visto que o nível de tráfego suportado por este diminui em relação ao puro, não se enquadrando a nenhuma classificação de tráfego da AASHTO M320. Já a adição de 3% se enquadra, mas diminui o nível de tráfego suportado quando comparado com o ligante puro, diminuindo da categoria de tráfego pesado para tráfego padrão. Apesar da baixa elasticidade, todos os ligantes pesquisados ainda atendem aos critérios estabelecidos e são adequados à pavimentação quando atestado a propriedade do ligante não ser demasiadamente sensível às mudanças de carregamento.

Desta forma, é necessário compensar em até que ponto é vantajoso ganhar em resistência ao envelhecimento e propriedades mecânicas, mas também se perder em aplicabilidade do ligante asfáltico.

Conclui-se que o resíduo do PET triturado, com origem no pós consumo, pode ser utilizado como agente modificador do CAP, sendo capaz de promover ganhos nas Propriedades Mecânicas de Revestimentos Asfálticos modificados por esse aditivo.

5.2 Sugestões para futuras pesquisas

- Caracterizar quimicamente o ligante modificado por PET;
- Estudar as propriedades de misturas asfálticas produzidas com ligante modificado por PET;
- Realizar as mesmas análises com teores maiores de PET para obter assim possíveis melhoras com maiores teores.
- A nível comparativo realizar o ensaio MSCR a uma temperatura de 58°C para analisar se é possível corroborar com ensaio de PG.
- Realizar ensaio de Varredura linear de amplitude (LAS) para corroborar dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS

AHMADINIA, E., ZARGAR, M., KARIM, M. R., ABDELAZIZ, M. e AHMADINIA, E. **Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt.** Construction and Building Materials, V. 36, p. 984-989, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.015>.

AHMADINIA, E., ZARGAR, M., KARIM, M. R., ABDELAZIZ, M. e SHAFIGH, P. **Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt.** Materials and Design, V. 32, p. 4844-4849, 2011. DOI:10.1016/j.matdes.2011.06.016.

ANDERSON, M.; D'ANGELO, J.; WALKER, D. **MSCR: A better tool for characterizing high temperature performance properties.** EUA. Asphalt, v. 25, n.2, p. 15-16, 2010.

ARAO, Mieka. **Análise da Vida de Fadiga de Pavimentos Flexíveis em Diferentes Misturas.** 2014. 61 f. Trabalho de conclusão de curso (Monografia) - Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2014.

ASTM D7405 – 10a (2008) **Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer.** American Society for Testing and Materials.

ASTM D2872 – 12 (2013) **Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test).** American Society for Testing and Materials.

AWWAD, M. T. e SHBEEB, L. **The Use of Polyethylene in Hot Asphalt Mixtures.** American Journal of Applied Sciences, V. 4, p. 390-396, 2007.

AZARHOOSH, A. R., NEJAD, F. M., & KHODAI, A. **Using the Surface Free Energy Method to Evaluate the Effects of Nanomaterial on the Fatigue Life of Hot Mix Asphalt,** 28(10), p. 1–9. 2015.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros.** Petrobras, ABEDA, Rio de Janeiro, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA L. M. G. da; CERATTI J. A. P.; SOARES J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, 2007. 338 p., ISBN 85-85227-84-2.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

BERNUCCI, L.L.B.; MOTTA, L.M.G; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J. B. **“Pavimentação asfáltica - Formação básica para engenheiros”**. Rio de Janeiro: PETROBRAS/ABEDA, 2010.

Bretas, R. E. S.; D’Ávila, M. A. **Reologia de Polímeros Fundidos**. 2º ed., EdUFSCar, São Carlos, 2005.

BRINGEL, R. M. **Estudo Químico e Reológico de Ligantes Asfálticos Modificados por Polímeros e Aditivos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Química Orgânica). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

BRINGEL, R. M.; SOARES, S. A.; SOARES, J. B. **Análise da susceptibilidade térmica de ligantes asfálticos através da energia de ativação de fluxo**. Transportes, v. 17, n. 1, p. 46-52, 2009.

