



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

**COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E REOLÓGICA EMPÍRICA DO  
LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO POR ADIÇÃO DE LIGNINA**

Wanderley Sousa da Costa

Campina Grande-PB, 2021

**COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E REOLÓGICA EMPÍRICA DO  
LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO POR ADIÇÃO DE LIGNINA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Campina Grande-PB, 2021

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

**Wanderley Sousa da Costa**

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:** D. Sc. John Kennedy Guedes Rodrigues  
D. Sc. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

CAMPINA GRANDE – PB

2021

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**WANDERLEY SOUSA DA COSTA**

### **COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E REOLÓGICA EMPÍRICA DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO POR ADIÇÃO DE LIGNINA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 13/04/2021  
perante a seguinte Comissão Julgadora:

---

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

*Ana Maria Gorgaltes Duarte Mendonça*

---

Prof.ª Dr.ª Ana Maria G. Duarte Mendonça  
Orientadora  
Dr.ª em Ciências e Engenharia de Materiais  
Departamento de Engenharia Civil  
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais  
Universidade Federal de Campina Grande

*Aline F. N. de Azeredo*

---

Prof.ª Dr.ª Aline F. Nóbrega de Azeredo  
Membro Interno  
Dr.ª em Engenharia Civil  
Departamento de Engenharia Civil  
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais  
Universidade Federal de Campina Grande

*Osires de Medeiros Melo Neto*

---

Osires de Medeiros Melo Neto  
Membro Externo  
Mestrando em Eng. Civil e Ambiental - UFCG  
Departamento de Engenharia Civil  
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais  
Universidade Federal de Campina Grande

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, inteligência suprema, causa primeira de todas as coisas, a quem por tudo dou graças.

A minha Mãe Cícera e Pai Josivan por sempre estarem presentes na minha vida, nos momentos de felicidade e de tristeza, sempre me guiando pelo melhor caminho. Se hoje posso alcançar essa vitória, devo ser muito grato por eles terem sempre agido muito bem na minha vida, auxiliando-me nas minhas decisões mais difíceis e me dando todo o suporte possível.

As minhas avós Minervina e Antônia, que ajudaram a mim e meus pais nos momentos de dificuldades.

A Universidade Federal de Campina Grande, essa instituição que tenho a maior honra de ter no meu currículo, local em que tive um grande crescimento pessoal, onde entrei como um garoto e estou saindo um homem preparado para os desafios do mundo.

A minha orientadora Dr<sup>a</sup> Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça, por todo conhecimento repassado, pela disponibilidade, dedicação, empenho e paciência, agradeço muito pela oportunidade de ser seu orientando.

Ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da UFCG, pelo fornecimento de materiais e equipamentos necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

A todos os profissionais da Universidade Federal de Campina Grande, incluindo Docentes, Técnicos e Auxiliares que direto e indiretamente colaboraram grandemente para a minha formação.

Aos meus melhores amigos Rodrigo Vieira e Adísio Júnior que conviveram comigo morando juntos na maior parte do tempo da graduação, graças a eles consegui superar a saudade de casa e proporcionar bons momentos.

A todos os meus amigos que a UFCG me presenteou nesses anos de graduação, Rafael, Mateus Leite, Felipe, Gustavo Lima (in memoriam), Daniel, David, Gercino, Juliermes, Sávio, Mateus Ferreira, amizades verdadeiras que com toda certeza se estenderá para além da graduação.

## DEDICATÓRIA

*À Deus e, principalmente, aos meus pais, que foram meus dois pilares de sustentação, que com muito amor e esforço me prepararam para a vida, e me apoiaram nos momentos mais difíceis dessa trajetória. Obrigado pelo amor e todo o apoio incondicional, essa vitória é nossa!*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Separação química do ligante asfáltico.....	16
Figura 2 – Etapas do ensaio de recuperação elástica de um ligante convencional e outro modificado: (a) alongamento e (b) ruptura .....	21
Figura 3 – Estrutura hipotética de lignina.....	29
Figura 4 – Sequência de atividades desenvolvidas na pesquisa.....	31
Figura 5 – (a) Lignina <i>Pinus</i> (b) Lignina <i>Eucalipto</i> .....	32
Figura 6 – Lignina do eucalipto modificado destorroada (a) e peneirada (b).....	33
Figura 7 – Agitador mecânico FISATOM (modelo 722) .....	33
Figura 8 – Ensaio de penetração sendo executado.....	35
Figura 9 – Execução do ensaio de ponto de amolecimento.....	36
Figura 10 – Viscosímetros utilizados para medição das viscosidades dos ligantes asfálticos.....	37
Figura 11 – Variação da perda de massa das amostras envelhecidas através do RTFO.....	38
Figura 12 – Variação da perda de massa das amostras envelhecidas através do RTFO.....	39
Figura 13 – Ensaio de penetração para os ligantes puro e modificado.....	40
Figura 14 – Porcentagem de penetração retida (PPR).....	42
Figura 15 – Ponto de amolecimento dos ligantes puro e modificados.....	43
Figura 16– Variação do ponto de amolecimento (PA) antes e após o RTFO.....	44
Figura 17 – Viscosidade do ligante Eucalipto Modificado antes e após RTFO.....	45
Figura 18 – Viscosidade rotacional à 135°C.....	46
Figura 19 – Viscosidade rotacional à 150°C.....	46
Figura 20 – Viscosidade rotacional à 177°C.....	47

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Polímeros populares na modificação de ligantes asfálticos.....	27
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição aproximada dos constituintes de madeira de coníferas, folhosas e gramíneas.....	30
Tabela 2 – Nomenclatura das amostras da pesquisa.....	34
Tabela 3 – Temperaturas de usinagem e compactação dos ligantes.....	48

## RESUMO

A modificação de ligantes asfálticos tem por finalidade aumentar a resistência deste às deformações permanentes, trincas ocasionadas por fadiga ou por variações térmicas, além de, conseqüentemente, melhorar as condições de segurança e conforto das rodovias e reduzir custos com manutenções. Sendo a lignina um polímero natural, subproduto da indústria de papel e celulose, e que já demonstrou grande potencial em algumas pesquisas a partir de sua associação com o ligante asfáltico, principalmente por apresentar propriedades antioxidantes, esta pesquisa teve como objetivo a verificação do efeito da adição de lignina nos teores de 3%, 6% e 9% nas propriedades físicas e reológicas do ligante asfáltico CAP 50/70, e como tipo de lignina selecionou-se a lignina retirada da madeira Pinus, Eucalipto e Eucalipto modificado, sendo essa última resultante de um cruzamento genético. O principal objetivo desta pesquisa é o estudo comparativo na forma de revisão bibliográfica do efeito da aplicação da lignina em ligante asfáltico, analisando suas propriedades físicas e reológicas, baseado em resultados das pesquisas realizadas por Santos (2017) e Luz (2019), possibilitando assim, verificar os efeitos que essa combinação conseguirá trazer e com isso analisar a viabilidade da combinação para aplicação em estudos mais avançados. Para a obtenção dos resultados realiza-se ensaios de Envelhecimento a curto prazo (RTFO), Ensaio de Penetração, Ponto de Amolecimento e Viscosidade Rotacional. Os resultados indicaram a viabilidade da incorporação da lignina ao CAP 50/70 já que aumentaram a vida de fadiga, a resistência às deformações permanentes e retardaram o processo de envelhecimento em todos os teores, com um destaque positivo para os teores de 3% da Pinus e Eucalipto, além da 9% de Eucalipto modificado que apresentaram os melhores rendimentos do ponto de vista reológico. Dessa maneira a utilização desse polímero natural é uma alternativa viável do ponto de vista técnico, podendo ser também favorável em relação ao meio ambiente por evitar um descarte inadequado do material e a questões econômicas por agregar valor comercial a um resíduo industrial para a modificação de ligantes.

**Palavras-chave:** Reologia empírica; Propriedades físicas; Ligante asfáltico; Lignina.

## ABSTRACT

The modification of asphalt binders has the purpose of increasing its resistance to permanent deformations, cracks caused by fatigue or by thermal variations, in addition to, consequently, improving the safety and comfort conditions of the roads and reducing maintenance costs. As lignin is a natural polymer, a by-product of the paper and cellulose industry, and which has already shown great potential in some researches due to its association with the asphalt binder, mainly because it has antioxidant properties, this research aimed to verify the effect of addition of lignin in the contents of 3%, 6% and 9% in the physical and rheological properties of the asphalt binder CAP 50/70, and as a type of lignin, the lignin removed from the wood Pinus, Eucalyptus and modified Eucalyptus was selected, the latter being resulting from a genetic cross. The main objective of this research is the comparative study in the form of a bibliographic review of the effect of the application of lignin in asphalt binder, analyzing its physical and rheological properties, based on the results of research carried out by Santos (2017) and Luz (2019), thus enabling , to verify the effects that this combination will be able to bring and with that to analyze the feasibility of the combination for application in more advanced studies. To obtain the results, short-term Aging tests (RTFO), Penetration Test, Softening Point and Rotational Viscosity are performed. The results indicated the feasibility of incorporating lignin to CAP 50/70 since they increased the fatigue life, the resistance to permanent deformations and delayed the aging process in all levels, with a positive highlight for the contents of 3% of Pinus. and Eucalyptus, in addition to the 9% of modified Eucalyptus that presented the best yields from the rheological point of view. In this way, the use of this natural polymer is a viable alternative from a technical point of view, and it can also be favorable in relation to the environment because it avoids inappropriate material disposal and economic issues because it adds commercial value to an industrial waste for the modification of binders.

**Key words:** Empirical rheology; Physical properties; Asphalt binder; Lignin.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1 Justificativa .....	14
1.2 Objetivos.....	14
1.2.1 Objetivo Geral.....	14
1.2.2 Objetivos específicos.....	14
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	15
2.1 Ligante Asfáltico.....	15
2.2. Propriedades físicas .....	19
2.3. Reologia dos Ligantes.....	21
2.4 Ligante asfáltico modificado com polímero.....	24
2.4.1. Tipos de polímeros utilizados na modificação de ligantes asfálticos.....	26
2.5 Lignina: estrutura, origem e propriedades .....	27
2.5.1 Principais tipos de Lignina.....	29
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	31
3.1 Materiais .....	32
3.2 Metodologia .....	33
3.2.1 Preparação das misturas .....	33
3.2.2 Nomenclatura das amostras .....	34
3.2.3 Envelhecimento a curto prazo (RTFO).....	34
3.2.4 Determinação das propriedades físicas dos ligantes.....	35
3.2.4.1 Ensaio de Penetração .....	35
3.2.4.2 Ponto de Amolecimento .....	35
3.2.5 Viscosidade Rotacional.....	36
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	38
4.1 Envelhecimento a curto prazo.....	38
4.2 Ensaio convencionais.....	40
4.2.1 Ensaio de penetração .....	40
4.2.2 Ponto de Amolecimento .....	42
4.3 Ensaio especiais .....	44
4.3.1 Viscosidade Rotacional.....	44
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS</b> .....	50
5.1 Considerações Finais.....	50
5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras.....	52
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	53

## 1. INTRODUÇÃO

As rodovias pavimentadas do Brasil, assim como a de outros países, necessitam constantemente de avaliação e renovação devido à deterioração dos pavimentos, notadamente dos pavimentos asfálticos. Como forma de otimizar as propriedades da mistura asfáltica quanto aos principais defeitos que podem ocorrer nos revestimentos asfálticos, a modificação de ligantes asfálticos com polímeros tem sido muito utilizada. Além disso, a incorporação desses aditivos resulta em economia, visto que a melhoria do desempenho gera um aumento da vida útil do pavimento (LUZ, 2019). Dessa forma, aliado à busca por modificadores de ligantes asfálticos surge em paralelo o conceito de sustentabilidade e isso vem abrindo espaço para tecnologias com a utilização de modificadores naturais e reaproveitados de processos industriais, como por exemplo, a Lignina.

A modificação de ligantes asfálticos é uma prática corriqueira a fim de aumentar a resistência deste às deformações permanentes, trincas ocasionadas por fadiga ou por variações térmicas, além de, conseqüentemente, melhorar as condições de segurança e conforto das rodovias e reduzir custos com manutenções (MARINHO FILHO, 2017).

A lignina é o segundo material mais abundante do reino vegetal, logo depois da celulose, sendo um constituinte em abundância na madeira, cerca de 15 a 30%, dependendo da espécie vegetal. As ligninas são obtidas em larga escala como um subproduto da indústria de papel e celulose (SANTOS, 2008) onde as duas madeiras mais utilizadas são as das espécies Pinus (coníferas) e Eucalipto (folhosas). Esta pode ser extraída nos diversos processos de polpação da madeira, sendo o Processo Kraft (reação da madeira com hidróxido de sódio + sulfeto de sódio) o mais usual no contexto industrial brasileiro, onde 81% do processamento é realizado dessa maneira (CASTRO, 2009).

A lignina possui estrutura relativamente semelhante do ponto de vista macromolecular aos componentes do CAP (BOTARO et al., 2006) e assim como ocorre com a associação dos demais polímeros com o ligante, em que é crucial a compatibilidade entre ambos para se obter melhores desempenhos, esse material poderá também trazer melhorias ao asfalto convencional no que diz respeito às suas propriedades reológicas.

O principal objetivo desta pesquisa é fazer um comparativo das propriedades físicas e reológica empírica de ligantes asfálticos modificados por ligninas de diferentes espécies vegetais, possibilitando assim, verificar os efeitos que essa combinação poderá trazer e com isso analisar a viabilidade da combinação para aplicação em estudos mais avançados.

