



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

**PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CIMENTO ASFÁLTICO DE
PETRÓLEO (CAP 50/70) MODIFICADO POR ADIÇÃO DE ÓLEO DE
COPAÍBA**

PAULO DE SOUSA SANTOS JÚNIOR

Orientadora: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

Co-orientador: Valter Ferreira de Sousa Neto

CAMPINA GRANDE – PB

JULHO/2018

**PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CIMENTO ASFÁLTICO DE
PETRÓLEO (CAP 50/70) MODIFICADO POR ADIÇÃO DE ÓLEO DE
COPAÍBA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPINA GRANDE – PB

JULHO/2018

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

PAULO DE SOUSA SANTOS JÚNIOR

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: Pavimentação

Orientadora: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça
Co-orientador: Valter Ferreira de Sousa Neto

CAMPINA GRANDE – PB

JULHO/2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

PAULO DE SOUSA SANTOS JÚNIOR

PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP 50/70) MODIFICADO POR ADIÇÃO DE ÓLEO DE COPAÍBA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 31/07/2018
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

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

Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz
Membro Externo
Faculdade Integrada de Patos

AGRADECIMENTOS

A Deus, minha espada e meu escudo, a luz que tanto me guiou em cada escolha de minha vida.

À minha mãe, Maria Vilene, o amor mais verdadeiro e incondicional que poderia existir nesse mundo.

À minha namorada, Micaella, um presente de Deus que me impulsiona a ser melhor dia após dia.

À minha orientadora, PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça, por ser tão gentil, paciente e prestativa durante a realização deste trabalho.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai, Paulo Malaquias dos Santos, meu maior exemplo de força, coragem e determinação e, acima de tudo, a minha mãe, Maria Vilene de Sousa, a mulher mais incrível, bondosa e iluminada que já conheci. Eu os amarei para todo sempre.

EPÍGRAFE

“No que diz respeito a todos os atos de iniciativa e criação, há uma verdade elementar – assim que a pessoa se engaja definitivamente, a providência também entra em ação.”

Johann Wolfgang Von Goethe

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da seção transversal do pavimento.	19
Figura 2 - Camadas de um pavimento asfáltico.	20
Figura 3 - Representação das quatro frações betuminosas dos ligantes asfálticos: saturados, asfaltemos, aromáticos e resinas.	22
Figura 4 - Representação gráfica do fenômeno de envelhecimento dos ligantes asfálticos.	25
Figura 5 - Trincas em pavimentos asfálticos.	28
Figura 6 - Buracos no revestimento asfáltico.	29
Figura 7 - Desagregação no revestimento.	30
Figura 8 - Extração racional do óleo de copaíba.	34
Figura 9 - Tipos de óleo extraídos da árvore de copaíba.	35
Figura 10 - Estufa de Filme Fino Rotativo.	38
Figura 11 - Reômetro DHR-1.	41
Figura 12: Ensaio de Performance Grade (PG).	42
Figura 13: Temperaturas máximas de utilização do ligante asfáltico antes e após o processo de envelhecimento a curto prazo (RTFO).	43
Figura 14: Módulo Complexo (G^*) x Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos ligantes em estudo antes do envelhecimento a curto prazo-RTFO.	44
Figura 15: Módulo Complexo (G^*) x Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos ligantes em estudo após envelhecimento a curto prazo-RTFO.	44
Figura 16: Variação do parâmetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ x Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos ligantes em estudo antes do RTFO.	45
Figura 17: Variação do parâmetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ x Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos ligantes em estudo após RTFO.	46
Figura 18: Parâmetros A e B para os ligantes em estudo.	47
Figura 19: Estimativa de vida da fadiga do ligante asfáltico em estudo.	49
Figura 20: Compliâncias não recuperáveis para o CAP 50/70 e teores de óleo de copaíba.	50

Figura 21: Porcentagem de recuperação elástica para o CAP 50/70 e adições de óleo de copaíba. 51

Figura 22: Jnr diff para amostras de CAP 50/70 e adições de óleo de copaíba. 52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Defeitos dos pavimentos asfálticos	27
Quadro 2: Agentes modificadores dos ligantes asfálticos	32

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FHWA	Federal Highway Administration
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
LAOS	<i>Large Amplitude Oscillatory Shear</i>
MSCR	Multiple Stress Creep and Recovery
NCHRP	National Cooperative Highway Research Program
NBR	Norma Brasileira
PG	Performance Grade (Grau de Desempenho)
RCRT	<i>Repeated Creep and Recovery</i>
RTFO	Rolling Thin Film Oven
SAOS	<i>Small Amplitude Oscillatory Shear</i>
SARA	Saturados, Aromáticos, Resinas e Asfaltenos
SBR	Borracha de Estireno-Butadieno
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
VECD	Viscoelastic Continuum Damage

RESUMO

O cimento asfáltico de petróleo é um material termossensível destinado ao ramo da pavimentação uma vez que, além de expor características impermeabilizantes e aglutinantes, apresenta grande resistência à ação da maioria dos sais, álcalis e ácidos inorgânicos, e aspecto de flexibilidade. O CAP pode ter seu comportamento determinado baseando-se nas condições as quais está submetido, apresentando-se como um sólido vítreo em baixas temperaturas e/ou diante de um carregamento rápido, ou agindo como um fluido viscoso em altas temperaturas e/ou carregamento lento. Comumente, são adicionados aditivos a este material, buscando a melhoria de suas propriedades, bem como, a redução das temperaturas de usinagem e compactação. Assim, este estudo tem como objetivo principal avaliar o comportamento reológico do ligante asfáltico CAP 50/70 modificado por adição de óleo de copaíba. Foram realizados ensaios de caracterização física e reológica, destacando-se: *Multiple Stress Creep Recovery* - MSCR, *Linear Amplitude Sweep* - LAS e *Performance Grade* - PG para o CAP 50/70 com adição de óleo de copaíba nos teores de 1%, 2% e 3% antes e após envelhecimento a curto prazo-RTFO. Observou-se que a adição do óleo de copaíba promoveu melhorias de algumas das propriedades reológicas do ligante, no entanto, não apresentou-se benéfico para todos os parâmetros analisados.

Palavras-chave: Ligante asfáltico; Óleo de copaíba; Reologia.

ABSTRACT

Asphaltic petroleum cement is a thermosensitive material destined to the paving industry since, in addition to exposing waterproofing and binder characteristics, it presents great resistance to the action of most salts, alkalis and inorganic acids, and flexibility aspect. CAP may have its behavior determined on the basis of the conditions under which it is present, presenting as a glassy solid at low temperatures and / or under rapid loading, or acting as a viscous fluid at high temperatures and / or loading slow. Commonly, additives are added to this material, seeking to improve its properties, as well as reducing machining and compacting temperatures. Thus, this study has as main objective to evaluate the rheological behavior of modified asphalt binder CAP 50/70 by addition of copaiba oil. Physical and rheological characterization tests will be carried out, including: *Multiple Stress Creep Recovery* - MSCR, *Linear Amplitude Sweep* - LAS e Performance Grade - PG for CAP 50/70 with addition of copaiba oil at 1%, 2% and 3% before and after short-term aging-RTFO. It was observed that the addition of the copaiba oil promoted improvements of some of the rheological properties of the binder, however, it was not beneficial for all parameters analyzed.

Keywords: Asphalt binder; Copaiba Oil; Rheology.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.	14
1.1 JUSTIFICATIVA.	16
1.2 HIPÓTESE DA PESQUISA.	16
1.3 OBJETIVOS.	16
1.3.1 Objetivo Geral.	16
1.3.2 Objetivos Específicos.	16
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.	18
2.1 PAVIMENTOS ASFÁLTICOS.	18
2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS.	20
2.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS.	21
2.4 REOLOGIA E ENVELHECIMENTO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS.	23
2.5 DEFEITOS DOS PAVIMENTOS.	25
2.6 LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS.	30
2.7 ÓLEO DE COPAÍBA: ORIGEM, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES.	33
2.7.1 Origem e Espécies.	33
2.7.2 Extração.	33
2.7.3 Propriedades e Aplicações.	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS.	38
3.1 Materiais.	38
3.2 Métodos.	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.	42
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.	53
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.	53
5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.	55
REFERÊNCIAS.	56

1 INTRODUÇÃO

A dificuldade de locomoção por estradas em estado natural e a necessidade de se transportar mercadorias com maior rapidez e comodidade implicou no desenvolvimento e aprimoramento das atividades de pavimentação como meio de promover melhorias operacionais significativas para o tráfego, tornando as superfícies mais regulares e possibilitando viagens mais seguras e confortáveis. As múltiplas camadas do pavimento, ou seja, revestimento, base, sub-base, subleito e reforço de subleito, devem suportar adequadamente os esforços oriundos de cargas e ações climáticas sem sofrer processos de degradação e desgaste prematuros (ZATARIN et al., 2017). Nesse contexto, torna-se indispensável os estudos em torno de misturas asfálticas mais eficazes e economicamente interessantes que permitam construção de estradas mais duráveis, resistentes e que se mantenham em estado transitável por maiores períodos de tempo (MOTHÉ, 2009).

A demanda mundial por petróleo e as preocupações ecológicas com a utilização de matérias primas não renováveis impulsionam a busca por fontes alternativas para a confecção de pavimentos, entretanto a maior parte destes, em nível global, ainda são provenientes de misturas asfálticas usinadas a quente, assim chamadas porque requerem temperaturas entre 140 °C e 180 °C para que o CAP atinja um nível de viscosidade ideal para agregar os demais componentes da mistura. Esse processo, invariavelmente libera substâncias nocivas ao ecossistema como metano, dióxido de enxofre, monóxido de carbono e dióxido de nitrogênio, genericamente chamadas de fumos de asfalto ou vapores de asfalto, além de demandar vultuosos gastos energéticos, logo, encontrar novos compostos tecnicamente viáveis que possibilitem a redução das temperaturas de usinagem, aplicação e compactação do asfalto implicará na obtenção de pavimentos com maior desempenho, bem como em ganhos econômicos e socioambientais inegáveis (PORTUGAL,2016).

Já é um fato conhecido que modificação de asfaltos por meio de aditivos, com destaque para agentes à base de polímeros, permite a confecção de pavimentos com desempenhos consistentes, capazes de resistir até mesmo a condições severas de utilização como tráfego intenso ou alta concentração de

veículos à baixa velocidade. Estas misturas asfálticas modificadas, em geral, apresentam susceptibilidade térmica reduzida e maior flexibilidade, tornando-se então menos susceptíveis aos processos comuns de deterioração: deformação permanente, formação de trincas por fadiga e por variação térmica. A deformação permanente que ocorre no asfalto é um tipo de deformação plástica que se dá mediante aplicação de cargas cíclicas e costuma se acentuar sob temperaturas elevadas, situação muito comum nas rodovias brasileiras. As fissuras por fadiga são um processo de deterioração estrutural derivado de solicitações repetidas, tensões e extensões frequentes durante a passagem das cargas de tráfego. As fissuras térmicas costumam surgir perpendicularmente à direção do tráfego por ocorrência de temperaturas muito baixas, também denominadas de temperaturas críticas, ou através de desgastes acumulados por ciclos contínuos de temperaturas menos agressivas que a crítica (FERNANDES, 2009).

Vários estudos sobre a incorporação de produtos de origem natural aos ligantes asfálticos demonstram sua capacidade de melhorar as propriedades físicas, mecânicas e reológicas dos cimentos asfálticos de petróleo. Aditivos como óleos vegetais de mamona, linhaça, algodão, dendê, soja, milho, moringa, fibras de biomassa, lodos, asfalto natural, enxofre e lignina já foram testados com relativo sucesso em estender à vida útil dos compostos de petróleo, tornando-os mais resistentes ou mesmo por representarem uma forma economicamente viável de reutilizar subprodutos industriais, atentando para a necessidade de desenvolvimento sustentável e preservação ambiental.

O óleo de copaíba enquadra-se nesse conceito de “aditivo verde” por representar uma fonte rica e renovável de hidrocarbonetos com diversas aplicações já muito exploradas pela indústria de fármacos e cosméticos podendo ser utilizado até mesmo como matéria prima para a produção de combustível quando misturado na proporção de 1:9 com o óleo diesel (PIERI et al., 2009). Espera-se, portanto, que o óleo em estudo se torne um agente modificador eficaz no aprimoramento das propriedades reológicas dos ligantes asfálticos.

1.1 JUSTIFICATIVA

A utilização de ligantes asfálticos modificados deve resultar em ganhos técnicos e socioambientais expressivos com a redução dos custos para a execução e manutenção dos pavimentos, diminuição dos gastos energéticos para o processamento das misturas asfálticas e mitigação dos impactos negativos sobre o meio ambiente provenientes do descarte inadequado de subprodutos industriais.

Dessa forma, óleo de copaíba deverá representar uma fonte alternativa e renovável para a produção de cimentos asfálticos de petróleo com desempenho superior e ainda assim reduzir os custos a médio e longo prazo para a produção e manutenção dos pavimentos, além de consubstanciar os inúmeros estudos desenvolvidos em torno de matérias primas que se enquadrem melhor nas exigências atuais de desenvolvimento sustentável.

