



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

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
PRODUZIDAS COM LIGANTE MODIFICADO POR LIGNINA EXTRAÍDA  
DE PINUS**

**RODOLFO PEREIRA SOUSA**

Orientadores: Dra Carina Silvani  
Ph Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça.

Campina Grande-PB, 28/06/2019

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS  
PRODUZIDAS COM LIGANTE MODIFICADO POR LIGNINA  
EXTRAÍDA DE PINUS**

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**

**RODOLFO PEREIRA SOUSA**

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.

Orientador: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

CAMPINA GRANDE – PB

06/2019

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**RODOLFO PEREIRA SOUSA**

### **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDAS COM LIGANTE MODIFICADO POR LIGNINA EXTRAÍDA DE PINUS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 28/06/2019  
perante a seguinte Comissão Julgadora:

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Carina Silvani  
Doutora em Engenharia  
Universidade Federal do Rio Grande do  
Sul

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Ana Maria Gonçalves Duarte  
Doutora em Engenharia Civil  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Orientadora

---

Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Aline Figueirêdo Nóbrega de Azeredo  
Doutora em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Campina Grande  
Membro Interno

---

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

---

Conrado César Vitorino  
Mestre em Engenharia Civil e Ambiental  
Universidade Federal de Campina Grande  
Examinador Externo

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por me proporcionar saúde e a força necessária para encarar este desafio, e a Nossa Senhora por me guiar neste caminho. Ao meus pais, Francisco e Selmara, que sempre me ampararam em todas as dificuldades, bem como meu irmão Lucas e irmã Vitória. Não poderia deixar de agradecer ao meu avô Cícero (*in memoriam*), que sempre me apoiou nos estudos, desde a infância. Agradeço também aos amigos, irmãos e a família que formei aqui em Campina Grande, em especial a minha amiga e irmã Ana Luiza e sua família, que sempre me acolheram, ao meu grande amigo Caio Batatinha. Também a todos que passaram por essa minha jornada nesta cidade, especialmente os irmãos de EJC: Rayane, Tanammy, Ramsés, Marinho e Victor. Além de Ana Carolina uma das pessoas mais especiais que já conheci. A professora Ana Maria pela paciência na orientação e incentivo que tornaram possível a conclusão deste trabalho, além de todos os funcionários do LEP que auxiliaram com o desenvolvimento da pesquisa.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, que é o alfa e ômega da minha vida, aos meu pai Francisco, minha mãe Selmara, a minha irmã Vitória, meu irmão Lucas, e meu avô Cícero.

