



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

**REOLOGIA DE LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO POR ADIÇÃO DE
LIGNINA EXTRAÍDA DO EUCALIPTO**

FERNANDO ROCHA DE BRITO LIRA

Orientadores: John Kennedy Guedes

Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça.

Campina Grande-PB, 28/06/2019

**REOLOGIA DE LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO POR ADIÇÃO DE
LIGNINA EXTRAÍDA DO EUCALIPTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB, 28/06/2019

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

FERNANDO ROCHA DE BRITO LIRA

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

Junho/2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, pela paciência e dedicação todo este tempo e pela formação que me deram, sendo eles os contribuintes diretos deste momento.

Aos meus dois irmãos, que sempre estiveram dispostos a ajudar nessa caminhada toda, obrigado!

Também aos amigos que fiz durante esta jornada e que me acompanharam nessa pesquisa: obrigado por serem tão prestativos, pelos momentos de alegria e por ajudarem a tornar essa pesquisa possível. Não só pelos momentos de conquistas, mas sempre nas correções para que eu pudesse me tornar um mais correto profissional.

A minha orientadora, Ana Maria, por ter aceito o pedido de orientação, pela atenção e vontade em ajudar nessa pesquisa e também por todo conhecimento repassado como professora.

Aos professores, que todos, sem exceção, contribuíram com seus ensinamentos.

E, finalmente, agradeço a Deus, por me agraciar com o dom da vida e me guiar até aqui, sempre presente nas dificuldades e vitórias.

DEDICATÓRIA

Primeiramente dedico a Deus, pois sem Ele não conseguiria.

Aos meus pais, Fernando e Edna, que sempre se esforçaram para me proporcionar o melhor, sempre me aconselhando a me tornar uma melhor pessoa. Muito obrigado!

Aos meus irmãos, Igor e Victor, sempre presentes, me apoiando nesta caminhada.

Aos amigos que sempre me ajudaram quando precisei.

Dedico também a todos os outros familiares, por me apoiarem desde que entrei no curso, me guiando para os melhores caminhos!

E aos professores, que contribuíram não só com conhecimentos e conceitos, mas na formação de um profissional com ética e respeito.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Comportamento do ligante asfáltico em função do tempo x carga.....	16
Figura 02: Ligante asfáltico sob carregamento e sua resposta visco-elástica, com componentes.....	18
Figura 03: Intervalos de temperatura em função da viscosidade para compactação e mistura do ligante asfáltico.....	19
Figura 04: Estrutura da Lignina.....	22
Figura 05: Viscosidade para os dois tipos de asfaltos.....	24
Figura 06: CAP 50/70.....	27
Figura 07: Estufa RTFO.....	28
Figura 08: Vetores do módulo.....	29
Figura 09: Reômetro de cisalhamento direto.....	29
Figura 10: Representação do ensaio de MSCR (SCIELO, 2017).....	30
Figura 11: Parâmetro ($G^*/\text{sen } \delta$) antes do RTFO.....	32
Figura 12: Parâmetro ($G^*/\text{sen } \delta$) depois do RTFO.....	32
Figura 13: Ângulo de fase (δ) antes do RTFO.....	33
Figura 14: Ângulo de fase (δ) depois do RTFO.....	33
Figura 15: Grau de Desempenho antes e depois do RTFO.....	34
Figura 16: Compilância não-recuperável (Jnr).....	34
Figura 17: Porcentagem de Recuperação (%Rec).....	35
Figura 18: Diferença de Compilância (Jnr, diff%).....	35
Figura 19: Compilância não recuperável (Jnr).....	36
Figura 20: Porcentagem de Recuperação (%Rec).....	36
Figura 21: Diferença de Compilância (Jnr, diff%).....	37
Figura 22: Parâmetro A.....	37
Figura 23: Parâmetro B.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Amostras e nomenclaturas utilizadas.....	28
---	----

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AMP - Asfalto Modificado por Polímero

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres

ASTM - American Society for Testing and Materials

CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre

DSR - Reômetro de Cisalhamento Dinâmico

LAS - Varredura Linear de Amplitude e Deformação

NBR - Norma Brasileira

MSCR - Multiple Stress Creep Recovery

PG - Performance Grade

REDUC - Refinaria Duque de Caxias

RTFO - Estufa de Filme Fino Rotativo

SUPERPAVE - Superior Performing Asphalt Pavements

G^* - Módulo Complexo de Cisalhamento

G' - Módulo Elástico

G'' - Módulo Viscoso

T máx - Tensão de Cisalhamento Aplicada

$\gamma_{máx}$ - Deformação devido à Tensão de Cisalhamento

γ_E - Deformação Elástica

γ_{ER} - Deformação Elástica Retardada

γ_V - Deformação Viscosa

δ - Ângulo de fase

%REC - Porcentagem de Recuperação

Jnr - Compilância Não-Recuperável

Hz - Hertz

RESUMO

A utilização de novos materiais na composição do asfalto é uma prática que vem em grande evolução, sempre como novas alternativas que podem trazer benefícios financeiros, ecológicos e na própria estrutura do ligante. A resistência às deformações permanentes, trincas ocasionadas por fadiga ou por variações térmicas devem ser maximizadas a partir de novos constituintes do ligante asfáltico, garantindo que o rendimento do asfalto, diante dos diversos tipos de tráfegos, seja perfeito, trazendo conforto e segurança. Este projeto teve como objetivo analisar o comportamento reológico de ligantes asfálticos modificados por adição de lignina proveniente de eucalipto. Esse material, de grande abundância na natureza, representa 15% a 30% da constituição da madeira no reino vegetal. Assim, foram realizados ensaios de caracterização reológica, tais como: MSCR, LAS, PG e PG contínuo para o ligante asfáltico modificado por adições de 3%, 6% e 9% de lignina extraída de eucalipto para amostras nas fases normais e envelhecidas. Verificou-se que a adição de lignina promoveu melhorias ao ligante asfáltico através dos resultados desses ensaios, tais como: uma melhor resposta ao envelhecimento, resistência térmica superior, além de altos índices de rigidez e elasticidade para as estruturas dos ligantes asfálticos modificados.

PALAVRAS-CHAVE: Propriedades, ligante asfáltico, reologia.

ABSTRACT

The use of new materials in the composition of the asphalt is a practice that comes in great evolution, always as new alternatives that can bring financial benefits, ecological and in the own structure of the binder. The resistance to permanent deformations, cracks caused by fatigue or thermal variations must be maximized from new constituents of the asphalt binder, ensuring that the performance of the asphalt, in front of the different types of traffic, is perfect, bringing comfort and safety. This project aimed to analyze the rheological behavior of modified asphalt binders by adding lignin from eucalyptus. This material, of great abundance in the nature, represents 15% to 30% of the constitution of the wood in the vegetal kingdom. Thus, rheological characterization tests were performed, such as: MSCR, LAS, PG and continuous PG for the modified asphaltic binder by additions of 3%, 6% and 9% of lignin extracted from eucalyptus for samples in the normal and aged phases. It was found that the addition of lignin promoted improvements to the asphalt binder through the results of these tests, such as: better aging response, superior thermal resistance, and high stiffness and elasticity indexes for modified structures.

KEY WORDS: Properties, asphalt binder, rheology.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	13
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1 Materiais	25
3.2 Métodos	25
3.2.1 RTFO (ESTUFA DE FILME FINO ROTATIVO)	26
3.2.2 PG - Performance Grade	27
3.2.3 MSCR (Multiple Stress Creep Recovery)	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1 PG – Performance Grade	31
4.2 MSCR – Fluência e recuperação sob tensões múltiplas	35
4.3 LAS (Varredura Linear de amplitude e deformação)	41
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES FUTURAS	43
5.1 Considerações Finais	43
5.2 Sugestões para pesquisas Futuras	44
REFERÊNCIAS	45

1. INTRODUÇÃO

De uma maneira geral, o termo Reologia define-se como a ciência que estuda o fluxo e deformação da matéria. Essa análise ocorre mediante as tensões aplicadas diretamente no material para o conhecimento da estrutura, já que existe uma relação entre a forma molecular das substâncias em solução e sua viscosidade. A aceitação do produto em geral é dependente dos ensaios reológicos, que servem como controle de qualidade (MOTHÉ, 2009).

O asfalto é um dos mais versáteis e antigos materiais desenvolvidos pelo homem na engenharia civil, e o seu uso na pavimentação é de larga escala em questão de revestimento. Proporcionando a forte união dos agregados envolvidos, age como um ligante que permite flexibilidade controlável, alta resistência e durabilidade, e possui como principal constituinte, o betume, mistura de hidrocarbonetos solúvel no bissulfeto de carbono. Os pavimentos asfálticos possuem uma camada superficial de agregado mineral revestido e cimentada por asfalto sobre outra camada de base asfáltica, pedra e cascalho ou sobre concreto de cimento tipo Portland. Sabe-se que na mistura asfáltica empregada na pavimentação, cujos constituintes básicos são agregados, material de enchimento (filler) e o cimento asfáltico, este último, é utilizado como principal ligante dos agregados minerais, que representam cerca de 95% da mistura (MOTHÉ, 2009).

Com a deterioração e constante ampliação da malha viária no Brasil e no mundo, novas soluções e técnicas são de bastante importância, e novos componentes na formação do asfalto. A dependência por combustíveis fósseis, como os polímeros sintéticos, é prejudicial, causando grande impacto ambiental, e assim, alternativas baseadas em recursos renováveis tornam-se soluções.

A lignina é um polímero natural, o terceiro componente fundamental da madeira, como a do eucalipto, ocorrendo entre 15% e 35% de seu peso, e pode se associar ao ligante asfáltico, apresentando propriedades antioxidantes. Pode ser extraída nos diversos processos de extração na madeira, e além disso, muitas vezes é descartada quando não está sendo utilizada na queima para aproveitamento energético na própria indústria, o que vem despertando interesse no

desenvolvimento de alternativas para sua aplicação, também podendo implicar como fonte de renda extra para os próprios fabricantes de papel. Portanto, são indispensáveis soluções e desenvolvimento de tecnologias de materiais para pavimentação cada vez mais. É assim que surgem os asfaltos modificados e como alternativa para melhoria das propriedades dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP), a modificação por polímeros tem se mostrado eficaz em vários estudos que vem sendo realizados. Tais modificações serão estudadas para que possam atuar na estrutura do asfalto naturalmente, sem alterar ou prejudicar suas funções (SANTOS, 2008).

1.1 JUSTIFICATIVA

O estudo do comportamento de ligantes asfálticos é interessante devido à relação existente entre qualidade do pavimento e desempenho do ligante. A utilização de asfalto com agentes modificadores pode resultar na redução de custos na manutenção do pavimento como também uma diminuição no consumo de energia. Portanto, é importante caracterizar os ligantes asfálticos modificados a fim de se obter uma maior compreensão de suas propriedades físicas e reológicas e a partir dos resultados obtidos, analisar qual ligante desempenhará uma melhor função de acordo com o tipo de pavimento e local onde ele será executado.

A justificativa deste trabalho se encontra na importância de se procurar novas alternativas sustentáveis para melhorar as propriedades dos ligantes asfálticos e, conseqüentemente, a qualidade das estradas e rodovias.