### **1.1 Justificativa**

No Brasil, a malha rodoviária é amplamente utilizada principalmente para transportes de cargas e assim torna-se fundamental para o desenvolvimento econômico do país. Sendo assim, é inevitável os estudos sobre comportamento de ligantes asfálticos, visto que é de grande importância para o modal de transporte a final é um dos principais constituintes do mesmo. Sabe-se que, a utilização de asfalto com agentes modificadores resulta em melhorias funcionais como também na diminuição de custos com manutenção.

Sendo assim, a justificativa deste trabalho se encontra na importância da procura por novas alternativas, consideradas sustentáveis, para que desse modo haja melhorias nas propriedades dos ligantes asfálticos, como também progresso na qualidade dos pavimentos contribuindo para a evolução do modal e contribuindo para acelerar o desenvolvimento do país.

### **1.2 Objetivos**

#### **1.2.1 Objetivo Geral**

O principal objetivo desse estudo é comparar o efeito da adição de lignina de diferentes espécies vegetais nas propriedades físicas e reológicas empíricas de ligantes asfálticos, analisando os resultados das pesquisas de dissertações de mestrado realizadas por Santos (2017) e Luz (2019).

#### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Identificar as alterações sofridas nas propriedades físicas do ligante após modificação por adição de lignina;
- Analisar as modificações apresentadas para a viscosidade do ligante com a adição de lignina;
- Comparar as propriedades físicas e reológica empírica obtida para o ligante modificado por adição de lignina.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Ligante Asfáltico

Ligantes asfálticos são materiais aglutinantes, de cor escura, constituídos por misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis de elevada massa molecular. Estes podem ser obtidos em estado natural ou por diferentes processos físicos ou químicos. O ligante asfáltico é composto em quase sua totalidade de carbono e hidrogênio, tendo mais alguns outros componentes como compostos organometálicos, *etc.*

No Brasil é utilizado a denominação ligante asfáltico para designar esse produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico a temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas, e que se enquadra em limites de consistência para determinadas temperaturas estabelecidas em especificações.

Os ligantes asfálticos são constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes. Além da presença de hidrocarbonetos, os ligantes podem apresentar em sua composição heteroátomos cuja presença e percentual dependem da fonte do petróleo, das modificações induzidas, das técnicas de processamento e do envelhecimento em serviço. Os átomos de carbono podem ser classificados da seguinte forma:

- cadeias lineares, denominadas alifáticas ou parafínicas;
- anéis saturados, tendo a maior relação de carbono/hidrogênio, chamados de naftênicos;
- anéis não saturados de carbono, chamados de aromáticos.

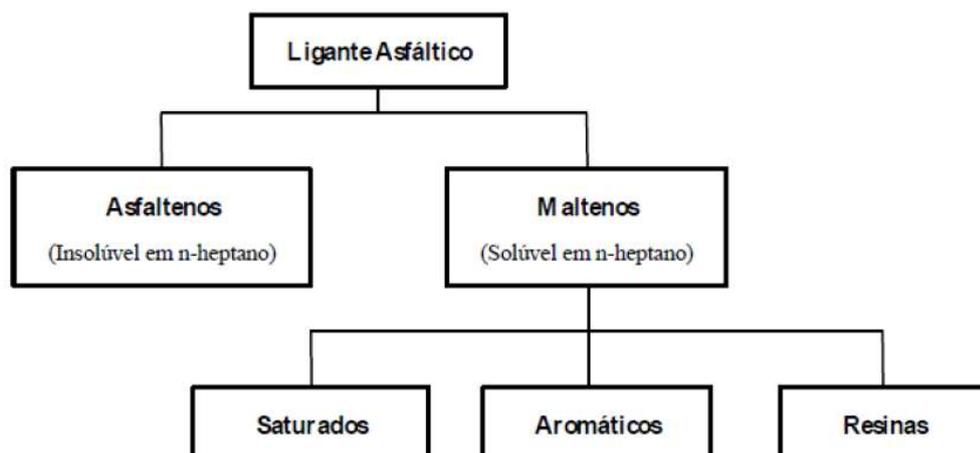
Os ligantes asfálticos são compostos por um complexo arranjo de átomos, na qual a proporção das moléculas formadas por esses átomos e a maneira como elas interagem entre si afetam o comportamento físico e químico do material (ROBERTS *et al*, 1996). Desta forma, a necessidade de dados acerca do comportamento do material asfáltico ocasiona na divisão dos componentes dos ligantes em dois grupos: asfaltenos e maltenos.

Segundo Sultana (2014) embora as porcentagens de heteroátomos sejam pequenas, são estas que conferem polaridade aos ligantes, que é relativamente mais útil na compreensão da relação entre a química do ligante e a reologia. A relação entre as frações polares de diferentes ligantes de asfalto às suas propriedades físicas (por exemplo, viscosidade) e de engenharia (por exemplo, módulo de cisalhamento dinâmico) tem sido estudada nas últimas décadas, e.g. Corbett (1969), Dealy (1979) e Robertson (1991).

A composição química do ligante asfáltico tem influência no desempenho físico e mecânico das misturas asfálticas. O tipo de fracionamento pelo qual o ligante é submetido também é fator que influencia na sua composição química. O método empregado para separar os constituintes é conhecido como SARA (S de saturados, A de aromáticos, R de resinas e A de asfaltenos).

Segundo Nascimento (2015) os asfaltenos são separados por precipitação com n-heptano, enquanto os maltenos são solúveis em n-heptano e separados por cromatografia de adsorção. Um esquema da separação química está ilustrado na Figura 1.

**Figura 1** - Separação química do ligante asfáltico



**Fonte:** Adaptado de Gama (2009)

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

a) os asfaltenos conferem a coloração preto ou marrom escuro do ligante, são aglomerados de compostos polares e polarizáveis formados por associações intermoleculares, constituídos de hidrocarbonetos naftênicos condensados e de cadeias saturadas curtas que apresentam uma grande tendência de interação e associação, formando conglomerados.

Estes constituem entre 5% a 25% do ligante asfáltico, refletindo na dureza e viscosidade (quanto maior o percentual de asfaltenos, mais duro e mais viscoso será o ligante) e apresentam-se como materiais sólidos, quebradiços, pretos ou marrons, que sua concentração influencia nas características reológicas do ligante (READ & WHITEOAK, 2003). Os ligantes que possuem maior concentração de asfaltenos são mais rígidos e viscosos, o que pode resultar em maior resistência a deformações permanentes, porém mais susceptíveis ao dano por fadiga (OSMARI, 2016).

b) As resinas são compostos de hidrogênio e carbono, com pequena proporção de oxigênio, enxofre e nitrogênio, são semissólidos ou sólidos, polares, marrom-escuro, e de grande capacidade adesiva, funcionam como agentes dispersantes de asfaltenos nos óleos intermicelares, tornando-se responsáveis pela homogeneidade do líquido. A proporção de resinas e asfaltenos governa o tipo de comportamento do ligante asfáltico, sendo uma solução (SOL) ou gelatina (GEL) (READ & WHITEOAK, 2003).

c) Os aromáticos são líquidos viscosos, amarelos e marrons escuros, constituídos por moléculas de carbono não polares, sendo os anéis aromáticos predominantes, participando em maior proporção no ligante asfáltico (40 a 65%). Os aromáticos têm grande capacidade de serem dissolvidos por hidrocarbonetos de alto peso molecular (READ & WHITEOAK, 2003).

d) Os saturados caracterizam-se por serem cadeias de hidrocarbonetos alifáticos, consistindo em óleos viscosos não polares geralmente incolores (OSMARI, 2016). Os saturados são óleos viscosos não-polares transparentes, compondo de 5 a 20% dos asfaltos.

Há várias razões para o intensivo uso do ligante asfáltico em pavimentação, principalmente por este proporcionar uma forte união dos agregados, permitindo controlar a flexibilidade agindo como ligante. Além de ser impermeável, durável e

resistente à ação da maioria dos materiais ácidos, alcalinos e salobres, proporcionando aos usuários conforto, segurança e economia ao trafegar.

Em serviços de pavimentação, o ligante pode ser utilizado com diferentes combinações granulométricas de agregados. Dessa forma, este tem que apresentar uma consistência adequada, ou seja, suficientemente fluido para facilitar a mistura com agregados e, posteriormente, lançamento e compactação. Em contrapartida, após a compactação, esse deve ter consistência suficiente para resistir as cargas do tráfego e as variações climáticas (ITEN, 2011).

Segundo Azevedo *et al* (2009), entre as funções do ligante asfáltico na pavimentação, estão:

- aglutinante: promover a ligação entre os agregados possibilitando que a mistura asfáltica resista à ação mecânica de desagregação produzida pelas cargas dos veículos;
- impermeabilização: garantir ao revestimento vedação eficaz contra a ação da água, proveniente das chuvas, evitando danos ao pavimento;
- flexibilidade: promove ao pavimento uma maior resistência à deformação permanente.

Ainda conforme Azevedo *et al*. (2009), dificilmente outro material atende melhor a realização econômica e simultânea dessas funções que o ligante asfáltico. Contudo, esses autores destacam também que, apesar do ligante asfáltico ser o principal material utilizado na construção de rodovias e vias urbanas, ele apresenta algumas limitações, tais como: em determinadas misturas a presença de umidade na interface agregado/ligante leva à perda de material pétreo; à resistência à tração do asfalto diminui à medida que o mesmo é flexionado, ou seja, o asfalto perde sua resistência mecânica quando o pavimento sofre deflexões; em baixas temperaturas, se torna rígido e quebradiço, sujeito à trincas, enquanto que em altas temperaturas, amolece e flui, causando deformações permanentes; e ainda apresenta uma tendência ao envelhecimento (ROSA JÚNIOR, 2015).

## 2.2. Propriedades físicas

Parâmetros para a produção e utilização dos ligantes asfálticos devem ser definidos baseados em ensaios físicos, químicos e mecânicos (MOTHÉ, 2009), a fim de nortear e garantir o desempenho do material em campo. Embora, historicamente, as especificações sejam baseadas em propriedades físicas pela facilidade de obtenção destas ao invés das propriedades químicas (MORILHA JÚNIOR, 2004) por exemplo, todas tem sua importância e devem ser sempre relacionadas.

A consistência está relacionada ao estado físico do material. Quando os ligantes asfálticos encontram-se em temperaturas intermediárias, apresentam consistência semi-sólida; em temperaturas baixas, consistência sólida; e em temperaturas altas, consistência líquida (FAXINA, 2006). Essa consistência é quantificada através das principais propriedades físicas: penetração, ponto de amolecimento e viscosidade, as quais serão analisadas nesta pesquisa.

As especificações dos tipos de ligantes são obtidas através de procedimentos diferenciados de ensaios, como a Viscosidade rotacional, obtida através do viscosímetro Brookfield e o envelhecimento pelo método *Rolling Thin Film Oven* (RTFO), os quais são mais representativos na definição das propriedades reológicas dos ligantes asfálticos.

A determinação da penetração do ligante, além de estar relacionada à sua consistência, também é um fator classificante para o CAP, o qual pode receber as seguintes denominações: CAP 30-45, CAP 50-70, CAP 85-100 e CAP 150-200, expressos em décimos de milímetros, de acordo com a profundidade que uma agulha atinge verticalmente uma amostra do material. Baixos valores de penetração indicam elevada rigidez, ou seja, maior consistência do CAP.

O ponto de amolecimento é a temperatura em que uma amostra de CAP semi-sólida colocada num anel metálico amolece até atingir uma certa referência. Segundo Nicácio e Amorim (2015), essa propriedade e as deformações plásticas do revestimento asfáltico estão fortemente relacionadas, pois quanto menor o ponto de amolecimento, maior será a ocorrência de deformações. Para Bastos et al. (2015), em seu estudo comparativo de CAP 30/45 e CAP 50/70, observaram que

maiores valores de ponto de amolecimento e menores valores de penetração indicam uma menor susceptibilidade à deformação permanente.

A susceptibilidade térmica, que depende da determinação da penetração a 25° C e do ponto de amolecimento, sinaliza o quanto as propriedades de um ligante asfáltico podem ser alteradas por ocasião da variação de temperatura. Por isso, para garantir um melhor desempenho do pavimento, é necessária a utilização de um ligante asfáltico com susceptibilidade térmica baixa (KALANTAR et al., 2012), a fim de evitar mudanças bruscas de comportamento em campo. O Índice de Susceptibilidade Térmica (IST) é a forma de representar essa característica e “expressa a variação da consistência com a temperatura na faixa de serviço em pavimentos” (LUCENA, 2005, p. 23; MOTHÉ, 2009, p. 29).

A viscosidade também está relacionada à consistência do asfalto ou à resistência ao fluxo e influencia diretamente na sua trabalhabilidade. A partir de sua determinação e das respectivas temperaturas relacionadas, obtém-se as condições adequadas para a mistura do ligante com os agregados e conseqüentemente para sua aplicação.

Outra propriedade de grande importância no estudo dos ligantes, mas que geralmente é atribuída a asfaltos modificados, é a Recuperação Elástica. Através deste ensaio, realizado a 25°C, é possível medir o retorno elástico que o ligante possui, fundamental para garantir uma maior resistência à deformação. Há uma maior sensibilidade do ensaio à ligantes modificados principalmente por polímeros cuja característica principal seja a elasticidade, como os elastômeros. Devido à insignificância ou ausência dessa característica em ligantes convencionais, a diferença no comportamento é notável, quando compara-se com um ligante modificado, nas etapas de alongamento e ruptura do ensaio de recuperação elástica, conforme ilustra a Figura 2.