*“Uma boa forma de ir além do possível, é marchar na direção do impossível.”*

**Eliezer Batista**

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Equipamentos utilizados na análise .....	23
<b>Figura 2:</b> Esquema da análise química do ligante asfáltico .....	24
<b>Figura 3:</b> Representação esquemática dos componentes dos asfaltos .....	24
<b>Figura 4:</b> Modelo de micelas .....	25
<b>Figura 5:</b> Representação esquemática do ligante asfáltico de comportamento Sol e Gel .....	26
<b>Figura 6:</b> envelhecimento do ligante asfálticos nas etapas de construção e de utilização do pavimento .....	28
<b>Figura 7:</b> Unidades básicas da estrutura das ligninas. ....	32
<b>Figura 8:</b> Fluxograma das caracterização do CAP Puro, modificado e agregados. ....	35
<b>Figura 9:</b> Fluxograma da caracterização das propriedades mecânicas .....	36
<b>Figura 10:</b> Misturador mecânico .....	37
<b>Figura 11:</b> Ensaio de granulometria .....	41
<b>Figura 12:</b> Agregados graúdos sendo pesados na condição submersa .....	42
<b>Figura 13:</b> Secagem da amostra com circulador de ar quente .....	42
<b>Figura 14:</b> Penetrômetro utilizado no experimento .....	38
<b>Figura 15:</b> Ensaio de ponto de amolecimento .....	39
<b>Figura 16:</b> O viscosímetro Brookfield, modelo DV-III ULTRA .....	40
<b>Figura 17:</b> Fluxograma Dosagem SUPERPAVE .....	44
<b>Figura 18:</b> Ensaio de compressão diametral .....	45
<b>Figura 19:</b> Prensa UTM-25 utilizada no ensaio de módulo de resiliência .....	46
<b>Figura 20:</b> Ensaio de Lottman Modificado .....	47
<b>Figura 21:</b> Ensaio de módulo dinâmico .....	48
<b>Figura 22:</b> Curva de distribuição granulométrica .....	50
<b>Figura 23:</b> Gráfico comparativos dos resultados de penetração .....	51
<b>Figura 24:</b> Ponto de amolecimento do ligante puro e modificado .....	52
<b>Figura 25:</b> Viscosidades das amostras .....	53
<b>Figura 26:</b> Resistência a tração para o CAP puro e modificado por lignina .....	56
<b>Figura 27:</b> Gráfico comparativo do módulo de resiliência .....	57
<b>Figura 28:</b> Resistência retida a tração .....	58
<b>Figura 29:</b> Curvas mestras para o ligante puro e modificado .....	59
<b>Figura 30:</b> Módulo dinâmico das misturas à 4°C .....	60

<b>Figura 31:</b> Módulo dinâmico das misturas à 21°C .....	60
<b>Figura 32:</b> Módulo dinâmico das misturas à 37°C .....	61
<b>Figura 33:</b> Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (T=4°C).....	62
<b>Figura 34:</b> Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (T=21°C).....	62
<b>Figura 35:</b> Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (T=37,7°C) ..	63

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Composição elementar da lignina.....	32
<b>Tabela 2:</b> Ensaio realizados para caracterização do CAP e misturas asfálticas .....	37
<b>Tabela 3:</b> Ensaio realizados para caracterização dos agregados .....	40
<b>Tabela 4:</b> Ensaio realizados para determinação das propriedades mecânicas.....	43
<b>Tabela 5:</b> Distribuição do tamanho das partículas .....	49
<b>Tabela 6:</b> Massa específica dos agregados.....	50
<b>Tabela 7:</b> resultados de penetração.....	51
<b>Tabela 8:</b> Temperaturas de usinagem e compactação para o ligante puro e modificado .....	54
<b>Tabela 9:</b> Resultados dos parâmetros volumétricos .....	55
<b>Tabela 10:</b> Módulo de resiliência conforme normas NBR e ASTM.....	57

## **LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS**

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AMPT - Asphalt Mixture Performance Test
- ANP - Agência Nacional de Petróleo
- ASTM - American Society for Testing and Materials
- AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials
- CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo
- DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre
- Gmm - Massa Específica Máxima Medida da Mistura
- NBR - Norma Brasileira Registrada
- RBV - Relação Betume x Vazios
- RRT - Resistência Retida à Tração
- SARA - Saturado Aromático Resinas Asfaltenos
- SUPERPAVE - Superior Performing Asphalt Pavements
- TC Temperatura de Compactação
- TU Temperatura de Usinagem
- VAM - Vazios do Agregado Mineral
- Vv - Volume de vazios

## **RESUMO**

Na maioria dos países, a principal técnica para revestimento de pavimentos flexíveis, é o revestimento asfáltico. A introdução de modificadores em ligantes asfálticos e em misturas asfálticas tem com o intuito evitar o surgimento dos defeitos propriamente ditos, permitindo melhorar a qualidade do ligante asfáltico e, por conseguinte, proporcionar ao pavimento uma maior vida em serviço. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas produzidas com ligante modificado por adição de teores de 3% e 6% de lignina proveniente de pinus. Para este estudo foi utilizado o CAP 50/70 e como modificador a lignina extraída do pinus. Foram realizados ensaios para determinação das propriedades mecânicas das misturas, dentre eles, destacam-se: tração indireta, Lottman Modificado e módulo de resiliência. A adição da lignina promoveu um aumento da rigidez, da viscosidade e das temperaturas de usinagem e compactação. Foi possível constatar um aumento da resistência ao rompimento, uma redução da adesividade após ciclos de umidade.