Essa melhoria, por exemplo, poderá resultar diretamente na redução de acidentes, diminuição das perdas de insumos agrícolas, redução da manutenção em geral de automóveis, e conseqüentemente no aumento da vida útil dos mesmos (MOTHÉ, 2009).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como principal objetivo estudar as propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado por adição de lignina extraída do eucalipto.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar reologicamente o CAP 50/70 modificado por adição de lignina proveniente do eucalipto antes e após o envelhecimento a curto prazo;

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

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

Introdução – Introdução, Justificativa, Objetivos da Pesquisa e Organização deste estudo.

Fundamentação Teórica que trata de assuntos relacionados ao ligante asfáltico, propriedades, usos aplicações e sobre a lignina- extração, procedimentos e usos.

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 a adição de lignina extraída do pinus ao ligante convencional.

Considerações Finais e sugestões para pesquisas futuras – São apresentadas as considerações obtidas acerca da pesquisa e as sugestões para estudos sobre o tema.

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

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – O Asfalto

O asfalto é um dos materiais mais utilizados e antigos da construção civil. De grande versatilidade, suas aplicações são inúmeras, e a principal delas é na pavimentação. O Brasil, por exemplo, possui cerca de 95% de suas estradas são de revestimento asfáltico. Isso se explica por suas várias vantagens, como: forte união dos agregados; alta durabilidade e resistente a ácidos, álcalis e sais; é impermeabilizante; permite o controle na flexibilidade, em amplas combinações com aditivos e modificadores (BERNUCCI et al., 2007).

Algumas definições são importantes e empregadas como referência ao material, como:

- Asfalto: tem o betume como principal componente, podendo conter outros materiais. É uma mistura de hidrocarbonetos do petróleo, naturais ou destilados.
- Betume: geralmente é compreendido como hidrocarbonetos solúveis e bissulfetos de carbono misturados;
- Alcatrão: obtido a partir da queima/destilação do carvão ou madeira. É uma forma genérica de um material composto também por hidrocarbonetos.

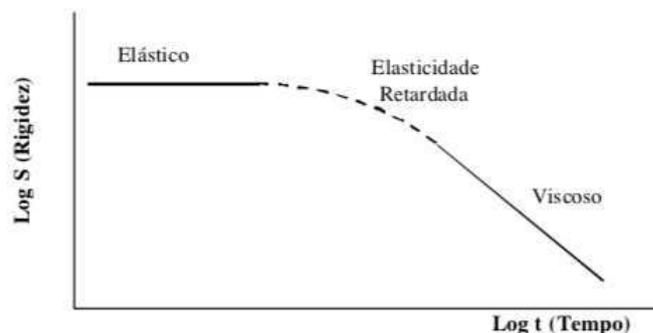
Quanto a terminologia, para os europeus, geralmente é utilizada o termo 'betume' para caracterizar o ligante obtido do petróleo. Enquanto que no Brasil e Estados Unidos, o termo usado é o 'asfalto', além do CAP para designação desse produto semissólido a baixas temperaturas, líquido para altas temperaturas e visco-elástico à temperaturas ambientes. (BERNUCCI et al., 2007).

Os bolsões de asfalto são a forma primária de encontrá-los. Encontrados em jazidas, são originados da evaporação das partes mais voláteis do petróleo. O que representa, nos dias de hoje, quase toda a produção de asfalto derivada da destilação de petróleo em refinarias.

Quimicamente, existem quase 1500 tipos de petróleos explorados no nosso planeta, mas somente a minoria é aproveitada para produção do asfalto. A composição química do asfalto tem influência nas propriedades físicas e mecânicas do asfalto, porém, sua maior importância será nos processos de inclusão dos agentes modificantes, como os polímeros (Shell, 2003).

Quanto a essas propriedades físicas e mecânicas, tornaram-se bem complexas para a engenharia. Apresenta uma certa viscosidade (Figura 01), diminuindo a rigidez em relação ao tempo em que sofre um carregamento em longos períodos.

Figura 01 - Comportamento do ligante asfáltico em função do tempo x carga (adaptada de ROBERTS et al., 1998).



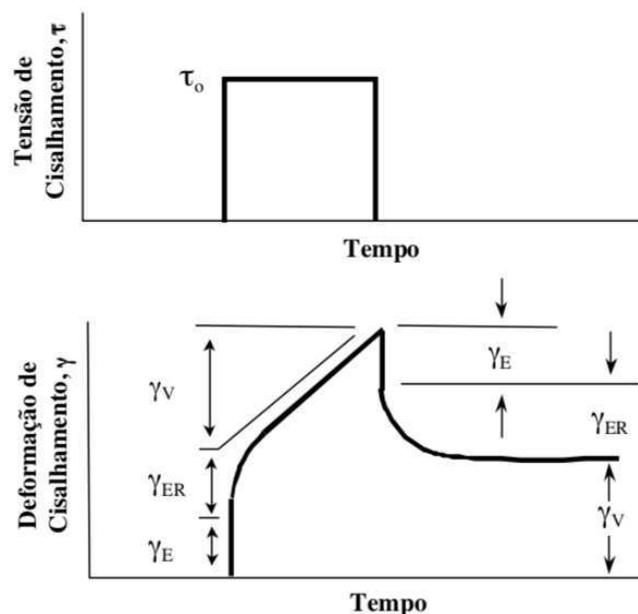
O cimento asfáltico é o produto predominante, tanto nas emulsões, quanto nos asfaltos diluídos. Quando se há a evaporação dos demais produtos como água e solventes, o cimento asfáltico torna-se determinante no desempenho das misturas asfálticas. Como na termoplastia, característica que proporciona a viscosidade quando aquecidos demais e a solidificação ao retornar a temperatura ambiente. Isso representa uma importante propriedade, visto que, os asfaltos são expostos a grandes carregamentos e variações de temperaturas entre -20°C e 60°C, para longos períodos de tempo (ANP, 2012).

2.2 – Reologia dos Ligantes Asfálticos

A reologia mostra por meio de teorias e práticas, como se comporta tal material, submetido a cargas por determinados períodos de tempo, no quesito de tensão e deformação, sempre relacionando as condições ambientais, tipo de sollicitação, etc. Logicamente, a reologia do asfalto representa os modelos de tensão x deformação do material ao longo do tempo, e assim, o conceito de rigidez de um cimento asfáltico se dá pela relação (tensão x deformação) para determinada carga e temperatura (GAMA, 2016).

Inicialmente, durante um carregamento, o material sofre uma deformação elástica (γ_E) no momento, e durante toda aplicação dessa carga sofre uma somatória de uma componente elástica retardada (γ_{ER}) com uma componente viscosa (γ_V). Após essa atuação das cargas, a deformação elástica é recuperada, a retardada necessita de um período de recuperação e a deformação permanente é constituída pela componente viscosa. Na figura 02, todo processo é ilustrado.

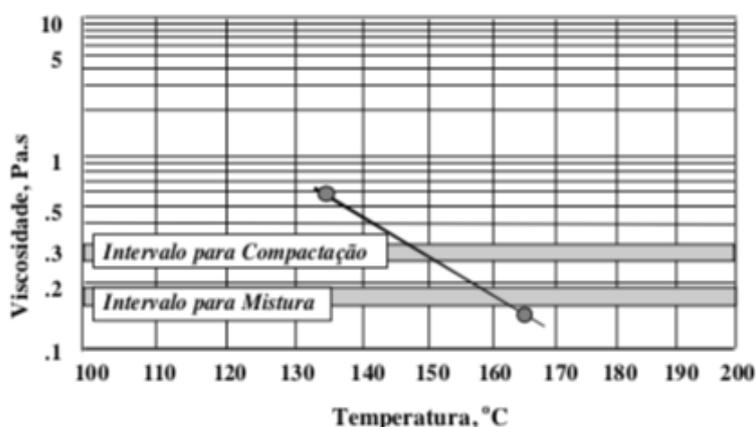
Figura 02 – Ligante asfáltico sob carregamento e sua resposta visco-elástica, com componentes elásticas (γ_E), elástica retardada (γ_{ER}) e viscosa (γ_V) (modificada de CHRISTENSEN e ANDERSON, 1992)



O ligante asfáltico deve apresentar um comportamento de um fluido antes de ser utilizado, para as fases de mistura (normalmente em usinas), lançamento e compactação. Isso aumenta a eficiência da compactação e a mistura com agregados minerais. O que está relacionado com a viscosidade também são as altas temperaturas, e esse comportamento viscoso é definido pela relação tensão x deformação, de cisalhamento, aplicadas no material.

Para a compactação do ligante asfáltico, a taxa mais indicada de viscosidade é em torno de 0,25 e 0,31 Pa.s (Pascal. segundo). Para misturas, algo entre 0,15 e 0,19 Pa.s. Com esses dados, determina-se a temperatura ideal para a compactação no campo e as misturas em usinas. A figura 03 ilustra os intervalos de temperaturas:

Figura 03 – Intervalos de temperatura em função da viscosidade para compactação e mistura do ligante asfáltico (adaptada de ROBERTS et al., 1998)



Essa temperatura não deve ser muito elevada. Por questões de segurança, é recomendado que o ponto de fulgor, nível em que o ligante asfáltico é considerado um material inflamável, seja controlado, para que não ocorra uma liberação de vapores, e o risco de serem geradas centelhas.

O envelhecimento é outra característica que deve ser analisada. As moléculas de oxigênio do meio ambiente reagem com as orgânicas que compõem o cimento asfáltico, formando uma capa asfáltica mais rígida e dura pela oxidação. Naturalmente, quando os ligantes são misturados aos agregados minerais, as substâncias tendem a envelhecer em um pequeno período de tempo, como também, ao longo de sua vida útil, os pavimentos, sofrem carregamentos e influências ambientais que resultam no envelhecimento a longo prazo. Portanto, é essencial a análise do envelhecimento dos ligantes: na sua fase de produção e aplicação, como também no seu serviço durante sua utilização (WHITEOAK, 1990).

Foi criada uma metodologia chamada SUPERPAVE, por meio do programa SHRP, em 1987 nos Estados Unidos, em que novos ensaios foram implantados para avaliar o caráter dos ligantes a partir de seus resultados. De acordo com essa metodologia, os ensaios de avaliação das propriedades reológicas são realizados nos equipamentos: RTFO - Estufa de Película Delgada Rotacional (Rolling Thin Film Oven); PAV - Vaso de Pressão de Envelhecimento (Pressure Aging Vessel); DTT – Prensa de Tração Direta (Direct Tension Test); Viscosímetro Rotacional; BBR – Reômetro de Flexão de Viga (Bending Beam Rheometer) e o DSR - Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (Dynamic Shear Rheometer). O RTFO simula o envelhecimento do asfalto pelo ligante a curto prazo, enquanto o reômetro aplica tensões para verificar o comportamento elástico e viscoso do ligante (MELLO, 2014).

