



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

**DETERMINAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO DO LIGANTE
ASFÁLTICO MODIFICADO POR ADIÇÃO DE ÓLEO DE COPAÍBA**

THALES VASCONCELOS GOMES

Orientadores: John Kennedy Guedes Rodrigues

Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça.

Campina Grande-PB, 14/12/2018.

**DETERMINAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO DO LIGANTE
ASFÁLTICO MODIFICADO POR ADIÇÃO DE ÓLEO DE COPAÍBA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB, 14/12/2018

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

THALES VASCONCELOS GOMES

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: John Kennedy Guedes Rodrigues

Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça.

CAMPINA GRANDE – PB

Dezembro/2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

THALES VASCONCELOS GOMES

DETERMINAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO POR ADIÇÃO DE ÓLEO DE COPAÍBA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 14/12/2018 perante a seguinte
Comissão Julgadora:

Prof. Dr^a Ana Maria Gonçalves Duarte
Orientadora
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues
Orientador
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Msc. Valter Ferreira de Sousa Neto
Membro Interno
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Msc. Gabryelle Keith Avelino Cruz
Examinador Externo
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse realizado, e em especial eu gostaria de agradecer:

Aos meus pais, Celso e Clara Rosa, por tudo! Pelo apoio e incentivo que recebi por toda a vida, também pelo carinho, paciência e amor que sempre me dão sem pedir absolutamente nada em troca.

À Thaisa, minha irmã, que está na mesma etapa do curso, e apesar do pouco tempo e a distância, sempre podemos nos ajudar, trocar ideias e energias.

À Fabiana, por todo amor e companheirismo desde que nos conhecemos. Pelo estímulo, paciência e carinho durante as etapas do curso e da vida.

À minha orientadora, Prof.^a Ana maria, pelo conhecimento e toda paciência e atenção durante a pesquisa.

Aos meus amigos que permaneceram em Porto Velho, minha cidade natal, pelos momentos e amadurecimentos da vida, que mesmo distante sempre me apoiaram.

Aos meus amigos Arthur, Guilherme, Guido e Matias, que se tornaram minha família durante os anos do curso, com quem compartilhei tantos momentos bons. Agradeço toda a amizade pelas conversas, descontrações e amadurecimentos.

E muito obrigado a todos que me apoiaram, incentivaram e colaboraram de alguma maneira, direta ou indiretamente, durante minha carreira acadêmica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Separação química do ligante asfáltico, segundo Corbett.	8
Figura 2 - Modelo de micelas de Yen.	9
Figura 3 - Envelhecimento do ligante asfáltico nas etapas de construção e de utilização do pavimento.	11
Figura 4 - Esquema da aplicação de tensão de cisalhamento na amostra de ligante asfáltico.	15
Figura 5 - Representação vetorial de parâmetros reológicos.	15
Figura 6 - Atraso entre tensão e deformação em amostras ensaiadas no DSR.	16
Figura 7 - Representação de curvas mestras geradas para cada temperatura de ensaio.	17
Figura 8 - Translação das curvas mestras para temperatura de referência.	18
Figura 9 - Fluxograma das etapas da pesquisa realizada.	23
Figura 10 - Misturador mecânico.	24
Figura 11 - Estufa para procedimento RTFO.	25
Figura 12 - Penetrômetro para ensaio de penetração.	26
Figura 13 - Aparato utilizado para ensaio de ponto de amolecimento.	27
Figura 14 - Viscosímetros utilizados para medição das viscosidades dos ligantes asfálticos.	28
Figura 15 - Reômetro de cisalhamento direto (DSR).	28
Figura 16 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO.	30
Figura 17 - Resultados das penetrações retidas.	32
Figura 18 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento.	32
Figura 19 - Resultados da variação de ponto de amolecimento.	33
Figura 20 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional antes do RTFO.	34
Figura 21 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional após RTFO.	36
Figura 22 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional em relação às faixas de temperatura de usinagem e compactação.	37
Figura 23 - Curvas mestras de módulo complexo em função da frequência.	38
Figura 24 - Curvas mestras de módulo complexo em função da frequência.	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO.....	30
Tabela 2 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento antes e após RTFO.	32
Tabela 3 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional antes do RTFO.	34
Tabela 4 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional após RTFO.	35
Tabela 5 - Temperaturas de usinagem e compactação dos ligantes.	37

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

δ	Ângulo de fase
G^*	Módulo complexo de cisalhamento
G'	Módulo de Armazenamento
G''	Módulo de Dissipação
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
ASTM	American Society for Testing and Material
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CNT	Confederação Nacional de Transportes
cP	Centipoise
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DSR	Dynamic Shear Rheometer
Hz	Hertz
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
NBR	Normalização Brasileira
rpm	Rotações por Minuto
RTFO	Rolling Thin Film Oven
SARA	Saturates, aromatics, resins, and asphaltenes
SBS	Estireno-butadieno-Estireno
SHRP	Strategic Highway Research Program
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavement System
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande

RESUMO

A maior parte dos pavimentos executados atualmente são oriundos de misturas asfálticas usinadas à quente, as quais são produzidas em altas temperaturas e emitem gases responsáveis pelo efeito estufa. Desse modo, a tentativa de redução dessas temperaturas é considerada alternativa na produção de revestimentos asfálticos capazes de proporcionar vantagens econômicas e ambientais. Existem vários tipos de substâncias que adicionadas ao ligante asfáltico proporcionam esta redução, entre os principais modificadores estão os óleos. Dessa maneira, esta pesquisa tem como objetivo analisar o comportamento do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 modificado por adição de óleo de copaíba nos teores de 4 e 5%, quanto a redução das temperaturas de compactação e usinagem e as características físicas e reológicas do ligante asfáltico. Para tal, foram utilizados os ensaios físicos convencionais de penetração, ponto de amolecimento, e viscosidade rotacional antes e após o procedimento de envelhecimento à curto prazo (RTFO) e o ensaio reológico de curva mestra. A adição de óleo de copaíba teve como resultado a diminuição do ponto de amolecimento e aumento da penetração em função da diminuição de sua dureza e viscosidade. Por consequência auxiliou nas diminuições das temperaturas de compactação e usinagem, tornando-se assim benéfico em questão de trabalhabilidade e sustentabilidade. No entanto, pode ser vista perda de resistência em relação ao ligante puro, em função da redução do módulo complexo (G^*), e aumento em sua elasticidade verificado pela redução do ângulo de fase (δ). Os resultados demonstraram que a amostra com 4% de óleo copaíba demonstrou melhor desempenho reológico em relação à resistência do ligante, tendo em vista a redução das temperaturas de usinagem e compactação.

Palavras-chave: Ligante asfáltico; Mistura morna; Óleo de Copaíba.

ABSTRACT

Most of the floors currently run are derived from hot-machined asphalt mixtures, which are produced at high temperatures and emit gases responsible for the greenhouse effect. Thus, the attempt to reduce these temperatures is considered an alternative in the production of asphalt coatings capable it to provide economic and environmental advantages. There are several types of substances that are added to the asphalt binder provide This Reduction, among the main modifiers are the oils. In this way, this research aims to verify the influence of the addition of Copaiba oil in the contents of 4 and 5% in petroleum asphalt cement (CAP) 50/70, in the reduction of compaction and machining temperatures and the physical and rheological characteristics of the asphaltic ligand. For this purpose, conventional physical penetration assays, softening point, and rotational viscosity were used before and after the procedure of short-term ageing (RTFO) and the rheological test of the master curve. The addition of Copaiba oil resulted in decreased softening point and increased penetration as a function of decreased hardness and viscosity. Therefore, it assisted the decreases in compaction and machining temperatures, thus becoming beneficial in the matter of workability and sustainability. However, it can be seen loss of resistance in relation to the pure binder, due to the reduction of the complex modulus (G^*) and increase in its elasticity checked by reducing the phase angle (δ). The results showed that the sample with 4% Copaiba oil demonstrated better rheological performance in relation to the ligand resistance, bearing in mind a Reduction of machining and compaction temperatures.

Key words: Asphaltic Ligand; Warm Mixtures; Copaiba oil.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivo Geral.....	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
1.1.3	Organização do Trabalho de Conclusão de Curso – TCC	3
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1	Pavimentação	4
2.1.1	Defeitos de superfície em pavimentos	5
2.2	Ligante asfáltico	7
2.2.1	Composição química.....	8
2.3	O fenômeno do envelhecimento do ligante asfáltico	10
2.3.1	Caracterização das propriedades mecânicas e de envelhecimento do ligante asfáltico.....	12
2.3.1.1	RTFOT (Rolling Thin Film Over Test) - Aquecimento em Película Delgada Rolada.....	13
2.4	Reologia de ligantes asfálticos.....	14
2.4.1	O Reômetro de Cisalhamento Dinâmico	15
2.4.1.1	Curva Mestre	16
2.5	Ligantes asfálticos modificados	18
2.5.1	Aditivos Orgânicos	20
2.5.1.1	Óleo de copaíba.....	21
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Materiais	23
3.2	Métodos.....	23
3.2.1	Preparação das amostras	24
3.2.2	RTFO (Estufa de Filme Fino Rotativo)	24
3.2.3	Ensaio de Penetração	25
3.2.4	Ponto de Amolecimento.....	26
3.2.5	Viscosidade rotacional	27
3.2.6	Curva Mestre.....	28

4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1	Propriedades físicas	30
4.1.1	Ensaio de Penetração	30
4.1.2	Ponto de amolecimento.....	32
4.2	Propriedades reológicas	34
4.2.1	Viscosidade Rotacional Brookfield	34
4.2.1.1	Antes do envelhecimento à curto prazo (RTFO)	34
4.2.1.2	Após o envelhecimento (RTFO)	35
4.2.1.3	Temperatura de usinagem e compactação.....	36
4.2.2	Curva mestra	37
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
5.1	Considerações Finais	40
5.2	Sugestões Para Pesquisas Futuras	41
	REFERÊNCIAS	42

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o principal modal para transporte de passageiros e cargas é o sistema rodoviário. A qualidade do pavimento repercute diretamente no desempenho dos transportes rodoviários e em consequência na economia do país. Um automóvel trafegando em rodovias em estado precário onera seus custos de operação, consome mais combustível, está mais suscetível a acidentes, demora mais para percorrer suas rotas, além de trazer prejuízos ao meio ambiente.

A má qualidade da pavimentação asfáltica, na grande maioria das vezes, está diretamente relacionada ao envelhecimento do ligante asfáltico, o principal material aglutinante utilizado em revestimentos de pavimentos rodoviários e aeroportuários.

De acordo com Silva (2011), o envelhecimento do cimento asfáltico de petróleo CAP é caracterizado pelo processo de oxidação, perda de voláteis, endurecimento físico e exsudativo. Esse envelhecimento acontece em 3 etapas: durante o processo de usinagem, durante sua aplicação, que compreende o espalhamento e compactação, e durante todo seu tempo útil de serviço. Esses processos causam modificações químicas e reológicas no ligante asfáltico, diminuindo assim sua eficiência.

Devido à importância que a malha rodoviária apresenta na infraestrutura do país e a sua inevitável deterioração por efeitos ambientais e de carga, é necessário o desenvolvimento de novas tecnologias capazes de gerar pavimentos de boa qualidade, menor custo e que permitam reduzir os gases de sua fabricação, que potencializam o efeito estufa, contribuindo assim, com as questões ambientais (MELLO, 2014).

Atualmente a maior parte dos pavimentos executados são oriundos de misturas asfálticas usinadas à quente, as quais são produzidas em temperaturas entre 140°C e 180°C para garantir estabilidade e durabilidade, onde é necessária quantidade significativa de energia para o aquecimento. As misturas asfálticas mornas ou Warm-Mix Asphalt (WMA) diferem das convencionais pelas temperaturas nas quais são produzidas, afim de reduzir a queima de combustíveis e consequentemente reduzir a emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa. Estes de gases, durante a usinagem e compactação, tem despertado interesse da comunidade científica para realização de pesquisas, com o objetivo de avaliar a diminuição das temperaturas em misturas mornas (PORTUGAL 2016).

Muitos autores afirmam que a diminuição das temperaturas de usinagem e compactação das misturas mornas proveem grandes benefícios em relação ao meio ambiente, o ambiente de trabalho e a qualidade final do material. No entanto, é necessário uma análise completa das novas propriedades do material, mecânicas e reológicas para garantir assim a sua viabilidade técnica e econômica (SILVA, 2016).

Dessa forma, de acordo com Santos (2017), a busca por modificadores de ligantes asfálticos em paralelo com o conceito de sustentabilidade vem abrindo espaço para tecnologias com a utilização de modificadores naturais e reaproveitados de processos industriais. Ainda segundo a autora, é possível encontrar na literatura pesquisas com produtos naturais associados ao ligante asfáltico, como óleos vegetais de mamona, linhaça, algodão, dendê, soja, milho e moringa.

De acordo com Yamaguchi & Garcia (2012), o óleo de copaíba é um óleo resina extraído do tronco da árvore de copaíba e apresenta diversas propriedades, como medicinais, cosméticas e industriais, sendo uma das plantas com uso medicinal mais conhecida e utilizada no Brasil. É retirado de uma árvore nativa brasileira localizada nas regiões sudeste, centro-oeste e amazônica, e é um extrato muito utilizado pela população brasileira, sendo facilmente comercializado em feiras livres, ervanários e lojas de produtos naturais, entre outros.