Palavras-chave: Misturas asfálticas, propriedades, pavimentação.

## **ABSTRACT**

In most countries, the main technique for coating flexible floors is the asphalt coating. The introduction of modifiers in asphalt binders and in asphalt mixtures has the purpose of avoiding the emergence of the defects themselves, allowing to improve the quality of the asphalt binder and, therefore, to provide the pavement with a longer life in service. Thus, this study aimed to evaluate the mechanical properties of asphalt mixtures produced with modified binder by addition of 3% and 6% lignin contents from pine. For this study, the CAP 50/70 was used as modifier and the lignin extracted from the pinus. Tests were carried out to determine the mechanical properties of the mixtures, among them: indirect traction, Modified Lottman and resilience modulus. The addition of lignin promoted an increase in stiffness, viscosity and machining and compaction temperatures. It was possible to observe an increase in tear strength, a reduction of adhesiveness after cycles of humidity.

**Key words:** Asphalt mixtures, properties, paving.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1 Justificativa.....	18
1.2 Objetivos .....	18
1.2.1 Objetivo Geral.....	18
1.2.2 Objetivos Específicos.....	18
1.3 Organização do Trabalho de Conclusão de Curso - TCC.....	20
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>21</b>
2.1 Ligante asfáltico .....	21
2.2 Estrutura química .....	22
2.3 Envelhecimento do ligante asfáltico .....	27
2.4 Caracterização das propriedades mecânicas .....	29
2.5 Lignina: origem, estrutura e propriedades.....	31
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
3.1 Materiais.....	35
3.2 Métodos .....	35
<b>3.2.1</b> Caracterização do CAP puro e modificado por 3 e 6% lignina extraída de pinus .....	36
<b>3.2.2</b> Caracterização dos agregados .....	40
<b>3.2.2.1</b> Granulometria.....	40
<b>3.2.2.2</b> Massa específica real dos agregados graúdos.....	41
<b>3.2.2.3</b> Massa específica real dos agregados miúdos.....	42
<b>3.2.3</b> Propriedades físicas das misturas asfálticas .....	38
<b>3.2.3.1</b> Penetração .....	38
<b>3.2.3.2</b> Ponto de amolecimento .....	39
<b>3.2.3.3</b> Viscosidade Rotacional .....	39
<b>3.2.4</b> Propriedades mecânicas das misturas asfálticas .....	43
<b>3.2.4.1</b> Dosagem das Misturas Asfálticas.....	43
<b>3.2.4.2</b> Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral .....	45
<b>3.2.4.3</b> Módulo de Resiliência.....	45
<b>3.2.4.4</b> Lottman Modificado .....	46

3.2.4.5	Módulo Dinâmico .....	48
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>49</b>
4.1	Caracterização física dos agregados .....	49
4.1.1	Granulometria .....	49
4.1.2	Massa Específica.....	50
4.2	Propriedades Físicas das misturas asfálticas.....	51
4.2.1	Ensaio de penetração .....	51
4.2.2	Ponto de amolecimento .....	51
4.2.3	Viscosidade Rotacional .....	53
4.3	Dosagem das Misturas Asfálticas .....	54
4.4	Propriedades mecânicas das misturas asfálticas.....	56
4.4.1	Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral .....	56
4.4.2	Módulo de Resiliência.....	57
4.4.3	Lottman Modificado .....	58
4.4.4	Módulo Dinâmico .....	59
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>64</b>
5.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	64
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	65
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>66</b>

## 1. INTRODUÇÃO

É notório a evidência da preocupação ambiental nos últimos anos. Neste contexto a sustentabilidade é frequente, e os profissionais do campo da engenharia são responsáveis pelo desenvolvimento de produtos, materiais e métodos que busquem a eficiência e gerem o menor impacto ambiental possível (SILVA, 2016).