1.2 HIPÓTESE DA PESQUISA

Parte-se da seguinte hipótese: *“O óleo de copaíba pode ser utilizado como um componente melhorador das propriedades do CAP”*. Como consequência da aceitação desta hipótese, tem-se uma alternativa a possibilidade de redução de custos e das temperaturas de compactação e usinagem.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo principal avaliar o comportamento reológico do CAP 50/70 modificado por adição de óleo de copaíba.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar as propriedades reológicas do cimento asfáltico convencional CAP 50/70 com adição de 1, 2 e 3% de óleo de copaíba antes do envelhecimento a curto prazo-RTFO;

- Determinar as propriedades reológicas do ligante asfáltico convencional CAP 50/70 com adição de 1, 2 e 3% de óleo de copaíba após do envelhecimento a curto prazo-RTFO.

1.4 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, Hipótese da pesquisa, Objetivos da Pesquisa e Organização do Projeto.

Fundamentação Teórica – São abordados assuntos relacionados ao cimento asfáltico de petróleo, características físicas, reológicas, óleo de copaíba, origem, caracterização e aplicações.

Materiais e Métodos – São apresentados os materiais utilizados na pesquisa e relatados aspectos considerados importantes sobre os procedimentos da etapa experimental

Resultados e Discussões –São apresentados os resultados obtidos para o ligante puro e com adição de 1,2,3% de óleo de copaíba;

Considerações Finais e sugestões para pesquisas futuras

Por fim, estão as Referências, onde serão listadas as pesquisas citadas neste estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Mothé (2009) cita a definição do Asphalt Institute, dos EUA, onde diz que os cimentos asfálticos de petróleo são os cimentos asfálticos com ou sem a adição de agentes modificadores, os quais não devem ser maiores que 250 μm . Estes ligantes podem ser asfalto natural, asfalto de petróleo alcatrão. Os CAP's podem ser divididos em basicamente dois tipos: os destinados a pavimentação e os destinados a indústria. No que se refere aos destinados à pavimentação, objeto do presente estudo, podem ser: cimento asfáltico, cimento asfáltico diluído, emulsão asfáltica ou cimento asfáltico modificado.

Os ligantes asfálticos de petróleo são amplamente utilizados na área da construção civil em atividades de impermeabilização, proteção contra corrosão e pavimentação com a função de proteger as superfícies contra os danos gerados pela penetração da água e de manter os componentes da mistura asfáltica fortemente unidos. Os ligantes afetam significativamente o desempenho e durabilidade do pavimento no qual são empregados, e o seu aprimoramento visa retardar o envelhecimento do mesmo, mitigar o surgimento de trincas, fissuras e deformações permanentes (FERNANDES, 2009).

2.1 PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

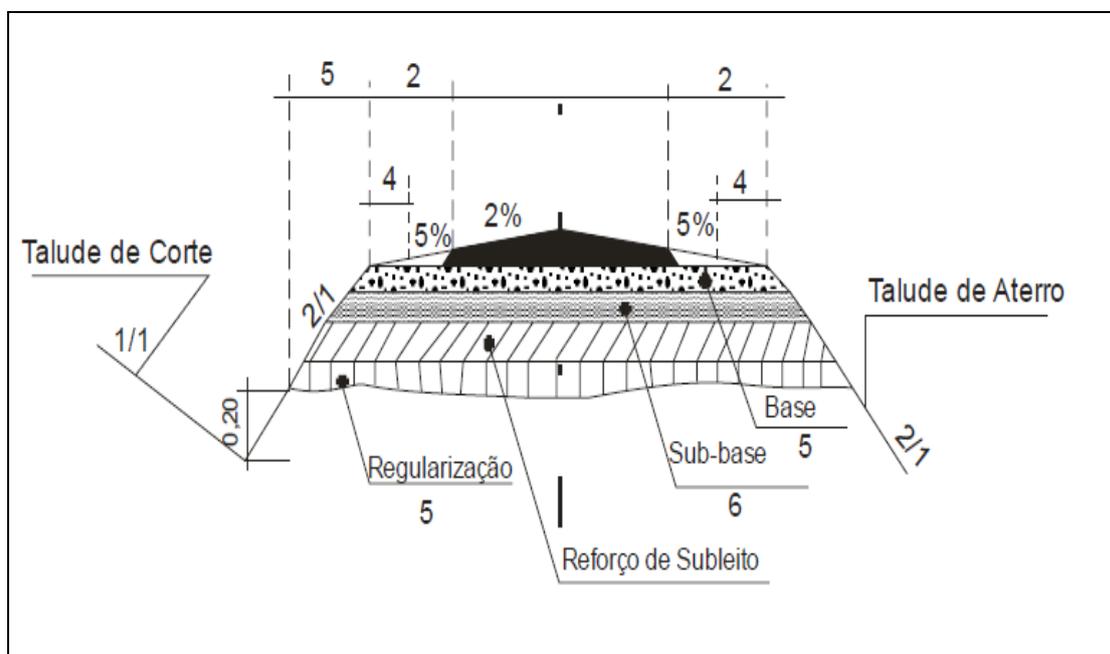
Pavimento é a estrutura de resistência variável responsável por resistir aos esforços verticais e horizontais, ditos solicitações, provocados, essencialmente, pela locomoção de pessoas e veículos sobre o mesmo e por sua interação com a superfície do solo para o qual transmite as tensões. De acordo com o manual do DNIT (2006), o pavimento rodoviário é uma superestrutura formada por várias camadas finitas assentes sobre o subleito (infraestrutura ou terreno de fundação), podendo ser divididos em três categorias:

- Rígidos: Assim chamados por sua elevada rigidez em relação às camadas inferiores e à capacidade de absorver praticamente todas as tensões que incidem sobre ele. Geralmente são executados com cimento Portland;

- Semirrígidos: Têm como principal característica uma base cimentada por algum aglutinante que confere a rigidez intermediária própria desse tipo de pavimento;
- Flexíveis: Pavimentos nos quais todas as camadas sofrem deformações significativas mediante aplicação de cargas.

Na Figura 1 está apresentada a estrutura básica da seção transversal de um pavimento.

Figura 1 - Esquema da seção transversal do pavimento



Fonte: Manual de pavimentação do DNIT (2006)

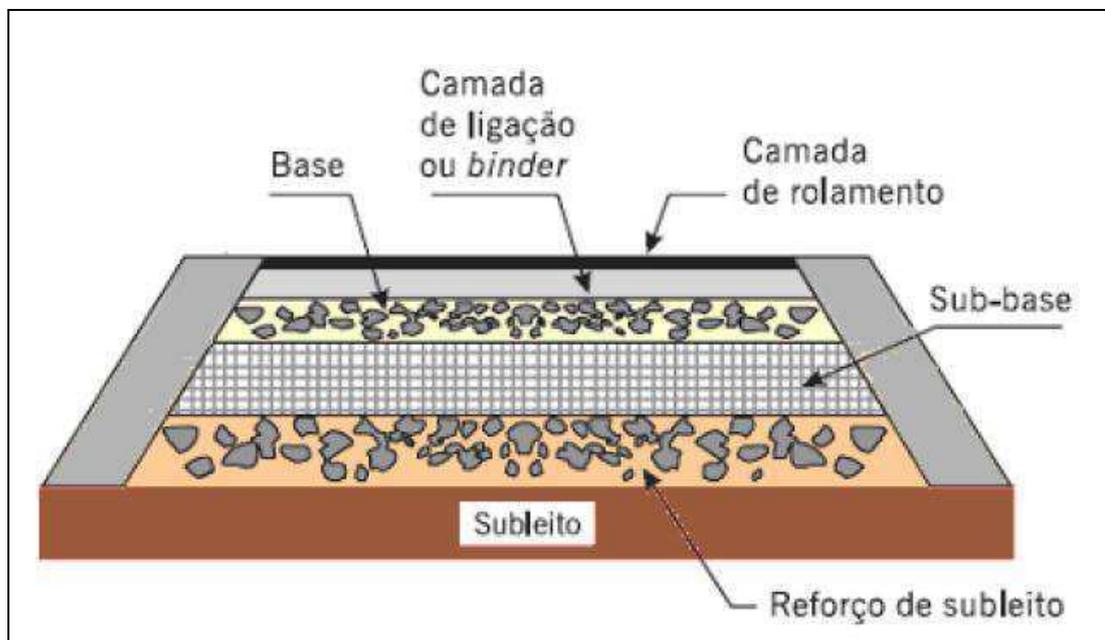
Conforme Lucena (2005), asfalto é um material cimentante, azul escuro ou negro, cujo principal componente é o betume, definido como uma mistura de hidrocarbonetos, geralmente associados a derivados não metálicos, solúvel em bissulfeto de carbono. Por sua vez, o cimento asfáltico de petróleo (CAP) é o asfalto refinado para atender aos requisitos da pavimentação, aplicação industrial e finalidades especiais, representando de 5 a 6 %, em peso, das misturas asfálticas, sua função primordial é agir como aglomerante para os demais componentes da mistura, essencialmente agregados minerais.

2.2 MISTURAS ASFÁLTICAS

Misturas asfálticas são uma combinação de materiais minerais como brita, pó-de-pedra, areia; e ligante asfáltico (cimento asfáltico), emulsão asfáltica ou asfalto diluído. Sendo o ligante asfáltico grande influente no comportamento da mistura, mesmo que sua porcentagem não seja superior ao 8% p/p do total da mistura (MOTHÉ, 2009).

As misturas asfálticas devem ser projetadas para resistir ao fadigamento e ao fendilhamento por variação térmica, ter adesividade e textura superficial adequadas, bons níveis de trabalhabilidade, durabilidade, resistência e impermeabilidade, além de possibilitar a constituição de pavimentos economicamente viáveis, de fácil manutenção e que não produzam ruídos excessivos. Estas estarão presentes sob a forma de diversas camadas, conforme ilustra a Figura 2 (LUCENA, 2009).

Figura 2 - Camadas de um pavimento asfáltico



Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2006)

Para Lucena (2009), as principais camadas das misturas asfálticas são denominadas e caracterizadas da seguinte forma:

- Camada de rolamento ou capa asfáltica: Camada superior do pavimento que recebe diretamente os esforços provenientes do tráfego. Nessa camada, a mistura deve apresentar estabilidade e flexibilidade compatíveis com o funcionamento elástico da estrutura, além de rugosidade e aderência adequadas às condições de segurança.
- Camada de ligação: alocada logo abaixo da camada de rolamento. A formulação dessa camada emprega agregados de maior diâmetro máximo e maior percentual de vazios.
- Camada de nivelamento ou regularização: Responsável por corrigir deformações e selar fissuras existentes no antigo pavimento, para tal é formulada através de massa asfáltica com graduação fina.

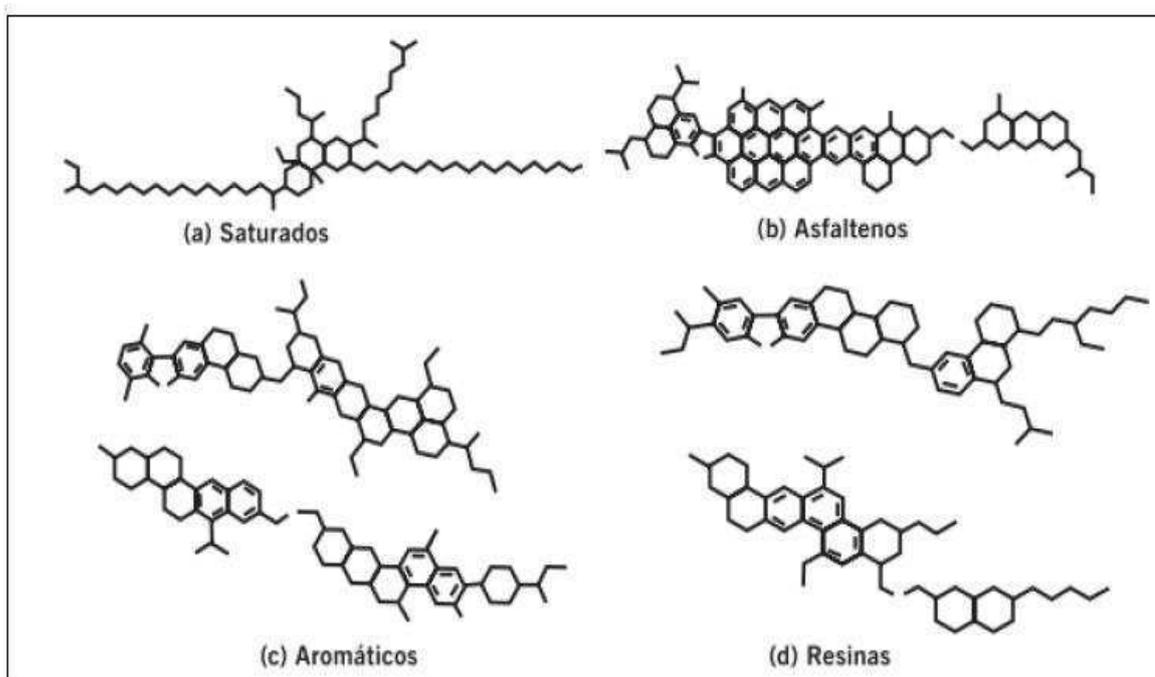
O desempenho dos pavimentos depende, dentre outros fatores, das propriedades físicas e mecânicas das suas camadas. A camada de revestimento possui custo elevado e, devido a isto, os fatores que possam interferir no desempenho desta camada devem ter controle rigoroso, como a características dos seus materiais, dosagem, condições de compactação, processo construtivo e plano de manutenção (Lucena, 2009).