Dessa maneira, por ser um produto renovável, de fácil acesso e baixo custo, o presente trabalho propõe o uso, como “aditivo verde”, do óleo de copaíba na composição do CAP, a fim de retardar o envelhecimento à curto prazo e diminuir as temperaturas de usinagem e compactação.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Dessa maneira, esta pesquisa tem como objetivo analisar o comportamento do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 modificado por adição de óleo de copaíba nos teores de 4 e 5%, quanto a redução das temperaturas de compactação e usinagem e as características físicas e reológicas do ligante asfáltico.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar fisicamente o ligante asfáltico modificado por adição de óleo de copaíba nos teores de 4 e 5% antes e após o envelhecimento à curto prazo;

- Caracterizar reologicamente o CAP 50/70 e o ligante modificado por adição de óleo de copaíba nos teores de 4% e 5% antes do envelhecimento à curto prazo;
- Verificar a diminuição das temperaturas de usinagem e compactação do ligante asfáltico.

1.1.3 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:

Capítulo 1: Introdução – Introdução, Justificativa, Objetivos da Pesquisa e Organização do Projeto de Pesquisa Aplicada;

Capítulo 2: Fundamentação Teórica - São abordados os aspectos gerais dos pavimentos e os principais defeitos que ocorrem no Brasil, bem como características gerais, de composição e reologia do ligante asfáltico. Processos de envelhecimento do CAP e de misturas asfálticas, principais ensaios de caracterização empírica, química e reológica do CAP, aditivos em ligantes asfálticos e características do óleo de copaíba.

Capítulo 3: Materiais e Métodos - São apresentados os materiais utilizados na pesquisa e relatados os procedimentos da etapa experimental;

Capítulo 4: Resultados e Discussões - São tratados os resultados obtidos durante a pesquisa;

Capítulo 5: Considerações Finais - São apresentadas as considerações acerca dos resultados obtidos e sugestões para realizações de estudos futuros sobre o tema da pesquisa.

Por fim, nas Referências são apresentados os estudos consultados para o desenvolvimento deste trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Pavimentação

Pavimentar uma via de circulação de veículos é obra civil que visa, antes de tudo, a melhoria operacional para o tráfego, na medida em que é criada uma superfície mais regular (garantia de melhor conforto no deslocamento do veículo), uma superfície mais aderente (garantia de mais segurança em condições de pista úmida ou molhada), uma pista de rolamento menos ruidosa diante da ação dinâmica dos pneus (garantia de melhor conforto ambiental em vias urbanas e rurais), seja qual for a melhoria física oferecida.

Ao conceder condição para uma via de melhor qualidade de rolamento, automaticamente se proporciona aos usuários uma expressiva redução nos custos operacionais, já que os custos de operação e de manutenção dos veículos estão associados às condições de superfície dos pavimentos. Além disto, as estruturas de pavimentação têm como função básica suportar os esforços oriundos de cargas e de ações climáticas, sem que apresentem processos de deterioração prematura.

Dessa forma, a pavimentação tem como função propiciar um tráfego confortável e seguro, com estruturas e materiais capazes de suportar os esforços decorrentes da ação do tráfego combinados com as condições climáticas, a um mínimo custo (BALBO, 2007).

De uma forma geral, segundo o Manual de Pavimentação de 2006 do DNIT, os pavimentos são classificados em rígidos, semirrígidos e flexíveis. Os pavimentos rígidos são aqueles em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado, tipicamente constituído por lajes de concreto de cimento Portland. O semirrígido caracteriza-se por uma base cimentada por algum aglutinante com propriedades cimentícias como por exemplo, por uma camada de solo cimento revestido por uma camada asfáltica. Na pavimentação flexível todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas.

Mais recentemente há uma tendência de usar-se a nomenclatura pavimentos de concreto de cimento Portland (rígido) e pavimentos asfálticos (flexível), para indicar o tipo de revestimento do pavimento. De acordo com Bernucci et al. (2008), nos pavimentos asfálticos o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes

asfálticos e geralmente é formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito.

2.1.1 Defeitos de superfície em pavimentos

Segundo Minhoto (2005), quando em serviço, os pavimentos degradam-se ao longo do tempo devido a ação do tráfego e das ações climáticas. A ocorrência de degradação conduz à redução da qualidade global dos pavimentos, quer sob o ponto de vista da sua aptidão estrutural, sob o ponto de vista da qualidade funcional, ou de circulação, proporcionada aos usuários. O autor acresce que as degradações verificadas nos pavimentos flexíveis estão normalmente associadas a uma perda progressiva da qualidade inicial dos materiais constituintes das camadas dos pavimentos, em particular das camadas betuminosas.

De acordo com Gonçalves (1999), dentre os muitos fatores que afetam o desempenho a ser oferecido por um determinado pavimento, destaca o número e a magnitude das cargas do tráfego, as propriedades dos materiais componentes das camadas e a sua heterogeneidade ao longo da via, a natureza do solo de subleito, a frequência e as práticas de manutenção aplicadas ao longo do tempo, as condições de drenagem e aspectos ambientais.

A norma DNIT 005 (2003) lista os principais defeitos que ocorrem nos pavimentos flexíveis brasileiros, sendo eles:

- Fenda: Toda descontinuidade na superfície do pavimento, que conduza a aberturas de menor ou maior porte, apresentando-se como fissura ou trinca;
- Afundamento: Deformação permanente caracterizada por depressão da superfície do pavimento;
- Ondulação: Deformação caracterizada por ondulações ou corrugações transversais na superfície do pavimento;
- Escorregamento: Deslocamento do revestimento em relação à camada subjacente do pavimento, com aparecimento de fendas em forma de meia-lua;
- Exsudação: Excesso de ligante na mistura asfáltica, que não é absorvida pelos agregados, surgindo na superfície do revestimento;
- Desgaste: Efeito do arrancamento progressivo do agregado do pavimento, caracterizado por aspereza superficial do revestimento e provocado por esforços tangenciais causados pelo tráfego;
- Buraco: Cavidade que se forma no revestimento por diversas causas (inclusive por falta de aderência entre camadas superpostas, causando o deslocamento

das camadas), podendo alcançar as camadas inferiores do pavimento, provocando a desagregação dessas camadas.

Os defeitos estruturais mais comuns encontrados nos pavimentos asfálticos nas rodovias brasileiras, segundo Moura (2010), são os trincamentos por fadiga e as deformações permanente em trilhas de roda. Estes defeitos devem ser evitados realizando-se um projeto estrutural adequado e uma dosagem da mistura asfáltica condizente com o projeto estrutural.

A deformação permanente em trilha de roda é um problema de desempenho de pavimentos asfálticos, definida como o acúmulo de pequenas quantidades de deformação não recuperável resultante da aplicação das cargas dos veículos. Segundo o autor, essa deformidade é simultânea a deformação viscosa do ligante asfáltico e deformação plástica da estrutura mineral da mistura asfáltica, tanto o ligante como o agregado exercem papel fundamental no comportamento mecânico da mistura asfáltica: o ligante, como resultado de sua consistência e reologia, e o agregado com as forças de fricção interna entre suas partículas. Carvalho (1997) reforça que a deformação permanente ou plástica é um tipo de deformação que ocorre no material, devido a ação de uma carga, e que não é recuperável quando a mesma for removida.

Já o aparecimento de trincas na superfície do pavimento, prejudica o desempenho estrutural e funcional da rodovia, causado principalmente por fadiga, decorrente da passagem repetida das cargas dos veículos, pela retração, pela movimentação do solo de fundação e por defeitos construtivos. Por consequência ocorre a perda de impermeabilização da superfície do pavimento, um aumento nas tensões verticais atuantes nas camadas subjacentes, por conta da queda na rigidez da camada trincada e a degradação progressiva do revestimento próximo a trinca, devido à concentração de esforços na região, o que leva ao aumento da falha (COLOMBIER, 1989 apud GONÇALVES, 1999).

Segundo Oliveira (2003), outro aspecto a ser considerado é a velocidade de operação do veículo. O tempo de aplicação da carga propagada pelos automóveis e a carga dinâmica imposta ao pavimento são fatores importantes, mas independentes, que influenciam o comportamento do pavimento. A variação da velocidade do veículo pode afetar a reação dos vários materiais componentes do pavimento e conseqüentemente seus estados de tensão, deformação e ruptura. Portanto, em locais onde os veículos comerciais se deslocam com menor velocidade, ou em condição de fluxo canalizado, existe maior possibilidade de ocorrer deformações permanentes no pavimento.

Por estes motivos, devem ser rigorosos os critérios de escolha do ligante utilizado na mistura asfáltica. O mesmo deve ser suficientemente fluido para facilitar sua trabalhabilidade e bombeamento em relação ao recobrimento dos agregados em temperaturas altas específicas para o Concreto Betuminoso Usinado a Quente (por volta de 160°C). Esse deve ser suficientemente rígido para resistir as deformações permanentes em altas temperaturas (por volta de 60°C) e finalmente o mesmo deve ser suficientemente flexível para resistir ao trincamento em baixas temperaturas (por volta de 20° C) (LESUEUR, 2009 apud DUARTE, 2018).

De acordo com Gonçalves (1999), a inexistência de relações bem definidas entre parâmetros estruturais e parâmetros que expressem a degradação do pavimento revela que a origem dos defeitos observados deve estar não em um processo normal de deterioração, que se acumula com a repetição das cargas do tráfego, mas em outros mecanismos como em condições adversas de drenagem subsuperficial ou subterrânea, deficiências construtivas, como má compactação, segregação, asfalto superaquecido na usina ou aplicado abaixo da temperatura adequada ou através do envelhecimento natural do revestimento asfáltico, onde a oxidação do ligante torna a mistura gradativamente mais frágil, e propensa a sofrer trincamento apenas em virtude das tensões geradas pelas oscilações térmicas.

2.2 Ligante asfáltico

Os ligantes, que são intensivamente empregados em pavimentos flexíveis, proporcionam forte união dos agregados agindo como um aglutinante que permite flexibilidade controlável, são duráveis e resistentes à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, podendo ser utilizados aquecidos ou emulsionados, em amplas combinações de esqueleto mineral, com ou sem aditivos.

Qualificam-se como betume com origem comumente na destilação do petróleo, sendo um produto impermeável, que possui a propriedade de ser um adesivo termoviscoelástico e pouco reativo. A baixa reatividade química a muitos agentes não evita nesse material um processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água. No Brasil, utiliza-se a denominação CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) para designar esse produto semissólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas. O asfalto é um material quase totalmente solúvel em benzeno, tricloroetileno ou em bissulfeto de carbono (BERNUCCI et al, 2008).

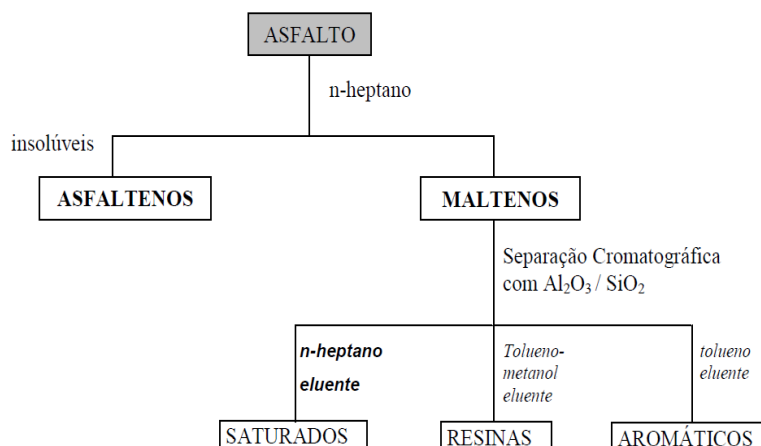
Segundo Negrão (2006), a produção do asfalto, de maneira não natural, constitui-se como um dos produtos finais da destilação do petróleo bruto, no qual as frações mais leves (gasolina, querosene, diesel) são separadas do asfalto por vaporização, fracionamento e condensação.

2.2.1 Composição química

Segundo Silva (2005), o CAP constitui, maioritariamente, uma mistura complexa de hidrocarbonetos de massa molar e estrutura química diferentes e em uma pequena parte de heteroátomos (oxigênio, nitrogênio e enxofre). Também podem estar presentes quantidades variáveis de vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio. Essa composição química pode variar devido à fonte do petróleo, com as modificações induzidas nos processos de refino e durante o envelhecimento na usinagem e em serviço.

Perante a complexidade de sua composição química, alguns pesquisadores elaboraram métodos de separação dos ligantes asfálticos segundo sua solubilidade em solventes específicos. De acordo com Bernucci et al (2008), o método mais moderno utilizado atualmente é normatizado pela ASTM D 4124-01, o qual separa nas seguintes frações: saturados, nafteno-aromáticos, polar-aromáticos e asfaltenos. As três primeiras frações são englobadas na designação genérica de maltenos, solúveis em *n*-heptano e separados por cromatografia de adsorção, os asfaltenos são insolúveis em *n*-heptano e separados por precipitação, conforme a Figura 1. O asfalto pode também receber outro fracionamento, utilizado na Europa, que conforme Silva (2005) foi estabelecida pelo químico Corbett, a qual diz que o ligante asfáltico é um material formado basicamente por quatro compostos: saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos, chamadas de frações SARA.

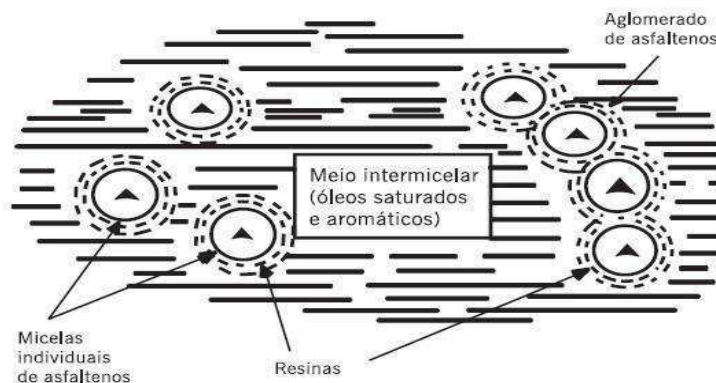
Figura 1- Separação química do ligante asfáltico, segundo Corbett.