Com relação ao Brasil, um problema enfrentado é o aumento da frota de veículos que circulam ano após ano, em paralelo a este processo é elevada porção da malha rodoviária no Brasil não pavimentada, isto favorece a busca por novas tecnologias capazes de gerar pavimentos de boa qualidade, menor custo, e que permitam a redução da emissão de gases poluentes, o que contribui para a melhoria do meio ambiente (SILVA, 2016).

Um dos mais versáteis materiais de construção utilizados pelo homem é o asfalto. O seu emprego na pavimentação é imprescindível e seu uso data da antiguidade. A pavimentação asfáltica é uma das principais formas de revestimento ao redor do planeta. E em nosso país a história não difere, pois cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico, este ainda é utilizado em grande parte das ruas (BERNUCCI, 2008).

A sociedade contemporânea é dependente de combustíveis fósseis para atender às necessidades básicas de energia, combustíveis, além de produtos químicos orgânicos e polímeros. Com o incremento da demanda de energia, o esgotamento gradual dos combustíveis fósseis, o que gera um aumento no preço do óleo bruto, e inúmeros prejuízos ambientais gerados pela emissão de gases poluentes, temos inúmeras motivações para a exploração de recursos renováveis para a produção sustentável de eletricidade, calor, combustíveis, produtos químicos orgânicos e polímeros (MAITY, 2015).

A biomassa lignocelulósica é considerada um dos recursos renováveis mais promissores para substituir energia e materiais de origem fóssil. O complexo uso de tecnologias de processamento para conversão de biomassa é similar às refinarias de petróleo, e são comumente denominadas de biorrefinarias. O termo biorrefinaria refere-se a um mecanismo integrado entre equipamentos e processos de conversão de biomassa para produzir

combustíveis, energia e produtos químicos (NREL – NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, 2011).

A lignina é um dos componentes que constituem a biomassa lignocelulósica, trata-se de uma macromolécula composta por unidades fenilpropano. Grande parte da lignina disponível é obtida como subproduto da produção de polpa celulósica, e a sua principal utilização é a queima para geração de energia na própria indústria. Todavia, a estrutura aromática da lignina pode ser responsável por produzir uma grande variedade de produtos químicos mais valiosos de forma mais sustentável (OLIVEIRA, 2015).

Desta maneira, a utilização de materiais lignocelulósicos como recursos renováveis para a produção de combustíveis e produtos químicos desperta a atenção da comunidade acadêmica e governantes, preocupados com a limitada oferta e o passivo ambiental gerado pela utilização dos combustíveis fósseis (CARVALHO, 2015).

## 1.1 Justificativa

O ligante asfáltico vem sendo amplamente utilizado na pavimentação de rodovias, é um material bastante complexo com uma grande variedade de compostos orgânicos. Há várias razões que fazem com que este material seja tão utilizado, e ele parte do fato de que ele proporciona forte união dos agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável, bem como também se mostra durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, álcalis e sais.

Embora bastante utilizado, o asfalto vem sofrendo uma degradação cada vez maior, e isso se dá pelos seguintes fatores: aumento no volume de tráfego, excesso de carga transportada por eixo, pressão de enchimento dos pneus elevada e pouco planejamento e realizações de conservação/intervenção.