2.3 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

A caracterização química do ligante asfáltico é realizada, em geral, através do método SARA, que utiliza a cromatografia de camada fina com detecção por ionização de chama para separar os constituintes em saturados, aromáticos, resinas e asfaltemos, conforme ilustra a Figura 3. Nesse processo, o cimento asfáltico é diluído em n-heptano para que um filtro capte a parte solúvel (aromáticos, saturados e resinas), genericamente denominada de maltenos, enquanto a parte insolúvel (asfaltemos) sofre precipitação (FILHO, 2017). A proporção entre maltenos e asfaltemos na constituição dos ligantes é o principal responsável pelas características químicas, físicas e reológicas do asfalto (FERNANDES, 2009).

De acordo com Bernucci et al. (2006), a quantidade de asfaltemos interfere diretamente na rigidez, viscosidade e coloração (preta ou marrom escuro) do ligante asfáltico, estando presente na proporção de 5% a 25 % da mistura; as resinas estão presentes em estado sólido ou semissólido e são determinantes para o comportamento do ligante enquanto solução (sol) ou gelatina (gel), constituem-se de hidrocarbonetos associados à átomos de enxofre, oxigênio e nitrogênio; os aromáticos representam a maior parcela do ligante, entre 40% e 65%, são considerados o meio de poptização e polarização dos asfaltemos; os saturados são fisicamente representados por óleos viscosos não polares transparentes, constituem-se de cadeias retas e ramificadas de hidrocarbonetos cuja fração no ligante está entre 5 a 20 %.

Figura 3 - Representação das quatro frações betuminosas dos ligantes asfálticos: saturados, asfaltemos, aromáticos e resinas



Fonte: Filho (2017)

Os ligantes asfálticos formam então, em termos de composição química, um sistema coloidal em que parafinas, cicloparafinas e estruturas aromáticas constituem o solvente em que estão suspensos um conjunto de micelas de asfaltemos (FAXINA, 2006 apud MOTHÈ 2009). O processo de caracterização permite a análise e quantificação desses componentes para que se compreenda a forma específica com

que interferem nas propriedades reológicas do CAP. Segundo Leite (1999 apud MOTHE, 2009), esses componentes têm as seguintes propriedades:

- Aromáticos: Melhoram as propriedades físicas do CAP, agindo como plastificante;
- Saturados: Afetam negativamente a suscetibilidade térmica do CAP e em grandes concentrações causam seu amolecimento;
- Resinas: Podem aprimorar a ductilidade e a capacidade de dispersão dos asfaltenos, no entanto contribuem negativamente para suscetibilidade térmica do cimento asfáltico;
- Asfaltenos: Têm influência positiva sobre a suscetibilidade térmica e elevam a viscosidade dos cimentos asfálticos.

2.4 REOLOGIA E ENVELHECIMENTO DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

O termo reologia (do grego, rheos, que significa fluxo e loggia, estudo) designa a ciência que estuda o comportamento do fluxo de um corpo ou as deformações sofridas pelo mesmo mediante a aplicação de forças ou surgimento de tensões. De acordo com Correia (2006) são várias as razões que justificam o estudo das propriedades reológicas de um material, a saber: avaliar a forma e o tamanho molecular das substâncias em solução para aferir sua interferência na viscosidade do material; controlar a qualidade dos produtos através de parâmetros mais precisos do que os fornecidos por métodos empíricos de análise; projetar equipamentos mais adequados às necessidades de mercado e melhorar o controle dos processos produtivos na medida em que se amplia os conhecimentos sobre a estrutura das matérias primas e dos produtos empregados.

No que diz respeito aos ligantes asfálticos, o estudo das suas propriedades reológicas permite diferenciá-los de acordo com o tipo de petróleo e o método de refino empregado, além de possibilitar a determinação de temperaturas mais adequadas aos processos de usinagem e construção das camadas asfáltica. Verifica-se que as propriedades como rigidez, elasticidade, fluência, viscosidade e taxa de relaxação dos ligantes podem ser relacionadas ao surgimento de danos ou deteriorações na superfície dos pavimentos asfálticos, logo o estudo dessas

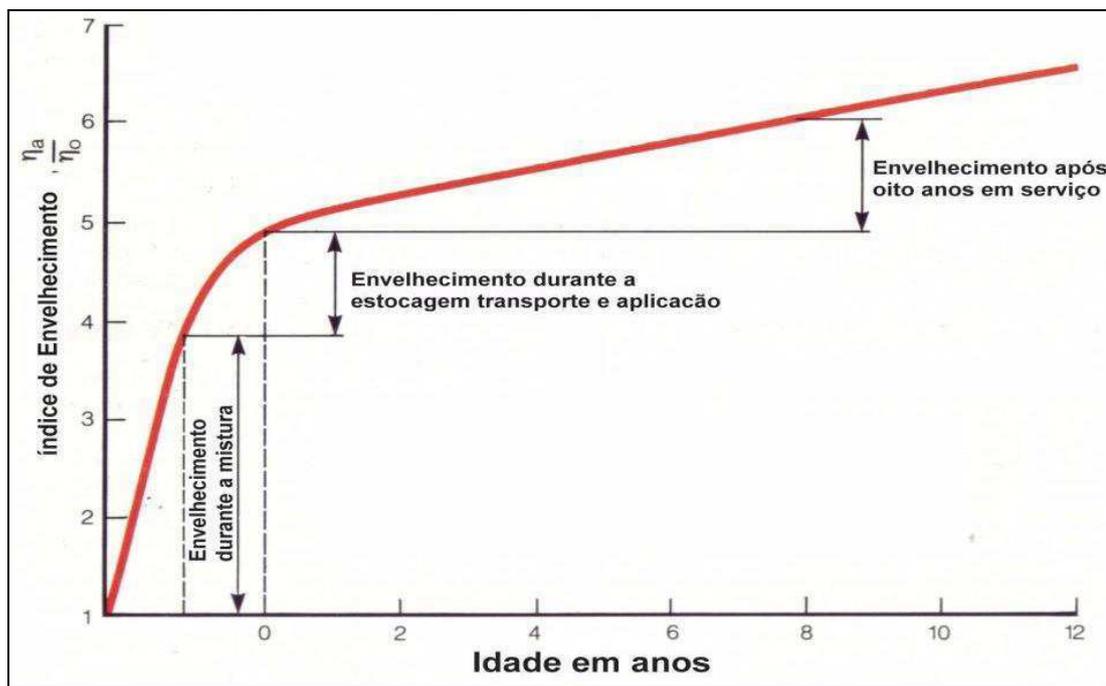
propriedades tem grandes implicações econômicas e socioambientais (MOTHÉ, 2009).

As características reológicas, físicas e mecânicas dos ligantes asfálticos se alteram substancialmente à medida que seus compostos envelhecem e são submetidos a processos oxidativos (CAVALCANTE, 2016). Nesse trabalho, utiliza-se o método *Rolling Thin Film Oven (RTFO)*, que simula o envelhecimento em estufa, para quantificar esse processo, simulando a perda de massa do ligante através do envelhecimento a curto prazo numa estufa com altas temperaturas e presença de ar, condições semelhantes a que se estabelecem no processo de usinagem (SANTOS, 2017).

De acordo com Silva (2011), citados por Silva & Araújo (2016), o processo de envelhecimento dos ligantes asfálticos se inicia ainda na fase de usinagem (cerca de 60% do envelhecimento total) durante a mistura com os agregados minerais mediante aplicação de temperaturas elevadas, esta fase é, então, responsável pela maior parcela de deterioração das propriedades do ligante. Este continua a se desgastar durante as fases de estocagem, espalhamento e compactação, que também requerem temperaturas altas para o manejo e aplicação do material, essas atividades configuram 20% do envelhecimento total quando analisadas em conjunto. O Restante (20% do total) decorre da aplicação de cargas e por meio das intempéries a que se submetem os pavimentos nas condições normais de tráfego.

As reações de oxidação são determinantes para o comprometimento das propriedades físicas e reológicas do ligante. Estas reações ocorrem mesmo nas fases de espalhamento e compactação do material asfáltico, mas, principalmente, durante a fase de usinagem quando o ligante é exposto ao oxigênio do ar sob a forma de película fina, com elevada superfície de contato, não obstante isso, aplicam-se ainda temperaturas altíssimas para unir fortemente os agregados minerais. Esse processo interfere negativamente nas propriedades físicas do ligante elevando sua consistência, viscosidade e ponto de amolecimento e reduzindo sua resistência à penetração. Quando em mistura, o ligante asfáltico envelhecido torna o pavimento mais duro e suscetível ao surgimento de trincas e deformações, conforme ilustrado na Figura 4 (SILVA, 2011 apud SILVA & ARAÚJO, 2016).

Figura 4 - Representação gráfica do fenômeno de envelhecimento dos ligantes asfálticos



Fonte: Adaptado de Whiteoak (1990)

2.5 DEFEITOS DOS PAVIMENTOS

Os pavimentos flexíveis devem ter condições que proporcionem aos usuários conforto, segurança e economia ao transitar. Quando há falhas de projeto ou construção, são vistas condições precárias dos pavimentos. A norma DNIT 005 (2003) lista os principais defeitos que ocorrem nos pavimentos flexíveis brasileiros, sendo eles: fissuras, afundamentos, ondulações, escorregamento de massa, exsudação, desgaste e buracos. (FILHO, 2017)

O DNIT (2003) definiu os defeitos de superfície em pavimentos como deteriorações na superfície dos pavimentos asfálticos que podem ser observados a olho nu. Identificar os defeitos é importante para que se tome as medidas corretas para resolução dos problemas.

Para Lucena (2009), os defeitos dos pavimentos podem ocorrer devido à composição inadequada das misturas que os compõem, pela relação inadequada entre as camadas ou pela falta de resistência das camadas que os constituem. Oda (1995) apud Lucena (2009) mostra que os defeitos causam irregularidades,

provocam desconforto e podem levar a riscos à segurança do usuário, além de influir na velocidade e custos operacionais dos veículos.

Para Filho (2017), dentre as deformações dos pavimentos, as fissuras podem ter relação com a estrutura da mistura, podendo piorar com a fadiga, ou ter influência externa das condições das camadas do pavimento. A exsudação é o excesso de ligante na mistura asfáltica, que não é absorvida pelos agregados, visível na superfície do pavimento. O desgaste tem relação com a abertura da granulometria da mistura, que sofre esforços tangenciais com a passagem dos veículos arrancando seus agregados. Os buracos podem ser consequência dos problemas anteriores, que deixam as camadas do pavimento frágeis, decompondo-se aos poucos.

Conforme a norma DNIT 005/2003, os defeitos dos pavimentos são as fendas, afundamentos, corrugação, exsudação, desgaste, buracos e remendos, conforme o Quadro 1, anexo A da referida norma.

Os mecanismos ocasionados pelas falhas de adesão e coesão poderão acelerar os seguintes tipos de defeitos: trincas, buraco e desgastes. (LUCENA, 2009).

Quadro 1: Defeitos dos pavimentos asfálticos

Fendas				Codificação	Classe de Fendas		
Fissuras				FI	-	-	-
Trincas no revestimento geradas por deformação permanente excessiva e/ou decorrentes do fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Transversais	Curtas	TTC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TTL	FC-1	FC-2	FC-3
		Longitudinais	Curtas	TLC	FC-1	FC-2	FC-3
			Longas	TLL	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas Interligadas	"Jacaré"	Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	J	-	FC-2	-
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	JE	-	-	FC-3
Trincas no revestimento não atribuídas ao fenômeno de fadiga	Trincas Isoladas	Devido à retração térmica ou dissecação da base (solo-cimento) ou do revestimento		TRR	FC-1	FC-2	FC-3
	Trincas Interligadas	"Bloco"	Sem erosão acentuada nas bordas das trincas	TB	-	FC-2	-
			Com erosão acentuada nas bordas das trincas	TBE	-	-	FC-3

Outros Defeitos				Codificação
Afundamento	Plástico	Local	Devido à fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito	ALP
		da Trilha	Devido à fluência plástica de uma ou mais camadas do pavimento ou do subleito	ATP
	De Consolidação	Local	Devido à consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito	ALC
		da Trilha	Devido à consolidação diferencial ocorrente em camadas do pavimento ou do subleito	ATC
Ondulação/Corrugação - Ondulações transversais causadas por instabilidade da mistura betuminosa constituinte do revestimento ou da base				O
Escorregamento (do revestimento betuminoso)				E
Exsudação do ligante betuminoso no revestimento				EX
Desgaste acentuado na superfície do revestimento				D
"Painéis" ou buracos decorrentes da desagregação do revestimento e às vezes de camadas inferiores				P
Remendos			Remendo Superficial	RS
			Remendo Profundo	RP

NOTA 1: Classe das trincas isoladas

- FC-1: são trincas com abertura superior à das fissuras e menores que 1,0mm.
- FC-2: são trincas com abertura superior a 1,0mm e sem erosão nas bordas.
- FC-3: são trincas com abertura superior a 1,0mm e com erosão nas bordas.