Fonte: Silva (2005).

A estrutura do ligante asfáltico é tradicionalmente exemplificada pelo modelo de Yen, ou modelo de Micela, onde considera uma dispersão coloidal composta por micelas de asfaltenos peptizadas por resinas, imersas em meio de maltenos (saturados e aromáticos), representada pela Figura 2. Uma micela é um aglomerado de moléculas em uma solução coloidal, o qual é uma mistura que consiste de grandes moléculas simples, dispersas em uma segunda substância (BERNUCCI et al, 2008).

Figura 2 - Modelo de micelas de Yen.



Fonte: BERNUCCI et al, 2008.

Sua composição química, por fim, tem influência no desempenho físico e mecânico das misturas asfálticas, mas sua maior influência será nos processos de incorporação de agentes modificadores, tais como os polímeros.

Além do modelo de Micelas de Yen, existem outros estudos relacionados a modelos estruturais para representação do ligante asfáltico, como por exemplo, o proposto pelo SHRP (Strategic Highway Research Program), segundo o qual, o CAP consiste de duas famílias de moléculas funcionais denominadas polar e apolar, ligadas por forças intra e intermoleculares, responsáveis pela formação de redes tridimensionais que explicam as características viscoelásticas do CAP (OLIVEIRA 2015).

Bernucci et al (2008) comenta que o SHRP foi estabelecido pelo Congresso dos Estados Unidos em 1987, como um plano de estudos de cinco anos para melhorar o desempenho, a durabilidade e a segurança das estradas. Um dos principais resultados desse programa de pesquisa foi a proposição de novos métodos de avaliação dos ligantes asfálticos para pavimentação. Essas novas especificações passaram a ser conhecidas como SUPERPAVE (Superior Performing Asphalt Pavements) e apresentam mudanças significativas nos procedimentos de ensaio de ligantes e misturas asfálticas, pois privilegia a avaliação das

propriedades reológicas por ensaios mais representativos que os atuais, baseadas nos ensaios tradicionais de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade.

2.3 O fenômeno do envelhecimento do ligante asfáltico

O envelhecimento do CAP tem sido tratado como um aspecto de relevância na relação entre as propriedades reológicas do ligante asfáltico e o comportamento mecânico das misturas asfálticas. As condições severas às quais o ligante asfáltico é submetido, durante as operações de usinagem e de compactação e também ao longo da vida útil do pavimento, provoca um enrijecimento natural do material, que prejudica o comportamento mecânico da mistura asfáltica (NASCIMENTO 2015).

Segundo Huang et al (1996), o envelhecimento dos ligantes asfálticos é um fenômeno complexo, por promover alterações de natureza física e química destes materiais, que está diretamente associado a mecanismos de ruína da camada asfáltica, como a desagregação e o trincamento por fadiga ou de origem térmica. Este fenômeno combina os efeitos da volatilização de suas frações mais leves e de reações químicas de seus componentes com oxigênio.

De acordo com Whiteoak (1991), os quatro principais mecanismos responsáveis pelo envelhecimento do ligante asfáltico são:

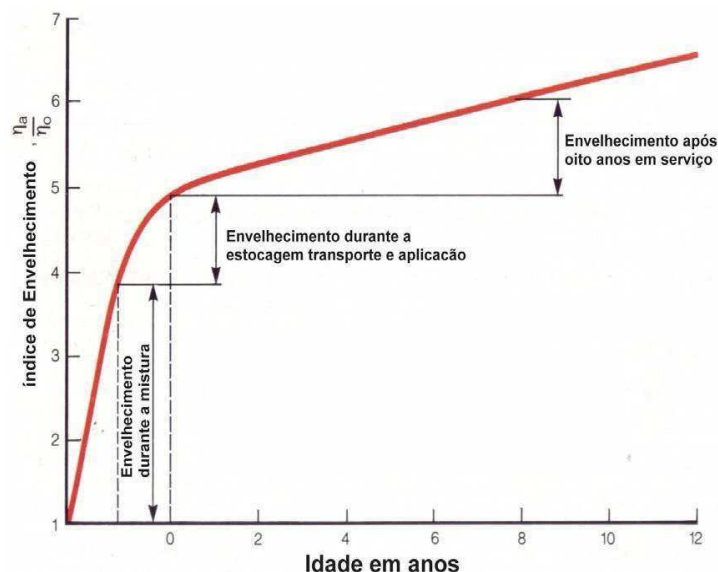
- Oxidação: O ligante asfáltico, como uma substância orgânica, oxida lentamente quando em contato com o ar. Durante o processo de usinagem, a presença de oxigênio, a grande superfície específica dos agregados e as altas temperaturas propiciam a oxidação;
- Perda de voláteis: Evaporação dos componentes voláteis, a qual depende da temperatura e da condição de exposição;
- Endurecimento físico: Fenômeno reversível que ocorre à temperatura ambiente e é atribuído à reordenação de moléculas e a cristalização de parafinas e;
- Endurecimento exsudativo: Resulta do movimento dos componentes oleosos que exsudam do ligante asfáltico para dentro do agregado mineral. Esta é uma função tanto da tendência de exsudação do ligante como da porosidade do agregado.

Ainda pelo autor, o envelhecimento de um ligante asfáltico ocorre principalmente em três etapas:

- Fabricação da mistura ligante asfáltico (USINAGEM): o ligante é aquecido a altas temperaturas (160-180°C) na presença de O₂, sob a forma de película fina para entrar em contato com o agregado aquecido. Após esta etapa o ligante asfáltico já não possui as mesmas características de saída da refinaria;
- Espalhamento e compactação: o ligante asfáltico está em constante contato com oxigênio e sob altas temperaturas;
- Utilização da estrada ou *in situ*: Durante sua vida útil o ligante está sujeito a temperaturas mais baixas, não ultrapassando 60-70°C na superfície do revestimento, porém este continua a envelhecer devido às condições climáticas e, indiretamente, a solicitação do tráfego de veículos.

A Figura 3, ilustra um exemplo de um gráfico que representa a medida do efeito do envelhecimento nas várias etapas de uso do ligante, feita por um índice de envelhecimento que é a relação entre a viscosidade a cada instante (η_a) e a viscosidade original (η_0) do ligante recém-produzido. A primeira etapa, de maior impacto, da usinagem da mistura asfáltica, representa cerca de 60% do envelhecimento; a segunda, ocorre durante o espalhamento e compactação, representando cerca de 20% do envelhecimento total; e a terceira etapa ocorre durante a vida útil do revestimento, representa cerca de 20% do envelhecimento total sofrido pelo ligante (TONIAL, 2001 apud MORILHA JÚNIOR, 2004).

Figura 3 - Envelhecimento do ligante asfáltico nas etapas de construção e de utilização do pavimento.



Fonte: Shell Bitumen Handbook (WHITEOAK, 1991).

Este envelhecimento é tradicionalmente dividido em duas fases: a curto prazo, associado à exposição ao ar e ao calor durante a usinagem e a compactação da mistura asfáltica, e o envelhecimento a longo prazo, que se desenvolve ao longo da vida útil da camada asfáltica.

No envelhecimento a curto prazo a volatilização e oxidação ocorrem em paralelo. A volatilização é um fenômeno predominantemente físico, que se expressa na perda de componentes voláteis do ligante, já a oxidação é um fenômeno de natureza química, com consequências mais complexas sobre o comportamento reológico do ligante asfáltico e, por esta razão, de mais difícil mensuração. À medida que o ligante asfáltico oxida, grupos carbonila (C=O) se formam, o que aumenta a polaridade e a tendência de associação com outros compostos polares. À medida que tais associações são estabelecidas, são formados asfaltenos menos solúveis e que apresentam comportamento de sólido. Esta mudança de composição resulta em aumento da viscosidade e das propriedades elásticas do ligante asfáltico. (NASCIMENTO 2015).

Enquanto o mecanismo de envelhecimento do ligante e da mistura é complexo, seu impacto sobre o desempenho do pavimento é geralmente compreendido. Segundo Morilha (2004), quando o ligante asfáltico envelhece, isto resulta em um aumento da rigidez desse ligante e, conseqüentemente, da mistura asfáltica. Esse efeito tende a aumentar a resistência à formação das trilhas de roda da mistura (defeito bastante comum em estradas, que se manifesta na superfície do rolamento do pavimento nos locais onde as rodas dos veículos transitam) e pode ser considerado como um efeito benéfico do envelhecimento. Por outro lado, o envelhecimento pode resultar no desenvolvimento e/ou aceleração de vários tipos de problemas, tais como trincamento e fratura por fadiga, trinca térmica e deterioração devido ao desgaste e à umidade, esforços que podem levar à falência da estrutura do pavimento.

Atualmente, as especificações de ligantes asfálticos têm avançado na direção de classificar o material com base em seu comportamento reológico após o envelhecimento.

2.3.1 Caracterização das propriedades mecânicas e de envelhecimento do ligante asfáltico

Dada a sua influência sobre as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos, o envelhecimento tem sido objeto de estudos ao longo das últimas décadas, com o intuito de tentar incluir alguns critérios de controle nas especificações destes materiais.

Em especificações mais elaboradas, como da SUPERPAVE, para ligantes asfálticos, a problemática do envelhecimento está, aparentemente, bem modelada. Esta especificação

prescreve a simulação do envelhecimento a curto prazo, ocorrido na fase de construção da camada asfáltica, por meio do ensaio em estufa de filme fino rotativo (RTFOT), e o envelhecimento a longo prazo, que se dá lentamente ao longo da vida útil do pavimento, por meio do ensaio em vaso pressurizado (PAV). Tais técnicas de envelhecimento acelerado, além de várias outras listadas na literatura, são orientadas pelo princípio da simulação termo-oxidativa, que se baseia na aplicação de temperatura e pressão, combinada com exposição a algum gás (ar ou oxigênio), durante um determinado intervalo de tempo (NASCIMENTO 2015). O presente trabalho analisará apenas os efeitos do envelhecimento à curto prazo.

Outra maneira de caracterizar o efeito do envelhecimento é através dos testes reológicos empíricos tradicionais, que são rápidos e de fácil execução, como a penetração, o ponto de amolecimento e medidas de viscosidades.

Estes ensaios parecem capazes de descrever adequadamente as mudanças no comportamento reológico nos ligantes tradicionais depois do envelhecimento.

2.3.1.1 RTFOT (Rolling Thin Film Over Test) - Aquecimento em Película Delgada Rolada

Em 1963, a Divisão de Estradas do Departamento de Obras Públicas do Estado da Califórnia desenvolveu um teste que simula de forma efetiva a usinagem de uma mistura asfáltica, o RTFOT, um ensaio que Azeredo (2011) caracteriza como uma simulação de envelhecimento do asfalto por aquecimento em película delgada rolada. O RTFOT foi aprovado em 1970 pela American Society for Testing and Materials como método ASTM D 2872 e normalizado pela AASHTO (T-240). Atualmente este ensaio faz parte do Programa SHRP e das Normas da Comunidade Européia EN 12591/1999 e CEN TC 19/2000.

De acordo com ASTM D 2872, este ensaio simula o envelhecimento do ligante que ocorre durante a usinagem e compactação da mistura. Desta maneira, tende a simular a oxidação e evaporação durante a produção e execução da mistura asfáltica.

O ensaio é feito colocando-se uma quantidade específica de cimento asfáltico (35g) num cilindro de vidro, que gira dentro de uma estufa a 163°C. Por intermédio de um orifício aberto no cilindro, uma corrente de ar atinge o cimento asfáltico a cada rotação da placa rotativa com os cilindros, durante 85 minutos.

Este método de teste tem o intuito de proporcionar mudanças nas propriedades do asfalto que podem ocorrer durante a usinagem a 150°C, verificadas por variações nas medidas

reológicas. Também pode ser usado para se determinar a variação de massa indicando assim a volatilidade do asfalto (LIMA, 2003).

2.4 Reologia de ligantes asfálticos

A reologia é a ciência que estuda o comportamento do fluxo ou a deformação de um corpo sob a ação de uma força ou tensão. A reologia clássica considera dois materiais como ideais: o sólido elástico e fluido viscoso. Os sólidos ideais deformam-se elasticamente e a energia necessária para a deformação é totalmente recuperada quando a força é removida. Os fluidos ideais, tal como líquidos e gases, tendem a se deformar de forma irreversível, dessa forma a energia requerida para a deformação é dissipada pelo fluido sob forma de calor e não é mais recuperada pela remoção da força exercida (MOTHÉ et al., 2006).

LU et al (2009) afirmam que o ligante asfáltico é um material viscoelástico e pode apresentar tanto um comportamento elástico como viscoso, ou uma combinação destes, de acordo com a temperatura e o tempo em que o ligante é observado. Quando em temperaturas suficientemente baixas e/ou altas taxas de carregamento (frequências), o ligante se comporta essencialmente como um sólido elástico. À medida que a temperatura aumenta e/ou a taxa de carga diminui, a propriedade viscosa do asfalto se torna mais aparente. Em temperaturas suficientemente altas e/ou longos tempos de carga, o asfalto é essencialmente um líquido newtoniano, e pode ser descrito por um valor de viscosidade independente da taxa de cisalhamento.