**Figura 2** – Etapas do ensaio de recuperação elástica de um ligante convencional e outro modificado: (a) alongamento e (b) ruptura



(a)



(b)

**Fonte:** Adaptado de Bernucci et al., 2008.

Lima (2008a) enfatiza que os ensaios empíricos apresentam uma boa correlação com o desempenho do ligante em campo, quando não modificados. Entretanto, apresentam falhas quando realizados para ligantes modificados, pois há uma série de fatores que influenciam as análises por estes ensaios convencionais como, por exemplo, não considerar diferentes carregamentos e diferentes temperaturas, como é de prática comum nos ensaios ditos reológicos.

### **2.3. Reologia dos Ligantes**

O termo reologia é originário do grego, *rhéos*, que significa fluxo e *logia*, que significa estudo; ou seja, a reologia é a ciência que estuda o comportamento do fluxo ou a deformação de um corpo sob a ação de uma força ou tensão.

Dentre algumas das principais razões para estudar o comportamento reológico, destacam-se alguns pontos: a reologia contribui para o conhecimento de estruturas, pois existe uma relação entre o tamanho e a forma molecular das substâncias em solução e sua viscosidade; contribui também para o controle de processos, realizado por medidas reológicas da matéria-prima e do produto, e para

o projeto de máquinas, para que sejam utilizados equipamentos com a potência adequada ao processamento dos materiais.

Entretanto, a maioria dos corpos reais não se comportam nem como sólidos, nem como fluidos ideais, sendo chamados de fluidos viscoelásticos, pois apresentam um comportamento misto (viscoso e elástico).

A reologia clássica considera dois materiais como ideais: o sólido elástico e o líquido ou fluido viscoso. Os sólidos ideais deformam-se elasticamente e a energia necessária para deformação é totalmente recuperada quando a força é removida. Os fluidos ideais, tais como líquidos e gases, tendem a se deformar de forma irreversível, dessa forma a energia requerida para a deformação é dissipada pelo fluido sob forma de calor e não é mais recuperada pela remoção da força exercida (MOTHÉ *et al*, 2009).

Os ligantes asfálticos são materiais de natureza complexa e podem apresentar comportamento elástico e viscoso, dependendo de fatores como temperatura, nível de tensão e tempo de atuação do carregamento, daí serem comumente referidos como materiais viscoelásticos. Um material viscoelástico combina o comportamento elástico, no qual o material armazena o trabalho aplicado e recupera sua conformação original após a remoção das cargas aplicadas, e o comportamento viscoso, no qual o material deforma permanentemente sob carregamento e dissipa o trabalho aplicado principalmente na forma de deformação permanente (MOTHÉ, 2009).

$$Y_{xy} = \frac{\partial v_x}{\partial y} \quad (\text{Equação 1})$$

No qual  $\partial v_x$  é a diferença de velocidade entre duas camadas de fluido adjacentes e  $\partial y$  é a distância entre elas.

Propriedades como viscosidade, rigidez, elasticidade, deformação ao longo do tempo (fluência) e taxa de relaxação são de grande interesse para estudar a reologia dos ligantes asfálticos. Por se tratar de material altamente termossensível, alguns parâmetros reológicos são empregados na caracterização destes materiais nas diversas faixas de temperatura que estão submetidos ao longo do processamento das misturas asfálticas e da vida útil dos pavimentos.

O entendimento da reologia dos ligantes asfálticos destaca-se por:

- permitir diferenciar ligantes asfálticos obtidos de diferentes refinarias e por diferentes processos de refino;
- orientar a seleção das temperaturas para as operações de usinagem e compactação das camadas de revestimento asfáltico;
- permitir determinar propriedades reológicas, estas que podem estar relacionadas com o surgimento de patologias nas camadas asfálticas.

A análise reológica dos ligantes asfálticos foi desenvolvida com o intuito de relacionar os parâmetros reológicos e mecânicos, a fim de evitar o caráter limitador dos ensaios empíricos, uma vez que não relacionam adequadamente o comportamento e desempenho de misturas asfálticas em campo e laboratório.

As propriedades reológicas dos ligantes asfálticos dividem-se em propriedades reológicas fundamentais e propriedades reológicas empíricas (SANTOS, 2017). As fundamentais são fornecidas por ensaios que medem a viscosidade aparente (medida no viscosímetro rotacional), viscosidade cinemática (medida no viscosímetro capilar), módulo de cisalhamento dinâmico, ângulo de fase, módulo de armazenamento, módulo de dissipação e viscosidade complexa (medidas no *Dynamic Shear Reometer* - DSR), rigidez sob baixas temperaturas e taxa de relaxação sob baixas temperaturas (medidas no *Bending Beam Reometer* - BBR).

As propriedades empíricas são obtidas por medidas de penetração (medido no penetrômetro), ponto de amolecimento (medido pelo “conjunto anel e bola”), viscosidade Saybolt-Furol (medido em viscosímetro Saybolt-Furol), resiliência (medido em “conjunto cuba e esfera”), ductilidade (medido no ductilômetro) e retorno elástico (medido no ductilômetro).

A utilização dos ensaios reológicos nos ligantes asfálticos permitem a associação com ensaios mecânicos realizados nas misturas asfálticas, possibilitando a comparação do comportamento e a influência do ligante na mistura asfáltica (MARINHO FILHO, 2017).

## 2.4 Ligante asfáltico modificado com polímero

Os ligantes asfálticos têm sido modificados com polímeros sintéticos e naturais desde 1843. Esse processo teve continuidade na Europa nos anos de 1930 e em 1950 também estava sendo disseminado na América do Norte, como afirmam Kalantar et al., (2012). Entretanto, os polímeros sintéticos começaram a ser amplamente utilizados na América do Norte após a II Guerra Mundial e, por volta de 1950, um exemplo bastante conhecido, o Neoprene Látex, começou a ser utilizado na modificação de ligantes asfálticos (ZHU et al., 2014).

A primeira patente relacionada a asfalto modificado com polímero foi concedida nos anos de 1940 e, a partir de então, principalmente após a incorporação do SBS na modificação de asfaltos, várias patentes tem sido concedidas ao redor do mundo (ZHU et al., 2014).

Segundo Kalantar et al., (2012), ao longo dos últimos anos, os EUA, seguido da China, Canadá e alguns países Europeus, lideraram o ranking de pesquisas e atividades relacionadas a modificação de ligantes asfálticos com polímeros. O interesse por Asfaltos Modificados com Polímeros – AMP tem aumentado cada vez mais devido a melhoria do desempenho de ligantes asfálticos aplicados na indústria de pavimentação.

Na maioria das vezes, o tráfego pesado, bem como a influência climática, prejudicam a vida útil dos pavimentos. A incorporação de polímeros nos ligantes asfálticos tem sido uma boa alternativa para mitigar alguns efeitos provenientes desses eventos, tais como deformações permanentes devido a altas temperaturas, fissuração do revestimento asfáltico devido a baixas temperaturas, problemas relacionados a fadiga, escorregamento do revestimento, etc (XIAO et al., 2014).

Kalantar et al., (2012) destacam que deformações permanentes geradas a partir de altas temperaturas e fissuras geradas a partir de baixas temperaturas estão relacionadas com a sensibilidade do asfalto a variações de temperatura, ou seja, com a sua susceptibilidade térmica. Se a pressão do pneu e o volume de tráfego pesado aumentar, um pavimento com AMP pode influenciar na redução dessa susceptibilidade à variação da temperatura.

Segundo Kalantar et al., (2012), uma das propriedades mais importantes das misturas asfálticas é a estabilidade. Uma estabilidade adequada pode ser suficiente para atender a vários requisitos do revestimento asfáltico relacionados ao tráfego, se essa estabilidade for menor do que a esperada, problemas de fluidez ocorrerão na superfície da estrada.

Assim sendo, Kalantar et al., (2012) destacam que a adição de polímeros ao ligante asfáltico pode melhorar substancialmente suas propriedades reológicas em baixas, intermediárias e altas temperaturas. Em baixas temperaturas, eles atuam aumentando a resistência da mistura às fissuras de origem térmica e trincas por fadiga; em altas temperaturas, eles atuam diminuindo as deformações plásticas e aumentando o módulo de cisalhamento.

Polacco et al., (2015) destacam que os AMP's também foram desenvolvidos devido aos pavimentos flexíveis terem se tornado inadequados nos últimos anos em virtude da diminuição da vida útil causada pelo aumento do tráfego, e ao aumento da necessidade de manutenções causado pelo surgimento precoce de defeitos no pavimento. O aumento da vida útil e a melhoria da qualidade dos pavimentos que utilizam AMP proporcionam uma segurança e economia capazes de superar os seus altos investimentos iniciais.

Zhu et al., (2014) afirmam que o teor de polímero incorporado ao ligante asfáltico, bem como os processos de fabricação, podem interferir nas suas propriedades reológicas finais. Com o aumento deste teor, pode ocorrer inversão da fase dominante do betume para o polímero. Contudo, uma microestrutura ideal para o AMP contém duas fases contínuas interligadas que determinam o teor ótimo de polímero para a modificação asfáltica. Com essas duas fases interligadas, os AMP's demonstram, em geral, melhores performances em relação a propriedades mecânicas, estabilidade a estocagem e custo-benefício.

Os polímeros utilizados nos AMP's devem obedecer a uma longa lista de pré-requisitos, portanto, um número bastante pequeno de polímeros são devidamente utilizados na indústria de pavimentação. Preferencialmente, os polímeros escolhidos tem uma característica em comum: a habilidade de formar uma rede física que se origina a partir da presença simultânea de segmentos rígidos e flexíveis em suas estruturas. Se o inchamento dessa rede pelas moléculas de asfalto durante a fase da mistura não perder sua estrutura principal, esse polímero

influenciará fortemente nas propriedades reológicas do ligante asfáltico (POLACCO et al., 2015). Uma modificação efetiva resulta em um sistema termodinamicamente instável, mas cineticamente estável, no qual o polímero é parcialmente inchado por leves componentes do asfalto.

#### **2.4.1. Tipos de polímeros utilizados na modificação de ligantes asfálticos**

Os polímeros utilizados na indústria de modificação de asfaltos são classificados conforme alguns critérios, dentre eles, as categorias nas quais esses polímeros estão inclusos (XIAO et al., 2014). Segundo Polacco et al., (2015) os polímeros mais utilizados na modificação de ligantes asfálticos estão sub-divididos em três categorias: I) elastômeros termoplásticos, II) termoplásticos e III) reativos.

Gama et al., (2016) afirmam que cada tipo de polímero adicionado ao ligante asfáltico produz diferentes efeitos e altera as propriedades mecânicas da mistura asfáltica. Os elastômeros termoplásticos conferem boas propriedades elásticas ao ligante, enquanto que os termoplásticos e os polímeros reativos conferem aumento de rigidez e redução de deformações sob carga.

Como afirmam Zhu et al., (2014) o grupo de polímeros mais utilizados na modificação de ligantes asfálticos são os elastômeros termoplásticos os quais são capazes de resistir à deformação permanente, esticando sob carga e recuperando elasticamente no momento que a carga é removida. O estireno butadieno estireno – SBS e o estireno isopreno estireno – SIS, os quais são produzidos por polimerização aniônica, são os representantes mais importantes dessa classe (JASSO et al., 2015).

**Quadro 1** - Polímeros populares na modificação de ligantes asfálticos

Categories	Exemplos	Vantagens	Limitações
Termoplásticos	* Polietileno (PE) * Polipropileno (PP)	* Boas propriedades em altas Temperaturas; * Custo relativamente baixo.	* Limitada melhoria na elasticidade; *Problemas de separação de fase.
	* Etileno Acetato de Vinila (EVA); *Etileno Acrilato de Butila (EBA)	* Estabilidade a estocagem relativamente boa; *Alta resistência a deformação permanente.	* Limitada melhoria na recuperação elástica; *Limitadas melhorias propriedades em temperaturas baixas.
Elastômeros Termolásticos	* Estireno-Butadieno-Estireno (SBS); *Estireno-Isopreno-Estireno (SIS)	* Rigidez elevada; *Sensibilidade a temperatura reduzida; *Resposta elástica elevada.	* Problemas de compatibilidade com alguns ligantes; * Baixa resistência ao calor e a oxidação; *Custo relativamente alto.
	* Estireno-Etileno/Butileno-Estireno (SEBS)	* Elevada resistência ao calor e a oxidação.	* Problemas de instabilidade a estocagem; * Elasticidade relativamente reduzida; * Alto custo.
	* Estireno-Butadieno (SBR)	* Boa compatibilidade com os betumes; *Boa ductilidade; *Boa resistência a trincas em baixas temperaturas	* Propriedades mecânicas baixas;

Fonte: Zhu et al., (2014) (adaptada pelo autor).

## 2.5 Lignina: estrutura, origem e propriedades

Santos (2008) define a madeira, quimicamente, como sendo um biopolímero tridimensional formado basicamente por celulose, hemicelulose e lignina, numa proporção aproximada de 50:20:30, respectivamente. A celulose e a lignina, por sua vez, são os polímeros naturais mais abundantes da natureza e nos processos industriais para obtenção de fibras celulósicas, essas duas macromoléculas são separadas através da deslignificação da madeira, da qual resulta geralmente um licor residual, também denominado licor negro, contendo a lignina e a hemicelulose (BELGACEM et al., 2003).