A Partir de 1990, o teste pelo Grau de Performance (PG) foi introduzido para classificar os ligantes. Avalia-se o desempenho do ligante nas temperaturas em que ele exerce sua função, relacionando suas propriedades com as condições em que ele é submetido. Isso abrange, por exemplo, suas condições climáticas, envelhecimento e temperaturas do ambiente e do próprio ligante (MARINHO FILHO, 2017). Com base na norma ASTM 6816/11, é necessário a realização do ensaio de BBR para determinação da temperatura mínima de PG, porém, uma grande disponibilidade de tempo também é necessária para que amostras sejam condicionadas. Alguns pavimentos no Norte do planeta sofrem trincas prematuras e tornam-se subprojetados, por exemplo (KANABAR, 2010).

Para estabelecer novos parâmetros, a SUPERPAVE procurou relacionar situações mais reais de carregamentos em pavimentos de campo e desenvolveu o

teste de Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas (MSCR). É analisado a resposta elástica do ligante asfáltico para duas cargas bem distintas, aplicadas em ciclo a uma temperatura encontrada no PG. É encontrada uma resposta das deformações em relações a tensões aplicadas, a partir do Percentual de Recuperação e Compilância Não-Recuperável. Ou seja, é observada toda a resistência do material à deformação permanente, além do seu comportamento elástico de retorno.

A AASHTO TP 101-12 (2012) apresentou um novo ensaio para medição de algumas propriedades reológicas do ligante. O LAS (Varredura Linear de Amplitude) baseia-se na aplicação de carregamentos cíclicos com amplitudes de cargas linearmente crescentes, medindo a resistência ao dano de ligantes asfálticos (LUZ, 2019).

Toda essa compreensão das propriedades reológicas dos ligantes asfálticos é fundamental para solucionar diversos problemas em situações práticas. Como nos defeitos na superfície do pavimento e na diferenciação dos ligantes de diferentes processos de refino e petróleo, possibilitando a escolha da temperatura de usinagem e compactação de misturas. Rigidez, elasticidade, viscosidade e fluência são algumas dessas propriedades que afetam o desempenho do asfalto, e variam de acordo com o processo de produção da mistura asfáltica e durante a etapa de serviço do pavimento (MOTHÉ, 2009).

2.3 – Ligantes Modificados

Não é de hoje que diversos tipos de materiais são usados na adição ao ligante do asfalto, visando a melhoria em algum tipo de característica. Em 1823, T. Hancock fez uma combinação de uma borracha natural, como forma de impermeabilizar. Já a primeira patente de uma mistura de material betuminoso com borracha natural para a construção de estradas foi obtida por E.E. Castell em 1844. Já a primeira estrada construída com asfalto modificado por borracha ocorreu em 1902, em Cannes (ZANZOTTO e KENNEPOHL, 1996).

O ligante asfáltico modificado é aquele que foi adicionado algum tipo de agente modificador, seja de origem natural, polimérica ou sintética. Os ligantes

convencionais, por mais que sejam totalmente adequados a suas funções nos pavimentos, acabam necessitando desses agentes modificadores por fatores como:

- Aumento no peso dos veículos em geral;
- Aumento da carga por eixo em veículos grandes;
- Aumento do tráfego;

Esses fatores e vários outros fizeram com que surgisse uma demanda no desenvolvimento de uma maior resistência no revestimento asfáltico. É uma melhor opção para melhoria das propriedades reológicas e a resolução de vários problemas (SOARES et al., 2002).

Há vantagens também nos aspectos ambientais. A melhoria das propriedades do ligante asfáltico por meio de modificadores é uma prática totalmente importante nos dias atuais. Cada dia mais, os materiais para extração no meio ambiente mundial estão em escassez, e novas alternativas devem ser exploradas, trazendo vantagens na produção e uso.

Por isso, deve-se entender que o material que contém o agente modificador não deva existir em pequenas quantidades para que o material seja econômico e de fácil acesso. Além disso, deve suportar temperaturas que o ligante é submetido, possuir estabilidade química e física durante todos os processos, ser misturado em equipamentos comuns, garantir trabalhabilidade com os agregados, etc. Resumindo, ser totalmente compatível com o ligante asfáltico em que vai ser adicionado (READ e WHITEOAK, 2003).

Segundo Polacco *et al.* (2004), a escolha do teor do polímero adicionado tem influência no custo e grau de desempenho do pavimento. Geralmente é escolhido o teor do polímero entre 4% e 6%, que resulta na diminuição da suscetibilidade térmica, redução de deformações permanentes, conseqüentemente no aumento do desempenho mecânico. Ainda foi destacado que essas melhorias provenientes da adição dos modificantes só serão observadas a longo prazo, a necessidade de manutenção do asfalto reduzirá. Portanto, maiores custos iniciais para adição desses modificadores e a pouca necessidade de manutenção são uma solução mais viável se comparado a ter baixos custos iniciais e várias manutenções ao longo dos anos para os asfaltos.

2.4 – Lignina

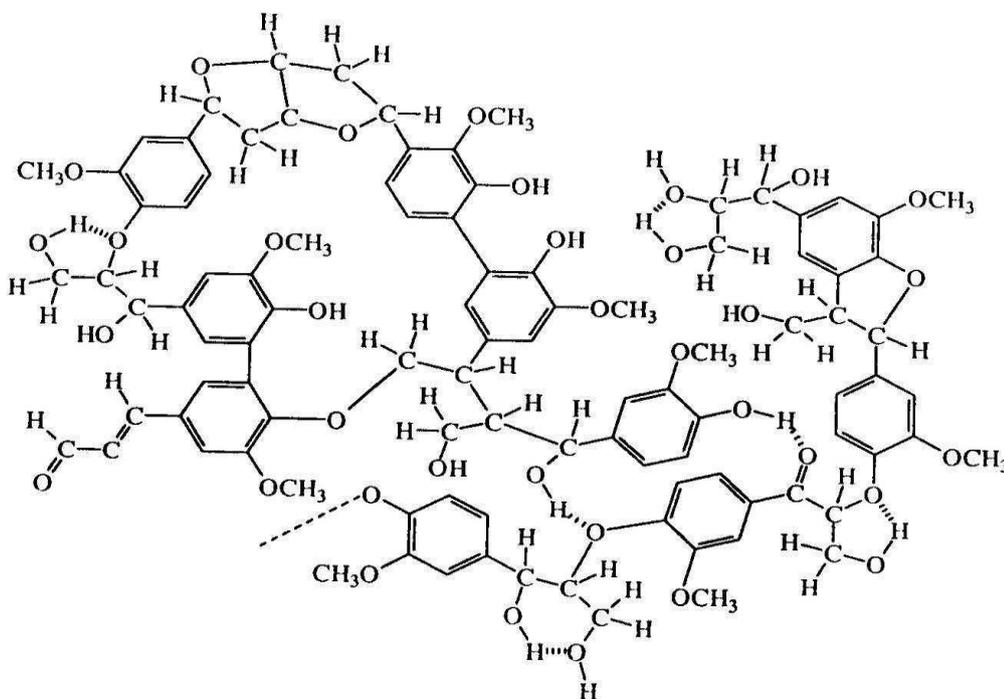
A madeira é um material orgânico, sólido, de composição complexa, constituída quimicamente por dois grandes grupos:

- Alta Massa Molecular: Celulose, Hemicelulose e Lignina
- Baixa Massa Molecular: Cinzas e Extrativos

A lignina é um dos polímeros naturais mais presentes na natureza e nas indústrias de produção de fibras celulósicas (MORAIS et al., 2005).

Quanto a sua estrutura, a lignina é um polímero bem complexo, aromático e amorfo. É uma macromolécula tridimensional e heterogênea que está presente na maioria dos vegetais. Suas unidades monôméricas não se repetem de maneira contínua e são cobertas por várias ligações químicas diferentes, comprovando sua complexidade estrutural. A Figura 04 ilustra uma estrutura hipotética da lignina:

Figura 04 – Estrutura da Lignina



Fonte: InfoEscola

É um composto muito importante para a madeira. São responsáveis pela rigidez da parede celular e oferecer resistência mecânica, atuam diretamente na proteção da planta contra organismos prejudiciais, além de realizarem o transporte de nutrientes e água. No entanto, a lignina e seus derivados possuem uma aparência amarelada, dificultando os processos de branqueamento nas fábricas de papel, e tornam-se substâncias indesejadas nessa área (FERNANDES, 2005).

Grande parte das ligninas possuem enxofre na sua constituição, o que pode comprometer seu desempenho quando combinados a outros materiais na adição. Mas esse elemento encontrado nas ligninas reage com o oxigênio rapidamente antes de ocorrer o envelhecimento por oxidação com qualquer outro composto do ligante. Porém, sabendo da alta variabilidade química da estrutura química da lignina, a presença do enxofre torna-se prejudicial as funções da lignina quando combinados, sendo ideal uma estrutura mais uniforme para as propriedades de um pavimento mais adequado (WILLIAMS e MCCREADY, 2008).

2.4.1 – Uso da Lignina de Eucalipto em Ligantes Asfálticos

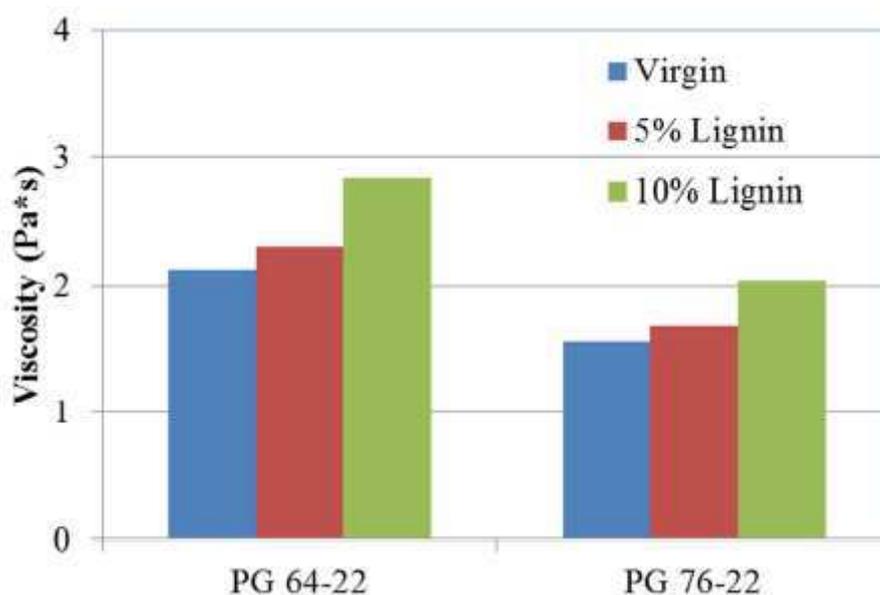
O descontrolado uso de combustíveis fósseis traz problemas globais como poluição ambiental, alterações climáticas. Isso nos conduz a procura por alternativas sustentáveis, como a biomassa para materiais. A biomassa lignocelulósica serve como matéria-prima renovável para coprodução de materiais, em fontes biológicas de largo uso e que podem gerar alta quantidade de resíduos e material descartado, como o Eucalipto (BATISTA, 2017).