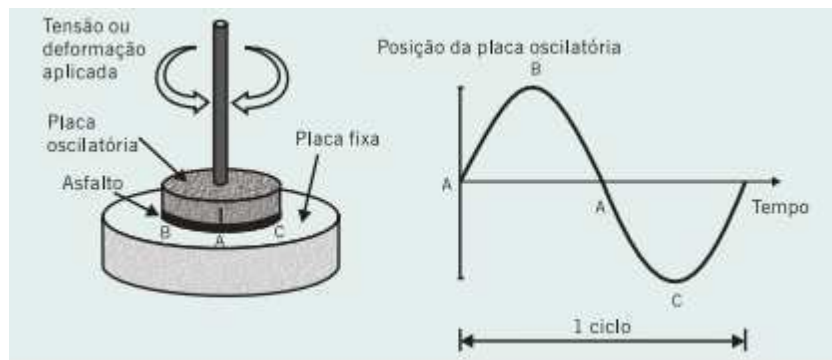
As propriedades reológicas dos ligantes asfálticos podem influenciar significativamente o seu desempenho durante a mistura, compactação e em serviço. Por esse motivo, vários tipos de testes e ensaios reológicos são frequentemente incluídos nas especificações do asfalto. As propriedades reológicas dos asfaltos são determinadas por interações moleculares (forças moleculares), que por sua vez dependem das composições químicas (LU et al., 2009).

A análise visco-elástica é útil na definição das características reológicas e respostas estruturais do concreto asfáltico, possibilitando entender o desempenho dos pavimentos flexíveis sob condições de carregamento variáveis com o tempo, desde solicitações quase totalmente estática, como ocorre nos estacionamentos, até observadas em autopistas e aeroportos, onde a velocidade dos carregamentos é alta. Bem como, possibilita estudar o efeito das deformações permanentes e das variações térmicas diárias e anuais (BATISTA, 2001).

2.4.1 O Reômetro de Cisalhamento Dinâmico

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), equipamento que faz parte da metodologia SUPERPAVE, corresponde a esse avanço. Este equipamento é utilizado para caracterizar as propriedades viscoelásticas do ligante asfáltico, submetendo uma pequena amostra deste material à tensões de cisalhamento oscilatórias entre duas placas paralelas, onde cada oscilação completa da placa superior corresponde a um ciclo, conforme a Figura 4.

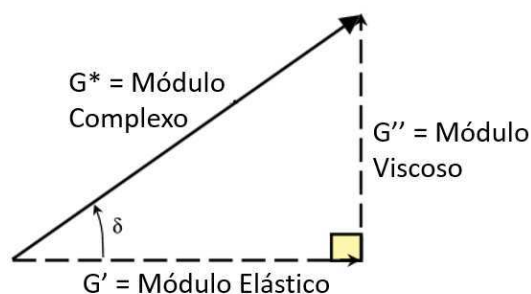
Figura 4 - Esquema da aplicação de tensão de cisalhamento na amostra de ligante asfáltico.



Fonte: Bernucci et al. (2010).

Com base em Fernandes (2009) apud Marinho Filho (2017), através dos ensaios do DSR, é possível determinar parâmetros viscoelásticos como módulo dinâmico de cisalhamento $|G^*|$, ângulo de fase (δ) 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, módulo de armazenamento (G') e componente viscosa, módulo de perda (G''), conforme a Figura 5. Estas duas componentes estão relacionadas com o módulo complexo nas equações (1) e (2).

Figura 5 - Representação vetorial de parâmetros reológicos.



Fonte: Marinho Filho (2017).

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

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

Onde:

G^* : módulo dinâmico;

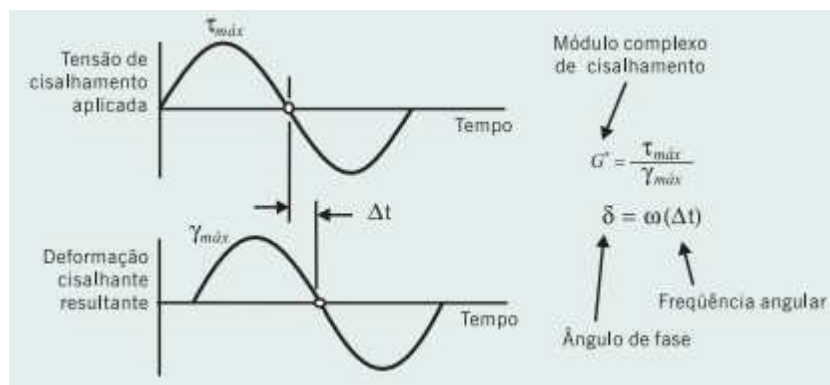
G' : módulo elástico;

G'' : módulo viscoso;

δ : ângulo de fase.

De acordo com Marinho Filho (2017), o ângulo de fase (δ) mede o nível de atraso no tempo entre a solicitação imposta e a resposta do ligante, este parâmetro pode indicar o nível de elasticidade do material. A Figura 6 ilustra o ciclo de tensão, deformação e cálculo do ângulo de fase. Portanto, se δ é igual a 0° , a resposta a deformação é imediata e o material é puramente elástico; se δ é igual a 90° , o material é puramente viscoso. O ligante asfáltico, por ser um material viscoelástico, apresenta valores intermediários de δ , entre 0 e 90° , dessa forma, seu comportamento nunca se apresenta unicamente como elástico ou viscoso.

Figura 6 - Atraso entre tensão e deformação em amostras ensaiadas no DSR.



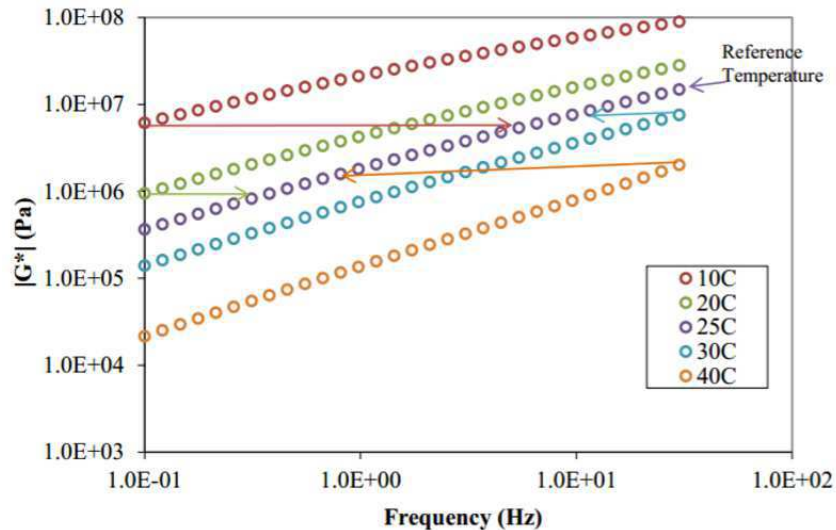
Fonte: Bernucci et al. (2010).

2.4.1.1 Curva Mestra

As propriedades reológicas de materiais viscoelásticos, como ligantes e misturas asfálticas podem ser investigadas através das suas curvas mestras. Segundo, Bechara et al (2008) apud Mello (2014), este modelo de representação expressa uma propriedade reológica qualquer do ligante asfáltico em função da frequência ou do tempo de aplicação do carregamento, descrevendo seu comportamento reológico para uma única temperatura em um espectro amplo de tempos ou frequência de carregamento. Para se construir uma Curva Mestra é necessário adquirir os dados de uma varredura de frequência em várias temperaturas. Após

isso, propriedades reológicas como módulo dinâmico de cisalhamento e o ângulo de fase são plotados para cada temperatura (Figura 7).

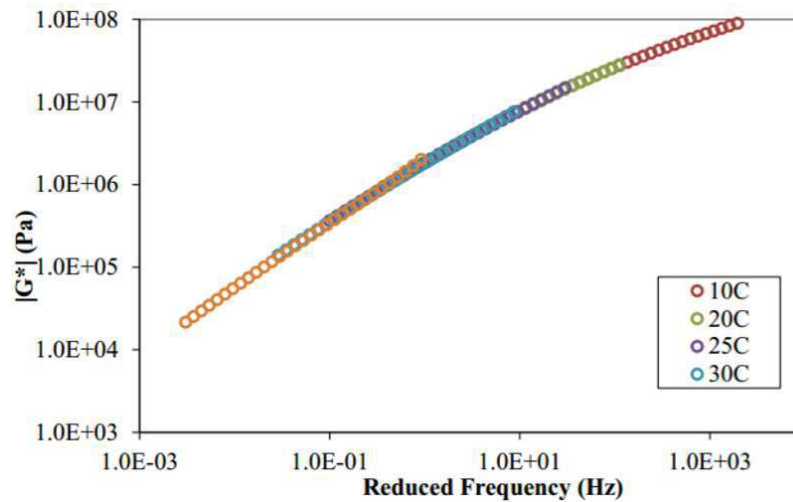
Figura 7 - Representação de curvas mestras geradas para cada temperatura de ensaio.



Fonte: Marinho Filho (2017).

A separação dos efeitos da temperatura e da frequência de carregamento é feita por meio de curvas de deslocamento horizontal da temperatura e de curvas mestre. Na obtenção destas curvas, admite-se a validade do princípio de superposição tempo-temperatura ou princípio de variáveis reduzidas que, fundamentalmente, descreve a equivalência entre estes dois fatores, ou seja, que a temperatura e o tempo ou frequência de aplicação de carga tem o mesmo efeito sobre as propriedades reológicas do material. Com base nos fatores de deslocamento obtidos na geração da curva mestre, é possível deslocar horizontalmente a curva mestre gerada na temperatura de referência e obter uma nova curva, capaz de descrever o comportamento reológico do material ao longo do mesmo espectro de frequências ou tempos de carregamento, na temperatura desejada, como mostrado na Figura 8 (BECHARA et al, 2008 apud MELLO, 2014).

Figura 8 - Translação das curvas mestras para temperatura de referência.



Fonte: Marinho Filho (2017).

Em função das suas potencialidades, a curva mestra representa uma ferramenta importantíssima na caracterização de materiais asfálticos ao longo de uma faixa ampla de temperatura e tempos ou frequências de carregamento. Baixas frequências representam o comportamento a altas temperaturas e baixas velocidades de carregamento, enquanto que frequências altas representam baixas temperaturas e velocidades altas, e, em geral a curva mestra engloba toda a faixa de serviço do asfalto na pavimentação.

2.5 Ligantes asfálticos modificados

Mothé (2009) apud Portugal (2016) considera ligante asfáltico modificado aquele que recebeu a adição de um agente modificador de origem natural, sintética ou polimérica. Mesmo que os ligantes tradicionais, ou seja, sem qualquer modificação, sejam adequados para uso em pavimentos.

Bernucci et al (2008) em seu livro *Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros* completa esclarecendo que para a maioria das aplicações rodoviárias, os asfaltos convencionais têm bom comportamento, satisfazendo plenamente os requisitos necessários para o desempenho adequado das misturas asfálticas sob o tráfego e sob as condições climáticas. Entretanto, diante à crescentes volumes de veículos comerciais e peso por eixo, ano a ano, em rodovias especiais ou nos aeroportos, em corredores de tráfego pesado canalizado e para condições adversas de clima, com grandes diferenças térmicas entre inverno e verão, o desenvolvimento de novas concepções de misturas asfálticas tem exigido a utilização de asfaltos modificados, dentre os mais utilizados atualmente podemos citar os polímeros.

Visto que o asfalto é um material termoviscoelástico, o autor explica que suas características vão influenciar diretamente o desempenho das misturas asfálticas, tanto de deformação permanente quanto de fadiga. As deformações resultantes das cargas aplicadas, pelo tráfego em movimento, podem ser bastante modificadas pela presença de polímeros no ligante, aumentando ou diminuindo as parcelas de viscosidade e de elasticidade do conjunto, para várias faixas de temperatura.

Para que a modificação do ligante seja viável técnica e economicamente, Bernucci et al (2008) considera necessário que o polímero seja resistente à degradação nas temperaturas usuais de utilização do asfalto, misture-se adequadamente com o asfalto, melhore as características de fluidez do asfalto a altas temperaturas, sem que o ligante fique muito viscoso para a mistura e espalhamento, nem tão rígido ou quebradiço a baixas temperaturas.

“O asfalto-polímero tem que manter suas propriedades durante a estocagem, aplicação serviço, deve poder ser processado nos equipamentos convencionais, permanecer estável, física e quimicamente, ao longo de todas as fases e não necessitar de temperaturas muito diferenciadas para aplicação.” (BERNUCCI et al, 2008).

Por muitas décadas vários pesquisadores têm tentado desenvolver usos industriais de vários modificadores de asfalto, tais como fíleres especiais, fibras e borrachas, por exemplo. Nos últimos 30 anos, com o desenvolvimento de vários polímeros diferentes, as modificações do ligante tomaram impulso significativo.

Pode-se citar o polímero SBS (estireno-butadieno-estireno), o qual tem sido muito empregado para modificar o asfalto, tanto para pavimentação como para aplicações industriais, apresentando comportamento melhor que asfalto convencional. O CAP modificado com SBS tem uma vida útil superior ao asfalto convencional. O SBS combina as propriedades termoplásticas e elastoméricas e sua utilização, em larga escala nas últimas décadas, tem sido norteada de excelentes resultados, pois este sistema apresenta recuperação elástica e resistência a tração por compressão diametral superior aos ligantes convencionais. Essas propriedades são essenciais para que o revestimento asfáltico permaneça resistente e flexível em toda gama de tensões e temperaturas a que está sujeito (ALMEIDA JÚNIOR, 2012 apud PORTUGAL, 2016).

Consoante à Yildirim (2007), pavimentos modificados por polímeros podem apresentar alta resistência à deformação permanente e a formação de trincas térmicas, diminuindo o trincamento por fadiga e reduzindo a susceptibilidade térmica.