NOTA 2: Classe das trincas interligadas

As trincas interligadas são classificadas como FC-3 e FC-2 caso apresentem ou não erosão nas bordas.

Lucena (2009) classifica os defeitos dos pavimentos em fendas, buracos e desagregações, conforme explicitado a seguir:

- **Fendas:** Este defeito engloba as fissuras e trincas. Facilita a penetração de águas, fazendo com que diminua a capacidade de suporte do pavimento e provocando desconforto e redução da segurança. São chamadas de fissuras quando a abertura é perceptível a olho nu a uma distância de 1,5m, e são classificadas como trincas quando sua abertura é superior a fissuras (Figura 5). Essas trincas são as principais responsáveis pela diminuição da vida útil dos pavimentos, reduzindo a impermeabilidade da superfície, causando perda da capacidade de suporte do solo e aumentando progressiva degradação do revestimento próximo às trincas.

Figura 5: Trincas em pavimentos asfálticos



Fonte: Lucena (2009)

- **Panela ou Buraco:** São cavidades de tamanhos variados, resultantes de uma desintegração localizada próximos a defeitos como trincas, fissuras, deformações ou perda de agregado, podendo ou não atingir camadas subjacentes. Elas estão associadas a uma drenagem deficiente, e

evoluem, sob a ação do tráfego e em presença de água. A Figura 6 apresenta um exemplo deste defeito.

Figura 6: Buracos no revestimento asfáltico



Fonte: Lucena (2009)

- **Desagregação:** A desagregação é a corrosão do revestimento do pavimento, caracterizada pelo desalojamento progressivo de partículas do agregado. As partículas do material ficam soltas e atuam como material granular resultando em depressões que podem acumular água. Geralmente é associado à presença da umidade, ao processo de envelhecimento ou ao baixo teor de cimento asfáltico presente na mistura (Figura 7).

Figura 7 - Desagregação no revestimento



Fonte: Lucena (2009)

Souza (2012) ressalta que para evitar a ocorrência prematura desses defeitos é preciso realizar estudos de critérios de dosagem e introduzir no mercado vários tipos de aditivos para cimentos asfálticos e misturas asfálticas. Avançar nos estudos de impactos ambientais em busca da sustentabilidade e introduzir inovações em busca do desenvolvimento de tecnologias para obtenção de maior eficiência energética e segurança para os usuários dos pavimentos asfálticos, tem contribuído para introdução de novos produtos e processos, que inclusive permitam diminuir a temperatura de usinagem e de compactação.

2.6 LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS

A confecção de misturas asfálticas com desempenho superior implica na seleção rigorosa da matéria prima a ser empregada, no entanto, limitar as fontes de suprimento utilizando apenas um conjunto específico de óleos brutos é pouco atrativo em termos técnicos e econômicos, para tal, é preferível a modificação dos materiais presentes na mistura, ou seja, os agentes modificadores são a melhor

opção no aprimoramento das propriedades térmicas, reológicas e mecânicas do pavimento, que passa a ter desempenhos bem mais consistentes sem que os custos de produção se tornem exorbitantes ou que sejam necessárias técnicas produtivas demasiadamente complexas (SOUZA, 2012).

Os agentes modificadores podem ser classificados em três categorias distintas, a saber: agentes poliméricos, agentes de rejuvenescimento e agentes derivados de produtos naturais. Os primeiros são agentes químicos que alteram a estrutura química dos CAPs, além de modificar suas propriedades físicas e mecânicas; os agentes de rejuvenescimento atuam reduzindo a viscosidade e repondo os compostos aromáticos do cimento envelhecido; os produtos naturais ainda são pouco empregados no Brasil, principalmente em decorrência dos resultados satisfatórios obtidos com a adição de polímeros, os mais comuns são à base de fibras de biomassa, asfalto natural, lodos e enxofre de cimento asfáltico de petróleo (SOUZA, 2012).

No Brasil, a modificação de asfaltos convencionais por meio de aditivos especiais vem sendo realizada desde 1995, principalmente pela adição de borracha de pneus e polímeros como o elastômero de copolímero (estireno-b-butadieno) (SBS), o elastômero de copolímero (butadieno-b-acrilonitrila - SBR) e o poli (etileno-co-acetato-de vinila), melhorando as propriedades do ligante que afetam o desempenho mecânico das misturas asfálticas e possibilitando a construção de estradas mais seguras e com menor custo de execução e manutenção. O emprego desses aditivos tem como objetivo a produção de asfaltos com maior recuperação elástica, pontos de amolecimento mais elevados, maior viscosidade, grande força coesiva e ductilidade superior (LIMA, 2008).

Há uma grande variedade de agentes modificadores (Quadro 2), entre os quais destacam-se os fíleres, extensores, polímeros elastômeros e polímeros plastômeros, por serem os mais empregados atualmente na melhoria das propriedades físicas, mecânicas e reológicas do asfalto. Verifica-se que os mesmos atuam nas misturas asfálticas como agentes antioxidantes e possibilitam a formulação de pavimentos com maior vida útil na medida em que aumentam sua resistência contra deformações permanentes e trincas térmicas (FILHO, 2017).

Quadro 2: Agentes modificadores dos ligantes asfálticos.

Tipo de modificador	Classe	Efeito				
		DP ^a	TF ^b	TBT ^c	DU ^d	EO ^e
Fíler	Negro de Fumo	X				X
	Mineral: Cal Hidratada	X				X
	Cinzas	X				
	Cimento Portland	X				
Extensores	Enxofre	X	X	X		
	Lignina de madeira				X	
Polímeros-Elastômeros	Estireno-butadieno (SB)	X		X		
	Estireno-butadieno-estireno (SBS)	X	X	X		
	Estireno-isopropeno (SIS)	X				
	Estireno-butadieno-borracha látex (SBR)	X		X		
	Policloropreno látex	X		X		
	Borracha natural	X				
	Acrlonila-butadieno-estireno (ABE)	X				
Polímeros-Plastômeros	Etileno-vinil-acetato (EVA)	X	X			
	Monômero Etileno-propileno-dieno (MEPD)	X				
	Etileno-acrilato (EA)	X				
	Poliisobutileno	X				
	Polietileno (alta e baixa densidade)	X		X		
	Polipropileno	X				
Borracha de Pneu	Diferentes tamanhos, tratamentos e processos	X	X	X		
Oxidantes	Compostos Manganeses	X				
Hidrocarbonetos	Aromáticos			X		
	Naftênicos					
	Parafínicos			X		
	Gás óleo leve			X		
	Asfaltenos: processo com resina (ROSE)	X				
	Asfaltenos: processo (DAS)	X				
	Asfaltenos: processo (DEMEX)	X				
	Óleo de Xisto				X	X
	Asfaltos Naturais: Trindade	X	X	X	X	
	Gilsonite	X			X	
Antistrips	Aminas: Amidoaminas					X
	Aminas					X
	Poliamidas					X
	Cal Hidratada					X
	Organometálicos					X
Fibras	Polipropileno	X	X	X		
	Poliéster	X		X		
	Aço	X	X	X		
	Reinforcement	X	X	X		
	Natural: Celulose	X				
	Mineral	X				
Antioxidantes	Carbonato: Chumbo			X		X
	Zinco			X		X
	Negro de Fumo	X				X
	Sais de cálcio					X
	Cal hidratada				X	X
	Fenóis					X
	Aminas				X	X

^a Deformação permanente

^c Trincamento em baixas temperaturas

^e Envelhecimento oxidativo

^b Trincamento por fadiga

^d Dano por umidade

Fonte: NCHRP(2001 apud FILHO, 2017)

2.7. ÓLEO DE COPAÍBA: ORIGEM, CARACTERIZAÇÃO E APLICAÇÕES

2.7.1 Origem e Espécies

Para Garcia & Yamaguchi (2012), a árvore copaíba, da qual é extraída o óleo resina, pertence à família Leguminosae, subfamília Caesalpinoideae e ao gênero Copaífera. Seu gênero compreende 72 espécies, dentre as quais 17 são endêmicas das regiões sudeste, centro oeste e norte do Brasil (mais especificamente na floresta amazônica). Conhecidas como copaibeiras ou pau d'óleo, a espécie é encontrada facilmente nas regiões amazônica e centro-oeste do Brasil.

Segundo Veiga Junior & Pinto (2002), as copaíbas são árvores nativas da região tropical da América Latina e também da África Ocidental. Na América Latina são encontradas espécies na região que se estende do México ao norte da Argentina.

Para os autores, as espécies mais abundantes dessa árvore presentes no país são: *C. officinalis* L. (norte do Amazonas, Roraima, Colômbia, Venezuela e San Salvador), *C. guianensis* Desf. (Guianas), *C. reticulata* Ducke, *C. multijuga* Hayne (Amazônia), *C. confertiflora* Bth (Piauí), *C. langsdorffii* Desf. (Brasil, Argentina e Paraguai), *C. coriacea* Mart. (Bahia), *C. cearensis* Huber ex Ducke (Ceará). No Brasil, a espécie *C. langsdorffii* Desf. é particularmente importante por estar distribuída por todo o território (da Amazônia a Santa Catarina, no nordeste e centro-oeste) e por possuir quatro diferentes variedades: *C. langsdorffii* var. *grandifolia*, *grandiflora*, *laxa* e *glabra*.

O óleo de copaíba é um exemplo de extrato muito utilizado pela população brasileira, sendo facilmente comercializado em feiras livres, ervanários e lojas de produtos naturais, entre outros. Sua forma comercial se apresenta na concentração de 0,5 a 4%. (GARCIA & YAMAGUCHI, 2012).

2.7.2 Extração

Conforme exposto por Veiga Junior (2002) e Pinto (2002), na maioria dos casos o óleo é exudado do tronco das árvores, sendo este o óleo de copaíba propriamente dito.

O óleo é um produto de excreção e desintoxicação do organismo vegetal, tem como função promover a defesa da planta contra animais, fungos e bactérias. Os seguintes métodos são os mais utilizados no processo de extração:

- Extração tradicional: O óleo é retirado por uma grande abertura no tronco da árvore com perda desnecessária de material. Esse processo causa a morte da planta e impede sua reutilização.
- Extração total: Retira-se completamente o óleo de árvores derrubadas e abertas. Esse método também é insustentável do ponto de vista ambiental, não obstante, ainda é muito utilizado.
- Extração racional: O óleo é extraído a partir de uma pequena abertura no tronco da árvore, onde é inserido um cano que conduz o óleo para o exterior (Figura 8). Possibilita a reutilização da planta para futuras extrações, portanto é o que melhor se enquadra no conceito de desenvolvimento sustentável (GARCIA & YAMAGUCHI, 2012).

Figura 8 - Extração racional do óleo de copaíba. O óleo escoar pelo orifício 2, quando ambos estão desobstruídos. Ao selar a abertura do orifício 1, cessa-se o escoamento do óleo.



Fonte: PIERI et al., 2009.

Segundo o ICMBio, após a extração, realizando o tratamento adequado, é possível a retirada nas mesmas árvores depois de um período que pode variar de seis meses a mais de dois anos. Quanto maior o tempo de espera, maior a

capacidade de a árvore produzir e estocar óleo. Geralmente, costuma-se fazer vários furos para achar o óleo (Figura 9).

Figura 9 - Tipos de óleo extraídos da árvore de copaíba



Fonte: Extraído de SlideShare (2007)

Após concluída a coleta do óleo, o orifício é vedado com argila para impedir o ataque de fungos ou cupins. A argila pode ser facilmente retirada, permitindo que se façam outras coletas no mesmo tronco. Nesta primeira extração a quantidade de óleo obtido varia bastante. Uma única árvore pode gerar até 40 ou 50 litros de óleo por ano, embora nem todas as espécies sejam capazes de produzir essa quantidade. (PINTO, 2002).

2.7.3 Propriedades e Aplicações

O conhecimento sobre as propriedades medicinais do óleo de copaíba é muito antigo, pois sabe-se que os índios latino-americanos já faziam uso do mesmo bem antes da chegada dos colonizadores ao continente. Os primeiros registros desse óleo datam de 1534 em uma carta enviada por Pethus Martins ao Papa Leão X, publicada em Estrasburgo uma, na ocasião o óleo resina foi designado de copei (LLOYD, 1898; VEIGA JUNIOR & PINTO, 2002 apud PIERI et al.,2009). Nesse mesmo contexto, ano de 1606, o padre jesuíta José Acosta publicou uma carta intitulada “História natural e moral dos índios”, a qual relata alguns benefícios provenientes do balsamo à base do óleo de copaíba, atentando para seu odor agradável e capacidade para curar feridas e outras enfermidades (PIERI et al.,2009).