O Eucalipto é uma espécie que possui diversas propriedades químicas e físicas e são usados para inúmeras finalidades, como: celulose e papel, estacas, lenha, movelaria, entre outros. São originados da Austrália, Tasmânia e outras ilhas, com mais de 700 espécies reconhecidas botanicamente. Os primeiros exemplares de Eucalipto foram introduzidos no Brasil em torno de 1825, no Jardim Botânico e Museu Nacional do Rio de Janeiro. Por ter rápido crescimento, potencial econômico e boa adaptação a diversas regiões, se difundiu rapidamente e passou a ser cultivada em todas as regiões do país. Sua produtividade depende de diversos fatores, como o trato adequado, local e insumos disponibilizados, e seu cultivo

possui várias orientações técnicas e indicações. Para a economia brasileira, tem grande influência comercial, já que são plantados anualmente em torno de 5,5 milhões de hectares atualmente, segundo a Indústria Brasileira de Árvores (EMBRAPA, 2017).

A reologia dos ligantes asfálticos virgens e modificados foram analisadas em alguns testes, para dois tipos de asfaltos, feitos por Wang e Derewecki (2013). Feitos no reômetro (DSR) e por viscosidade rotacional, foram encontrados valores para a viscosidade do ligante modificado, indicando crescimento de até 30% para alguns teores de lignina adicionada. Isso remete a uma elevação nas temperaturas de usinagem e compactação, processos da produção do pavimento. A Figura 05 ilustra esse aumento da viscosidade para cada teor de lignina:

Figura 05 – Viscosidade para os dois tipos de asfalto, PG 64-22 e PG 76-22.



Fonte: Wang e Derewecki, 2013.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Para realização desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

- ✓ CAP 50/70, obtido pelo processo de destilação do petróleo pela refinaria Duque de Caxias (REDUC), pertencente à Petrobras S/A, e distribuído, pela empresa Brasquímica Produtos Asfálticos Ltda, localizada no município de Candeias-BA. A Figura 06 ilustra o CAP 50/70:

Figura 06 – CAP 50/70



- ✓ Lignina, utilizada neste estudo foi extraída do eucalipto e cedida pelo Laboratório de Química Inorgânica da Universidade Federal de Viçosa.

3.2 Métodos

A metodologia utilizada para desenvolvimento desta pesquisa segue as normas da ASTM e da AASHTO. Toda essa metodologia foi aplicada para as amostras e suas respectivas nomenclaturas, conforme Tabela 01.

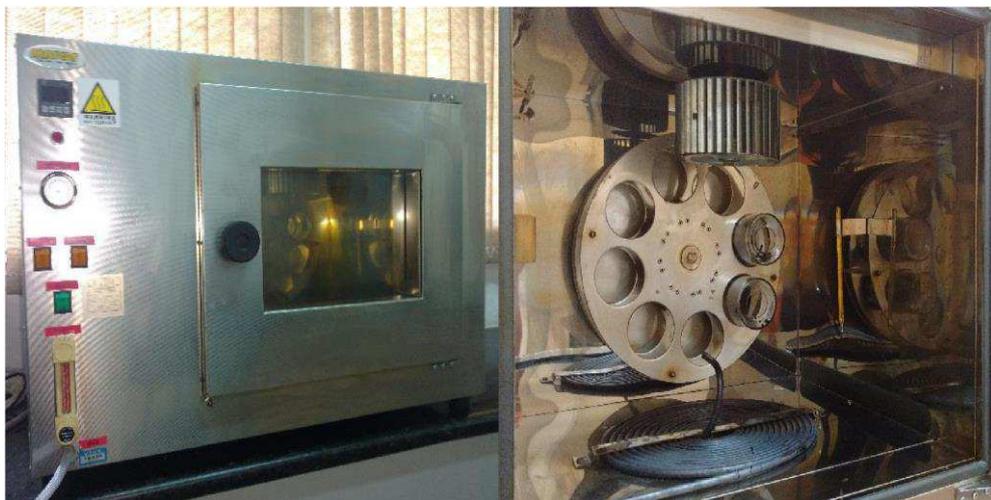
Tabela 01 – Amostras e nomenclaturas utilizadas

Amostras	Nomenclatura
Ligante puro convencional	CAP 50/70
CAP 50/70 + 3% Lignina Eucalipto	3% Eucalipto
CAP 50/70 + 6% Lignina Eucalipto	6% Eucalipto
CAP 50/70 + 9% Lignina Eucalipto	9% Eucalipto

3.2.1 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. A Figura 07 ilustra a estufa RTFO e suas partes externas e internas.

Figura 07 – Estufa RTFO externamente e internamente.



Fonte: Artur, 2018.

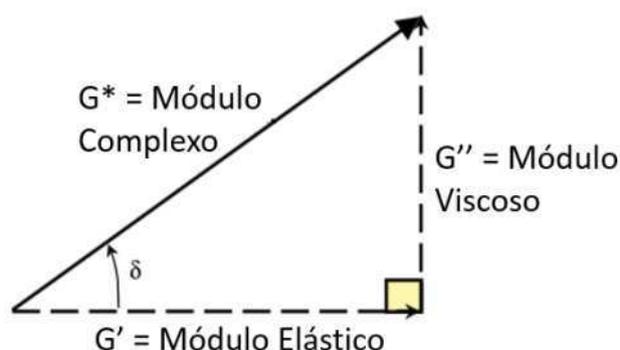
O procedimento possibilita a identificação de mudanças nas propriedades do asfalto que podem ocorrer durante a usinagem a 150 °C, verificadas por variações nas propriedades de consistência. Também pode ser usado para se determinar a variação de massa indicando assim a volatilidade ou oxidação do asfalto.

3.2.2 PG - Performance Grade

A especificação de ligantes SUPERPAVE é baseada na rigidez do material virgem e envelhecido, medidas numa combinação de propriedades visco elásticas, influenciadas por temperatura e tempo de carregamento (MCGENNIS *et al*, 1994). São estabelecidas classes pelo grau de desempenho dos ligantes (PG-Performance Grade) ligado a temperatura de campo, por exemplo, PG 64-22, onde o primeiro número 64, chamado de grau a alta temperatura, significa que o mesmo possui propriedades físicas adequadas até 64°C e o -22 chamado grau a baixa temperatura, significa que o ligante possui propriedades físicas compatíveis com a temperatura do pavimento até -22°C.

Nesse ensaio, usa-se o equipamento DSR (Figura 09) para analisar as características de elasticidade e rigidez às temperaturas elevadas, e para os limites superiores será admitido a relação $G^*/\sin \delta$, com no mínimo 1,00 kPA para amostras antes do envelhecimento, e de 2,20 kPA após RTFO (GAMA, 2016). A Figura 08 ilustra os principais parâmetros visco elásticos obtidos no DSR:

Figura 08 – Vetores do módulo complexo.



Fonte: Marinho Filho.

Figura 09 – Reômetro de Cisalhamento Direto (DSR).



O Módulo Complexo (G^*) é definido pela razão do máximo de tensão aplicada/máximo de deformação, ou seja, está relacionado com a quantidade de resistência do asfalto quando submetido por cargas. Os vetores comprovam, observando que quanto maiores o Módulo Elástico (G') e o Módulo Viscoso (G''), maior será a resultante, o Módulo Complexo.

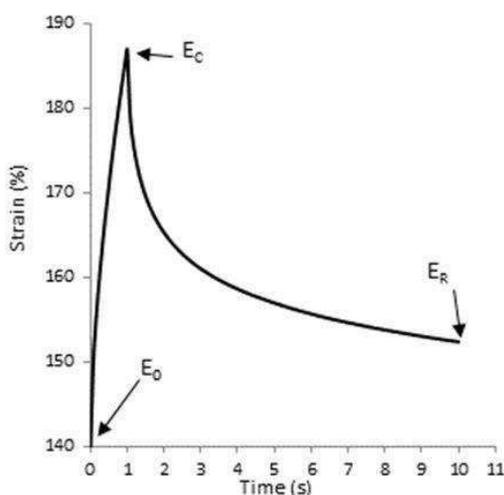
Para os limites inferiores, as temperaturas negativas não caracterizam o clima brasileiro, e os testes são mais complexos e necessitam de uma grande quantidade de tempo para realização, pelo ensaio de BBR, com base na norma ASTM D 6816/11 (KANABAR, 2010).

3.2.3 MSCR (Multiple Stress Creep Recovery)

A American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) utiliza o reômetro de cisalhamento dinâmico ou DSR (*Dynamic Shear Rheometer*) para um ensaio conhecido como *Repeated Creep and Recovery Test* (RCRT), para a caracterização da resistência dos ligantes asfálticos à deformação permanente e recentemente foi proposto seu aperfeiçoamento e agora é conhecido como ensaio de Fluência e Recuperação Sob Tensão Múltipla (*Multiple Stress Creep Recovery*-MSCR).

A execução do MSCR é feita com a amostra submetida ao envelhecimento de curto prazo no RTFO. No ensaio é utilizado o Reômetro de Cisalhamento Direto (DSR) para aplicar uma carga constante que é estabelecida pela norma ASTM D7405, cujos valores são de 100 Pa e 3200 Pa. O tempo de execução dessa carga é determinado em 1s, seguido de 9s de repouso, formando um ciclo total de 10 segundos que é repetido por 10 vezes. (LUZ, 2019). O comportamento do ligante é mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Representação do ensaio de MSCR.



Fonte: Scielo, 2017.

Calcula-se o Jnr e %Rec da seguinte forma:

$$Jnr (\sigma, N) = \frac{\text{Deformação não recuperada}}{\text{Tensão aplicada}}$$

$$\% Rec (\sigma, N) = \frac{\text{Pico de tensão} \times \text{Deformação não recuperada} \times 100}{\text{Pico de tensão}}$$

Observa-se a Compilância Não-Recuperável (Jnr), que representa a parcela do ligante asfáltico que não atende a propriedade elástica, ou seja, não retorna as

suas condições iniciais após essas cargas. Por outro lado, existe a porcentagem de recuperação (%Rec).

A diferença de Compilância Não-Recuperável entre as duas cargas também será importante para garantir que o material não seja tão sensível à variação dos níveis de tensão:

$$Jnr \text{ diff} = \left(\frac{Jnr \ 3200 - Jnr \ 100}{Jnr \ 100} \right) \times 100$$

3.2.4 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.

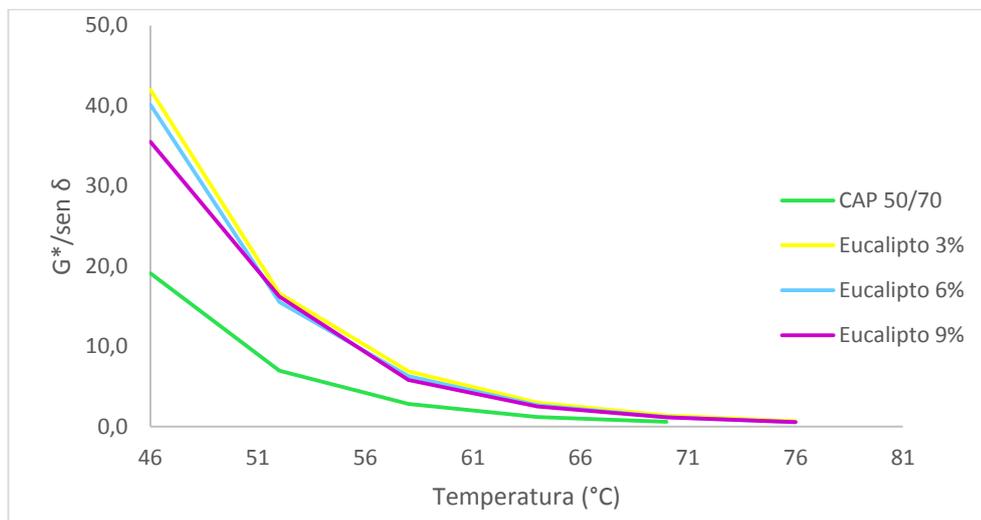
Para estes ensaios será utilizada a temperatura de 25°C e a sequência de carregamentos consiste em intervalos de 10 segundos a uma amplitude de deformação constante, sendo cada intervalo seguido por outro intervalo com uma amplitude de deformação maior. Após estas etapas são feitas leituras do comprimento das trincas ocasionadas nas rupturas por fadiga para posterior análise (PAMPLONA, 2013).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PG – Performance Grade

As Figuras 11,12,13,14 e 15 apresentam os resultados obtidos para PG – Performance Grade.