2.5.1 Aditivos Orgânicos

De acordo com Silva (2016), quando misturados ao ligante asfáltico os aditivos orgânicos apresentam capacidade de modificar suas propriedades reológicas, o que resulta, principalmente na redução de sua viscosidade. O autor afirma que tais mudanças ocorrem ao elevar a temperatura do ligante acima do seu ponto de amolecimento. A escolha do tipo e da taxa de aditivo orgânico utilizados para a produção de uma mistura morna deve ser feita de modo cauteloso, visando à temperatura na qual ocorre o ponto de amolecimento destes produtos e à temperatura esperada na vida de serviço do pavimento, a fim de se obter uma redução do risco de deformação permanente e também minimizar o potencial de trincamento por baixas temperaturas. Isto se deve ao fato de que pode haver uma redução drástica da viscosidade do ligante, além de existir o risco de um forte enrijecimento da mistura asfáltica devido a grandes quantidades de aditivo utilizado.

Os aditivos orgânicos podem ser incorporados antes e durante a usinagem, resultando em uma redução da temperatura de mistura em cerca 30 a 40°C. Após o resfriamento da mistura asfáltica, estes elementos passam por um processo onde os mesmos se cristalizam de modo disperso no ligante, resultando num aumento da rigidez deste asfalto e, por consequência, da mistura como um todo (RÜHL, 2014).

Em relação aos modificadores de origem naturais ou orgânicos, destacam-se o uso de óleos. Como exemplo, Lucena et al (2016) estudou a mudança das propriedades de consistência e a variação das temperaturas de usinagem e compactação com a adição ao ligante asfáltico de teores variando entre 0 e 3% de óleo de moringa. Os ligantes foram analisados por meio dos ensaios de viscosidade rotacional, Penetração, Ponto de Amolecimento e o envelhecimento à curto prazo RTFOT. Como resultado a adição do óleo de Moringa Oleífera Lam para teores no intervalo compreendido entre 0,5 a 1%, ocorre uma diminuição significativa das temperaturas de usinagem e compactação ($\approx 5^\circ\text{C}$), sem comprometer o desempenho do CAP.

Já Souza (2012) realizou uma pesquisa onde foi adicionado ao CAP 50/70, teores de 2 a 10% de óleo de mamona. O autor realizou os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional e encontrou reduções de 10°C nas temperaturas de usinagem e compactação quando ao teor de 5% do óleo da Mamona, sem comprometimento das propriedades mecânicas.

Por fim, Ribeiro (2011) estudou misturas mornas com adição do líquido da castanha de caju variando de 0,5 a 2% em peso do CAP. O autor obteve maiores reduções de viscosidade

para a adição de 2% do líquido e verificou que a adição contribuiu para retardar o envelhecimento do CAP.

2.5.1.1 Óleo de copaíba

De acordo com Yamaguchi & Garcia (2012), o óleo de copaiba é extraído do tronco da árvore de copaíba e apresenta diversas propriedades, como medicinais, cosméticas e industriais. Sendo uma das plantas com uso medicinal mais conhecida e utilizada no Brasil, o óleo é encontrado na forma farmacêutica de pomadas, óleos in natura, cápsulas, emulsões, entre outros.

Esta árvore de copaíba pertence à família Leguminosae, subfamília Caesalpinoideae e ao gênero *Copaífera*, é comumente encontrada na América Latina e África Ocidental. No Brasil é uma árvore nativa e está localizada nas regiões sudeste, centro-oeste e amazônica (FRANCISCO, 2005 apud YAMAGUCHI & GARCIA, 2012). Seu gênero compreende 72 espécies, existindo mais de 20 no Brasil.

Ainda segundo as autoras, as copaíbas são árvores de grande porte e possuem em seu interior grande quantidade de óleo-resina, os quais são extraídos através de três métodos: por meio da extração tradicional, no qual uma grande abertura do tronco da árvore é realizada, o que inutiliza a planta e desperdiça grandes quantidades de óleo; na extração total, na qual se retira todo o óleo a partir de árvores derrubadas e abertas e por fim, a extração racional, que é a mais adequada, realizada de modo sustentável, através de uma pequena abertura no tronco da árvore, onde é inserido um cano que conduz o óleo para o exterior, permite a vedação após a saída do óleo-resina e facilita futuras extrações.

Esse óleo é um produto de excreção e desintoxicação do organismo vegetal e representa uma forma de defesa da planta contra animais, fungos e bactérias (ROMERO, 2007 apud YAMAGUCHI & GARCIA, 2008).

Pieri et al. (2009) descreve óleo-resina de copaíba como uma substância natural composta de uma parte sólida, resinosa não volátil formada por ácidos diterpênicos responsável por 55 a 60 % do óleo, que é utilizada como bálsamos, diluída na outra parte, um óleo essencial, composto de sesquiterpenos. Estes podem ser divididos em sesquiterpenos oxigenados (álcoois) e hidrocarbonetos sesquiterpênicos que possuem maior atividade anti-inflamatória quando comparados aos outros dois grupos presentes.

Essa composição química do óleo extraído, como, pode variar em relação à concentração e natureza dos diterpenos e sesquiterpenos presentes de acordo com variações de espécies, os fatores biológicos como insetos e fungos, ou fatores abióticos, embora alguns estudos com o uso da *Copaifera duckei* não tenham apresentado diferença significativa na composição de óleos extraídos das mesmas árvores, em épocas sazonais diferentes. Apesar de poderem apresentar alterações nas quantidades e tipos de diterpenos e sesquiterpenos, apenas essas classes de substâncias podem estar presentes na composição do óleo puro.

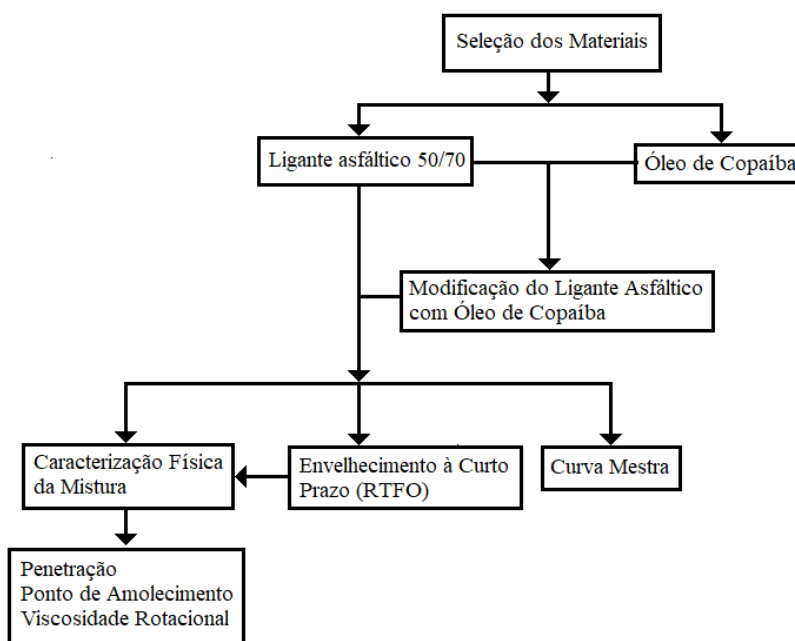
De acordo com Pieri et al. (2009), o principal sesquiterpeno é o beta-cariofileno, que possui comprovada ação anti-inflamatória, antibacteriana, antifúngica e antiedêmica, e o beta-bisaboleno, com propriedades descritas como analgésico e anti-inflamatório. O diterpenos mais encontrados são os ácidos hardwíckico, colavenol, ácido copaíferico, ácido copálico, entre outros.

Ainda de acordo com os autores, o óleo de copaíba tem sido utilizado extensivamente, com diversas funções. Pelo fato de ser fonte muito rica e renovável de hidrocarbonetos, o óleo resina tem sido intensamente avaliado como uma fonte de combustível, tendo sucesso comprovado, quando em mistura na proporção 1:9 com o óleo diesel, mas de forma abundante, vem sendo utilizado medicinalmente para inúmeras finalidades, das mais diferentes naturezas, e tem sido há vários anos matéria de vários estudos, visando comprová-las ou adaptá-las a novas terapias.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos empregados na pesquisa, bem como os procedimentos utilizados para a coleta e caracterização dos materiais. A Figura 9 apresenta a metodologia adotada para a realização dos ensaios.

Figura 9 - Fluxograma das etapas da pesquisa realizada.



Fonte: O autor (2018).

3.1 Materiais

Os materiais utilizados para realização deste estudo foram:

- **Ligante convencional:** Foi utilizado o CAP 50/70, obtido da distribuidora Stratura Asfaltos S/A (antiga Ipiranga Asfaltos S/A).
- **Óleo de copaíba:** Extraído da planta denominada de copaíba e adquirido no comércio local.

3.2 Métodos

A metodologia utilizada para desenvolvimento desta pesquisa seguiu os procedimentos a seguir:

3.2.1 Preparação das amostras

Para produção da mistura entre o ligante asfáltico e o óleo de copaíba, utilizou-se o agitador mecânico Fisaton Modelo 722D de cisalhamento, que este indica velocidade de rotação e temperatura em dispositivo digital, apresentado na Figura 10.

Figura 10 - Misturador mecânico.



Fonte: O autor (2018).

Inicialmente, o ligante asfáltico foi aquecido a uma temperatura de 135°C e uma rotação de 406 rpm, assim garantindo a homogeneidade do CAP na mesma temperatura. Ao atingir a temperatura estabelecida, adicionou-se o óleo de copaíba previamente aquecido, em teores de 4 e 5% em relação a massa total da amostra contabilizando 20 minutos para homogeneização da mistura. Por fim, as amostras foram armazenadas.

3.2.2 RTFO (Estufa de Filme Fino Rotativo)

O procedimento RTFO que segue a norma ASTM D 2872-97 avalia o envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação e evaporação pelo efeito de calor e ar sobre uma película de material asfáltico em movimento. Uma fina película de asfalto de 35g é continuamente girada dentro de um recipiente de vidro a 163°C por 85 minutos, com injeção de ar. Os efeitos do calor e do ar são determinados a partir de alterações nos valores das análises físicas como medidos antes e depois do tratamento no forno.

O procedimento possibilita a identificação de mudanças nas propriedades do asfalto que podem ocorrer durante a usinagem a 150 °C, verificadas por variações nas propriedades de

constância. Também pode ser usado para se determinar a variação de massa indicando assim a volatilidade ou oxidação do asfalto. A Figura 11 ilustra a estufa RTFO utilizada para realização do procedimento.

Figura 11 - Estufa para procedimento RTFO.



Fonte: O autor (2018).

3.2.3 Ensaio de Penetração

O ensaio de penetração mede a “consistência” ou “viscosidade indireta” do CAP no estado semissólido. Esse consiste basicamente em determinar a profundidade, em décimos de milímetros, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra verticalmente, durante 5 segundos em uma amostra de CAP a uma temperatura de 25°C. Em cada ensaio foram realizadas três medidas individuais de penetração, com a adoção da média destes valores, na condição da dispersão entre as três medidas não exceder os valores especificados na norma. A Figura 12 ilustra o Penetrômetro utilizado no ensaio.

Figura 12 - Penetrômetro para ensaio de penetração.



Fonte: O autor (2018).

Além do ensaio em si de penetração, também foram avaliados os parâmetros de penetração retida (PR) dos ligantes, fazendo uma relação entre o valor obtido para o ligante na condição sã e em sua condição envelhecida a curto prazo obtida no procedimento RTFO. A Equação (3) demonstra a relação para obtenção da PR.

$$PR = \frac{\text{PenetraçãoRTFO}}{\text{PenetraçãoPuro}} \times 100 \quad (3)$$

3.2.4 Ponto de Amolecimento

O ponto de amolecimento é a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido e atinge a placa inferior da aparelhagem do ensaio. Este ensaio, também conhecido por Anel e Bola, é regido pela norma DNIT-ME 131/2010. A Figura 13, ilustra o aparato utilizado para este ensaio.

Como são utilizadas duas bolas no procedimento, as quais são envolvidas pelo asfalto a partir do momento em que este amolece e começa a escoar, resulta na medida de duas temperaturas que não podem ser discrepantes entre si em mais de 2° C.

O ponto de amolecimento foi então a média das temperaturas lidas no termômetro assim que as bolas atingiram a placa de referência do ensaio.

Figura 13 - Aparato utilizado para ensaio de ponto de amolecimento.



Fonte: O autor (2018).

Assim como o ensaio de penetração, o aumento do Ponto de Amolecimento também foi avaliado para constatar que os altos valores apresentados indicam maior sensibilidade do ligante ao envelhecimento. O aumento é cálculo pela diferença entre o ponto de amolecimento dos ligantes em sua condição envelhecida e o ponto de amolecimento em condição pura.

O DNIT 095/2006 regulamenta um aumento máximo de 8°C no ponto de amolecimento para o CAP 50/70.

3.2.5 Viscosidade rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional tem por finalidade medir a consistência dos ligantes e foi realizado segundo a metodologia descrita pela ASTM D 4402/02. O método consiste na medição do torque necessário para rodar uma haste de prova (spindle) imersa em uma amostra de ligante aquecida sob velocidade constante. A quantidade de amostra utilizada no ensaio depende do tamanho da haste de prova, que deve ser selecionada em função do ligante. Para este ensaio será utilizado o viscosímetro rotacional cilíndrico modelo DV-III ULTRA e o modelo DV-II+ PRO, cada um ligado a um controlador de temperatura individualizado, com a finalidade de obtenção da média dos valores entre os dois equipamentos. A viscosidade será verificada em diferentes taxas de rotação, 20 rpm, 50 rpm e 100 rpm, à temperatura de 135°C, 150°C e 177°C, respectivamente. A Figura 14 ilustra o equipamento utilizado.