CAVALCANTE, F. P. **Efeito da adição dos óleos de ricinus communis e linus usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento Asfáltico de petróleo puro e modificado**. 2016. 301 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2017 – Relatório Gerencial**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: < <http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial> >. Acesso em: 21 de maio de 2018

Cortizo, M. S.; Larsen, D. O.; Bianchetto, H.; Alessandrini, J. L. Effect of the Thermal Degradation of SBS Copolymers During the Ageing of Modified Asphalts. **Polymer Degradation and Stability**, vol. 86, p. 275-282, 2004.

CRAVO, M. C. C. **Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástique e matriz de agregados finos**. 2016. 280 f. Tese

(Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

D'ANGELO, J. A. **The multiple stress creep recovery (MSCR) procedure.** Technical Brief prepared by the United States Department of Transportation, Federal Highway Administration. 2011

_____. DNIT 005/2003 - TER: **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia.** Rio de Janeiro, 2003.

DOMINGOS, M. D. I. (2011) **Caracterização do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados virgens e envelhecidos.** Dissertação de Mestrado. Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

DOMINGOS, M. D. I.; NG, A. K. Y.; FAXINA, A. L. **Comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados com polietileno de baixa densidade e ácido polifosfórico.** In: XXVIII ANPET – Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2014, Curitiba. XXVIII ANPET – Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2014.

FANG, C.; RUIEN YU, S. L.; LI, Y. **“Nanomaterials Applied in Asphalt Modification: A Review.”** Journal of Materials Science & Technology, 589-594, 2013.

FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha.** 2006. 311 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

FERNANDES, M. R. S. **Efeito de aditivo tipo óleo e enxofre na reologia de asfaltos modificados com SBS.** 2009. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2009.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos.** Tese de Doutorado. Universidade do Minho. Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

GAMA, D. A. **Efeito da adição de polímeros reativo, não-reativo e ácido polifosfórico e suas combinações nas propriedades de ligantes asfálticos.**

2016. 167 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

Gonzalez, O.; Muñoz, M. E.; Santamaría, A.; García-Morales, M.; Navarro, F. J.; Partal, P. **Rheology and Stability of Bitumen/EVA Blends**. European Polymer Journal, p. 2365-2372, 2004.

Lamontagne, J.; Dumas, P.; Mouillet, V.; Kister, J. **Comparison by Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy of Different Ageing Techniques: Application to Road Bitumens**. Fuel, vol. 80, p. 483-488, 2001.

LAVASANI, M.; NAMIN, M. L.; FARTASH, H. **Experimental investigation on mineral and organic fibers effect on resilient modulus and dynamic creep of stone matrix asphalt and continuous graded mixtures in three temperature levels**. Construction and Building Materials, v. 95, p. 232-242, 2015.

LEAL, Cláudio Luiz Dias. **Aproveitamento do bagaço de cana de açúcar em misturas asfálticas**. 2013. 219f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tese) – Tecnologia da Construção, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

LIMA, A. T., 2003, **Caracterização Mecânica de Misturas Asfálticas Recicladas a Quente**, Dissertação de Msc. UFC, Fortaleza, Brasil. Mestrado – Universidade Federal do Ceará - UFC, Fortaleza, 2004.

LYONS, K. R. e B. J. PUTMAN. **Laboratory evaluation of stabilizing methods for porous asphalt mixtures**. Construction and Building Materials, V. 49, p. 772-780, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.076>.

LUCENA, M. C. C. **Caracterização química e reológica de asfaltos modificados por polímeros**. 2005. 163f. Tese (Doutorado em Química Inorgânica). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

MACHADO, J. C. V. **Reologia e Escoamento de Fluidos: Ênfase na Indústria do Petróleo**. 1º ed., Interciência, Rio de Janeiro, 2002.