Figura 11 – Parâmetro ($G^*/\text{sen } \delta$) antes do RTFO.

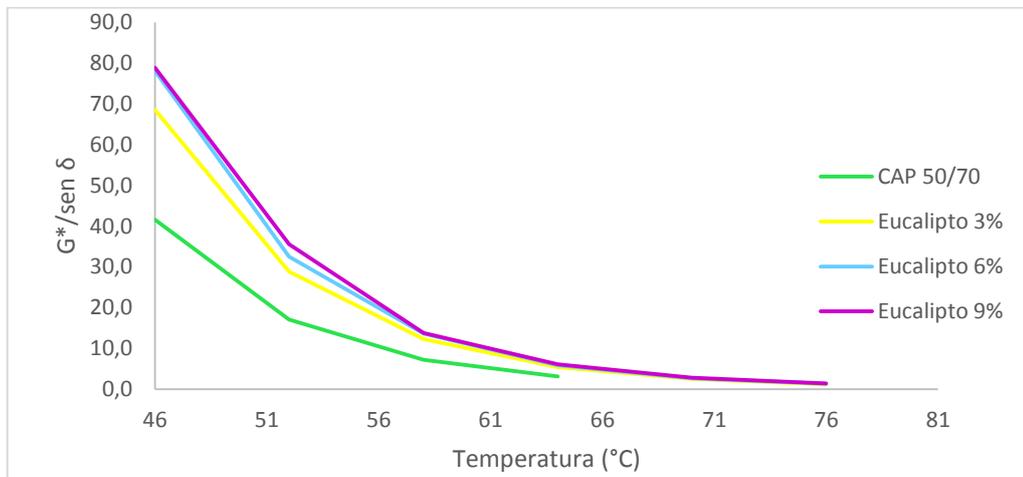


O Parâmetro ($G^*/\text{sen } \delta$) é diretamente proporcional ao Grau de Desempenho, que representa os intervalos de temperatura que o ligante atua perfeitamente, e assim, é um parâmetro que indica rigidez e resistência à deformação.

Para menores temperaturas, a amostra de Eucalipto 3% atingiu valores maiores desse parâmetro, e ao elevar a temperatura, todas tenderam a zero, chegando a um nível de temperatura máximo e rigidez mínima. A amostra de Eucalipto 9% suportou a maior temperatura antes de zerar o Parâmetro e atingir condições inadequadas de uso, enquanto que a amostra do CAP 50/70 foi a de menor alcance.

As amostras modificadas, no geral, alcançaram níveis maiores do Parâmetro ($G^*/\text{sen } \delta$) e suportaram maiores temperaturas antes do nível de rigidez mínimo, que é no Parâmetro zerado.

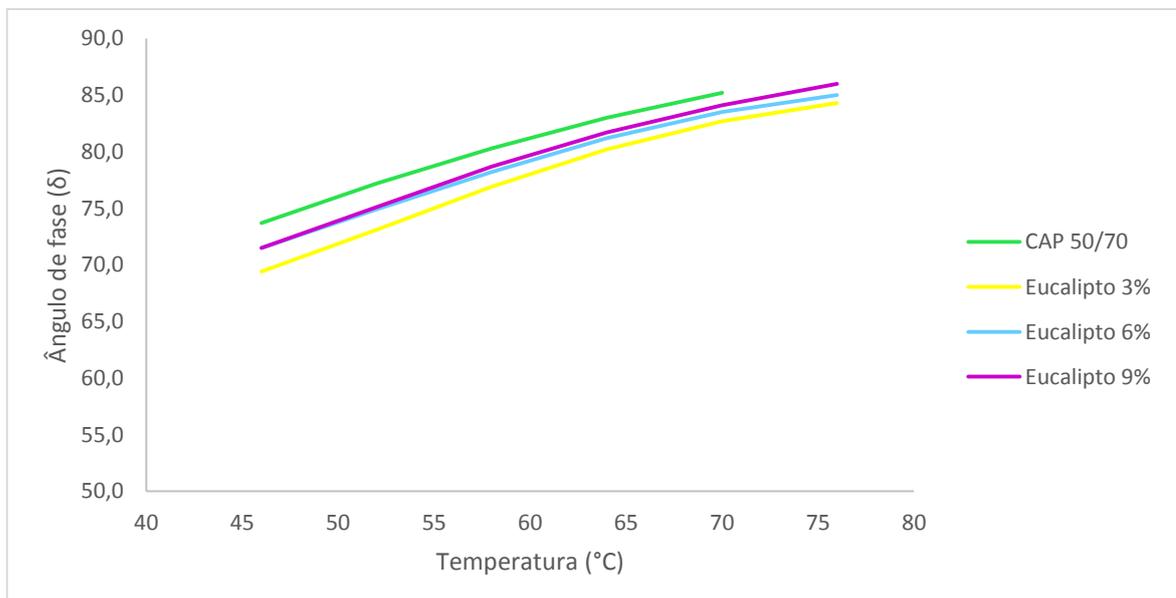
Figura 12 – Parâmetro ($G^*/\text{sen } \delta$) depois do RTFO.



O Parâmetro ($G^*/\text{sen } \delta$) dos ligantes cresceu para as três amostras modificadas pelo polímero, tanto antes como após envelhecimento. Um maior Módulo Complexo (G^*) representa uma maior consistência aos ligantes, que conseqüentemente, rigidez e resistência à deformação. Esse módulo é diretamente proporcional ao Parâmetro ($G^*/\text{sen } \delta$).

As Figuras 13 e 14 apresentam os resultados obtidos para o ângulo de fase do ligante em estudo antes e após RTFO.

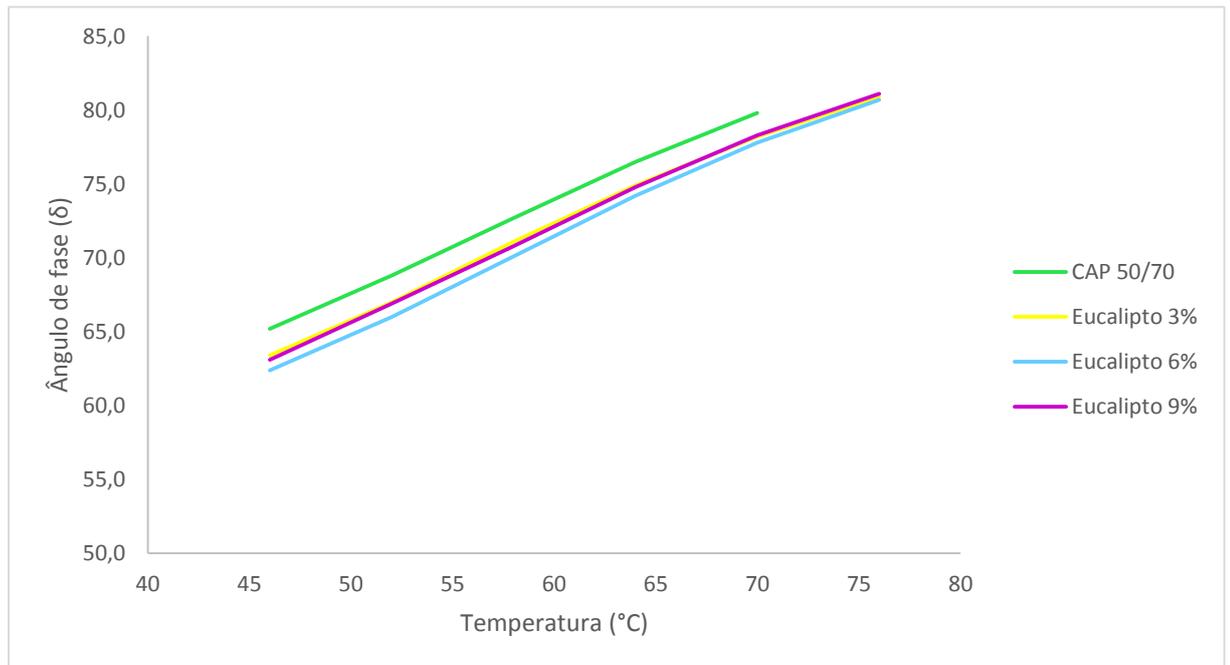
Figura 13 – Ângulo de fase (δ) antes do RTFO.



Nos ligantes modificados, antes do envelhecimento a curto prazo, os ângulos de fase foram inferiores ao do CAP 60/70, significa que o ligante puro é menos eficiente ao retornar à posição inicial depois dos carregamentos. Com o aumento da temperatura, os ângulos em geral cresceram, e o Módulo de Elasticidade diminuiu.

A amostra de Eucalipto 3% foi a que obteve a melhor resposta elástica, pois ao decorrer desse crescimento de temperatura dos estudos, sempre se manteve abaixo das demais.

Figura 14 – Ângulo de fase (δ) após RTFO.



Como já foi dito, as adições da lignina tornam os ângulos de fase bem inferiores, o que representa uma melhora em seu comportamento elástico. Isso é explicado pela proximidade do ângulo de fase do CAP 50/70 mais próximo de 90°, que significa menos elástico. Após o RTFO, a amostra Eucalipto 6% obteve menores ângulos com o aumento da temperatura, garantindo essas propriedades.