Para Veiga Junior & Pinto (2002), as copaibeiras são árvores com crescimento lento, alcançando de 25 a 40 metros de altura, podendo viver até 400 anos. O tronco é áspero, de coloração escura, e tem diâmetro de 0,4 a 4 metros. As folhas são alternadas. Os frutos contêm uma semente ovoide. As flores são pequenas, sem pétalas. O óleo de copaíba é encontrado no tronco da árvore, em canais formados pela dilatação de espaços intercelulares.

A composição química do óleo de copaíba varia de acordo com o gênero e a espécie da árvore do qual foi extraído, mas podemos citar alguns compostos comuns de grande interesse: os principais sesquiterpenos são o beta-cariofileno com ação anti-inflamatória, antibacteriana, antifúngica e antiedêmica, e o beta-bisaboleno, analgésico e anti-inflamatório. Os diterpenos mais encontrados são o ácido hardwíckico, colavenol, ácido copaíferico, ácido copálico, entre outros (GARCIA & YAMAGUCHI, 2012).

A plataforma do Instituto Chico Mendes (ICMBio) relata que às vezes muitas árvores são furadas sem que seja encontrado óleo, sendo chamadas de “secas”. Há também quatro qualidades diferentes de óleo, de acordo com sua viscosidade. O tipo mais fino tem viscosidade semelhante à gasolina e o mais grosso ao óleo de cozinha. Os coletores dizem que é possível identificar qual qualidade de óleo a árvore fornece apenas observando a cor e manchas no tronco da árvore.

Garcia & Yamaguchi (2012) apresentam uma série de aplicações interessantes para esse produto, das quais destaca-se as seguintes:

- Indústria de cosméticos: faz-se uso para a fabricação de sabonetes, cremes, espumas de banho, xampus, condicionadores, loções e óleos hidratantes em decorrência de suas propriedades emoliente, antibacteriana e anti-inflamatória. Há também uso para fabricação de perfumes, por ter caráter fixador;
- Indústria de fármacos: por suas aplicações medicinais, podem atuar como antiblenorrágico para as vias urinárias; anti-inflamatório, antisséptico, para o tratamento de cistite, incontinência urinária e sífilis; como antiasmático, expectorante para as vias respiratórias; combate sintomas de bronquite, faringite, hemoptise, pneumonia e sinusite; mostra-se eficaz no tratamento de infecções da derme e mucosa como dermatites, eczemas, psoríases e

ferimentos, bem como para úlceras e feridas no útero; empregado também como analgésico, antidiarreico, cicatrizante, afrodisíaco, antioxidante, antitetânico, anti-herpético, bactericida, anticancerígeno, antitumoral, no tratamento de leishmaniose, reumatismo, hemorragias, paralisia, dores de cabeça e picadas de cobra.

Conforme pesquisas feitas por Viegas Junior (2012) e Pinto (2012), há também interesse na madeira de determinadas espécies de *Copaifera*. Sua superfície é lisa, lustrosa, durável e de baixa permeabilidade, própria para fabricação de peças torneadas e de marcenaria em geral. A árvore também é utilizada na fabricação de carvão e pelas indústrias de construção civil e naval. Os autores também citam utilização da espécie na indústria de vernizes, na formulação como secativo, Na pintura com porcelana, o óleo atua como solvente para as tintas em pó, devendo ser mistura com outros óleos. A utilização do óleo de copaíba na indústria de fotografia, como acelerador também é citada na literatura.

Para os mesmos autores, por ser uma fonte rica e renovável de hidrocarbonetos, o óleo de copaíba tem sido analisado como combustível ecologicamente limpo, como aditivo para butadieno na confecção de borracha sintética e como inibidor de corrosão de aço em solução salina, assim como tem sido utilizado também na síntese de biomarcadores de sedimentos e resíduos de petróleo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados na pesquisa foram:

- **Ligante convencional:** O ligante foi obtido da distribuidora Stratura Asfaltos S/A (antiga Ipiranga Asfaltos S/A). Será utilizado o CAP 50/70.
- **Aditivos:** Óleo de copaíba.

3.2 MÉTODOS

Realizou-se ensaios de caracterização reológica do CAP 50/70, destacando-se os seguintes ensaios: grau de desempenho-PG e Fluência e Recuperação sob Tensão Múltipla- MSCR e Varredura de amplitude linear - LAS.

Envelhecimento a Curto Prazo – RTFO

A estufa de película fina plana RTFO (Figura 10) provoca o envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação e evaporação, permitindo avaliar a presença de frações de óleos mais leves e a oxidação que ocorre durante o aquecimento a 163 °C. Para esse ensaio foi utilizado a especificação da D 2872:2012 da ASTM e da NBR 15235:2009 da ABNT para as amostras de CAP puro e modificado com adição de 1%,2% e 3% de óleo de copaíba.

Figura 10 - Estufa de Filme Fino Rotativo



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Após realização dos ensaios de caracterização física do ligante convencional e modificado foram realizados os seguintes ensaios para determinação das propriedades reológicas:

Grau de Desempenho

Os ligantes asfálticos foram ensaiados em temperaturas relacionadas ao seu período de emprego, determinando seu grau de desempenho (*Performance Grade* – PG). Esse ensaio é definido por duas temperaturas que demarcam a faixa de uso do mesmo. Assim, determina-se uma temperatura máxima, de maneira a conservar uma atuação satisfatória, com deformação permanente baixa e, uma temperatura mínima, com o propósito de evitar o trincamento por baixa temperatura.

Por meio deste ensaio, regido pela ASTM D 7175/15, caracteriza-se as propriedades viscoelásticas do ligante, obtém-se o Módulo complexo (G^*) e o Ângulo de fase (δ), indicadores da rigidez e da elasticidade, respectivamente, além da máxima temperatura do Grau de desempenho (PG), determinante para a rigidez do asfalto a altas temperaturas (SANTOS, 2017).

De acordo com a norma ASTM D6373/16, o parâmetro utilizado para determinação do limite superior de PG é o $|G^*|/\text{sen}\delta$. Este parâmetro deve possuir valores superiores a 1,00 kPa para amostras não envelhecidas e valores superiores a 2,20 kPa para amostras envelhecidas após processo de envelhecimento a curto prazo- RTFO, tais valores devem ser verificados em cada temperatura de teste para todas as amostras (FILHO, 2017).

Linear Amplitude Sweep (LAS)

Este ensaio preconizado pela norma AASHTO TP101-14, busca caracterizar o comportamento do ligante asfáltico através de esforços de fadiga. Para isto, o ensaio é feito em duas etapas distintas: Na primeira, faz-se uma varredura de frequência de 0,1-30Hz, a uma amplitude de deformação de 0,1%. Já na segunda etapa faz-se uma varredura de amplitude de deformação a uma amplitude de 0,1-30% de deformação, a uma frequência fixa de 10Hz. Para estes ensaios foi utilizada a temperatura de 25°C e a sequência de carregamentos consiste em intervalos de 10 segundos a uma amplitude de deformação constante, sendo cada intervalo

seguido por outro intervalo com uma amplitude de deformação maior. Após estas etapas são feitas leituras do comprimento das trincas ocasionadas nas rupturas por fadiga para posterior análise (PAMPLONA, 2013).

A linear Amplitude Sweep – LAS, fornece o parâmetro A que representa a integridade do material em função do dano acumulado, nesse modelo o módulo inicial da amostra ($G^* \cdot \text{sen} \delta$) reduz em 35%, sendo valores maiores representativos ao aumento da vida de fadiga. Assim como o parâmetro B, calculado a partir da varredura de frequência, representando a sensibilidade do material ao nível de deformação (FILHO, 2017).

Fluência e Recuperação sob Tensão Múltipla

Do inglês *Multiple Stress Creep Recovery* (MSCR), o ensaio é uma consequência do aprimoramento do ensaio de Fluência Repetida e Recuperação - *Repeated Creep and Recovery* (RCRT) – promovido pela Administração Rodoviária Federal dos Estados Unidos - Federal Highway Administration (FHWA). Com a realização deste ensaio, normatizado pela ASTM D7405 que indica os tempos de fluência e recuperação de 1s e 9s, pretende-se avaliar o percentual de recuperação, a parcela não recuperável, bem como a dependência dos ligantes asfálticos diante do nível de tensões múltiplas as quais serão expostos.

Na primeira etapa do ensaio MSCR, aplica-se a tensão de 0,1 kPa para simular a condição de tráfego normal, na segunda etapa eleva-se a tensão para 3,2 kPa, situação representativa de tráfego mais intenso, com a finalidade de avaliação da capacidade do material em manter sua resposta elástica (PORTUGAL, 2016).

Os resultados desse teste são a compliança não-recuperável, $J_{nr}(\sigma, N)$, e a porcentagem de recuperação, $\%Rec(\sigma, N)$. Quanto menor for o valor de J_{nr} menor será a deformação não-recuperada, por consequência o CAP se apresentará mais resistente a deformação permanente. Quanto mais elevado a porcentagem de recuperação, melhor será resposta elástica do material (SANTOS, 2017).

Os ensaios reológicos foram realizados em Reômetro Modelo DHR-1, ilustrado na Figura 11. O estudo da reologia do cimento asfáltico de petróleo modificado por adição de óleo de copaíba foi realizado no laboratório de engenharia

de pavimentos, do departamento de engenharia civil da Universidade Federal de Campina Grande.

Figura 11 - Reômetro DHR-1.



Fonte: Dados da pesquisa (2018)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios de reologia avançada, realizados no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), são extremamente necessários para se entender a fundo quais os efeitos do óleo de copaíba no comportamento visco-elástico do ligante modificado.

Performance Grade (PG)

O ensaio de PG foi realizado tanto antes como após o envelhecimento a curto prazo, fornece informações acerca da temperatura máxima de utilização do ligante asfáltico, bem como parâmetros de deformabilidade e rigidez. A Figura 12 ilustra os resultados fornecidos pelo DSR do ensaio de PG do ligante asfáltico puro.

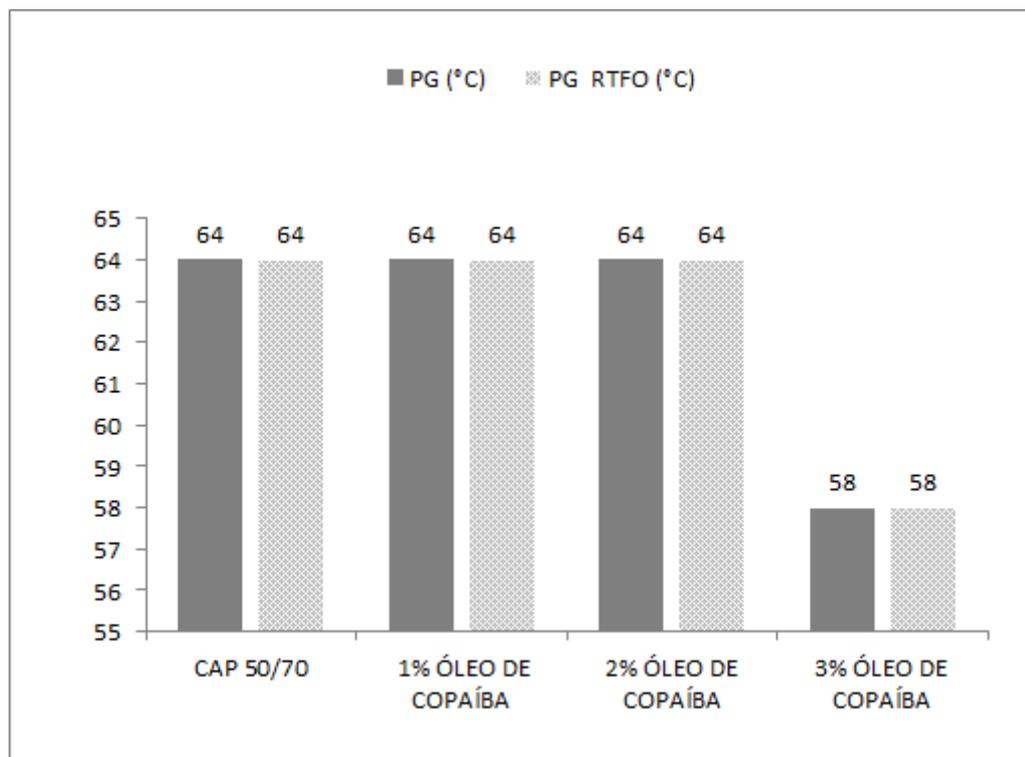
Figura 12 - Ensaio de Performance Grade (PG)

RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.1	1.77	12.1	74.5	14.6	15.2	Pass
2	10.0	52.1	0.70	12.1	78.1	5.77	5.90	Pass
3	10.0	57.9	0.30	12.1	81.3	2.44	2.47	Pass
4	10.0	63.9	0.13	12.1	84.1	1.08	1.09	Pass
5	10.0	69.9	0.06	12.0	86.1	0.519	0.520	Fail

A partir do ensaio de Performance Grade – PG, obtêm-se os parâmetros de Módulo Complexo (G^*), que está relacionado à rigidez do ligante, o ângulo delta (δ) que está relacionado à elasticidade, o parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ que reflete a deformabilidade do ligante asfáltico e, além de delimitar a faixa de temperatura de uso mínima e máxima do ligante. A Figura 13 ilustra o resultado obtido para as temperaturas máximas de utilização do ligante asfáltico antes e após o processo de envelhecimento a curto prazo (RTFO).