Sendo assim, de forma a evitar e minimizar esses tipos de problemas nos ligantes asfálticos, algumas substâncias vem sendo misturadas ao material em busca de obtenção de melhores condições de uso. Neste contexto surge a lignina, que devido a sua estrutura aromática pode ser responsável por uma melhoria das propriedades do ligante asfáltico.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar o efeito da adição da lignina proveniente de pinus no comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligante modificado por adição de lignina nos teores de 3% e 6%.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a resistência a tração indireta de misturas asfálticas produzidas com ligante modificado por adição de lignina proveniente do pinus nos teores de 3% e 6%.
- Estudar a relação entre o módulo de resiliência e o aumento da rigidez, para misturas asfálticas modificadas com teores de 3% e 6% de lignina extraída de pinus.

- Analisar a adesividade de misturas asfálticas modificadas com teores de 3% e 6% de lignina extraída de pinus, de acordo com as normas vigentes.
- Caracterizar a comportamento da rigidez de amostras modificadas com teores de 3% e 6% de lignina extraída de pinus, quando submetidas a variação de temperatura.

### 1.3 Organização do Trabalho de Conclusão de Curso – TCC

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

Introdução – Introdução, Justificativa, Objetivos da Pesquisa e Organização do Projeto.

Fundamentação Teórica – São abordados assuntos relacionados aos ligantes asfálticos, modificadores de ligantes asfálticos, misturas asfálticas e suas propriedades.

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 que pretende-se obter para as propriedades mecânicas de misturas asfálticas produzidas com ligante asfáltico modificado por adição de lignina proveniente de pinus.

Considerações finais e sugestões para pesquisas futuras

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

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para facilitar a compreensão da presente pesquisa apresenta-se uma visão abrangente dos conceitos aplicados ao estudo da pavimentação, bem como o comportamento de ligantes asfálticos, as definições acerca da estrutura química, o estudo do envelhecimento e a caracterização mecânica destes. Em seguida, aborda-se, de uma forma geral, o modificador natural em estudo, a lignina, com ênfase nos aspectos ambientais que remetem ao material e de estudos realizados sobre o tema proposto.

### 2.1 Ligante asfáltico

O asfalto é um produto derivado do petróleo, logo é constituído predominantemente por betume, e este é definido como uma mistura de hidrocarbonetos. Trata-se de um material, aglutinante, não volátil e de cor escura, que pode ser obtido de forma natural (como no lago de Guanoco, na Venezuela) ou a partir da destilação fracionada do petróleo. Logo, quando nos referimos aos asfaltos englobamos diversos derivados do petróleo, é o caso dos cimentos asfálticos, emulsões asfálticas e asfaltos diluídos. O ligante asfáltico mais conhecido é o asfalto de petróleo, que possui propriedades que atendem aos requisitos mínimos para aplicação em pavimentação (SANTOS, 2017).

O ligante asfáltico tem função aglutinante e impermeabilizante na mistura asfáltica. A função aglutinante visa proporcionar ligação entre os agregados, que possibilita uma mistura asfáltica capaz de resistir à ação mecânica de desagregação produzida pela ação do tráfego. Quanto à função de impermeabilização, garante ao pavimento vedação eficaz contra a penetração de água, minimizando o efeito nocivo, que pode comprometer a estrutura do pavimento (SOBREIRO et al.,2014).

Os pavimentos asfálticos são compostos por camada superficial asfáltica (revestimento), apoiada sobre camadas de base, de sub-base e de reforço do subleito. Os revestimentos asfálticos são projetados para resistir a números solicitações de carga, dentro do horizonte de projeto, eles devem suportar as

condições climáticas que estão sujeitas, impermeabilizar o pavimento, e garantir conforto e economia aos usuários (BERNUCCI, 2008). O ligante asfáltico proporciona a união dos agregados, o que possibilita a mistura asfáltica a capacidade de resistir à ação mecânica de desagregação produzida pela ação do tráfego, e ainda uma vedação eficiente contra a ação da água, o que poderia afetar a estrutura do pavimento (SOBREIRO, 2014).