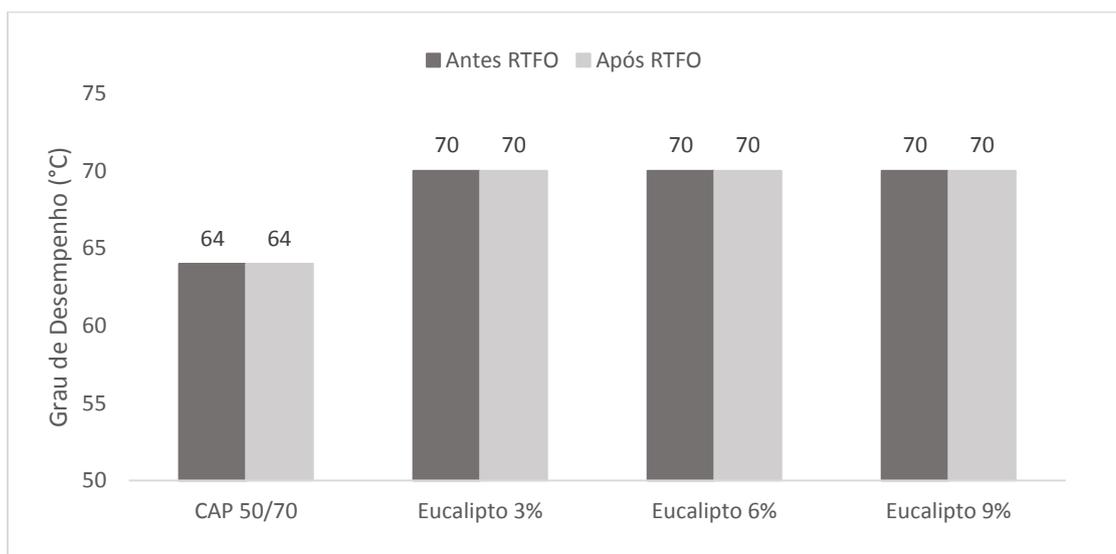
A medida que houve incremento de temperatura, os ligantes, em todas as amostras obtiveram altos ângulos de fase e redução nos Parâmetros ($G^*/\sin \delta$), inversamente proporcionais. Ou seja, o aumento da temperatura causou melhores

respostas quanto a rigidez e elasticidade, antes do RTFO, para os ligantes modificados.

Segundo Leite *et al.* (2009), a análise do envelhecimento dos ligantes asfálticos é muito importante. Ele se associa ao enrijecimento dos asfaltos, e conseqüentemente, causarão um mal funcionamento da estrutura. A sensibilidade dos parâmetros ($G^*/\text{sen } \delta$) e ângulo de fase controla essa consistência e perdem a sensibilidade com o efeito da temperatura.

A Figura 15 ilustra os resultados obtidos para o Grau de Desempenho obtido para o ligante em estudo antes e após RTFO.

Figura 15 – Grau de Desempenho antes e após RTFO.



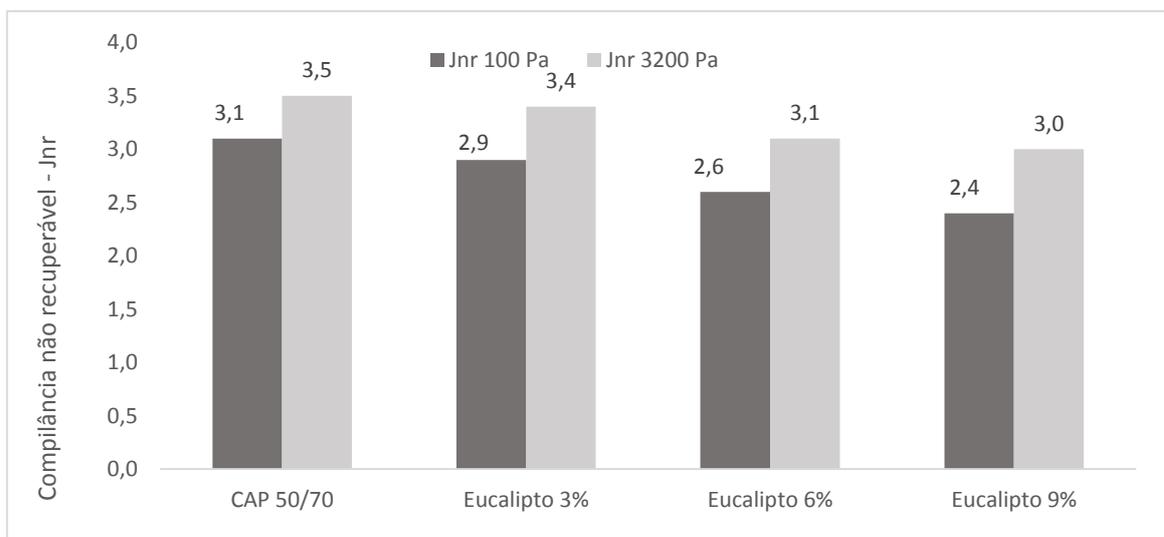
Notou-se que a adição da lignina aumentou bastante as temperaturas de falha no Grau de Desempenho, ou seja, o intervalo das temperaturas em que o ligante atua de forma ideal é mais extenso, tanto na virgem, quanto no envelhecido. Isso representa um aumento na resistência ao envelhecimento dos ligantes modificados.

O limite superior da temperatura nas amostras modificadas para as três amostras com teores diferentes atinge 70°C com perfeitas condições de trabalhabilidade, enquanto que para os ligantes puros, a temperatura máxima ideal chega a 64°C. As temperaturas mínimas foram desprezadas, já que as regiões de estudo não são submetidas a temperaturas muito negativas.

4.2 MSCR – Fluência e recuperação sob tensões múltiplas

As Figuras 16 e 17 ilustram respectivamente os resultados obtidos para a Compilância Não-Recuperável e a porcentagem de Recuperação (%Rec) do ligante em estudo a 70°C:

Figura 16 – Compilância Não-Recuperável (Jnr).

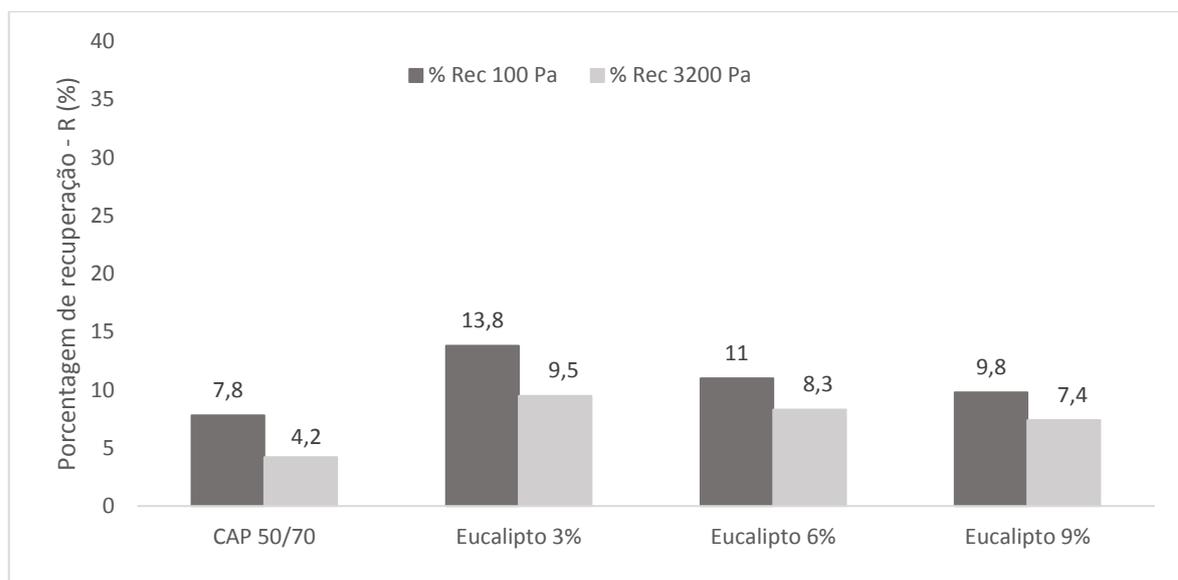


A Compilância Não-Recuperável (Jnr) é importante para avaliação reológica dos ligantes, usa-se para medir as deformações permanentes do ligante à altas temperaturas. Menores valores representam alta resistência do material a este fenômeno, enquanto que maiores valores significam alta suscetibilidade do ligante (D'ANGELO *et al.*, 2007).

Podemos analisar que após os testes realizados, o Jnr para 70°C, dos ligantes modificados apresentaram índices menores. Destaca-se a amostra de Eucalipto 9%, com números bem abaixo da amostra de CAP 50/70, e a maior resistência à deformação permanente.

Segundo a AASTHO M320 (2016), a classificação é baseada no valor de Jnr à 3200 Pa, e os resultados mostram que todas as amostras, inclusive a do CAP 50/70, atenderam ao Volume de Tráfico Padrão, que é de no máximo 4,0. Isso representa, por exemplo, que o número de passadas no eixo padrão dos asfaltos em teste não podem ultrapassar 10 milhões.

Figura 17 – Porcentagem de Recuperação (%Rec).



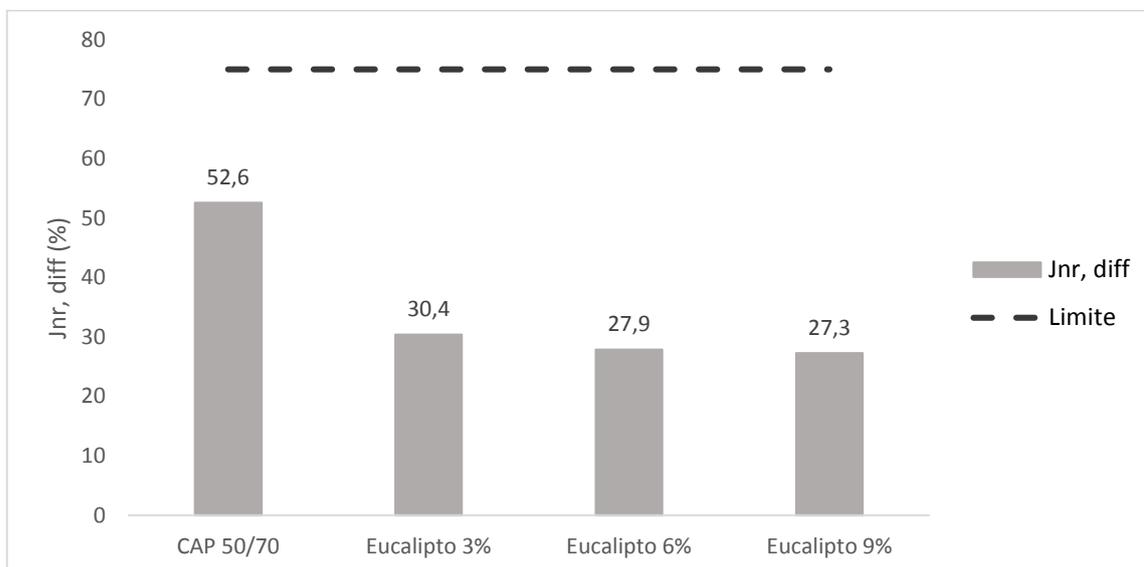
Ao contrário da Compilância Não-Recuperável, a Porcentagem Recuperada (%Rec) representa toda capacidade elástica do ligante de retorno ao estado inicial após as tensões aplicadas, número superior para as amostras modificadas pelo polímero (GOLALIPOUR, 2011).

A Porcentagem de Recuperação (%R), para a temperatura de 70°C, dos ligantes modificados apresentou números superiores. Isso representa uma maior parcela atingindo o ponto de estado inicial para cada ciclo carga-descarga. Inicialmente são aplicadas as tensões de 100 Pa e 3200 Pa por 1 segundo, há um repouso de 9 segundos para avaliação do comportamento, e foi constatado que as amostras modificadas reagem melhor às deformações, com resistências maiores.

A amostra Eucalipto 3% obteve a melhor resposta elástica nessa análise de %R. Para todas as amostras, a recuperação foi superior diante das cargas de 100 Pa do que 3200 Pa, ou seja, para cargas menores, a resposta elástica é mais eficiente nos ligantes asfálticos.