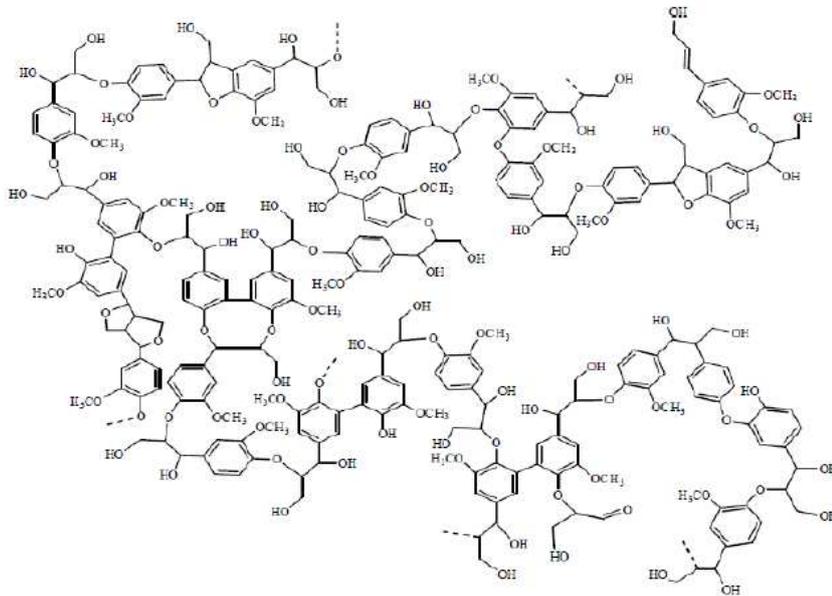
Segundo Luo (2010) a lignina é um polímero natural complexo, amorfo e aromático, derivado de unidades fenilpropanóides, sendo uma macromolécula heterogênea, tridimensional, com alto teor de carbono, presente em quase todos os vegetais (SOUTO *et al.*, 2015). A complexidade da sua estrutura química macromolecular foi comprovada por estudos que mostraram que suas unidades

monoméricas não ser repletas de maneira regular e são enlaçadas por muitas variedades de ligações químicas (PILÓ-VELOSO *et al.*, 1993). Além disso, sua estrutura pode variar dependendo da planta de origem, da sua localização no vegetal, idade da planta, condições ambientais, entre outros fatores (BELGACEM *et al.*, 2003; HERNÁNDEZ, 2007).

A lignina atua diretamente na proteção da planta contra micro-organismos indesejáveis, além de conferirem resistência mecânica e serem responsáveis pela rigidez da parede celular, tornando-se um composto fundamental na madeira, além dessas características realizam o transporte de nutrientes, água e metabólitos (PILÓ-VELOSO *et al.*, 1993; SANTOS, 2008). Porém, é um componente indesejável na fabricação de papel, por conta que este material e seus derivados possuem uma aparência amarelada (FERNANDES, 2005), o que dificulta o processo de branqueamento do produto final.

Segundo D'Almeida (1988) a lignina pode ser classificada pelos os grupos vegetais (ligninas das gimnospermas ou coníferas, ligninas das angiospermas ou folhosas e ligninas das gramíneas) e estes são caracterizados pela existência de uma ou duas unidades básicas que formam a estrutura desse polímero. Além disso, para Hernandez (2007) existem diferenças consideráveis entre as ligninas das gramíneas, como a de cana de açúcar, e as ligninas de madeiras, entre elas um menor grau de polimerização e a diferente reatividade. Na Figura 3 mostra-se uma estrutura hipotética de lignina, já que não é possível a definição de uma estrutura única para sua constituição (CRAVO, 2016).

**Figura 3 - Estrutura hipotética de lignina**



**Fonte:** Adaptado de Souto, 2015.

Segundo Luo (2010) a lignina é um polímero natural complexo, amorfo e aromático, derivado de unidades fenilpropanóides (DIAS et al., 2014). É uma macromolécula heterogênea, tridimensional, com alto teor de carbono, presente em quase todos os vegetais (BRAUN et al., 2005; SOUTO et al., 2015).

Além dessa composição básica, a maioria das ligninas possuem enxofre na sua constituição, esse elemento químico quando associado a outros materiais pode comprometer o desempenho da lignina. Porém, o enxofre que se encontra nas ligninas processadas pode auxiliar na redução da oxidação de ligantes asfálticos já que esse componente reage com o oxigênio antes mesmo dele ocasionar o envelhecimento dos compostos do ligante. A presença do enxofre juntamente com a variabilidade da estrutura química da lignina como um todo é um agravativo em sua utilização, por isso uma lignina mais uniforme seria interessante para se prever suas propriedades e assim poder projetar um pavimento adequadamente (WILLIAMS & MCCREADY, 2008).

### 2.5.1 Principais tipos de Lignina

Nas indústrias de papel e celulose, as madeiras mais utilizadas como matéria-prima são as das espécies de pinus (coníferas) e as das espécies de

eucalipto (folhosas) (LIMA *et al.*, 1988) e estas possuem constituição diferente como pode-se observar na Tabela 1.

**Tabela 1** - Composição aproximada dos constituintes de madeira de coníferas, folhosas e gramíneas

Constituintes	Composição (%)		
	Madeiras de Coníferas	Madeiras de Folhosas	Gramíneas
Celulose	42 ± 2	45 ± 2	26 ± 5
Hemicelulose	27 ± 2	30 ± 5	27 ± 3
Lignina	28 ± 3	20 ± 4	11 ± 3
Extrativos	3 ± 2	3 ± 2	26 ± 5

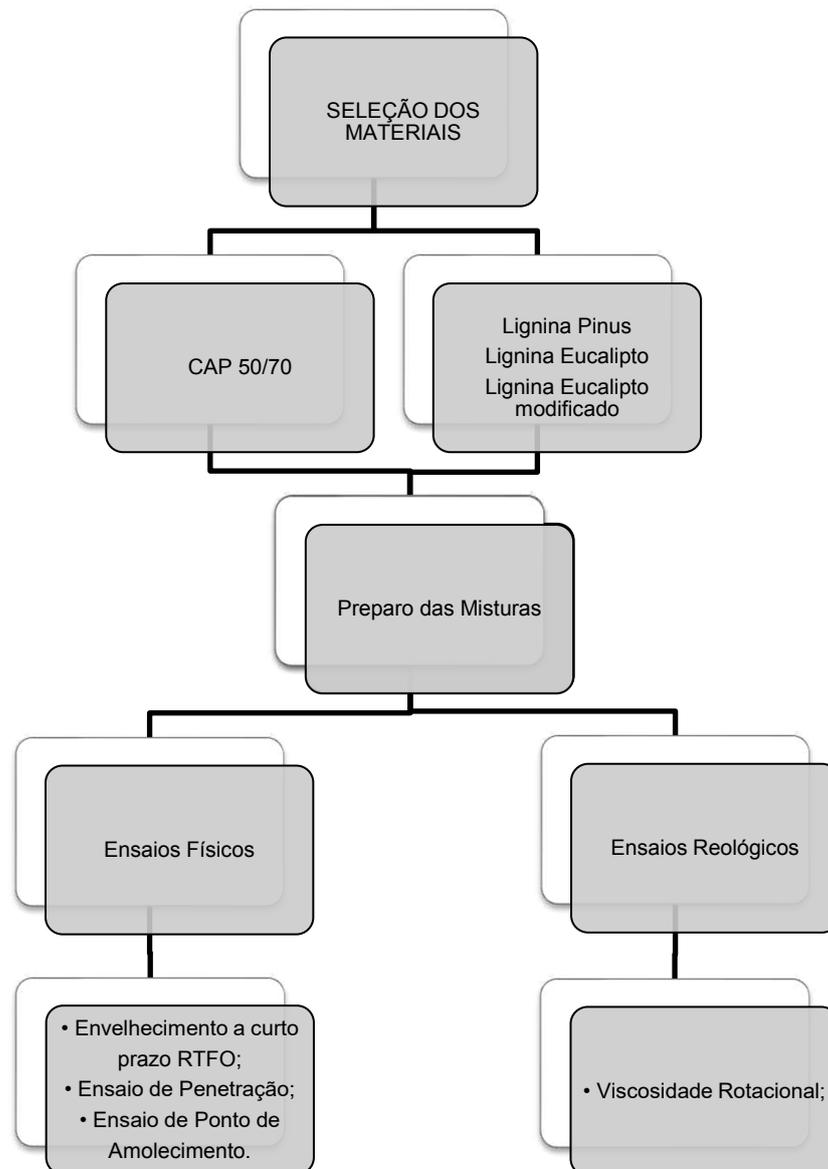
Fonte: Moraes *et al.*, 2005.

De uma maneira geral, os procedimentos pelos quais a lignina pode ser isolada são diversos, desde ensaios laboratoriais ou mais comumente industriais. Assumpção *et al.* (1988) define o processo de polpação como sendo o processo de separação das fibras da madeira por meio de energia química e/ou mecânica. Quando a energia química é utilizada, resulta numa deslignificação mais elevada que no processo mecânico. Os processos químicos para obtenção da pasta celulósica podem ser divididos em: ácidos (ex. processo sulfito) e alcalinos (ex. processo Kraft) (D'ALMEIDA, 1988).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados na obtenção dos objetivos da pesquisa. Os materiais, métodos e resultados foram analisados de dois trabalhos de dissertação, sendo eles de SANTOS (2017) e LUZ (2019). No Fluxograma da Figura 4 está ilustrada a sequência de atividades utilizadas na fase experimental para determinação das propriedades físicas, e reológicas dos ligantes na condição pura e com adição das ligninas.

**Figura 4** - Sequência de atividades desenvolvidas na pesquisa



### 3.1 Materiais

#### 3.1.1 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado nas pesquisas foi doado pela empresa JBR Engenharia LTDA, classificado como CAP 50/70, convencional. A amostra foi denominada de “Ligante Puro”.

#### 3.1.2 Lignina

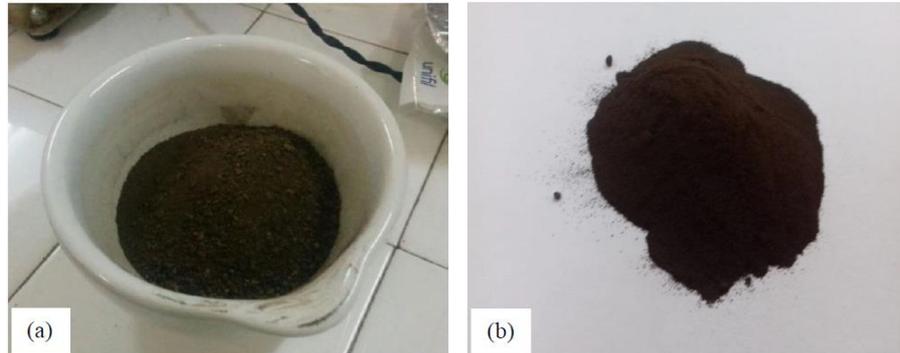
As ligninas utilizadas por Luz (2019) foram fornecidas pela empresa Klabin, produtora e exportadora de papéis do Brasil, que forneceu dois tipos de lignina: uma obtida a partir da madeira de Eucalipto e a outra oriunda da madeira Pinus, ambas espécies comuns em território brasileiro. Já a lignina utilizada por Santos (2017) foi obtida do Laboratório de celulose e papel da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Minas Gerais. A planta a partir da qual esse material foi obtido é resultante de um cruzamento genético entre a *Eucalyptus grandis* e a *Eucalyptus urophylla*. Para efeito de diferenciação de nomenclatura entre as ligninas chamou-se as ligninas de LUZ (2017) de Eucalipto e Pinus (Figura 5), enquanto a lignina de SANTOS (2019) nomeou-se de Eucalipto modificado (Figura 6).

**Figura 5** – (a) Lignina *Pinus* (b) Lignina *Eucalipto*.



**Fonte:** Luz (2019).

**Figura 6** – Lignina do eucalipto modificado destorroada (a) e peneirada (b).



Fonte: Santos (2017).

## 3.2 Metodologia

### 3.2.1 Preparação das misturas

Para o desenvolvimento das pesquisas, os teores dos três tipos de lignina foram adicionados ao ligante puro (CAP 50/70). As quantidades introduzidas no ligante tiveram como base o estudo de Santos (2017) onde a autora utilizou os teores de 3%, 6% e 9% de lignina.

Os parâmetros definidos para o processamento das misturas foram: rotação de 2000 rpm, tempo de 30 minutos e 160°C de temperatura. Foi utilizado para tal, um agitador mecânico FISATOM, Modelo 722, ilustrado na Figura 7:

**Figura 7** – Agitador mecânico FISATOM (modelo 722).



Fonte: Santos (2017).

O CAP 50/70 foi aquecido até 160° C. Em seguida, adicionou-se para cada amostra a quantidade de lignina correspondente, mantendo-se constantes a temperatura e a rotação pré-definidas, por 30 minutos.

### 3.2.2 Nomenclatura das amostras

Na Tabela 2 encontra-se as amostras usadas na pesquisa e suas respectivas nomenclaturas para identificação.

**Tabela 2** - Nomenclatura das amostras da pesquisa

<b>Amostras</b>	<b>Nomenclatura</b>
Ligante puro convencional	CAP 50/70
CAP 50/70 + 3% Lignina Pinus	3% Pinus
CAP 50/70 + 6% Lignina Pinus	6% Pinus
CAP 50/70 + 9% Lignina Pinus	9% Pinus
CAP 50/70 + 3% Lignina Eucalipto	3% Eucalipto
CAP 50/70 + 6% Lignina Eucalipto	6% Eucalipto
CAP 50/70 + 9% Lignina Eucalipto	9% Eucalipto
CAP 50/70 + 3% Lignina Eucalipto modificado	3% Eucalipto modificado
CAP 50/70 + 6% Lignina Eucalipto modificado	6% Eucalipto modificado
CAP 50/70 + 9% Lignina Eucalipto modificado	9% Eucalipto modificado

### 3.2.3 Envelhecimento a curto prazo (RTFO)

Este procedimento é realizado para medir o efeito do calor e ar sobre uma película em movimento de materiais asfálticos semissólidos. Os efeitos deste tratamento são determinados a partir de medições das propriedades selecionadas do asfalto antes e depois do teste. O procedimento será realizado seguindo as recomendações da norma NBR 15235/2009.