Nestes ensaios foram utilizadas amostras de CAP 50/70 puro e modificados, antes e após o RTFO.

Figura 14 - Viscosímetros utilizados para medição das viscosidades dos ligantes asfálticos.



Fonte: O autor (2018).

3.2.6 Curva Mestra

A curva mestra utiliza o equipamento reômetro oscilatório Discovery HR-1 (DSR), para expressar o comportamento viscoelástico dos ligantes asfálticos em função da temperatura e da taxa de carregamento em uma ampla faixa de frequência baseada no princípio da superposição tempo-temperatura. Este equipamento está ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Reômetro de cisalhamento direto (DSR).



Fonte: O autor (2018).

Este ensaio foi realizado com degraus de 6°C partindo de 46°C até a temperatura de 82°C. A partir de uma varredura de frequência, os valores de Módulo Complexo (G^*) e Ângulo de Fase (δ) foram dispostos em uma escala log-log para cada degrau de temperatura dando

origem a uma curva mestra. Em seguida, uma temperatura de referência foi escolhida e os dados coletados em várias temperaturas foram transportados considerando a frequência de carga até que as curvas se fundissem em uma única curva, para cada amostra. Foram confeccionadas amostras de ligante asfáltico com 25 mm de diâmetro e 1 mm de espessura, sendo analisadas apenas as amostras antes do RTFO.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o auxílio dos ensaios de Penetração, Ponto de amolecimento, Viscosidade rotacional e Curva mestra verifica-se os resultados para mensurar as propriedades físicas e reológicas das misturas asfálticas nos dois teores em estudo. A seguir, encontram-se os resultados obtidos para cada ensaio.

4.1 Propriedades físicas

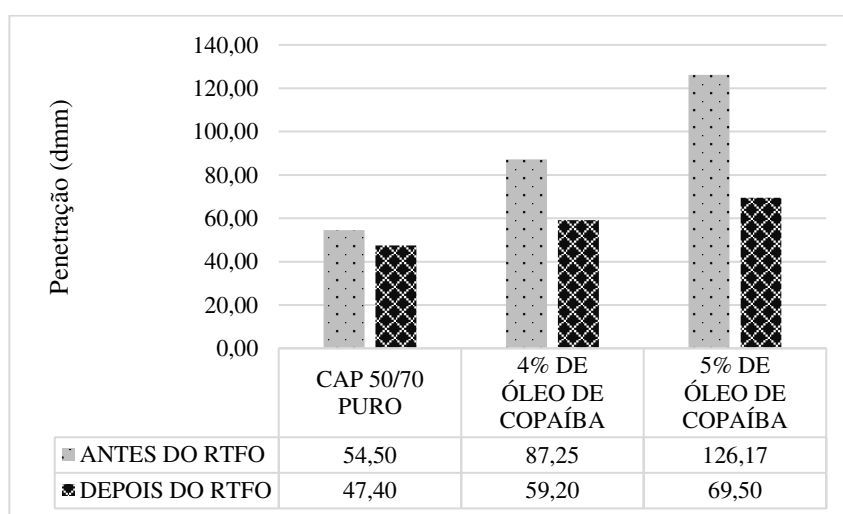
4.1.1 Ensaio de Penetração

Os resultados obtidos com relação a penetração do ligante puro e o ligante incorporado com óleo de copaíba nos teores de 4% e 5% antes e após o processo de envelhecimento à curto prazo estão exibidos na Tabela 01 e no gráfico da Figura 16. Verifica-se ainda os valores de penetração retida para amostra estudada.

Tabela 1 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO.

ENSAIO DE PENETRAÇÃO			
TEORES	ANTES DO RTFO (dmm)	DEPOIS DO RTFO (dmm)	PENETRAÇÃO RETIDA
CAP 50/70 PURO	54,50	47,40	86,97%
CAP 50/70 + 4% DE ÓLEO DE COPAÍBA	87,25	59,20	67,85%
CAP 50/70 + 5% DE ÓLEO DE COPAÍBA	126,17	69,50	55,08%

Figura 16 - Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFO.



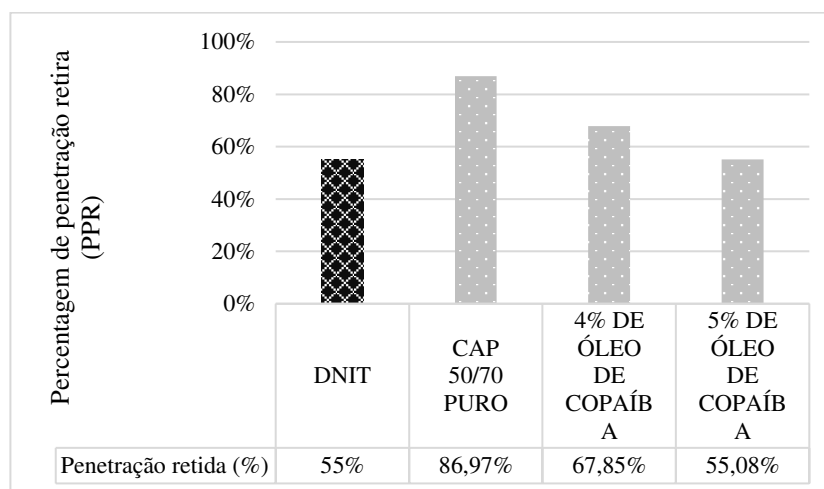
Foi observado um aumento nos valores da penetração em relação ao CAP 50/70 puro, esses aumentam à medida que se eleva o teor de óleo utilizado, indicando uma diminuição na dureza. Assim como verificado por Silva (2016), quando empregou óleo de girassol e óleo de moringa em sua pesquisa. O autor descreve que o aumento da penetração já era esperado, pois os óleos como aditivos orgânicos tem a capacidade de redução de viscosidade o que resulta por sua vez na redução da consistência do ligante asfáltico.

A norma DNIT 095/2006-EM estabelece para ligantes asfálticos um valor de penetração entre 50 e 70 decímetros de milímetro, e dessa forma, apenas o ligante asfáltico puro satisfaz a especificação, os demais resultaram em valores superiores ao estabelecido. No entanto, vale ressaltar que essa norma não é específica para os ligantes modificados.

Quanto as amostras ensaiadas após o envelhecimento a curto prazo na estufa RTFO, as penetrações dos ligantes apresentaram tendência semelhante de aumento de valor da penetração em relação ao aumento do teor do óleo, porém, ocorre uma diminuição dos valores de penetração quanto aos ligantes asfálticos antes do RTFO, o que indica um aumento da dureza do ligante devido a oxidação da amostra durante o processo de envelhecimento.

Por essa razão, o envelhecimento a curto prazo é avaliado em termos de porcentagem de penetração retida e é dado pela razão entre a penetração após e antes do RTFO. Esse dado é de suma importância para verificar a sensibilidade do ligante ao envelhecimento, e para isso, a norma DNIT 095/2006-EM define o mínimo de 55% para esse parâmetro. Assim, maiores valores para a porcentagem de penetração retida indicam uma menor sensibilidade ao envelhecimento.

A Figura 17 ilustra as penetrações retidas em comparação com o preconizado pela norma, mostrando que todas as amostras se apresentam dentro do limite. Entretanto, observa-se que a incorporação do óleo de copaíba torna o ligante mais sensível ao envelhecimento, por apresentar menores valores de penetração retida que o CAP puro.

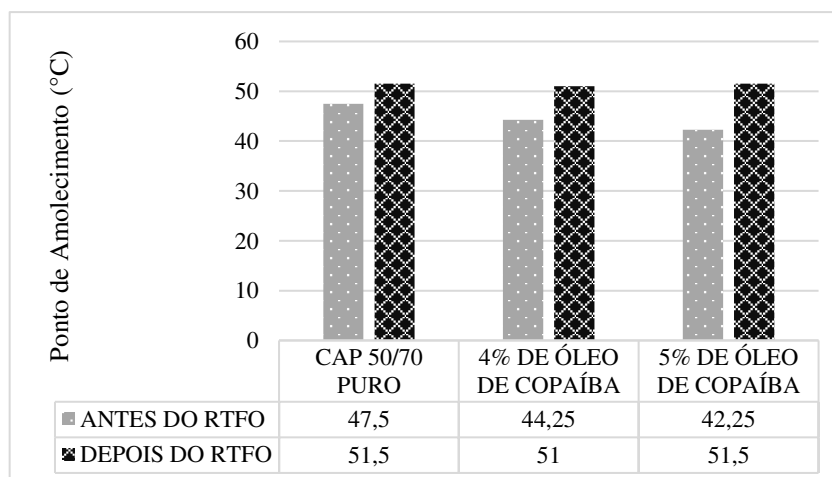
Figura 17 - Resultados das penetrações retidas.

4.1.2 Ponto de amolecimento

A Tabela 2 e a Figura 18 apresentam os resultados médios obtidos nos ensaios de ponto de amolecimento para o CAP 50/70 e modificado com o óleo de copaíba, antes e após o processo de envelhecimento.

Tabela 2 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento antes e após RTFO.

ENSAIO DE PONTO DE AMOLECIMENTO			
TEORES	ANTES DO RTFO (°C)	DEPOIS DO RTFO (°C)	AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO (°C)
CAP 50/70 PURO	47,5	51,5	4
CAP 50/70 + 4% DE ÓLEO DE COPAÍBA	44,25	51	6,75
CAP 50/70 + 5% DE ÓLEO DE COPAÍBA	42,25	51,5	9,25

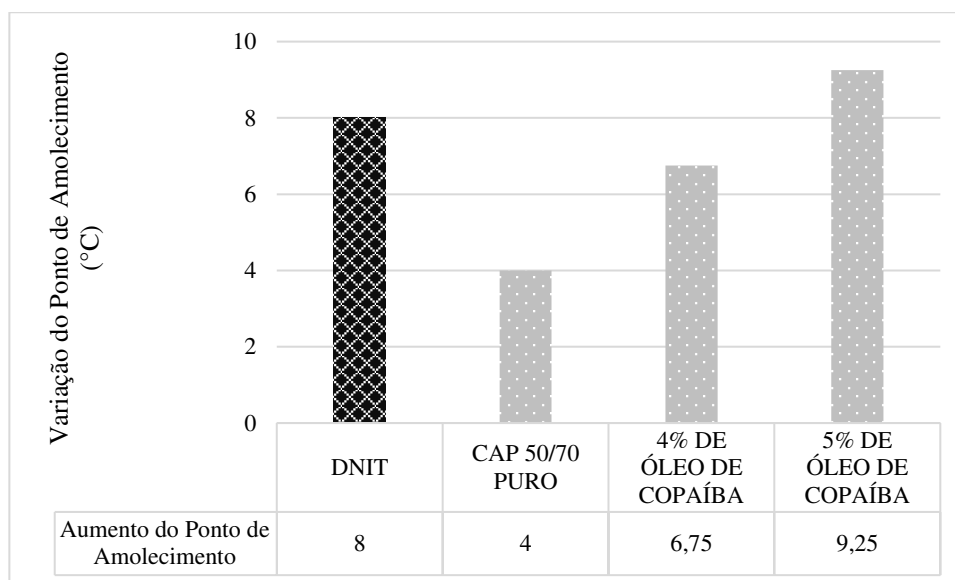
Figura 18 - Resultados do ensaio de ponto de amolecimento.

De acordo com resultados obtidos, observa-se que a modificação do ligante com os teores de aditivo apresentam uma tendência de diminuição do ponto de amolecimento. Tal fato decorre da diminuição da rigidez sofrido pelo ligante asfáltico, condição já observada no ensaio de penetração. O trabalho de Silva (2016), apresentou o mesmo comportamento quando adicionou óleo de girassol e óleo de moringa, e esclarece que tal redução implica na perda de resistência do CAP e ganho na sua trabalhabilidade o que dependendo da situação pode ser a vantagem procurada.

Por essa razão, a norma DNIT 095/2006-EM estabelece a temperatura mínima de 46°C para o ponto de amolecimento na condição normal, e dessa forma verifica-se que apenas o CAP 50/70 puro atende a este limite.

Levando em consideração a diferença entre os valores do ponto de amolecimento antes e após o envelhecimento, a norma DNIT 095/2006-ME prescreve um aumento máximo de 8°C para o CAP 50/70, a fim de analisar a sensibilidade do ligante aos fatores que causam o seu envelhecimento. A Figura 19 ilustra os resultados obtidos para variação do ponto de amolecimento dos ligantes e o previsto pela norma.

Figura 19 - Resultados da variação de ponto de amolecimento.



O ligante modificado com 5% apresenta maior variação dos pontos de amolecimento, com um aumento de temperatura de 9,25°C. O CAP 50/70 puro apresentou a menor variação, e, portanto, menor sensibilidade ao envelhecimento.