A Figura 18 ilustra os resultados obtidos para a diferença de Compilância Não-Recuperável (Jnr, diff%) do ligante em estudo.

Figura 18 – Diferença de Compilância (Jnr, diff%).



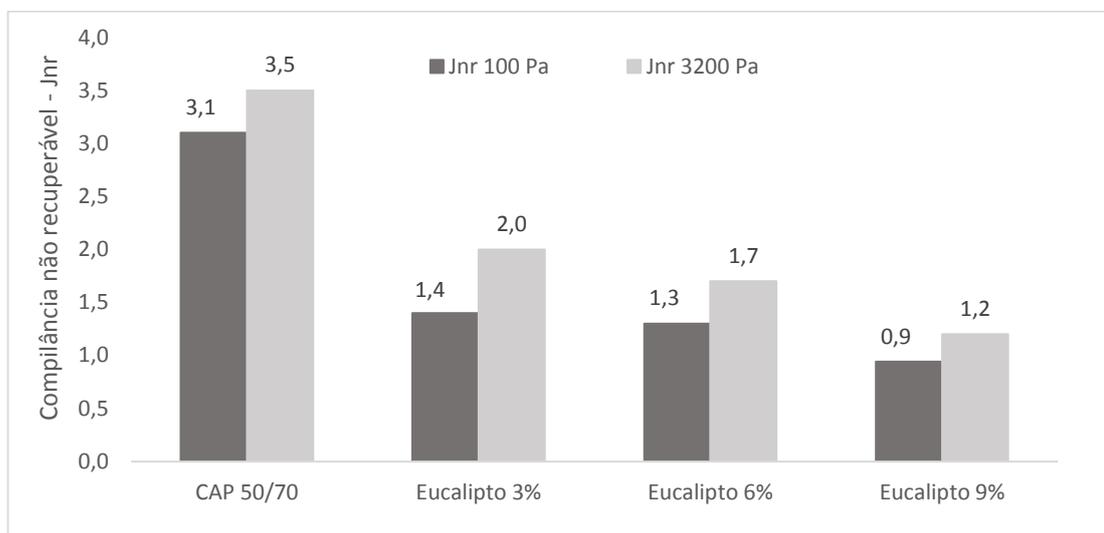
Visto que cada ciclo dura 10 segundos, com 1 segundo de tensões e posteriormente 9 segundos de descarga para análise, por duas cargas de 100 Pa e 3200 Pa, a Diferença de Compilância Não-Recuperada é importante para determinar se o material está susceptível a alterações nos níveis de tensão e consequentemente se haverá formação de deformação permanente.

Os níveis não podem superar 75%, para que as Jnr das duas tensões aplicadas aos ligantes não sejam tão distintas. Não atingindo esse nível, é garantido que os materiais asfálticos não serão sensíveis e propensos ao surgimento de deformações permanentes (SOBREIRO, 2014).

Observa-se que nenhuma amostra atinge o não-permitido, porém, os ligantes puros possuem índices bem superiores aos modificados pela lignina de Eucalipto. Entre as que contém lignina de Eucalipto, a amostra com teor de 9% é a mais satisfatória, já que apresenta índice abaixo das demais, e torna-se menos sensível.

As Figuras 19 e 20 ilustram respectivamente os resultados obtidos para a Compilância Não-Recuperável (Jnr) e Porcentagem de Recuperação (%Rec) das amostras do ligante em estudo a 64°C.

Figura 19 – Compilância Não-Recuperável (Jnr).

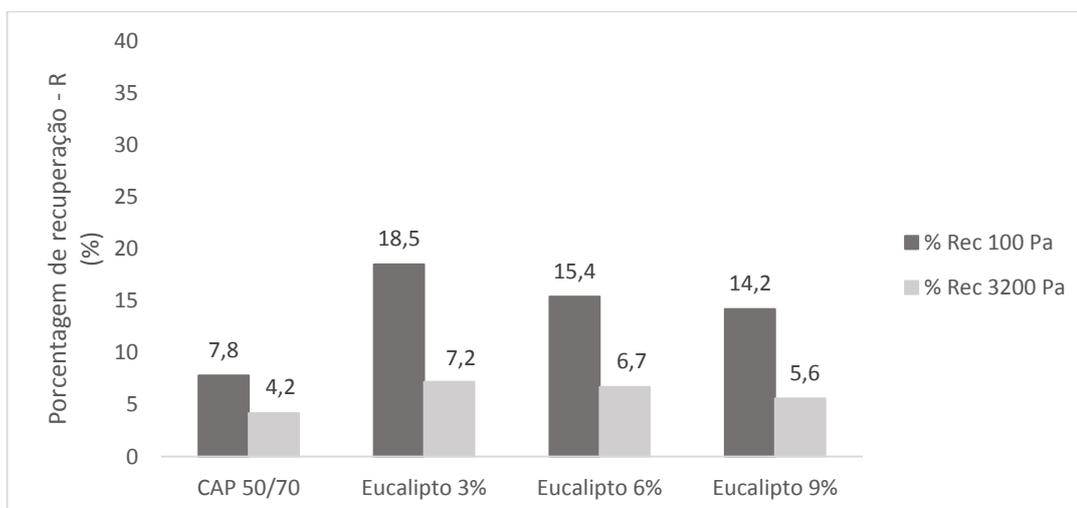


Segundo a AASTHO M320 (2016) e sua classificação, baseado nas Jnr's produzidas a partir da tensão de 3200 Pa, a amostra do CAP só comportará um volume de tráfego inferior a 10 milhões de passadas do eixo padrão. As amostras modificadas, por possuírem menores índices de Compilância Não-Recuperável, são caracterizadas pelo tipo de tráfego Pesado, suportando entre 10 e 30 milhões de passadas do eixo padrão.

Como já foi citado pelos testes aplicados à 70°C, a adição de lignina de Eucalipto nas amostras melhorou consideravelmente a resistência dos ligantes asfálticos, com destaque para a Eucalipto 9%, com o Jnr mais inferior.

Os valores encontrados são promissores para as duas temperaturas do PG (70°C e 64°C), já que os materiais alternativos apresentam comportamento satisfatório. As amostras modificadas suportam volumes de tráfego elevados em comparação com a do CAP 50/70, o que estenderia a vida útil dos asfaltos.

Figura 20 – Porcentagem de Recuperação (%Rec)



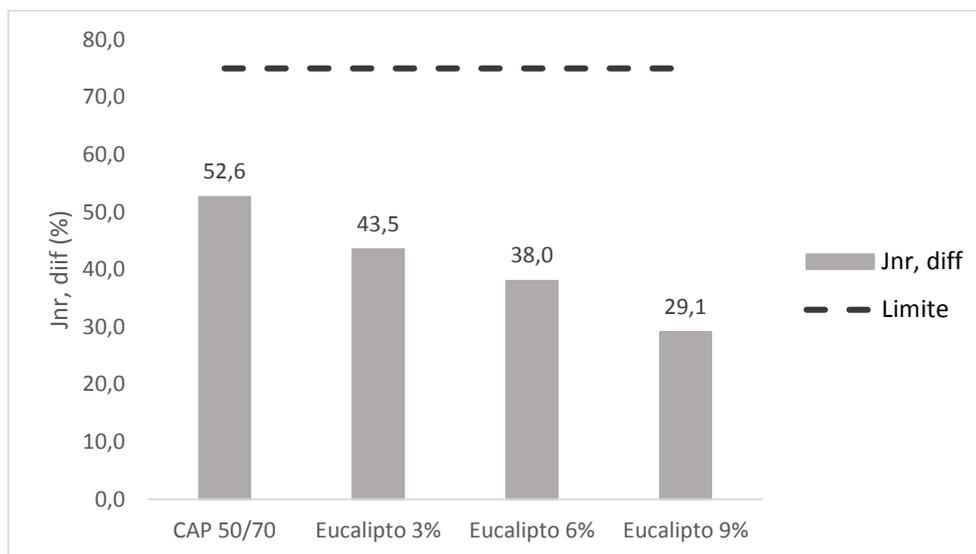
O ligante asfáltico pode recuperar uma parcela maior de sua deformação ao final do ciclo quando possui uma Porcentagem de Recuperação (%R) superior, favorecendo a resistência do material (DOMINGOS e FAXINA, 2015).

Assim como os testes feitos para 70°C, as amostras modificadas pela lignina apresentaram resultados mais positivos à 64°C. A Compilância Não-Recuperável foi elevada e a Porcentagem Recuperada foi inferior para as amostras que não foram modificadas pela adição da lignina. A capacidade de retorno elástico para a amostra de Eucalipto 3% foi a maior, após submetida a esse período de carga-descarga.

O resultado é também satisfatório, a adição de lignina de Eucalipto trouxe o aumento do comportamento elástico, e se torna alternativa na constituição dos revestimentos asfálticos.

A Figura 21 ilustra a Diferença de Compilância Não-Recuperável (Jnr, diff%) dos ligantes em estudo à 64°C:

Figura 21 – Diferença de Compilância (Jnr, diff%).

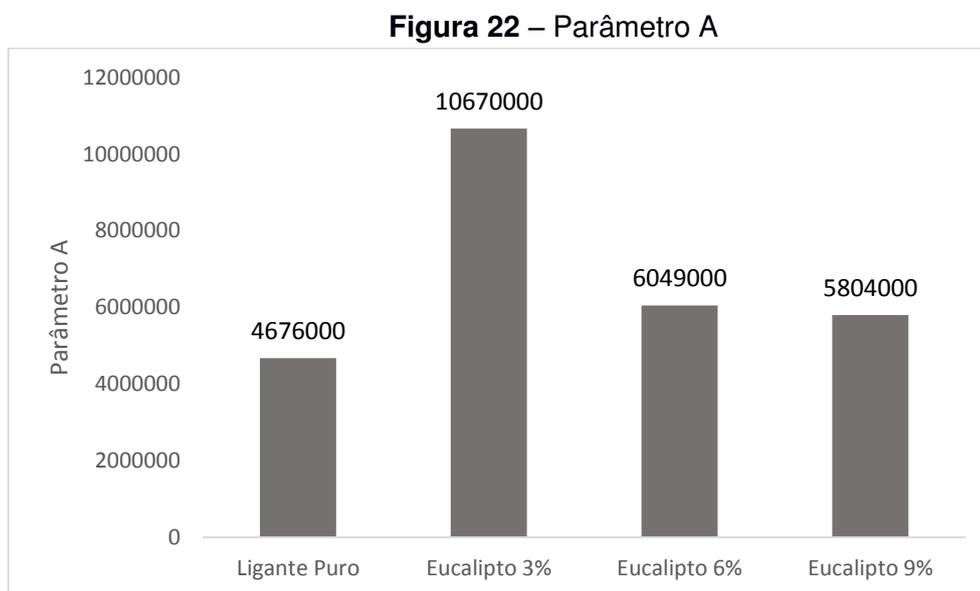


Observa-se que os maiores teores de lignina são indicados para diminuir o Jnr, diff(%), mas é importante que não se atinja um nível de gelificação do ligante, e esse aditivo seja desfavorável para a sensibilidade na alternância de tensões (DUARTE, 2018).