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

O resultado final do ensaio é a medida da variação de massa que o ligante sofreu decorrente do efeito do calor e do ar aplicados, além de ter contribuição na

execução de outros ensaios, pois possibilita a análise das propriedades do material submetido à essa condição de envelhecimento, além da condição normal do ligante.

### **3.2.4 Determinação das propriedades físicas dos ligantes**

#### **3.2.4.1 Ensaio de Penetração**

O ensaio de penetração consegue determinar a consistência do ligante asfáltico através da medida da profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100 g) penetra verticalmente numa amostra de ligante, por 5 segundos, à temperatura de 25°C.

O ensaio irá ser realizado conforme a norma DNIT-ME 155/2010 e suas especificações. A penetração da amostra se caracterizará pela média aritmética dos valores obtidos a qual foi aproximada até a unidade, de no mínimo três penetrações. O equipamento utilizado para realização deste ensaio está ilustrado na Figura 8.

**Figura 8** - Ensaio de penetração sendo executado



**Fonte:** Luz (2019)

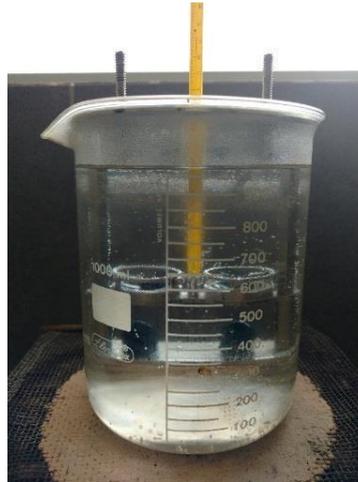
#### **3.2.4.2 Ponto de Amolecimento**

O ponto de amolecimento é a mais baixa temperatura na qual uma esfera metálica padronizada atravessa um anel também padronizado e cheio com o

material betuminoso, percorrendo uma determinada distância, sob condições especificadas.

O ensaio de ponto de amolecimento foi realizado conforme estabelecido na norma DNIT-ME 131/2010, A Figura 9 ilustra a execução do ensaio de ponto de amolecimento.

**Figura 9-** Execução do ensaio de ponto de amolecimento



**Fonte:** Santos (2017)

A partir dos dados do ponto de amolecimento e penetração calculou-se o índice de susceptibilidade térmica. Este parâmetro indica a sensibilidade da consistência dos ligantes asfálticos à variação de temperatura e é calculado pela Equação 2:

$$IST = \frac{(500) \times (\log \log PEN) + (20) \times (T^{\circ}C) - 1951}{120 - (50) \times (\log \log PEN) + (T^{\circ}C)} \quad (\text{Equação 2})$$

### 3.2.5 Viscosidade Rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional é utilizado para medir a viscosidade do asfalto a altas temperaturas, 135 °C, 150 °C e 177 °C, conforme a ABNT NBR 15184/2004 a ASTM D4402-15, e contribui significativamente na definição das temperaturas de usinagem e compactação do asfalto. O viscosímetro utilizado foi o Brookfield, modelo DV-III ULTRA, ligado a um controlador de temperatura conforme mostra a Figura 10. Os valores das viscosidades dos ligantes asfálticos puro e

modificados foram medidas antes e após o envelhecimento a curto prazo, em todas as amostras. A viscosidade é medida, então, por meio do torque necessário para girar o spindle imerso na amostra de asfalto nas velocidades de 20, 50 e 100 rpm, respectivamente às temperaturas do ensaio supracitadas. Essa propriedade será medida, antes e após o envelhecimento a curto prazo, em todas as amostras.

**Figura 10** - Viscosímetros utilizados para medição das viscosidades dos ligantes asfálticos



Fonte: Luz (2019)

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

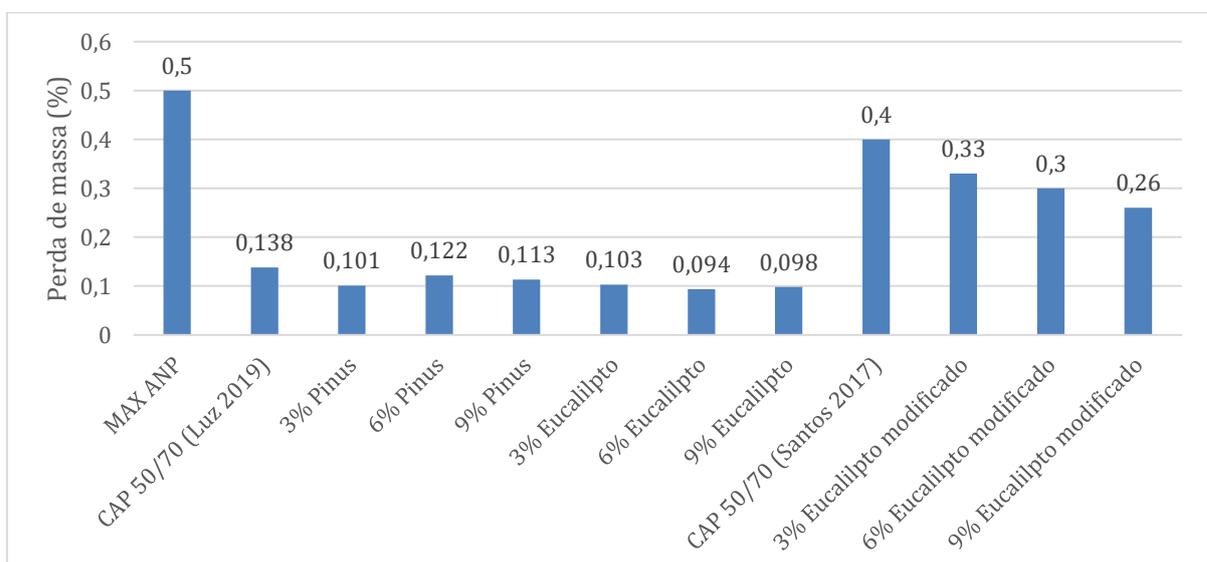
Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nas pesquisas de Santos (2017) e Luz (2019) por meio dos ensaios empíricos e reológicos para os ligantes asfálticos puro, modificado com a lignina Pinus, lignina do tipo Eucalipto e lignina Eucalipto modificado, seguindo os teores de 3%, 6% e 9% e com envelhecimento RTFO.

### 4.1 Envelhecimento a curto prazo

O envelhecimento a curto prazo simula o processo oxidativo do ligante asfáltico provocado pela usinagem, aplicação e compactação da mistura asfáltica. Como resultado, o procedimento nos fornece a variação da perda de massa das amostras, além deste ser pré-requisito para os demais ensaios que necessitam prever o comportamento dos materiais também sob esta condição de envelhecimento.

Após a realização do ensaio, a perda de massa das amostras de ligante demonstra o quanto o material sofreu o efeito da ação do calor e do ar aplicados no processo, ao ponto de causar a degradação e redução de parte da matéria presente, o que implica em alterações na composição e nas propriedades reológicas do material, como o aumento de sua viscosidade e rigidez (CRAVO, 2016). Na Figura 11 observam-se os resultados das perdas de massa (%) dos ligantes puro e modificados das amostras de Luz (2019) e Santos (2017) após o envelhecimento.

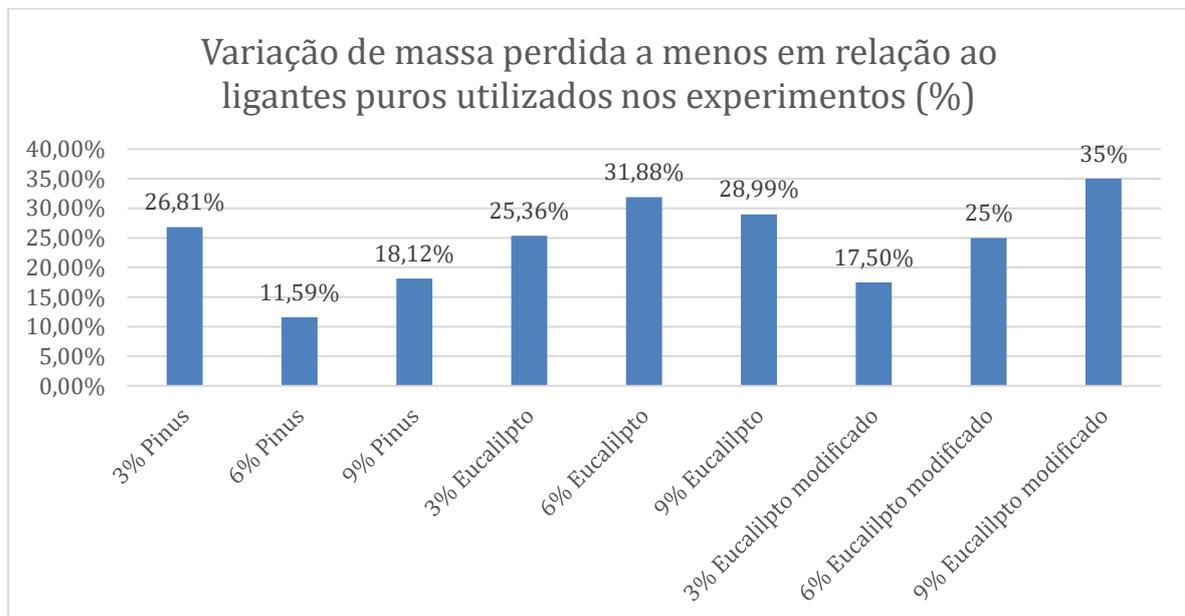
**Figura 11** – Variação da perda de massa das amostras envelhecidas através do RTFO.



Observa-se que todas as amostras atenderam as especificações SUPERPAVE, que define que a perda de massa não pode exceder 1%. Enquanto na Resolução ANP nº 19/2005 essa perda para ligantes puros deve ser de no máximo 0,5%.

Notou-se que a perda de massa para as amostras modificadas com a adição de lignina de ambas as pesquisas foram inferiores às perdas obtidas para o ligante puro, porém, também notou-se uma diferença entre as pesquisas em relação a perda de massa entre os ligantes puros CAP 50/70, já que na pesquisa de Santos (2017) essa perda foi de 0,4% e com Luz (2019) foi de 0,138%, provavelmente essa diferença se dá devido a diferença de asfaltenos na composição dos CAP 50/70, já que analisando as perdas dos ligantes modificados com a lignina se verifica uma certa constância entre as porcentagens de massa perdida em relação ao ligante puro, a Figura 12 ilustra esses valores.

**Figura 12** – Variação da perda de massa das amostras envelhecidas através do RTFO.



Analisando os resultados, verificou-se que a variação de massa dos ligantes modificados com os aditivos propostos apresentaram valores inferiores aos obtidos para o ligante puro. Na pesquisa de Luz (2019) apesar de todos os ligantes modificados apresentarem bons resultados não se consegue determinar um padrão de relação entre o teor do ligante e a redução da perda de massa, já que com o ligante Pinus o melhor resultado foi com teor de 3%, enquanto o ligante Eucalipto apresentou o melhor resultado no teor de 6%, onde verificou a menor perda de

massa entre as pesquisas (0,094%). Na pesquisa de Santos (2017), observou-se uma tendência inversamente proporcional em relação ao teor da lignina Eucalipto modificado, apresentando o melhor resultado no teor de 9%, onde a perda de massa foi de 0,26%, observou-se então uma diminuição de perda de 35% em relação a perda de massa do ligante puro (0,4%), demonstrando um potencial antioxidante deste polímero natural.

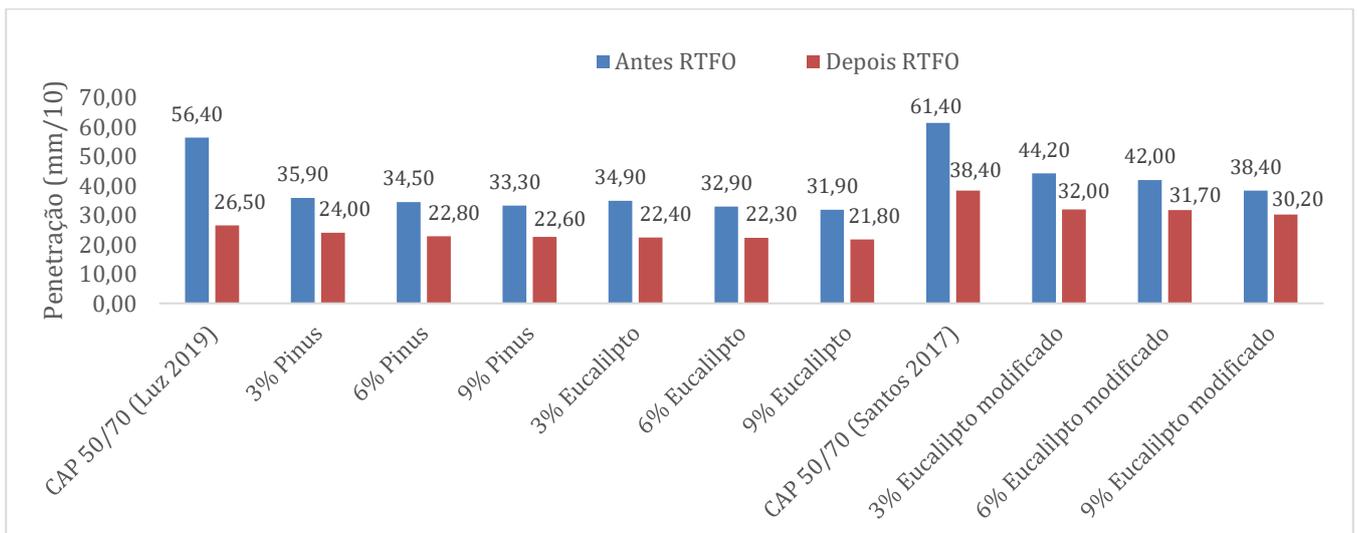
Essa redução da perda de massa dos ligantes modificados significa que estes volatilizaram menos seus componentes, ou seja, perderam menos suas propriedades viscoelásticas e que, provavelmente, poderão resistir mais ao enrijecimento na medida que envelhecem, resultando em maior durabilidade às deformações permanentes e à fadiga dos pavimentos.