4.2 Propriedades reológicas

4.2.1 Viscosidade Rotacional Brookfield

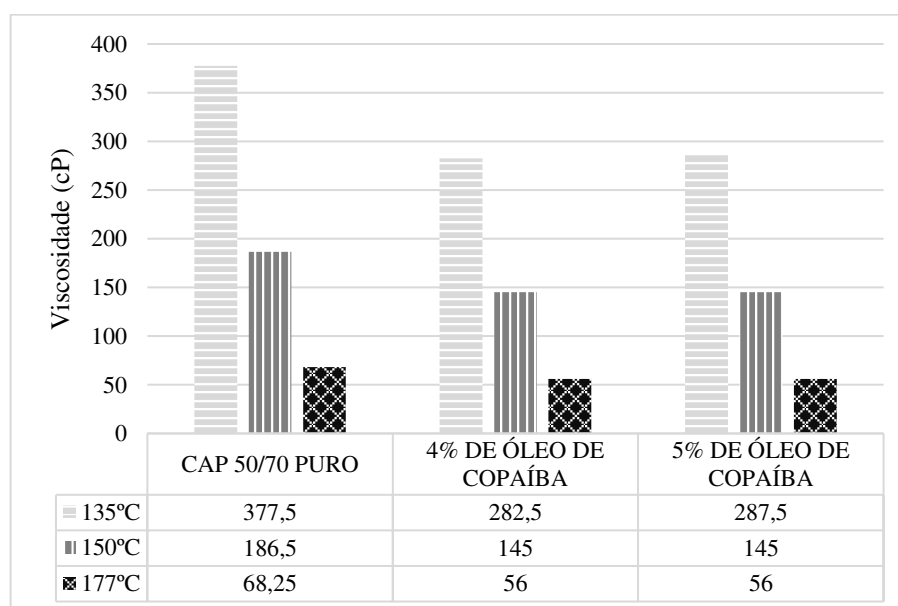
4.2.1.1 Antes do envelhecimento à curto prazo (RTFO)

O estudo da viscosidade se mostra importante para se avaliar a capacidade do ligante asfáltico de envolver todos os agregados da mistura e a sua trabalhabilidade em campo, além de ser possível determinar as temperaturas necessárias na usinagem e compactação. A Tabela 3 e Figura 20 apresentam os resultados do ensaio de viscosidade rotacional antes do processo de envelhecimento às temperaturas de 135°C, 150°C e 177 °C.

Tabela 3 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional antes do RTFO.

ENSAIO DE PONTO DE VISCOSIDADE ROTACIONAL (BROOKFIELD)			
TEMPERATURAS (°C)	VISCOSIDADE (cP)		
	CAP 50/70 PURO	CAP 50/70 + 4% DE ÓLEO DE COPAÍBA	CAP 50/70 + 5% DE ÓLEO DE COPAÍBA
135	377,5	282,5	287,5
150	186,5	145	145
177	68,25	56	56

Figura 20 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional antes do RTFO.



Analisando os resultados, observa-se uma redução da viscosidade com a incorporação do óleo de copaíba ao CAP 50/70, representando um decréscimo médio de cerca de 23% em comparação aos resultados obtidos para o ligante puro, com resultados obtidos para o ligante

com teor de 4% de óleo de copaíba. Entretanto, não houve variação significativa da viscosidade entre os teores de 4% e 5%, principalmente nas temperaturas mais altas do ensaio, o que indica que este acréscimo entre os teores de óleo de copaíba não foi o suficiente para influenciar no ligante, em termos de viscosidade.

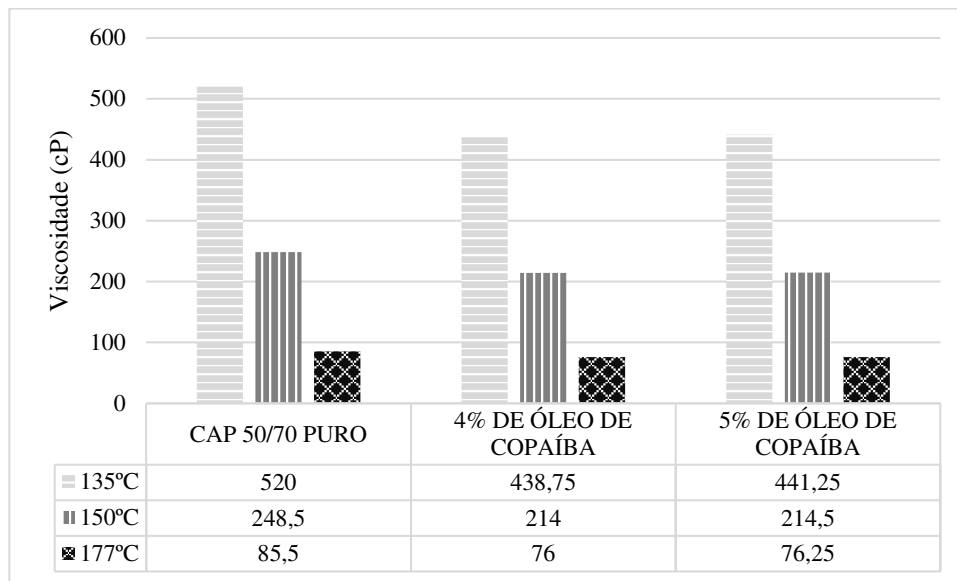
A norma DNIT 095/2006, delimita a viscosidade dos ligantes asfálticos a fim de propiciar um nível adequado de trabalhabilidade, esta especificação prevê para as temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C, valores mínimos de 270cP, 112cP e 57, respectivamente. Dessa forma, ambos os ligantes com adição de óleo de copaíba tiveram valor abaixo do especificado, para as temperaturas de 177°C.

4.2.1.2 Após o envelhecimento (RTFO)

A Tabela 4 e a Figura 21 ilustram os resultados da viscosidade após o processo de envelhecimento para às três temperaturas em que o ensaio foi realizado. Após submeter o ligante ao processo de envelhecimento a curto prazo (RTFO), é possível notar um acréscimo nos valores das viscosidades em todas as temperaturas, fato já esperado devido ao aumento da rigidez originado pela oxidação que o envelhecimento gera no ligante asfáltico.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional após RTFO.

ENSAIO DE PONTO DE VISCOSIDADE ROTACIONAL (BROOKFIELD)			
TEMPERATURAS (°C)	VISCOSIDADE (cP)		
	CAP 50/70 PURO	CAP 50/70 + 4% DE ÓLEO DE COPAÍBA	CAP 50/70 + 5% DE ÓLEO DE COPAÍBA
135	520	438,75	441,25
150	248,5	214	214,5
177	85,5	76	76,25

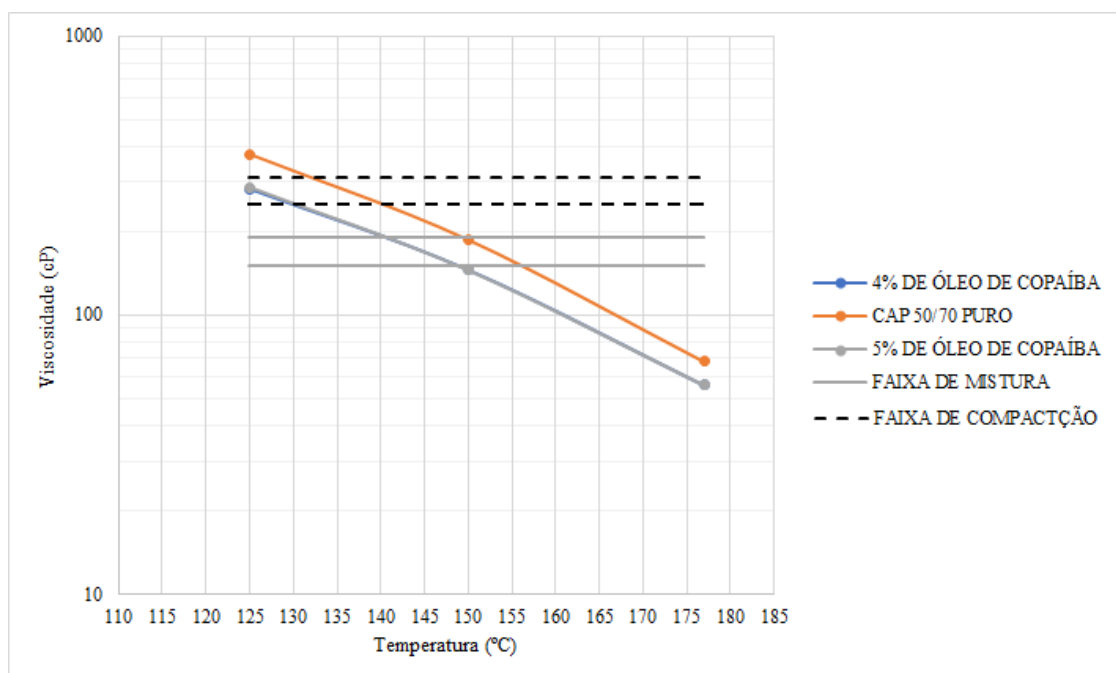
Figura 21 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional após RTFO.

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que o ligante puro sofreu um acréscimo médio de viscosidade de 26% em todas as temperaturas, enquanto que ambos os ligantes modificados sofreram um acréscimo médio em torno de 33%, o que indica certa sensibilidade ao envelhecimento. Mais uma vez, nota-se a paridade das viscosidades entre os ligantes modificados, revelando o teor de 4% com resultados ligeiramente menores.

4.2.1.3 Temperatura de usinagem e compactação

Baseado nos resultados da viscosidade rotacional foi realizada a verificação da diminuição de temperatura das misturas, frente aos teores de óleo de copaíba empregados na pesquisa. Bernucci et al. (2008), recomenda adotar o intervalo de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s para a obtenção das temperaturas máxima e mínima de usinagem a partir do gráfico viscosidade x temperatura, bem como recomenda o intervalo de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s para obter as temperaturas máxima e mínima de compactação da mistura asfáltica. A Figura 22 exemplifica como foram encontradas as temperaturas de usinagem e compactação para o CAP puro e para os ligantes modificados.

Figura 22 - Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional em relação às faixas de temperatura de usinagem e compactação.



Como não houve diferença significativa entre os resultados de viscosidade entre os teores de óleo de copaíba, os resultados de temperaturas de usinagem e compactação também foram os mesmos. Sendo assim, a Tabela 5 apresenta os resultados médios obtidos para as variações de temperaturas de compactação e de usinagem, do CAP 50/70 e do ligante modificado com óleo de copaíba.

Tabela 5 - Temperaturas de usinagem e compactação dos ligantes.

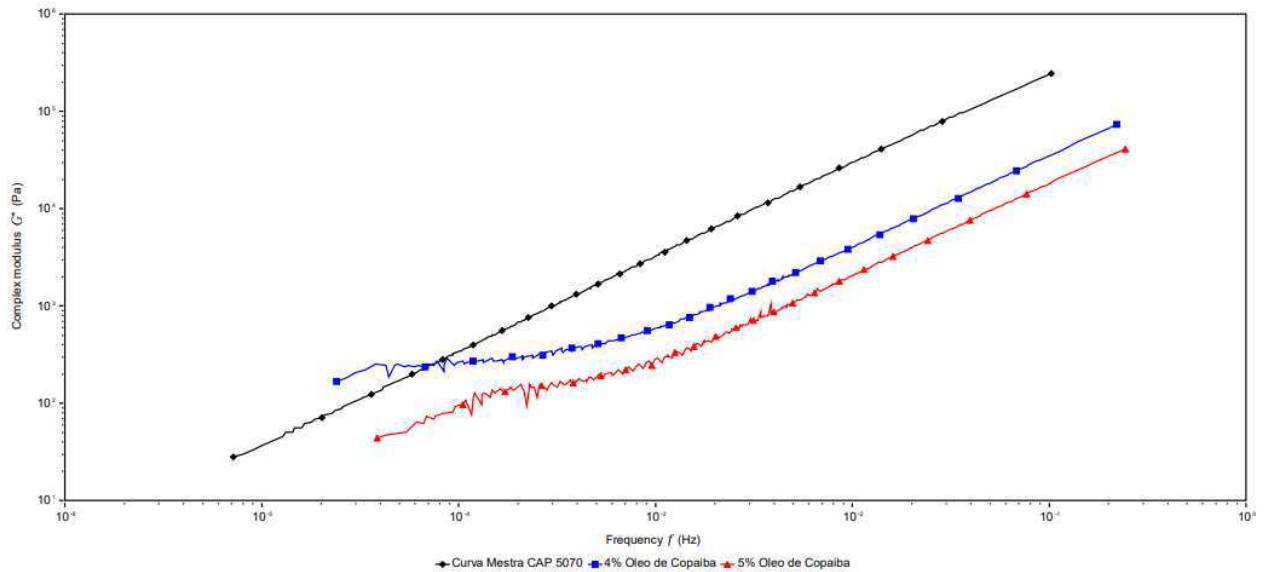
TEMPERATURAS (°C)	CAP 50/70 PURO	LIGANTES MODIFICADOS
USINAGEM	153,28	144,85
COMPACTAÇÃO	137,46	126,9

Conforme resultados obtidos, evidencia-se que o óleo de copaíba tornou o ligante mais fluido, ou seja, menos viscoso, o que diminuiu as temperaturas de usinagem e compactação da mistura. O ligante modificado apresentou redução média de cerca de 8,4°C para temperatura de usinagem e 10,6°C para temperatura de compactação em relação ao ligante puro.

4.2.2 Curva mestra

Na Figuras 23 é ilustrada a curvas mestra de módulo complexo para todas as amostras estudadas, empregando 25°C como temperatura de referência.