A Diferença de Compilância Não-Recuperável em nenhuma das amostras também não atingiu o limite de 75% indicado por Sobreiro (2014). As amostras modificadas apresentaram números reduzidos, representando seus baixos índices de susceptibilidade a alteração nos níveis de tensão. A amostra de Eucalipto 9% obteve o resultado mais satisfatório, comprovando que, quanto mais lignina de Eucalipto adicionada, menos sensível será o material às deformações permanentes para cargas distintas e extremas (0,1 kPa e 3,2 kPa).

4.3 LAS (Varredura Linear de amplitude e deformação)

A Figura 22 ilustra os resultados obtidos para o Parâmetro A para o ligante em estudo.

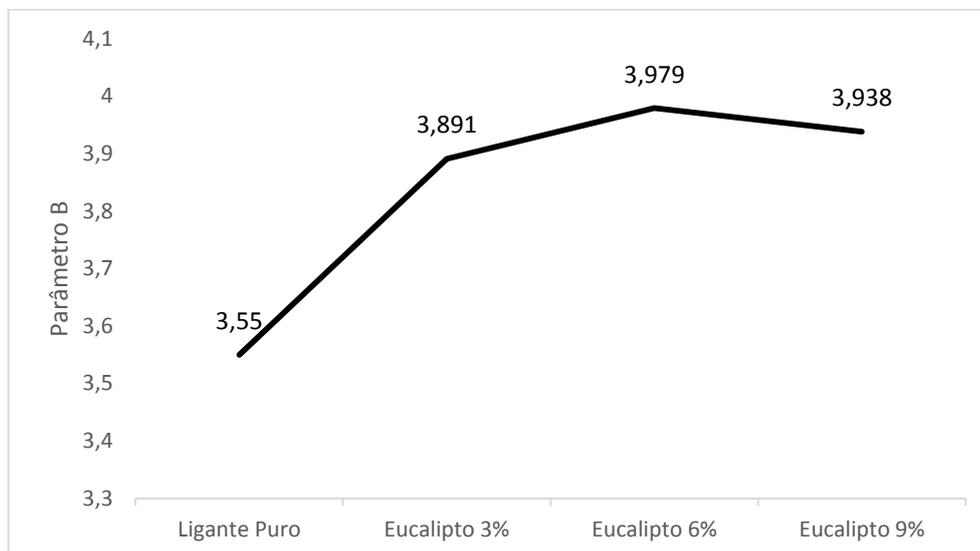


Foi feita a varredura de frequência de 0,1 Hz até 30 Hz para uma amplitude de deformação de 0,1%.

O Parâmetro A representa de forma geral a manutenção da integridade inicial das amostras. A adição da lignina de Eucalipto, como mostra a Figura 22, torna a amostra mais preservadora das suas condições iniciais para tensões. Destaca-se a modificada com 3% de Eucalipto, a mais conservadora das suas condições. Essa amostra teve um aumento de quase 130% para a amostra do CAP 50/70, que se mostrou bem abaixo de todas as modificadas.

A Figura 23 ilustra os resultados obtidos para o parâmetro B para o ligante em estudo.

Figura 23 – Parâmetro B



Já o Parâmetro B, para Kodrat *et al.* (2007), indica que a vida de fadiga do material decresce mais significativamente quando a deformação aumenta. No ensaio, as amostras modificadas pela lignina possuem números mais elevados do Parâmetro B, conseqüentemente, influenciando negativamente na vida de fadiga com o aumento da amplitude de deformações.

Foi feita, nesse caso, a varredura de amplitude de deformação de 0,1% a 30%, para a frequência de fixa de 10 Hz. Observa-se que, como já foi dito, a fadiga das amostras modificadas sofre mais com o aumento das deformações feitas na varredura.

Segundo o Princípio do Dano Contínuo Visco Elástico (VECD), é necessário que haja uma obtenção de informações sobre o comportamento do ligante asfáltico com relação a esses danos para uma ampla faixa de deformações e carregamentos. Assim, um “modelo” de fadiga é elaborado para auxílio (HINTZ, 2012).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES FUTURAS

5.1 Considerações Finais

Diante dos resultados, analisamos primeiramente o Grau de Desenvolvimento (PG), as temperaturas limites de trabalhabilidade e suporte para o ligante asfáltico. Para as amostras com a presença de lignina, o PG torna-se bem superior, e se comportam melhor nesses aspectos. A amostra do CAP 50/70 apresenta nível inferior de PG, o que prejudica várias propriedades, como resposta ao envelhecimento e intervalos de atuação de temperaturas menores.

Para o MSCR, quanto maior a Compilância Não-Recuperável, maior será a parcela que continuará deformada. A adição da lignina do Eucalipto reduziu esse parâmetro, tanto para as cargas menores quanto para as maiores, algo benéfico. Ao contrário, a Porcentagem de Recuperação só evoluiu quando a amostra foi modificada, ou seja, o ligante asfáltico conseguiu uma recuperação maior com a lignina, caracterizado pelo comportamento elástico.

Na Varredura Linear de Amplitude e Deformação (LAS), o parâmetro A indica que a amostra teve sua integridade de início, e todas as amostras adicionadas de lignina de Eucalipto possuíram tal parâmetro mais elevado do que a amostra pura. Porém, também aumentou as taxas do parâmetro B, que indica o aumento da sensibilidade à variação do nível, algo negativo. Então, o teste comprova que a adição da lignina de Eucalipto melhora a integridade do componente no acúmulo de danos, mas o torna mais susceptível ao aumento da amplitude de deformação.

Enfim, os resultados mostram que os ligantes modificados com lignina do Eucalipto suportam maiores temperaturas, possuem uma melhor resposta ao envelhecimento, que melhora resistência à deformação permanente e o aumento do aspecto elástico de recuperação. Não só possui melhores propriedades reológicas, mas contribui no cenário ambiental e financeiro, visto que, o aproveitamento da lignina do Eucalipto poupa o ambiente de descartes incorretos desse material da indústria de papel, e ainda o valoriza, já que o atribui novas funções.

5.2 Sugestões para pesquisas Futuras

- Analisar as propriedades reológicas do ligante modificado por adição de lignina em teores superiores aos utilizados neste estudo;
- Verificar através de outros ensaios se o ligante reage positivamente também.
- Caracterizar termicamente os ligantes modificados por adição de lignina;
- Utilizar polímeros distintos para obtenção de resultados também positivos;

REFERÊNCIAS

AASHTO M320 - Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder, AASHTO, 2005.

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

AASHTO TP 101-12 - Method of test for estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep, AASHTO, 2012.

ASTM 6816/11 - Standard Practice for Determining Low-Temperature Performance Grade (PG) of Asphalt Binders, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

ARTUR, T. A. **Caracterização do comportamento reológico de ligantes asfálticos modificados virgens e envelhecidos**. 2018. 51 f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2018.

BATISTA, K. B. **Desenvolvimento de ligantes asfálticos modificados com lignina como aditivo antienvelhecimento**. 2017. 96 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2017.

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

D'ANGELO, J.; ROBERT, K.; RAJ N, S.; LUDO, Z. Revision of the Superpave hightemperature binder specification: the multiple stress creep recovery test. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**. White Bear Lake, v. 76, p. 123-162, 2007.

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L.; SC, D. Susceptibility of Asphalt Binders to Rutting: Literature Review. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 2, p. 1–8, 2015.

DUARTE, E. V. N. **Avaliação reológica de ligante asfáltico 50/70 modificado com polímero reativo e não-reativo associado ao ácido polifosfórico**. 2018. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande. 2018.

FERNANDES, D. M. **Estudo da estabilidade térmica de blendas de poli (álcool vinílico) /lignina modificada**. 152 f. Dissertação (Mestrado em Química), Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2005.

GAMA, D. A. **Efeito da Adição de Polímeros Reativo, Não-Reativo e Ácido Polifosfórico e Suas Combinações nas Propriedades de Ligantes Asfálticos**. 2016. 167 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

GOLALIPOUR, A, *Modification of Multiple Stress Creep and Recovery Test Procedure and Usage in Specification*. Dissertação de mestrado, University of Wisconsin – Madison, Madison, WI, Estados Unidos, 2011.

KANABAR, N. **Comparison of ethylene terpolymer, styrene butadiene, and polyphosphoric acid type modifiers for asphalt cement**. Department of Chemistry. (Master of Science). Queens University, 2010.

KODRAT, I.; SOHN, D.; HESP, S. Comparison of Polyphosphoric Acid– Modified Asphalt Binders with Straight and Polymer-Modified Materials. **Transportation Research Board**, v. 1998, p. 47–55, 2007.

LEITE, L. F. M., MARTINS, A. T., CRAVO, M. C., “Reologia de Cimentos Asfálticos de Petróleo: Ferramenta para Previsão do Desempenho em Serviço de Ligantes Rodoviários. *XV Congresso Ibero Latino-Americano del Asfalto*, Lisboa, Portugal, 22-27 nov. 2009

LUZ, P. M. S. G. **Avaliação reológica do ligante asfáltico 50/70 modificado com lignina das madeiras pinus e eucalipto**. 2019. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2019.

MARINHO FILHO, P. G. T. **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.

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

MORAIS, S. A. L.; NASCIMENTO, E. A.; MELO, D. C. Análise da Madeira do *Pinus oocarpa* Parte II – Caracterização Estrutural da Lignina de Madeira Moída. **Revista Árvore**. V. 29, n. 3, p. 471-478, 2005.

MOTHE, M. G. **Estudo do Comportamento de Ligantes Asfálticos por Reologia e Análise Térmica**. 2009. Dissertação (Mestre em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

PAMPLONA, T. F. **Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes**. 2013. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade de São Paulo. São Carlos, 2013.

POLACCO, G., J. STASTNA, D. BIONDI, F. ANTONELLI, Z. VLACHOVICOVA, E L.

READ, J., e C. D. WHITEOAK. *The shell bitumen handbook*. **London: Thomas Telford Publishing**, 2003.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D.; KENNEDY, T. W. **Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction**. Lanham, Maryland: National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, 1996.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade de Brasília. Brasília. 2008.

SHELL. The Shell bitumen handbook. 5. ed. Cambridge, 2003.

SOBREIRO, F. **Efeito Da Adição De Ácidos Fosfóricos No Comportamento Reológico De Ligantes Asfálticos Puros E Modificados Com Copolímero SBS**. 2014. 346 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

WHITEOAK, D., 1990, SHELL Bitumen Handbook. SHELL, Inglaterra.

WILLIAMS, R. C.; MC CREADY, N. S. The Utilization of Agriculturally Derived Lignin as an Antioxidant in Asphalt Binder. **In Trans Project Reports**, 2008.

ZANZOTTO, L.; KENNEPOHL, G. J. Development of rubber and asphalt binders by depolymerization and devulcanization of scrap tires in asphalt. *Transportation Research Record*. Washington, n.1530, p.51-58. 1996.

ZANZOTTO. Rheology of asphalts modified with glycidylmethacrylate functionalized polymers. **J. Colloid Interface Sci.**, p. 366-373, 2004.

<http://www.anp.gov.br/petroleo-e-derivados2/asfalto> - Resolução ANP nº 36/2012.

<https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/eucalipto/tema>.