## 4.2 Ensaios convencionais

### 4.2.1 Ensaio de penetração

O ensaio de penetração determina a consistência do ligante à temperatura de 25°C e o parâmetro penetração está diretamente relacionado à propriedade de rigidez do pavimento. Os resultados do ensaio de penetração das amostras antes e após o envelhecimento estão ilustrados na Figura 13.

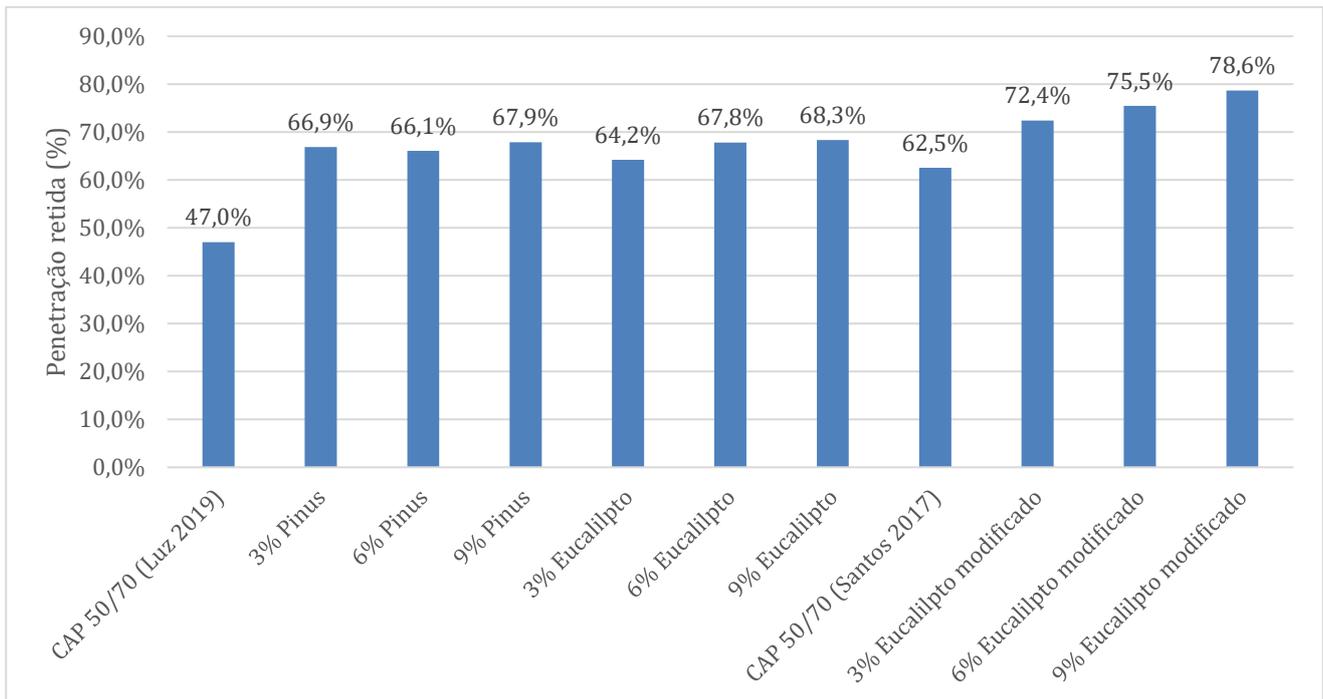
**Figura 13** – Ensaio de penetração para os ligantes puro e modificado



Por meio dos resultados encontrados observou-se que a adição da lignina reduziu o valor da penetração antes e após o envelhecimento, ou seja, a modificação do ligante gerou um aumento da consistência, conseqüentemente, houve uma elevação da sua dureza.

Tendo em vista que o ligante puro de ambas as pesquisas é o CAP 50/70, o limite estabelecido pela Resolução ANP nº 19/2005 para o parâmetro do ensaio de penetração é o intervalo de 50 a 70 décimos de milímetro. O resultado do ligante sem adição de lignina atendeu ao critério da especificação da ANP. Contudo, os ligantes modificados com lignina não se enquadraram no intervalo, pois apresentaram redução da penetração além do previsto para o ligante puro. Mesmo os ligantes modificados ficando fora da especificação da ANP para o ligante de referência (CAP 50/70), não pode à princípio ser considerado um ponto negativo, porque tal especificação não é própria para o material em estudo e está apenas servindo de base para comparação dos resultados entre os ligantes puro e modificados, e levando em consideração estudos de alguns autores (CRAVO (2016), BATISTA (2017), SANTOS (2017) e SANTOS *et al.*, (2018)) que demonstraram que é comum a diminuição da penetração na medida que são adicionados teores de lignina ao ligante asfáltico, portanto sendo assim aceitáveis os valores obtidos para estes ensaios. Segundo Botaro *et al.* (2006) que estudou a adição de 1% a 6% de lignina proveniente do bagaço da cana-de-açúcar ao CAP 20, esse aumento da dureza do ligante asfáltico é provocado pela introdução de uma elevada quantidade de anéis aromáticos presentes na estrutura da lignina que levam a redução da penetração em função do aumento da concentração de lignina.

Com o objetivo de verificar a sensibilidade do ligante ao envelhecimento, comparou-se os resultados antes e após o envelhecimento, com isso, obteve-se a penetração retida, que significa o quanto a penetração após o envelhecimento representa da penetração na condição normal. A Figura 14 mostra os valores obtidos para penetração retida.

**Figura 14 – Porcentagem de penetração retida (PPR).**

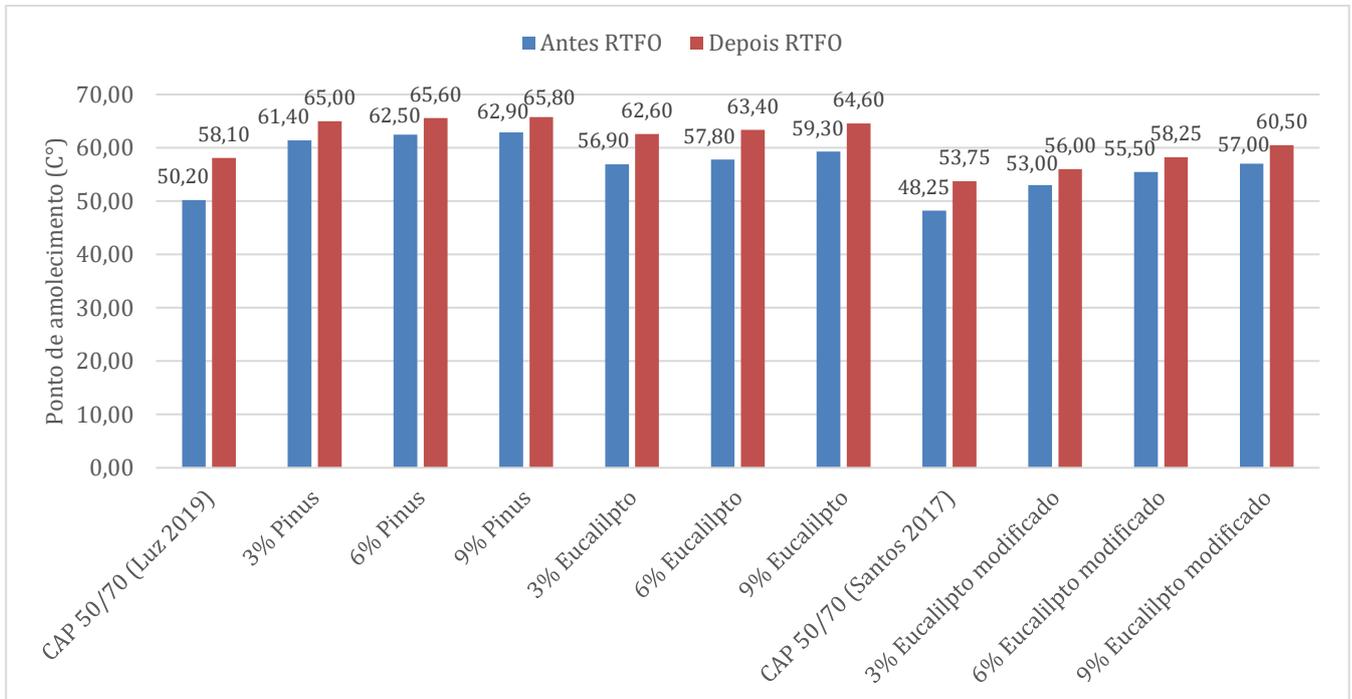
A resolução ANP nº 19/2005 define o mínimo de 55% para esse parâmetro de porcentagem de penetração retida. Através dos resultados observa-se que os ligantes modificados com a adição de lignina foram superiores ao ligante puro e apresentaram valores dentro do especificado com exceção do ligante puro CAP 50/70 de Luz (2019) que obteve uma penetração retida de 47%. Esse aumento da penetração retida tornou os ligantes mais resistentes ao envelhecimento e oxidação. Entre as amostras vale destacar o desempenho de lignina 9% Eucalipto modificado de Santos (2017) que teve o melhor desempenho do teste de retenção com 78,6%.

#### 4.2.2 Ponto de Amolecimento

A determinação do ponto de amolecimento é mais uma medida empírica da consistência do ligante e consiste em definir uma temperatura de referência para a qual o ligante atinge uma certa condição de escoamento. Este parâmetro relaciona-se à manutenção das propriedades do ligante a elevadas temperaturas e ao aumento da resistência à deformação permanente. A resolução da ANP nº 19 /2005 estabelece o limite mínimo para os valores de ponto de amolecimento para o CAP 50/70, que é uma temperatura de 46°C na condição normal. A Figura 15 apresenta

os resultados obtidos no ensaio de ponto de amolecimento para o ligante puro, CAP 50/70, e para os ligantes modificados com a lignina Pinus e Eucalipto, antes e após o processo de envelhecimento à curto prazo.

**Figura 15** – Ponto de amolecimento dos ligantes puro e modificados.



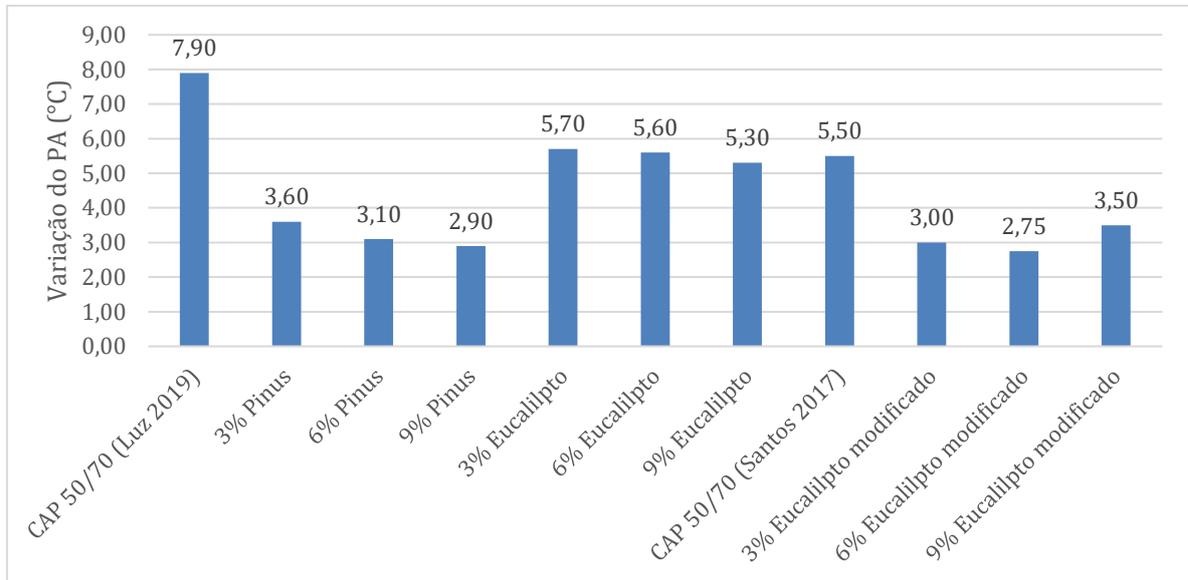
Analisando os valores encontrados nos experimentos, podemos verificar que houve uma tendência de aumento nas temperaturas de ponto de amolecimento dos ligantes modificados, o que é muito favorável, pois quanto maior o ponto de amolecimento, menor é a ocorrência de deformações e menos sensível torna-se o ligante à temperatura, mantendo suas propriedades até temperaturas mais elevadas, neste caso, 62,9°C, fato que pode ser observado com o notável acréscimo em 12,7°C no ligante com 9% de lignina Pinus comparado ao ligante puro, antes do envelhecimento, já após o envelhecimento a curto prazo a temperatura subiu para 65,8°C, que representa um acréscimo de 7,7°C em relação ao ligante puro pós RTFO.