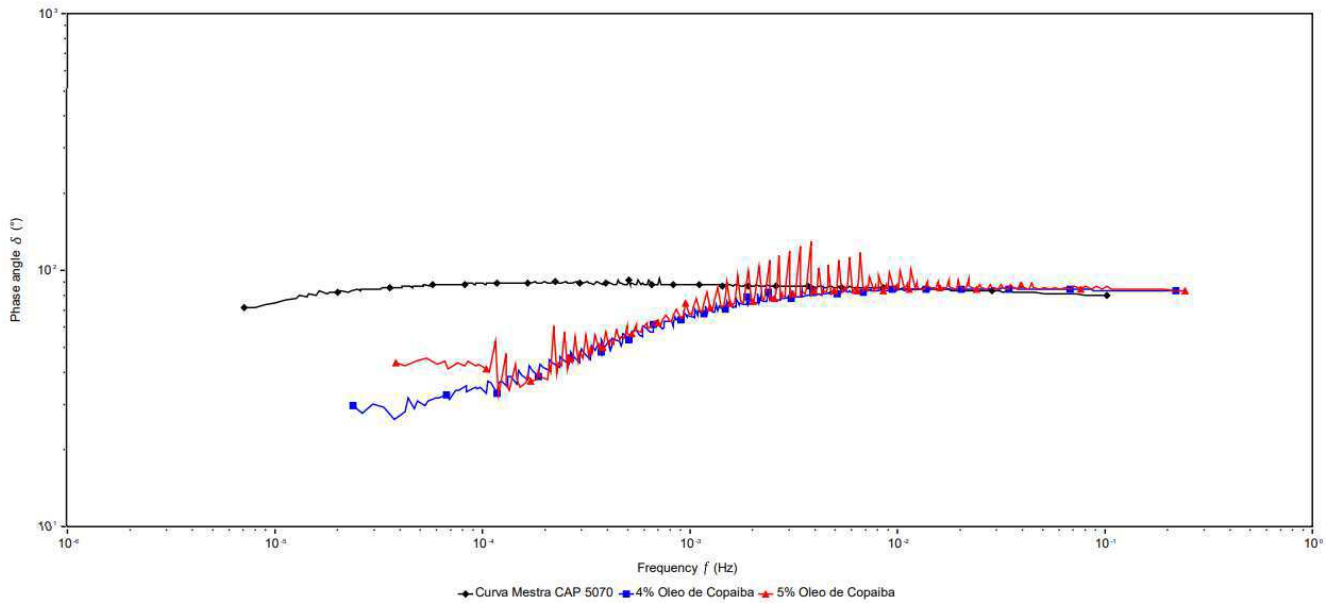
Figura 23 - Curvas mestras de módulo complexo em função da frequência.



Ao analisar a Figura 23, verifica-se que na região de baixas frequências, entre 10^{-5} Hz e 10^{-4} Hz, os valores de G^* aumentam, demonstrando assim aumento na rigidez do ligante. Entretanto, nota-se neste intervalo, instabilidade do ligante modificado, de forma que as curvas não apresentam um comportamento definido, o que pode indicar interferências na leitura dos dados ou danos na amostra, pois nessa faixa de frequência, os carregamentos são mais nocivos por serem aplicados mais lentamente.

O aumento da taxa de frequência corresponde a uma redução de temperatura na qual espera-se um aumento de rigidez do ligante. A partir de 10^{-4} Hz em diante, observa-se uma mudança de comportamento, os valores de G^* do CAP 50/70 ultrapassam os da amostra modificada com 4% de óleo de copaíba, tornando-se, portanto, a amostra com maior índice de aumento de rigidez. Contudo, os valores da amostra modificada com 4% permanecem maiores que os da amostra modificada com 5%, apresentando, então, maior contribuição na melhoria da rigidez, podendo influenciar num melhor desempenho quanto à resistência à deformações.

Na Figuras 24 é ilustrada a curvas mestra de ângulo de fase para todas as amostras estudadas, empregando 25°C como temperatura de referência.

Figura 24 - Curvas mestras de módulo complexo em função da frequência.

Ao analisar a Figura 24, observa-se dois comportamentos distintos das amostras em relação à mudança da taxa de frequência. Entre 10^{-5} Hz e 10^{-2} Hz, com a redução da taxa de frequência e aumento da temperatura, o CAP 50/70 apresenta os maiores valores de ângulo de fase, permanecendo este com uma certa constância, enquanto as amostras modificadas com óleo de copaíba apresentam queda nos valores. Sabendo que, quanto menor o valor de δ , melhor a resposta elástica, nessa faixa de temperatura, a modificação com óleo de copaíba confere ao ligante melhora em sua elasticidade, com destaque para a amostra modificada com 4% que, nessa faixa de frequência, apresentou os menores valores.

Em torno de 10^{-2} Hz em diante, a região de maior frequência e menor temperatura, verifica-se que os valores de δ de todas as amostras tendem a se aproximar, portanto nota-se que a influência da adição de óleo de copaíba ao CAP 50/70 tende a ser mais expressiva quanto a melhora da elasticidade com o aumento da temperatura, podendo contribuir, assim, para a melhora da resistência a deformações permanentes.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados experimentais deste trabalho fornecem conhecimento do comportamento das misturas asfálticas produzidas com a incorporação do óleo de copaíba em relação aos ensaios das propriedades físicas do ligante asfáltico (Penetração e Ponto de Amolecimento) e dos ensaios das propriedades reológicas (Viscosidade Rotacional e Curva Mestra).

Em todos estes processos as análises das amostras envelhecidas fornecem subsídio para estudos mecânicos e reológicos mais próximos da realidade em campo, pois considera um fator que está inerente a todo e qualquer material exposto ao meio em que vivemos e que não há possibilidade de excluir do seu histórico natural.

Dessa forma, destacam-se as seguintes conclusões:

5.1 Considerações Finais

Diante dos resultados do ensaio de penetração, verifica-se que o óleo de copaíba, interfere no comportamento do CAP Puro, aumentando a penetração e conseqüentemente, diminuindo a dureza e ganho de trabalhabilidade. Entretanto, quando se considera a penetração retida, que trata da resistência ao envelhecimento da mistura, os ligantes modificados mostraram-se mais susceptíveis ao envelhecimento que o CAP Puro.

A adição de óleo de copaíba proporcionou uma redução na temperatura do ponto de amolecimento, redução essa que pode comprometer o comportamento das misturas quando empregadas em campo, tornando o CAP muito sensível às temperaturas ambiente. E as variações de ponto de amolecimento acima do ligante puro, o que indica uma sensibilidade ao envelhecimento nesse parâmetro.

Outro fator observado que agregou viabilidade à utilização do óleo foi a menor sensibilidade à variação de temperatura, que pôde ser confirmado pelo IST mais próximo a zero.

Em relação aos fatores normativos, as propriedades físicas, penetração e ponto de amolecimento, como já esperado, ficaram fora dos padrões, afinal não é especificado para ligantes modificados.

Pode-se observar que a adição do óleo obtve êxito em reduzir a viscosidade quando comparados com o CAP puro, o que implicou em redução das faixas de temperaturas de

utilização do ligante consideráveis, sendo de 8,4°C para usinagem e de 10,6°C para compactação. E ainda o índice de envelhecimento apresentou resultados menos suscetível ao envelhecimento em relação ao CAP 50/70, para este parâmetro.

Pela curva mestra, verifica-se que ocorre uma perda de resistência dos ligantes modificados em relação ao CAP puro, que pode ser vista por sua redução no módulo complexo que também pode ser justificado pela redução da viscosidade. Quanto ao ângulo de fase os resultados apontam um aumento da elasticidade em relação ao ligante puro, principalmente para o teor de 4%.

Os resultados demonstraram que a amostra com 4% de óleo copaíba possui o melhor desempenho reológico sem que haja uma redução brusca da resistência do ligante.

Finalmente, é necessário que os estudos físicos e reológicos possam ser complementados juntamente com características químicas e mecânicas da composição do óleo de copaíba, para assim poder realizar uma inferência completa acerca das propriedades do novo material, e verificar se este é uma forma viável de ser empregado.

5.2 Sugestões Para Pesquisas Futuras

- Caracterizar quimicamente através do ensaio de FTIR e SARA do ligante modificado por óleo de copaíba e tentativa de descrição detalhada da influência do mesmo quando incorporado ao ligante asfáltico;
- Analisar a possibilidade de utilização do ligante modificado por óleo de copaíba em misturas asfálticas.

REFERÊNCIAS

AIREY, G. **Rheological Properties of Styrene Butadiene Styrene Polymer Modified Road Bitumens**, Fuel, v. 82, p.1709-1719, 2003.

ASTM D2872, 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**, 2013.

AZEREDO, S. R. de. **Estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos usando a técnica de espalhamento coerente de raios x**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2011.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BATISTA, I. M. **Comportamento mecânico de dois solos típicos da região de viçosa-MG, para fins de utilização em camadas de pavimentos flexíveis**. Tese (Dissertação em Engenharia Civil), Universidade Federal de Viçosa. Viçosa-MG, 2001

BERNUCCI, L. B; MOTTA L. M. G. da; CERATTI J. A. P.; SOARES J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, 2008. 338 p., ISBN 85-85227-84-2.

CARVALHO, C. A. B. de. **Estudo da contribuição das deformações permanentes das camadas do solo na formação das trilhas-de-roda num pavimento flexível**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de São Paulo, escola de engenharia de São Carlos, São Carlos, 1997.

CRAVO, M. C. C. **Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico de ligantes asfálticos, mástique e matriz de agregados finos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT 005/2003 - TER: **Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia**. Rio de Janeiro-RJ, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE – DNIT – EM 095/2006. **Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação de material**, Rio de Janeiro-RJ, 2006.

DUARTE, É. V. de N. **Avaliação reológica de ligante asfáltico 50/70 modificado com polímero reativo e não-reativo associado ao ácido polifosfórico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB, 2018.

GONÇALVES, F. P. **O desempenho dos pavimentos flexíveis**. Novembro de 1999.

HUANG, S. C.; RUTH, B. E. **Laboratory aging methods for simulation of field aging of asphalts**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 8, n. 3, p. 147-152.

LIMA A.T, **Caracterização mecânica de misturas asfálticas recicladas a quente.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Ceará, 2003.

LUCENA, L. C. F. L.; SILVEIRA, I. V.; COSTA, D. B. **Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera Lam para uso em misturas mornas.** Revista Matéria, Brasil, v. 21, n. 01, p. 72-82, 2016.

LU, X., ISACSSON, U., EKBLAD, J. **Rheological Properties of SEBS, EVA and EBA Polymer Modified Bitumens.** *Materials and Structures*, V. 32, p. 131-139, 2009.

MARINHO FILHO, P. G. T. **Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio.** Dissertação (Mestre em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2017.

MELLO, M. S. **Avaliação das propriedades reológicas e mecânicas de ligantes e misturas asfálticas irradiadas.** Tese (Doutorado), COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

MINHOTO, M. J. da C. **Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos rodoviários flexíveis.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade do Minho - Escola de engenharia, 2005.

MORILHA JÚNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas.** 165 p., Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2004.

MOTHÉ, C.G.; Correia, D.Z.; Petri, H.M.; Mothé, M.G.; Carestiatto, T., Tradução e Adaptação do livro: **Reologia e Reometria: Fundamentos Teóricos e Práticos.** Gebhard Schramm, Thermo Electron/USA, Editora Art líber Ltda/ SP, 232p., 2006.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo. 299 f. 2010.

NASCIMENTO, T. C. B. **Efeito dos envelhecimentos termo-oxidativo e foto-oxidativo sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2015.

NEGRÃO, D. P. **Estudo de asfaltos modificados por polímeros do tipo RET para aplicações em pavimentos.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo-SP, 2006.

OLIVEIRA, A. H. **Avaliação do potencial anti oxidante do líquido da castanha de caju (lcc) para materiais asfálticos através de diferentes métodos de envelhecimento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2015.

OLIVEIRA, P. C. A. de. **Contribuição ao estudo da técnica de reciclagem profunda na recuperação de pavimentos flexíveis.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, faculdade de engenharia civil. Campinas – SP, 2003.

PIERI, F. A.; MUSSI, M. C.; MOREIRA, M. A. S. **Óleo de copaíba (Copaifera sp.): histórico, extração, aplicações industriais e propriedades medicinais.** Rev. Bras Plantas Med., Botucatu, v. 11, n. 4, p. 465-472, 2009.

PORTUGAL, A. C. X. **Avaliação reológica de cimentos asfálticos de petróleo modificados com óleo de soja e de milho.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Univerisade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB, 2016.

RIBEIRO, E.A. **O efeito da modificação de ligante asfáltico com o liquido da castanha de caju (LCC) na resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Ceará. Fortaleza-CE, 2011.

RÜHL, R. **Lower temperatures: The best for asphalt, bitumen, environment and health and safety.** In: EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, 4., 2014.

SANTOS, N. S. dos. **Propriedades reologicas do ligante asfaltico (CAP 50/70) modificado por adição de lignina.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB, 2017.

SILVA, G. G. **Estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB, 2016.

SILVA, J. P. S.; ARAÚJO, R. F. de. **Estudo do envelhecimento dos ligantes asfálticos a partir do modelo de arrhenius.** Universidade Federal de Goiás - UFG, Aparecida de Goiânia-GO, **Revista Desafios** – v. 03, n. 01, 2016.

SILVA, J. P. S. **Avaliação dos efeitos de produtos rejuvenescedores em misturas asfálticas.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade de Brasília. Brasília-DF, 2011.

SILVA, L.S., **Contribuição ao estudo do envelhecimento de ligantes asfálticos. Influência da adição de polímeros e comportamento frente à radiação UV.** Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2005.

SOUZA, L. J. S. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cimento asfáltico de petróleo modificado com óleo de mamona.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB, 2012.

TEIXEIRA, C., Agência CNT de Notícias 2017. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Imprensa/noticia/brasil-tem-metodo-antigo-para-dimensionar-o-pavimento>>. Acesso em: 30 maio 2018.

WHITEOAK, D, **The SHELL Bitumen Handbook.** 1 ed. reprinted - Inglaterra, SHELL, 1991.

YAMAGUCHI, M. H.; GARCIA, R. F. **Óleo de copaíba e suas propriedades medicinais: Revisão bibliográfica.** Universidade Estadual de Maringá, **Revista Saúde e Pesquisa**, v. 5, n. 1, p. 137-146, jan./abr. 2012

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