MARINHO FILHO, P. G. T. **Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio**. 2017. Tese (Mestrado em engenharia civil e ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

MEDINA, J. e MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**, Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2015.

MELLO, M. S. **Avaliação das propriedades reológica e mecânica de ligantes e misturas asfálticas irradiadas**. 151 f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Nuclear. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MOHAMMED, D. T. e Z. H. HUSSEIN. **Evaluation of Pyrolysis PET Utilization in Asphalt Binder**. International Journal of Enhanced Research in Science Technology & Engineering, V. 3, p. 114-121, 2014a.

MOHAMMED, D. T. e Z. H. HUSSEIN. **Use of Pyrolysis Polyethylene Terephthalate (PET) as Asphalt Modifier in Asphalt Concrete Mix**. International Journal of Science, V. 3, p. 1-6, 2014b.

MOGHADDAM, T. B., KARIM, M. R., ABDELAZIZ, M. e T. SYAMMAUN. **Dynamic properties of stone mastic asphalt mixtures containing waste plastic bottles**. Construction and Building Materials, V. 34, p. 236-242, 2012. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.054.

MOGHADDAM, T. B. e M. R. KARIM. **Properties of SMA Mixtures Containing Waste Polyethylene Terephthalate**. International Scholarly and Scientific Research & Innovation, V. 6, n. 2, p. 1-4, 2012.

Morilha, A. J. **Estudo sobre a Ação de Modificadores no Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos e nas Propriedades Mecânicas e de Fadiga das Misturas Asfálticas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2004.

MOTTA, L. M. G., TONIAL, I., LEITE, L. M., CONSTANTINO, R. S., **Princípios de Projetos e análise Superpave de Misturas Asfálticas**. In: IBP, Rio de Janeiro, RJ, 1996.

MOTHÉ, M. G. **Estudo do Comportamento de Ligantes Asfálticos por Reologia e Análise Térmica**. 2009. 204 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Ouyang, C.; Wang, S.; Zhang, Y.; Zhang, Y. **Improving the Aging Resistance of Styrene-Butadiene-Styrene Tri-Block Copolymer Modified Asphalt by Addition of Antioxidants**. Polymer Degradation and Stability, vol. 91, p. 795-804, 2006.

PAMPLONA, T. F.; SOBREIRO, F. P.; FAXINA, A. L.; FABBRI, G. T. P. **Propriedades reológicas sob altas temperaturas de ligantes asfálticos de diferentes fontes modificados com ácido polifosfórico.** Transportes, v. 20, n. 4, p. 5-11, 2012.

RAHMAN, W. M. N. W. A. e A. WAHAB. **Green Pavement Using Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as Partial Fine Aggregate Replacement in Modified Asphalt.** Procedia Engineering, V. 53, p. 124-128, 2013. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.02.018.

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

ROSA JÚNIOR, J. M. **Estudo das propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70) modificado com polímeros funcionalizados.** 2015. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SANTOS, N. S. **Propriedades reológicas do ligante asfáltico (cap 50/70) modificado por adição de lignina.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

SHELL. **The Shell bitumen handbook.** 5. ed. London: Thomas Telford, 2003.

SILVA, J. A. L. **Utilização do politereftalato de etileno (pet) em misturas asfálticas.** 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SOBREIRO, F. P. **Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS.** 2014. 346 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SPECHT, L. P. **Avaliação das misturas asfálticas com borrachas recicladas de pneus.** 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

YILDIRIM, Y. **Polymer modified asphalt binders.** Construction and Building Materials. EUA, n. 21, p. 66-72, 2007.

XU, T.; HUANG, X., **Investigation into Causes of in-place Rutting in Asphalt Pavement.** Construction and Building Materials. V. 28, p. 525-530. 2012.

ZHANG, H., ZHU, C., YU, J., SHI, C., & ZHANG, D. **Influence of surface modification on physical and ultraviolet aging resistance of bitumen containing inorganic nanoparticles.** Construction and Building Materials, 98, 735–740. 2015.