Asukar et al. (2016) quando estudaram a associação de dois tipos de ligninas em teores de 5% e 7% em dois ligantes diferentes, também observaram, além de uma redução de penetração, um aumento no ponto de amolecimento das amostras.

A norma DNIT - ME 95/2006 determina que após o procedimento RTFO a variação do ponto de amolecimento não deve ultrapassar um máximo de 8°C

quando comparado ao ligantes antes do envelhecimento à curto prazo. A Figura 16 apresenta a variação desse parâmetro e nota-se o enquadramento de todas as amostras.

**Figura 16**– Variação do ponto de amolecimento (PA) antes e após o RTFO.



Dentre os resultados encontrados, verificou-se que as variações obtidas para os ligantes modificados foram inferiores ao obtido para o ligante puro intensificando a influência desse aditivo na resistência ao envelhecimento, com destaque maior na pesquisa de Luz (2019) para a lignina Pinus no teor de 9% que apresentou uma variação de 2,9 °C e que quando comparado ao CAP 50/70 reduziu cerca de 63,30%, enquanto na pesquisa de Santos (2017) quem apresentou maior destaque foi a lignina Eucalipto modificado 6% que apresentou uma variação de 2,75°C, representando uma redução de 50% em relação ao ligante puro utilizado na pesquisa, o que significa que em uma análise entre as duas pesquisas, no quesito de ponto de amolecimento a lignina Pinus 9% de Luz (2019) apresentou melhor resultado.

### 4.3 Ensaios especiais

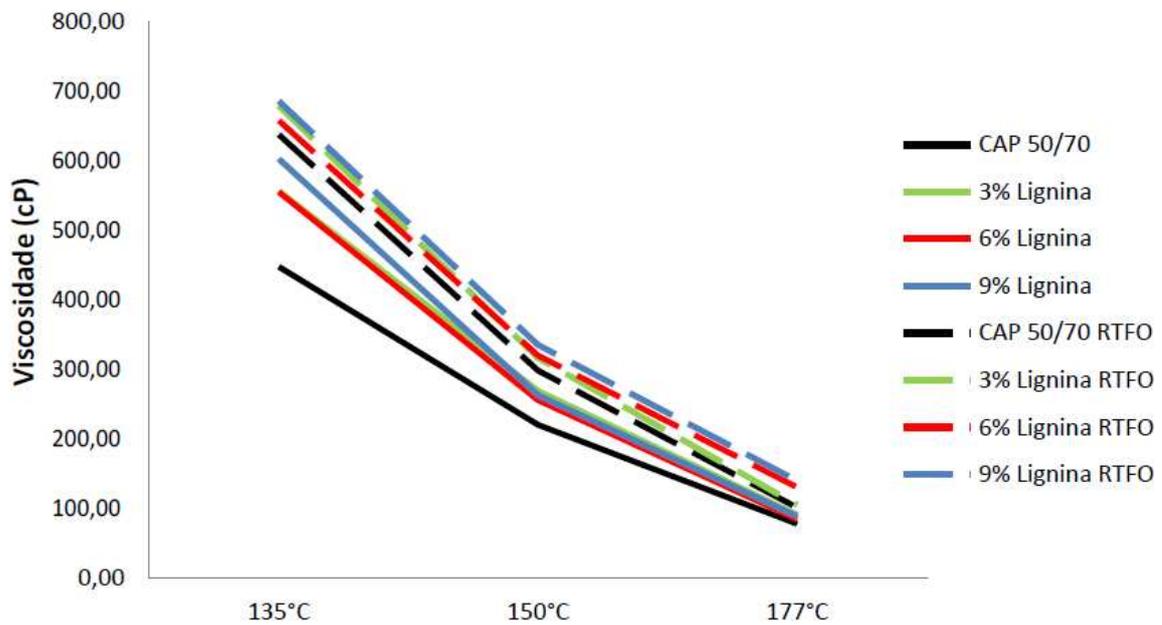
#### 4.3.1 Viscosidade Rotacional

A viscosidade do ligante está relacionada com sua capacidade de envolver os agregados da mistura e melhorar a trabalhabilidade das misturas asfálticas em campo, com um destaque para a determinação das temperaturas de usinagem e compactação. Por isso, seu estudo tem fundamental importância, visto que uma alta

viscosidade conduz a necessidade de altas temperaturas nas etapas da pavimentação, o que pode até inviabilizar o uso do material (SANTOS, 2017).

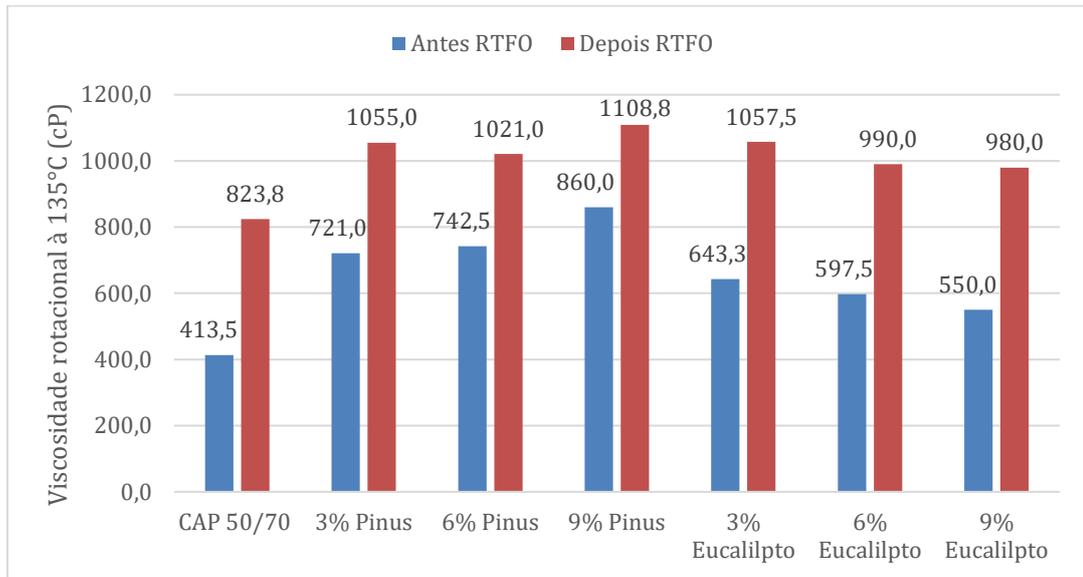
A Figura 17 ilustra o comportamento apresentado pelos ligantes da pesquisa de Santos (2017), enquanto as figuras 18, 19 e 20 ilustram os comportamentos dos ligantes referente a pesquisa de Luz (2019) quando submetidos ao ensaio no viscosímetro Brookfield.

**Figura 17** – Viscosidade do ligante Eucalipto Modificado antes e após RTFO.

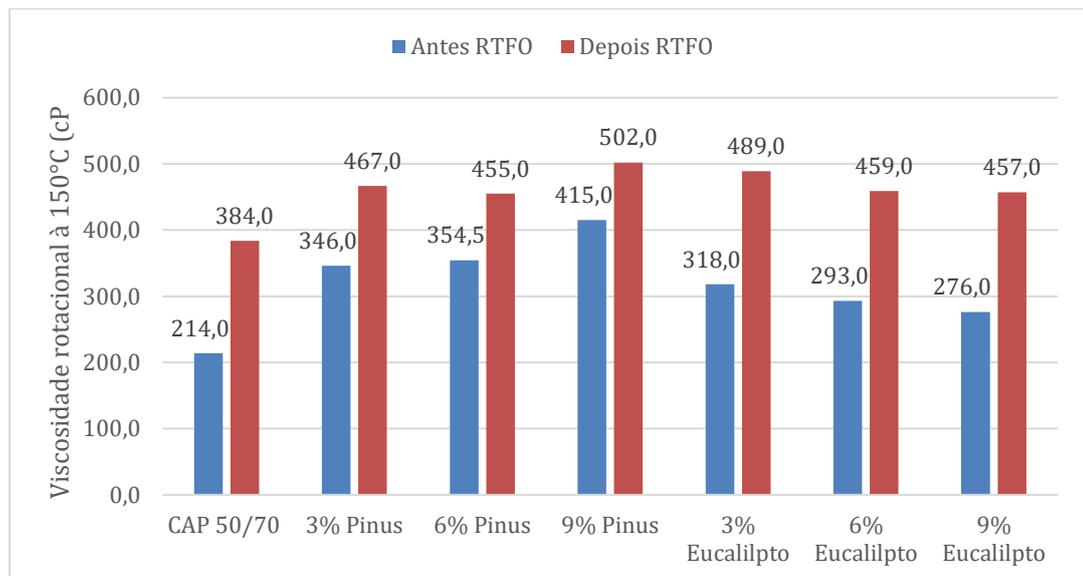


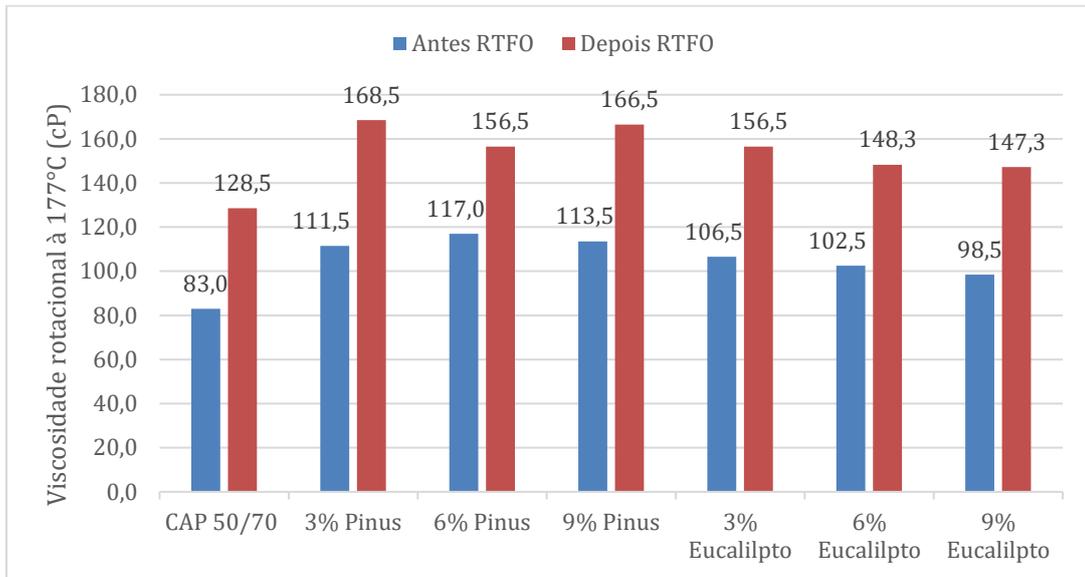
Fonte: Santos (2017)

**Figura 18 – Viscosidade rotacional à 135°C.**



**Figura 19 – Viscosidade rotacional à 150°C.**



**Figura 20 – Viscosidade rotacional à 177°C.**

Ao analisar na condição as amostras de Santos (2017) e Luz (2019), notou-se um aumento da viscosidade com o acréscimo dos teores de lignina em relação ao ligante puro, antes e após o envelhecimento a curto prazo. No entanto, ao comparar os três tipos de lignina percebeu-se que a medida que eleva a quantidade de lignina Pinus e lignina Eucalilpto modificada a viscosidade aumenta ao contrário do que ocorre com a lignina Eucalilpto que com o aumento do teor utilizado os valores de viscosidade diminuíram. Essa tendência foi sinalizada por Luz (2019) no ensaio de FTIR, onde os picos das amostras sugerem esse comportamento por meio das quantidades de asfaltenos.

Quanto à Resolução ANP nº 19/2005, os valores das viscosidades do ligante puro, e conseqüentemente dos modificados por adição de lignina, atenderam aos valores mínimos (274 cP – 135°C e 112 cP – 150°C) e intervalo (28-114 cP – 177°C) da especificação com suas respectivas temperaturas. Além disso, segundo a especificação SUPERPAVE, o limite máximo de 3 Pa.s na temperatura de 135°C para a viscosidade também foi atendido em todos os resultados. Cabendo salientar que 1 cP corresponde a 0,001 Pa.s.

De acordo com a metodologia SUPERPAVE a melhor viscosidade para a mistura concede ao ligante asfáltico capacidade de envolver todos os agregados. Gama (2016) justifica que viscosidades muito baixas podem provocar escorregamento da mistura asfáltica quando compactada pela ação dos rolos compactadores. Dessa maneira, é necessário definir as Temperaturas de Usinagem

– TU e Temperaturas de Compactação – TC ideais que vão variar conforme o tipo de ligante asfáltico utilizado.

As TU's e TC's foram calculadas por um método tradicional que determina uma TU na qual o ligante tenha uma viscosidade rotacional de  $0,17 \pm 0,02$  Pa.s e uma TC na qual apresente viscosidade rotacional de  $0,28 \pm 0,03$  Pa.s. Os valores das TU's e TC's estão disponibilizados na Tabela 3.