Figura 13 - Temperaturas máximas de utilização do ligante asfáltico antes e após o processo de envelhecimento a curto prazo (RTFO)



De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que o ligante asfáltico puro CAP 50/70 e o ligante com adição de teores de óleo de copaíba de 1% e 2% mantiveram constante a temperatura de PG antes e pós o envelhecimento, ou seja, foram mais resistentes ao efeito da oxidação, mantendo suas propriedades de deformabilidade e rigidez frente a altas temperaturas. Observa-se que para a adição de 1% de óleo de copaíba que já ocorreu à ação de antioxidante, impedindo o efeito degenerativo, mantendo a temperatura de PG constante tanto para o ligante virgem como para o ligante envelhecido, em 64 °C. À medida que eleva-se o teor de adição de óleo de copaíba ao ligante, perde-se em temperatura de PG, fato este explicado pela perda de viscosidade e consequente aumento de deformabilidade que ocorre frente ao incremento de temperatura.

Para o teor de 3%, verifica-se uma perda em temperatura de utilização, detendo-se aos 58°C, temperatura que pode ser atingida pelo pavimento asfáltico em dias muito quentes no nordeste brasileiro, o que torna sua utilização prejudicada nesta situação.

Para o módulo complexo (G^*), que está ligado à rigidez do ligante, as Figuras 14 e 15 ilustram que este parâmetro sofre queda com o aumento do teor de adição

do óleo de copaíba, ou seja, o ligante se torna menos rígido, tanto antes como após o processo de envelhecimento a curto prazo- RTFO.

Figura 14 - Módulo Complexo (G^*) x Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos ligantes em estudo antes do envelhecimento a curto prazo-RTFO

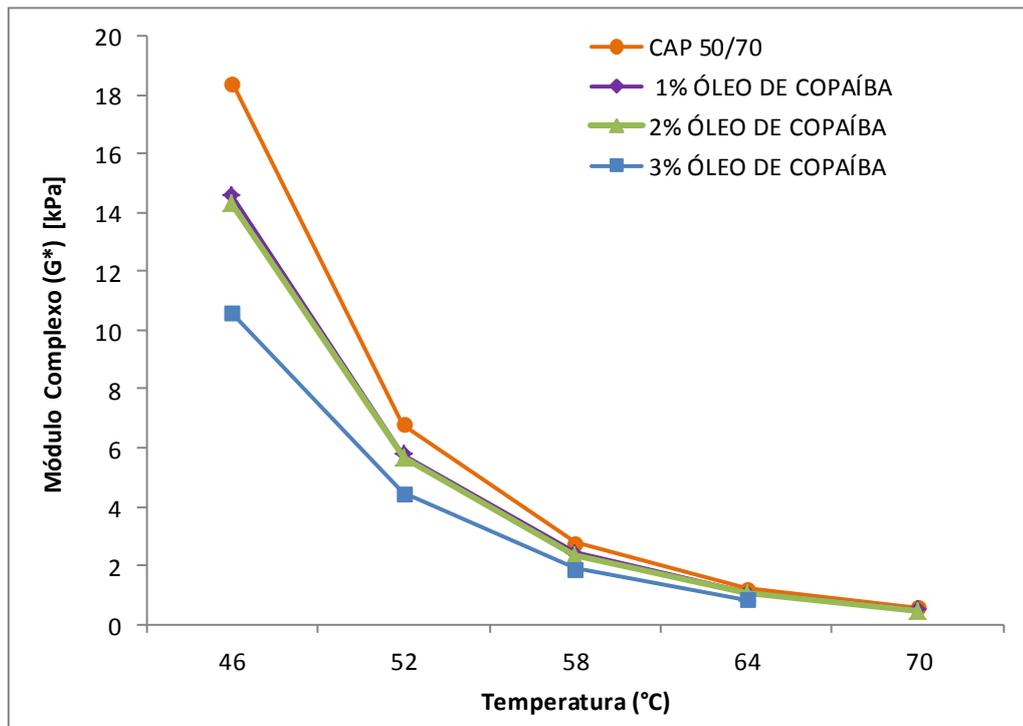
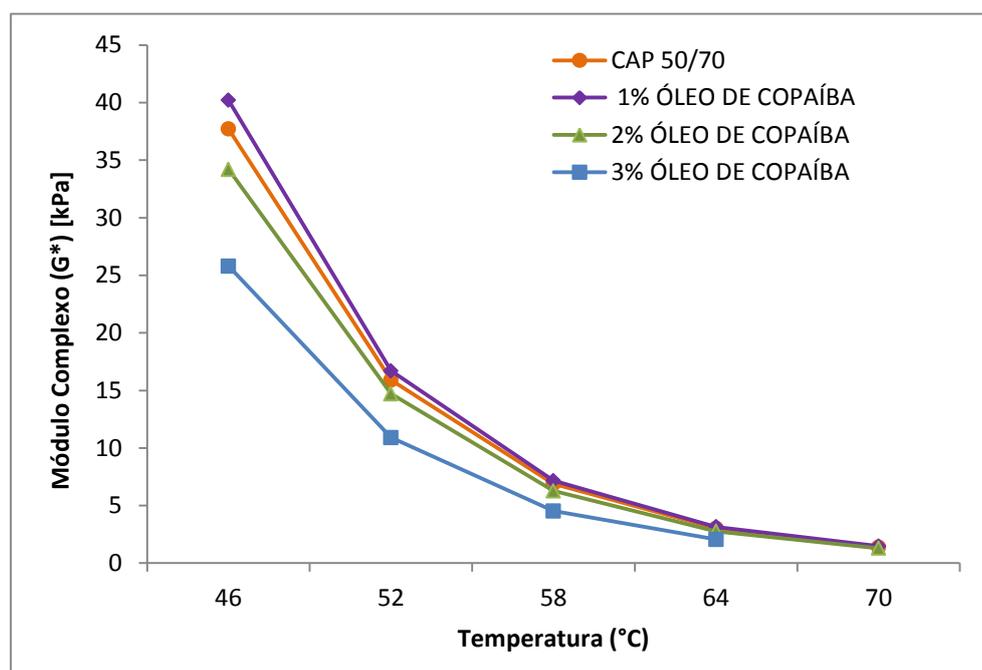


Figura 15 - Módulo Complexo (G^*) x Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos ligantes em estudo após envelhecimento a curto prazo-RTFO



Conforme resultados obtidos, verifica-se que para a temperatura de 46°C antes do envelhecimento a curto prazo-RTFO, o ligante puro apresentou um módulo complexo superior aos demais ligantes, da ordem de 20 kPa, reduzindo continuamente com o aumento da temperatura e convergindo para valores mais próximos aos obtidos para os ligantes modificados com óleo de copaíba.

Para os ligantes envelhecidos, observa-se que o ligante puro e o modificado com 1% de óleo de copaíba apresentaram valores muito próximo, da ordem de 38 e 40 kPa, respectivamente, havendo uma redução com o incremento de temperatura, porém o ligante modificado com óleo de copaíba apresenta valores de módulo complexo até a temperatura de 70°C, o que permite supor que esta substância atribua propriedades antioxidantes ao ligante asfáltico, permitindo-o ser melhor utilizado em altas temperaturas sem perder o seu desempenho.

Em consonância à análise do módulo complexo (G^*), as Figuras 16 e 17 ilustram os resultados obtidos para a variação do parâmetro $G^*/\text{sen}(\delta)$, antes e após o envelhecimento a curto prazo-RTFO.

Figura 16 - Variação do parâmetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ x Temperatura (°C) dos ligantes em estudo antes do RTFO

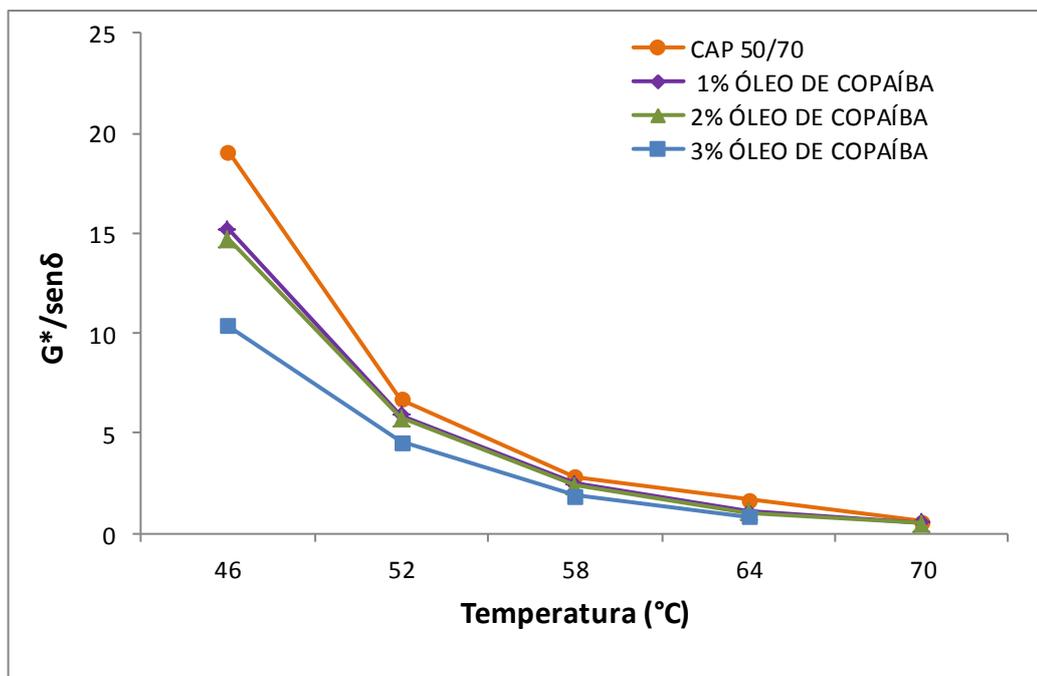
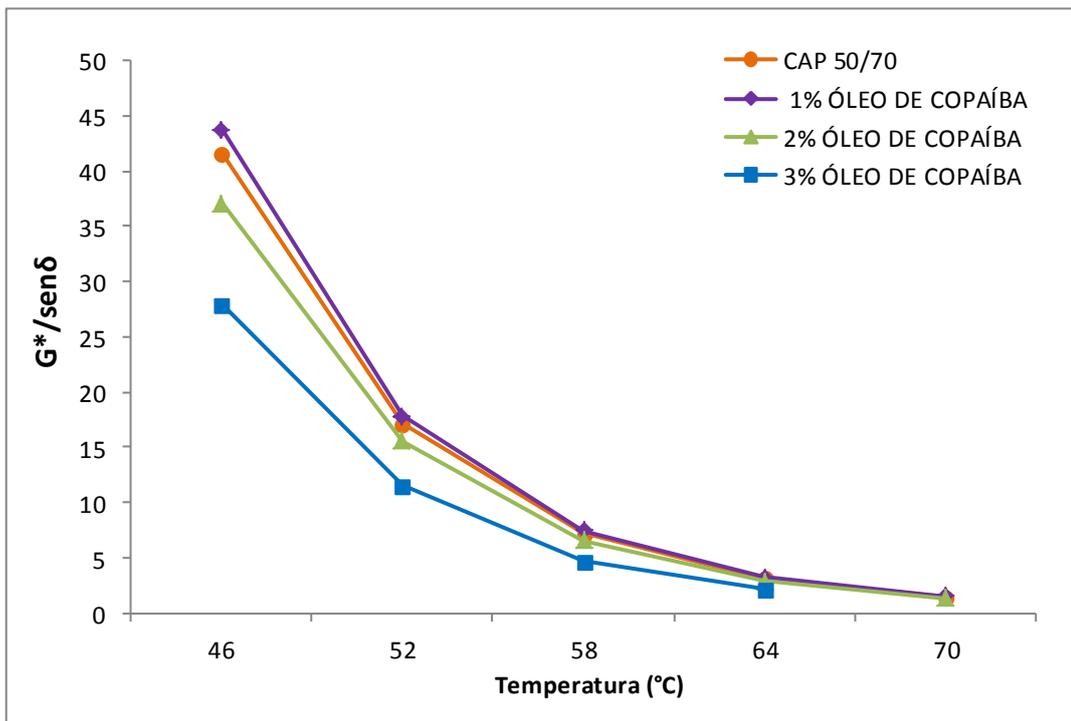


Figura 17 - Variação do parâmetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ x Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos ligantes em estudo após RTFO