**Tabela 3** – Temperaturas de usinagem e compactação dos ligantes

	Temperaturas de Usinagem e Compactação					
	Usinagem °C			Compactação °C		
	Intervalo	Valor	Médio	Intervalo	Valor	Médio
CAP 50/70 Luz (2019)	166	160	163	152	144	148
Pinus 3%	172	169	170	164	160	162
Pinus 6%	172	169	171	165	161	163
Pinus 9%	172	170	171	167	163	165
Eucalipto 3%	171	168	169	163	158	160
Eucalipto 6%	170	167	168	161	156	159
Eucalipto 9%	169	166	167	160	154	157
CAP 50/70 Santos (2017)	160	154	157	148	143	145,5
Eucalipto modificado 3%	164	158	161	152	147	149,5
Eucalipto modificado 6%	163	157	160	151	147	149
Eucalipto modificado 9%	164	158	161	152	148	150

Em relação à temperatura de usinagem, determinada a partir do intervalo de viscosidade compreendido entre  $(170 \pm 20)$  cP, obteve-se para o ligante puro de Luz (2019) valores numa faixa de  $163 \pm 3^\circ\text{C}$ , enquanto o ligante puro de Santos (2017) ficou na faixa de  $157 \pm 3^\circ\text{C}$ , já para os ligantes modificados por adição de lignina, os valores de Luz (2019) ficaram em torno de  $168 \pm 3^\circ\text{C}$  enquanto os de Santos (2017) apresentaram valores entre  $161 \pm 3^\circ\text{C}$ .

O aumento na viscosidade do ligante devido à adição da lignina causou evidentemente um aumento na temperatura de usinagem, em  $3^\circ\text{C}$  na pesquisa de

Santos (2017), enquanto os ligantes estudados por Luz (2019) apresentaram aumento de cerca de  $7^{\circ}\text{C}$ , se considerado o ponto médio das faixas de temperaturas anteriormente determinadas para o ligante puro e modificados. No entanto, esses valores não representam problemas, justificado até mesmo pela norma DNIT 031/2006 – ES que define o intervalo conveniente para a temperatura do ligante ser trabalhado na mistura entre  $107^{\circ}\text{C}$  a  $177^{\circ}\text{C}$ . Deste modo, o acréscimo da viscosidade não foi excessiva, assim como também a pequena variação de temperatura não prejudicou a trabalhabilidade do ligante.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

### **5.1 Considerações Finais**

O comparativos entre os resultados das propriedades físicas e reológicas das pesquisas de Santos (2017) e Luz (2019) mostraram que ambas conseguiram determinar ligantes modificados promissores, quando se diz respeito aos resultados dos ensaios físicos, que mostraram que os ligantes modificados com as ligninas Pinus, Eucalipto e Eucalipto modificado apresentaram menor penetração, maior ponto de amolecimento e menor susceptibilidade ao envelhecimento à curto prazo, mostrando suportar maiores temperaturas em campo e contribuindo de maneira positiva na resistência a deformação.

A análise dos resultados dos ensaios empíricos mostrou que a presença de lignina no ligante contribuiu positivamente na resistência à deformação, mas principalmente na resistência ao envelhecimento do material comparado ao ligante puro. O aumento da resistência à deformação foi verificado com a redução da penetração e consequente aumento da consistência, assim como no aumento do ponto de amolecimento, o qual fundamentou ainda mais essa afirmação. Já o aumento da resistência ao envelhecimento foi notado pelas menores variações dessas mesmas propriedades antes e após RTFO nos ligantes modificados.

A reologia dos ligantes modificados mostrou que a incorporação da lignina aumentou a viscosidade do ligante. Diante dos resultados da pesquisa, a modificação do CAP 50/70 com lignina foi benéfica pois retardou envelhecimento e enrijecimento demasiado do material, melhorando sua resistência quanto à deformação permanente e à fadiga.

Baseado nas análises físicas e reológicas realizadas teores estudados indicam que os mesmos possuem propriedades físicas e reológicas adequadas para o emprego em campo, porém, em cada estudo tiveram teores que se destacaram mais, no caso de Santos (2017) os resultados indicaram que o teor ótimo da lignina Eucalipto modificado foi de 9% e embora pudessem ser testados teores superiores a esse valor, esta hipótese foi sendo eliminada à medida que foi sendo observada um certa tendência desse acréscimo não contribuir de maneira tão positiva, como foi visto, por exemplo, nos ensaios de penetração e viscosidade rotacional. Já para Luz (2019) A adição das ligninas Pinus e Eucalipto no teor de

3% destacou-se, mostrando ser o meio mais eficaz de incorporação desse aditivo ao ligante asfáltico.

Portanto, a incorporação de lignina em ligantes asfálticos proporcionou benefícios como diminuição da deformação permanente, aumento da vida de fadiga, e ainda forneceu ao ligante, menor susceptibilidade ao envelhecimento precoce à curto prazo, Diante do exposto, pode-se concluir que a utilização das ligninas analisadas são viáveis do ponto de vista físico e reológico pelos resultados alcançados nesta pesquisa, assim como do ponto de vista ambiental, tendo em vista os problemas que o descarte incorreto desse resíduo da indústria de papel e celulose podem acarretar ao meio-ambiente, mas também pode ser viável economicamente por, em princípio, poder substituir em torno de 9% em peso do ligante utilizado na pavimentação. Mas ainda existem algumas lacunas que necessitam ser preenchidas para o emprego desta modificação, e encontram-se sugeridas no final do capítulo.

## 5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras

De acordo com os resultados encontrados, e com a finalidade de aprofundamento desta pesquisa, são feitas as seguintes sugestões de estudo nesta área:

- Verificar, por meio de outros ensaios químicos, a influência do tipo de lignina na modificação do ligante asfáltico convencional;
- Expor os ligantes asfálticos a raios ultravioletas por períodos variados e analisar as alterações nas características químicas e reológicas durante o envelhecimento;
- Utilizar ligantes distintos dos usados nesta pesquisa buscando avaliar a interação dos diferentes tipos de lignina com ligantes de composição química diferente.
- Analisar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas utilizando um ligante asfáltico modificado com lignina, empregando os dois tipos de lignina, Pinus e Eucalipto;
- Estudar o emprego da lignina como filler na mistura asfáltica;
- Realizar uma análise de custo da incorporação desse material no ligante ou diretamente na mistura asfáltica.

## REFERÊNCIAS

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.

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.

\_\_\_\_\_. NBR 15184. Materiais Betuminosos – *Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional*. São Paulo, 2004.

ASSUMPÇÃO, R. M. V.; PINHO, M. R. R.; CAHEN, R.; PHILIPP, P. *Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica*. São Paulo: Departamento de Divulgação do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A., p. 169-319. 1988.

ASUKAR, S. D.; BEHL, A.; GUNDALIYA, P. J. *Utilization of Lignin as an Antioxidant in Asphalt Binder*. International journal of innovative research in technology, IJIRT, v. 2, n. 12, p. 198-207, 2016.

AZEVEDO, P. N.; FILHO, A. F. S.; *Asfalto Modificado com Polímeros (SBS)*. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Católica do Salvador, Salvador, 2009.

BASTOS, J. B. S.; BORGES, R. L.; SOARES, J. B.; KLINSKY, L. M. G. *Avaliação em laboratório e em campo da deformação permanente de pavimentos asfálticos do Ceará e de São Paulo*. 2015. Transportes, v. 23, n. 3, p. 44-55, 2015.

BATISTA, K. B. *Desenvolvimento de Ligantes Asfálticos Modificados com Lignina como Aditivo Antienvelhecimento*. 2017. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG. 2017.

BELGACEM, M. N.; BLAYO, A.; GANDINI, A. *Organosolv lignin as a filler in inks, varnishes and paints*. Industrial Crops and Products, v. 18, n. 2, p. 145-153, 2003.

BERNUCCI, L. B., L. M. G. MOTTA, J. A. P. CERATTI, E J. B. SOARES. *Pavimentação asfáltica - formação básica para engenheiros*. 1. Rio de Janeiro: ABEDA, 2007.

BOTARO, V. R.; CASTRO, S. R.; JUNIOR, F. R.; CERANTOLA, A. E. *Obtenção e caracterização de blendas de asfalto CAP 20, modificado com poliestireno reciclado, resíduos de pneu e lignina organosolv*. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 59, n. 1, p. 117-122, 2006.

BRAUN, J. L.; HOLTMAN, K. M.; KADLA, J. F. *Lignin-based carbon fibers: Oxidative thermostabilization of kraft lignin*. Carbon, v. 43, n. 2, p. 385-394, 2005.

CABRAL, A, M. *Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas com Agregado Sinterizado de Argila Modificadas por Nanomaterial de Multicamadas de Grafeno*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

CRAVO, M. C. C. *Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástique e matriz de agregados finos*. 2016. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

D'ALMEIDA, M. L. O. *Composição química dos materiais lignocelulósicos*. In: PHILIPP, P. (Rev.); D'ALMEIDA, M. L. O. (Coord.). *Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica*. São Paulo: Departamento de Divulgação do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A.), 1988, p. 45-106.

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

\_\_\_\_\_. DNIT – EM 095/2006. *Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação de material*, Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 131/2010. *Materiais Asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola*, Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. DNIT – ME 155/2010. *Material asfáltico – determinação da penetração*, Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_. DNIT-ME 385/99. *Pavimentação – concreto asfáltico com asfalto polímero*. Rio de Janeiro, 1999.

DIAS, T. M. S.; SILVA, B. A.; REIS, M. M. *Estudo da lignina e seu potencial como bioaditivo para uso em misturas asfálticas*. Trabalho apresentado ao XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Curitiba, 2014.

DUARTE, E. V. N.; *Avaliação Reológica de Ligante Asfáltico 50/70 Modificado com Polímero Reativo e Não-Reativo Associado ao Ácido Polifosfórico*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

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, 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.

FERREIRA, C. A. S. *Avaliação do desempenho fotocatalítico de camadas betuminosas superficiais de pavimentos*. Dissertação (Mestrado). Universidade do Minho. Escola de Engenharia, 2016.

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.

HERNÁNDEZ, J. A. *Lignina organosolv de Eucalyptus dunnii maiden, poliuretano para madeira*. 93 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

ITEN, D. O. V. F. *Estudo das Misturas Asfálticas em CBUQ utilizando Asfalto Convencional e Asfalto Modificado por Polímeros*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2011.

JASSO, M.; HAMPL, R.; VACIN, O.; BAKOS, D.; STASTNA, J.; ZANZOTTO, L. *Rheology of conventional asphalt modified with SBS, Elvaloy and polyphosphoric acid*. Fuel Processing Technology, 2015.

KALANTAR, Z. N.; KARIM, M. R.; MAHREZ, A. *A review of using waste and virgin polymer in pavement*. Construction and Building Materials, p. 55-62, 2012.

LIMA, A. F.; JARA, E. R. P.; ALFONSO, V. A. *Madeira como matéria-prima para fabricação de pasta celulósica*. Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta

celulósica. São Paulo: Departamento de Divulgação do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S. A., 1988, p. 129-168.

LIMA, C. S. *Caracterização de ligantes asfálticos modificados com borracha de pneu e aditivo*. 2008a. 159 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 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.

LUO, J. *Lignin-based carbon fiber*. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia química). Universidade de Maine, 2010.

LUZ, P. M. S. G. *Avaliação reológica do ligante asfáltico 50/70 modificado com lignina das madeiras pinus e eucalipto*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2019.

MARINHO FILHO, P,G,T; *Avaliação Reológica de Ligantes Asfálticos Modificados com Nanopartículas de Dióxido de Titânio*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

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

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.

NICÁCIO, C. C.; AMORIM, E. F. *Análise da incorporação de resíduos de pneus em um cimento asfáltico de petróleo (cap 50-70) através de ensaios de caracterização tecnológica*. Instituto Federal de Mato Grosso – IFMT, Cuiabá, 2015.

OSMARI, P, H. *Caracterização química, reológica e de morfologia superficial de ligantes asfálticos modificados por diferentes agentes rejuvenescedores*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2016.

PILO-VELOSO, D.; NASCIMENTO, E. A.; MORAIS, S. A. L. *Isolamento e análise estrutural de ligninas*. Química Nova, v. 16, n. 5, p. 435-448, 1993.

POLACCO, G.; FILIPPI, S.; MERUSI, F.; STASTNA, G. *A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility*. Advances in Colloid and Interface Science, v. 224, p. 72–112, 2015.

READ, J.; WHITEOAK, D. *The Shell Bitumen Handbook*. 5ª edição, London, England, London Thomas Telford Publishing, 2003.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D. Y.; KENNEDY, T. W. *Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction*. 2ª edição, Lanham, Maryland, USA, National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, 1996.

ROSA JÚNIOR, J. M. *Estudo das propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70) modificado com polímeros funcionalizados*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2015.

SALES, P, M. *Avaliação das Características Físicas e Mecânicas de Misturas Asfálticas Modificadas com Adição do CCBit*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

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.

SANTOS, N. S. *Propriedades reológicas do ligante asfáltico (CAP 50/70) modificado por adição de lignina*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2017.

SANTOS, N. S.; RODRIGUES, J. K. G.; MENDONÇA, A. M. G. D. *Efeito da adição de lignina kraft proveniente da madeira de eucalipto na reologia do CAP 50/70*. Matéria, v. 23, n. 3. Rio de Janeiro, RJ. 2018.

SOUTO, F.; CALADO, V.; PEREIRA JR, N. *Fibras de carbono a partir de lignina: uma revisão da literatura*. Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 100-114, 2015.

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

XIAO, F.; AMIRKHANIAN, S.; WANG, H.; HAO, P. *Rheological property investigations for polymer and polyphosphoric acid modified asphalt binders at high temperatures*. Construction and Building Materials, v. 64, p. 316–323, 2014.

ZHU, J.; BIRGISSON, B.; KRINGOS, N. *Polymer modification of bitumen: Advances and challenges*. European Polymer Journal, v. 54, n. 1, p. 18–38, 2014.