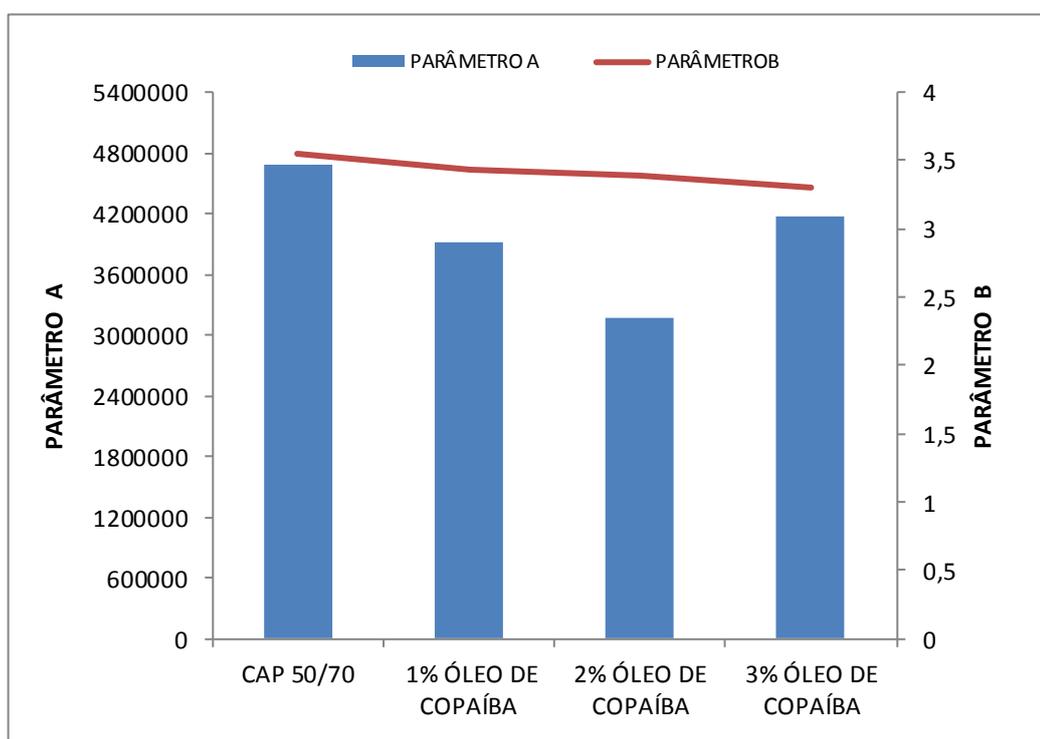
O parâmetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ mede a resistência à deformação permanente do ligante asfáltico e é estabelecido como critério de parada do ensaio de PG. Para o ligante puro, quando $G^*/\text{sen}(\delta)$ for menor que 1,0 o ensaio deve ser encerrado, admitindo-se que para valores inferiores o ligante está muito deformável e não atende aos critérios de desempenho mínimo. No ensaio com o ligante envelhecido, a análise é a mesma, porém o critério de parada do ensaio se dá quando $G^*/\text{sen}(\delta)$ for inferior a 2,0.

Realizando uma comparação entre os dois ligantes modificados por adição de óleo de copaíba nos teores de 1% e 2% que apresentam o mesmo valor de PG, (64°C), observa-se que o ligante com 2% de óleo de copaíba apresenta uma redução de 13% no valor de $G^*/\text{sen}(\delta)$ em relação ao teor de 1%, tornando o ligante mais deformável, o que coloca em evidência que o incremento do óleo de copaíba a mistura é determinante frente ao desempenho do ligante quanto à deformação permanente na mesma temperatura de utilização.

Linear Amplitude Sweep (LAS)

A Figura 18 ilustra os resultados de avaliação dos parâmetros A e B na resistência ao dano obtidos pelo ensaio da varredura linear de amplitude (LAS) para as amostras de CAP 50/70 puro e modificado por adição de óleo de copaíba nos teores de 1%,2% e 3%.

Figura 18 - Parâmetros A e B para os ligantes em estudo



De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que a adição do óleo de copaíba ao ligante não mostrou-se benéfica quanto ao aumento dos valores do parâmetro “A” para todos os teores em estudo, revelando que a modificação proposta não confere uma melhoria na integridade do ligante asfáltico diante do acúmulo de danos.

De acordo com Filho (2017), o parâmetro A, está relacionado à variação da integridade do material devido ao dano acumulado, valores maiores de A, significam que a amostra manteve a sua integridade inicial. Portanto, observa-se que a amostra

com adição de 3% de óleo de copaíba apresentou valor para A mais próximo ao obtido pra o ligante puro.

Considerando o ligante puro, este apresenta um parâmetro A superior ao ligante modificado por adição de óleo de copaíba, da seguinte ordem: 16,5% para o ligante com 1%; 32,1% para o teor de 2% de óleo; e 11% para o ligante modificado com 3% do óleo.

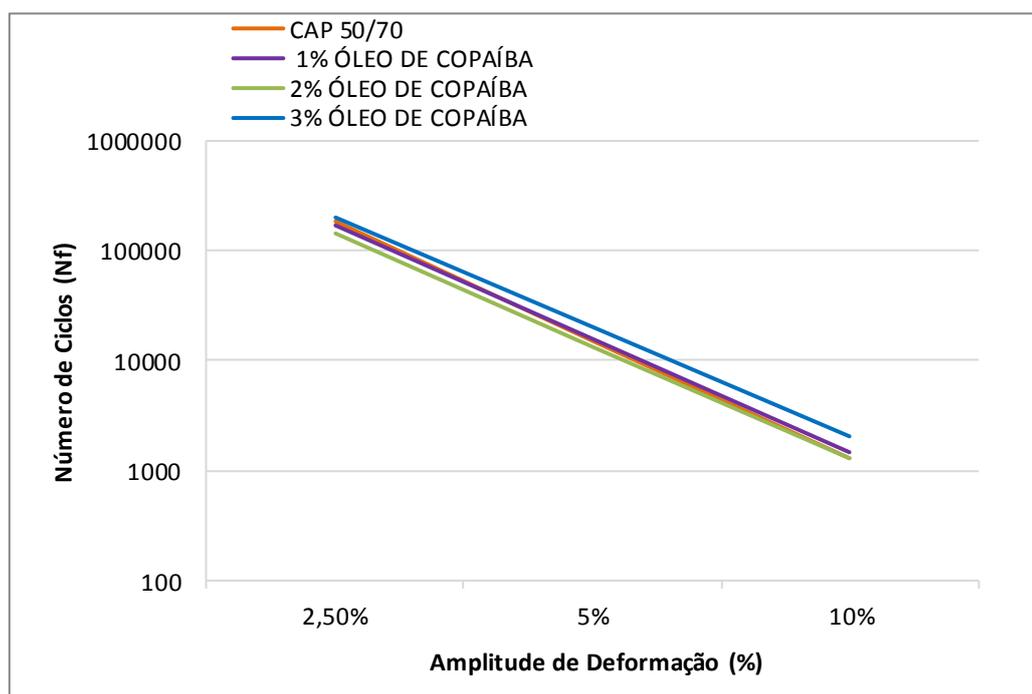
O parâmetro “B” é um indicativo da sensibilidade do ligante ao aumento do nível de deformações. Quanto maior o valor de “B” mais susceptível o ligante é á variação da amplitude de deformações.

Conforme resultados obtidos, verifica-se que a adição do óleo de copaíba ao ligante proporcionou a redução dos valores de “B”, indicando que essa redução foi proporcional ao aumento dos teores de óleo, obtendo-se para o teor de 3% de adição de óleo de copaíba uma redução de aproximadamente 1% do valor de “B” quando comparado ao resultado obtido para o ligante puro, indicando que a adição do óleo de copaíba foi benéfica do ponto de vista que proporcionou ao ligante uma redução da sensibilidade a variação do nível de deformação sob mudanças térmicas.

Segundo Filho (2017), a sensibilidade não é desejada para os ligantes asfálticos, pois indica fácil susceptibilidade a deformações sob variações de temperatura. Levando-se isto em consideração, a adição de 3% de óleo de copaíba foi o teor que apresentou o melhor parâmetro B, por ter uma variação mínima em relação ao ligante puro.

Por meio do principio do dano contínuo viscoelastico (VECD), é possível criar um modelo de fadiga que permite obter informações sobre o comportamento do ligante asfáltico com relação ao dano em temperaturas intermediárias, para uma ampla faixa de deformações e de ciclos de carregamento (HINTZ, 2012). A Figura 19 ilustra os resultados obtidos para a vida de fadiga (Nf) em função da amplitude de deformação para o ligante puro e modificado por adição de óleo de copaíba.

Figura 19 - Estimativa de vida da fadiga do ligante asfáltico em estudo



De acordo com os resultados obtidos, pode-se perceber que o Nf para o ligante com adição de óleo de copaíba possui um aumento gradativo conforme são acrescidas as porcentagens do modificante.

É importante ressaltar que obteve-se resultados similares para o ligante puro e com 1% de óleo de copaíba, no entanto, para o teor de 2%, os resultados obtidos foram muito próximos aos verificados para o ligante puro. Para o ligante com 3% de óleo de copaíba obteve-se a maior vida de fadiga, enquanto para o teor de 2% obteve-se a mais elevada resistência a fadiga.

De acordo com Nascimento (2015), níveis de deformação de até 3% são características de pavimentos com baixos níveis deflectométricos e possuem comportamento semelhante a um pavimento rígido. Em contrapartida, altos níveis deflectométricos são melhor comparados aos pavimentos flexíveis

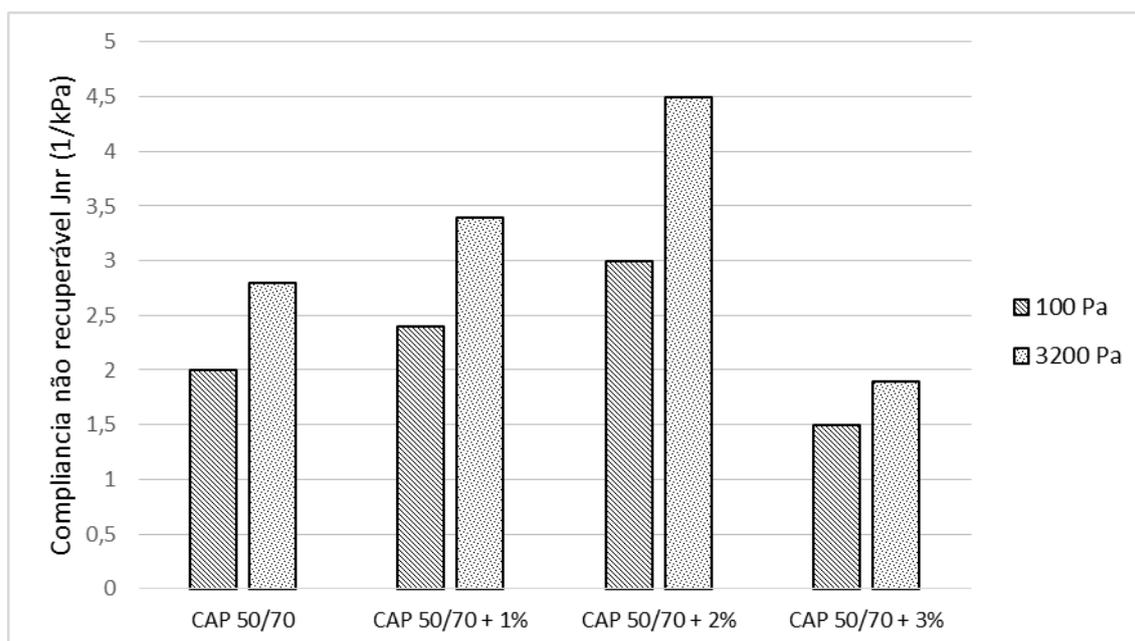
A análise da resistência ao dano de ligantes asfálticos por meio do princípio do dano contínuo viscoelástico (VECD) demonstra que existe uma forte dependência entre a resistência a fadiga dos ligantes asfálticos e o nível de deformação (GAMA, 2016).

Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)

Segundo Domingos et al. (2013), para avaliação de aumentos significativos na susceptibilidade à deformação permanente é utilizado o ensaio de MSCR, sendo este reconhecido como representativo para essa análise. Os parâmetros analisados neste teste são a compliância não recuperável e a recuperação elástica recuperada pelo ligante sob tensões de cisalhamento aplicadas.

A Figura 20 apresenta os resultados de J_{nr} para o CAP 50/70 nos teores de adição de óleo de copaíba para tensões aplicadas de 100 Pa e 3200 Pa. Altos valores de J_{nr} indicam elevada susceptibilidade do ligante à deformação permanente, enquanto que menores valores indicam maior resistência do ligante a este efeito.

Figura 20 - Compliâncias não recuperáveis para o CAP 50/70 e teores de óleo de copaíba

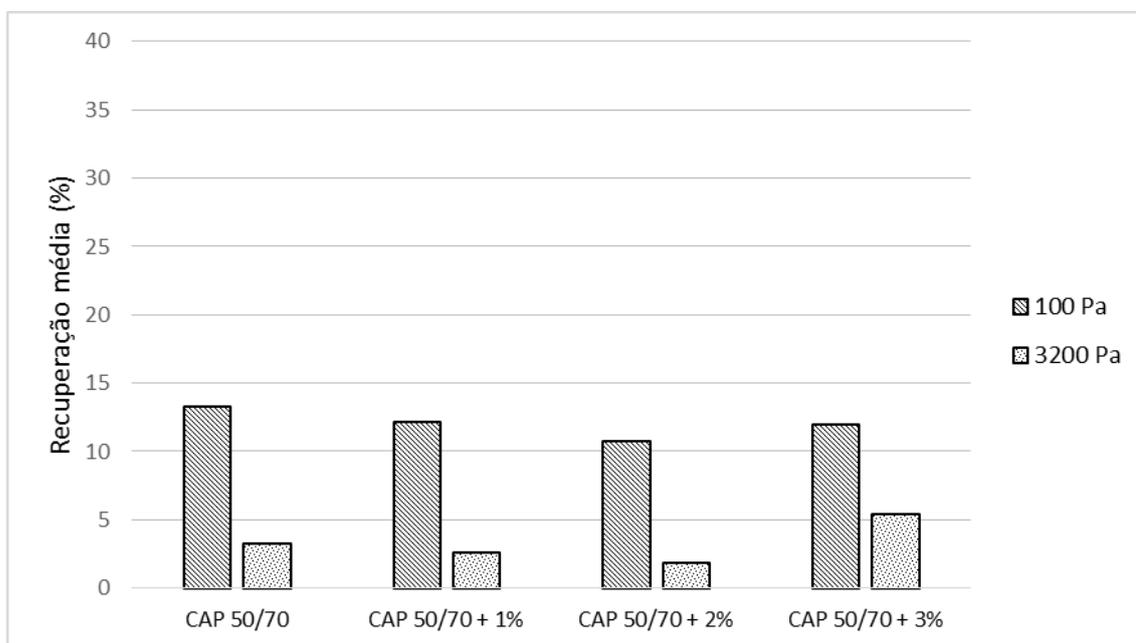


Analisando os resultados apresentados na Figura 20, para o CAP 50/70, verifica-se que os ligantes adicionados com 1% e 2% obtiveram valores maiores para compliância não recuperável quando comparados ao ligante puro. Para a adição de 3% foi verificado uma menor compliância frente ao ligante puro, sendo este um indicador positivo para o uso desta porcentagem de adição, evidenciando uma menor susceptibilidade à deformação permanente.

Para avaliação do tráfego a que estes ligantes com adição poderiam suportar, segundo a AASHTO M320 (2016), verificou-se que o teor de 1% possuía Jnr entre os limites de $2,0 \text{ kPa}^{-1}$ e 4 kPa^{-1} estando classificado para suportar tráfego padrão (S), assim como o ligante puro. Como o CAP 50/70 + 2% de óleo de copaíba apresentou um Jnr maior que $4,0 \text{ kPa}^{-1}$, não se enquadrando na classificação da AASHTO M320 (2016), este apresenta maior susceptibilidade a deformações, não atendendo ao requisito para o tráfego padrão. Para o CAP 50/70 + 3% de óleo de copaíba foi obtido um Jnr entre 1 kPa^{-1} e 2 kPa^{-1} , indicando que este atende aos requisitos para tráfego pesado (H).

Outro parâmetro obtido por meio do ensaio de MSCR é a porcentagem de recuperação elástica da amostra durante o tempo de 9 segundos após a aplicação de carga para os ciclos de tensão de 0,1 kPa e 3,2 kPa. A Figura 21 ilustra os resultados com o CAP 50/70 e as adições do óleo de copaíba.

Figura 21 - Porcentagem de recuperação elástica para o CAP 50/70 e adições de óleo de copaíba

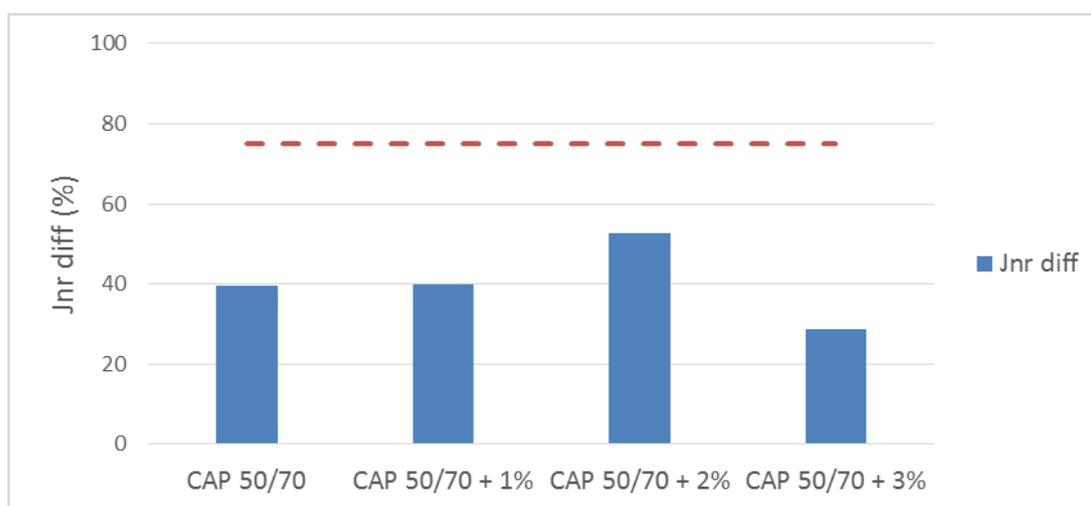


Para um tráfego normal, tensão de 0,1 kPa, houve redução para todos os teores na recuperação elástica do ligante adicionado com óleo de copaíba comparado ao ligante puro. Já para um tráfego intenso, tensão de 3,2 kPa, ocorreu

redução para os teores de 1% e 2%, para o teor de 3% houve aumento da recuperação elástica em torno de 2,1%, mostrando que, para esta porcentagem, o ligante apresentou melhor comportamento frente a tensão aplicada. Apesar do teor de 3% não ter aumentado significativamente a recuperação elástica, o fato de ter diminuído o Jnr comparado ao ligante puro torna o resultado positivo.

A Figura 22 apresenta os resultados do Jnr diff para o CAP 50/70 e teores de adição do óleo de copaíba.

Figura 22 - Jnr diff para amostras de CAP 50/70 e adições de óleo de copaíba



Os resultados obtidos demonstram que a adição de 1% e 2% do óleo de copaíba se torna mais sensível a mudanças de tensões inesperadas que possam acontecer na superfície do pavimento. No entanto, esse aumento da sensibilidade não interfere no desempenho do ligante, uma vez que nenhum dos valores chegaram próximos ao limite estabelecido por norma. Já para o teor de 3% de óleo de copaíba, houve redução do Jnr diff comparado ao ligante puro, mostrando que esse teor tornou o ligante menos sensível a mudança de tensões, em torno de 10,9%, apresentando melhor comportamento perante essas mudanças.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ligante asfáltico puro e com adição de 1% e 2% óleo de copaíba mantiveram constante a temperatura de PG antes e pós o envelhecimento, sendo, portanto mais resistentes ao efeito da oxidação, mantendo suas propriedades de deformabilidade e rigidez frente a altas temperaturas;

Para o módulo complexo obtido antes do envelhecimento a curto prazo. observa-se que o ligante puro apresentou resultado superior aos demais ligantes, da ordem de 20 kPa, reduzindo continuamente com o aumento da temperatura. Após envelhecimento, verificou-se que o ligante puro e o modificado com 1% de óleo de copaíba apresentaram valores muito próximos, havendo uma redução com o incremento de temperatura;

Para o parâmetro $G^*/\sin(\delta)$, que mede a resistência à deformação permanente do ligante asfáltico, observou-se para os teores de 1% e 2% que apresentaram o mesmo PG (64°C), que o ligante com 2% de óleo de copaíba apresenta uma redução de 13% no valor de $G^*/\sin(\delta)$ em relação ao teor de 1%, indicando que este é mais deformável;

Quanto a variação da integridade do ligante (Parâmetro A), verificou-se que a adição do óleo de copaíba ao ligante não mostrou-se benéfica quanto ao aumento dos valores do parâmetro “A” para todos os teores em estudo, indicando que o óleo não proporcionou melhoria na integridade do ligante asfáltico diante do acúmulo de danos. Para o parâmetro “B”, que é um indicativo da sensibilidade do ligante ao aumento do nível de deformações, observou-se que a adição do óleo de copaíba foi benéfica do ponto de vista que proporcionou ao ligante uma redução da sensibilidade a variação do nível de deformação sob mudanças térmicas.

Para a compliância não recuperável observou-se que **os** ligantes adicionados com 1% e 2% obtiveram valores superiores ao obtido para o ligante puro. Para a adição de 3% foi verificado uma menor compliância frente ao ligante puro, sendo

este um indicador positivo para o uso desta porcentagem de adição, evidenciando uma menor susceptibilidade à deformação permanente.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

De acordo com os resultados encontrados nesta pesquisa e com o intuito de um maior aprofundamento do tema, são postas as seguintes sugestões para futuras pesquisas envolvendo a adição do óleo de copaíba ao ligante asfáltico:

- a) Estudar as misturas asfálticas produzidas com ligante modificado por adição de óleo de copaíba;
- b) Avaliar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas produzidas com teores superiores aos analisados neste estudo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - **AASHTO M320**: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Washington, D. C., 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – **AASHTO TP 101**: Standard method of test for estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2012

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - **ASTM D2872**. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). West Conshohocken, PA, 2012.

_____. **ASTM D6373**: Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder. West Conshohocken, PA, 2015.

_____. **ASTM D7175**: Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. West Conshohocken, PA, 2015.

_____. **ASTM D7405**: Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. West Conshohocken, PA, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15235**: Materiais asfálticos – Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. Rio de Janeiro, 2009.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.; **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. PETROBRAS: Abeda, 504p., 2006.

CAVALCANTE, F. P. **Efeito Da Adição Dos Óleos De Ricinus Communis E Linus Asfáltico De Petróleo Puro E Modificado**. Tese (Doutorado), Centro De Ciências E Tecnologia Programa De Pós-Graduação Em Ciência E Engenharia Dos Materiais Campus I – Campina Grande. 2016.

CORREIA, D. Z. **Estudo de Misturas Poliméricas para Recuperação de Petróleo**. 2006. Tese (Doutorado em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Orientação: Profa. Cheila Gonçalves Mothé.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. **DNIT – Es 031/2006**. Pavimentos flexíveis - Concreto Asfáltico de Petróleo – Especificação de serviço, Rio de Janeiro, 2006.

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.

FILHO, P. G. T. M. **Avaliação Reológica de Ligantes Asfálticos Modificados com Nanopartículas de Dióxido de Titânio**. 2017. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

GAMA, D. A. **Efeito da adição de polímeros reativo, não-reativo e ácido polifosfórico e suas combinações nas propriedades de ligantes asfálticos** / Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

HINTZ, C. **Understanding mechanics leading to asphalt binder Fatigue**. Dissertation. University of Wisconsin-Madison. 2012.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – ICMBio. **Unidades de Conservação**. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/imgs-unidadescoservacao>. Acesso em: 09 mai. 2018.

LEITE, L.F.M. **Estudo de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. 1999. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Macromoléculas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LIMA, C. K. M. L. **Estudo da Incorporação de Resíduo Industrial Polimérico ao CAP**. 2008b. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

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.

LUCENA, L. C. F. L. **Verificação da Influência do Uso de Resíduos Industriais como Fíler em Misturas Asfálticas sob o Efeito da Presença D'Água**. 2009.138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

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.

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

ODA, S. **Caracterização de uma Rede Municipal de Estradas Não-pavimentadas**. Dissertação (Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos). Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.

PAMPLONA, T. F. **Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes**. 2013. 217 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo (EESC/USP). São Carlos, São Paulo, SP, 2013.

PIERI, F. A.; MUSSI, M. C.; MOREIRA; M. A. S. **Óleo de Copaíba (Copaifera Sp.): Histórico, extração, aplicações industriais e propriedades medicinais**. Rev. Bras. Pl. 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). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. F. 127. 2016.

SANTOS, N. S. **Propriedades Reológicas do Ligante Asfáltico (Cap 50/70) Modificado por Adição de Lignina**. 2017. 102 f. Dissertações (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

SILVA, J. P. S.; ARAUJO, R. F. **Estudo do Envelhecimento dos Ligantes Asfálticos a Partir do Modelo de Arrhenius**. Revista Desafios, v. 03, n. 01, 2016.

SILVA, J.P.S. **Avaliação dos Efeitos de Produtos Rejuvenescedores em Misturas Asfálticas**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Brasília-DF, 145f. Universidade de Brasília, 2011.

SOUZA, L. J. S. **Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com Óleo de Mamona**. 2012. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

VEIGA JUNIOR, V. F.; PINTO, A. C. **O gênero Copaifera L**. Revista Química Nova, v.25, n. 2, p. 273-286, 2002.

YAMAGUCHI, M. H.; GARCIA, R. F. **Óleo de Copaíba e Suas Propriedades Mediciniais: Revisão bliográfica.** Revista Saúde e Pesquisa, v. 5, n. 1, p. 137-146, jan./abr. 2012.

ZATARIN, A. P. M., A. L. F. SILVA, L. S. ANEMAM, M. R. BARROS, W. CRISOSTOMO. **Viabilidade da Pavimentação com Asfalto Borracha.** R. gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 5, n. 2, p. 649-674, out.2016/mar. 2017.