Ao redor do planeta a pavimentação asfáltica é o tipo de revestimento mais empregado, e no Brasil a situação não difere, sendo amplamente utilizado em rodovias e ruas. Ao analisar a matriz de transportes brasileira, observa-se um predomínio do modal rodoviário, embora é notório a redução dos investimentos federais no setor, devido à crise financeira e política que assola o país, o que fomenta a busca por materiais que aumentem a vida útil do pavimento, já que a manutenção é também negligenciada.

Um fenômeno que observa-se é a redução da vida útil dos pavimentos ao longo do tempo, ocasionado pelo aumento das solicitações de tráfego, o que impulsiona a busca por cimentos asfálticos de melhor qualidade (ROSA JÚNIOR, 2015). Logo, surge a utilização de modificadores introduzidos no CAP com a finalidade de melhorar a qualidade e o desempenho da mistura asfáltica, sejam polímeros ou óleos. Todavia, é vital a compatibilidade entre os materiais, para evitar problemas como: a separação de fases durante a armazenagem e a baixa resistência ao envelhecimento (LIMA, 2008b). Outras preocupações são ainda: o elevado custo e a alta sensibilidade à temperatura de determinados polímeros modificadores; isto leva ao desenvolvimento de modificadores alternativos, de origem vegetal, para uso em pavimentos flexíveis.

## 2.2 Estrutura química

A composição química do asfalto é bastante complexa e diversificada, alterando-se com a fonte de petróleo: ocorre uma variação do número de átomos de carbonos por molécula, além da presença de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes (BERNUCCI, 2008).

Outro fator que altera a composição química é o tipo de fracionamento a que se submete o ligante asfáltico, o método mais moderno empregado atualmente é o normalizado pela ASTM D 4124-01, este separa as seguintes frações: saturados, nafteno-aromáticos, polar-aromáticos e asfaltenos. Os asfaltenos são separados primeiro por precipitação com adição de n-heptano, e os outros constituintes, englobados na designação genérica de maltenos, são solúveis no n-heptano e separados por cromatografia de adsorção. Outro método similar conhecido é o SARA (S de saturados, A de aromáticos, R de resinas e A de asfaltenos), sendo a separação dos constituintes realizada por cromatografia de camada fina com detecção por ionização de chama (LEITE, 1999; SHELL, 2003)

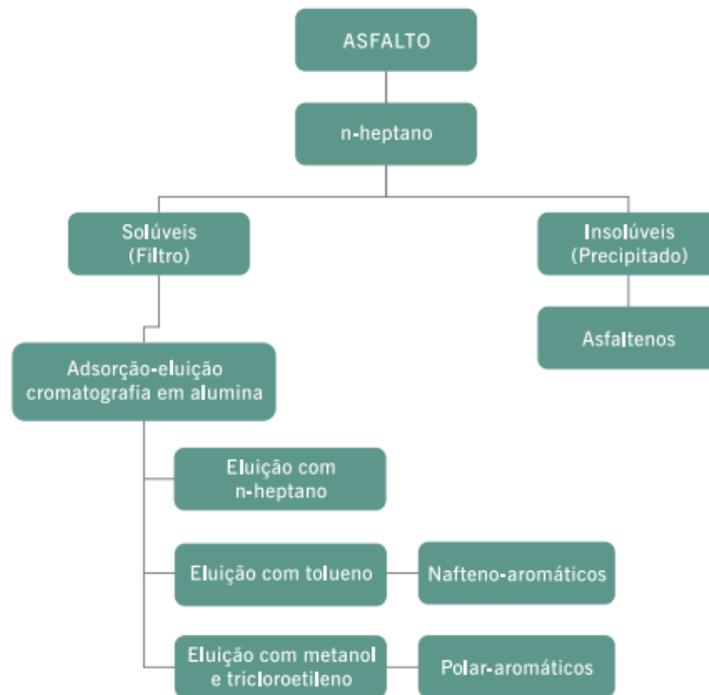
A Figura 1 ilustra os dois equipamentos usados para essa análise e de maneira esquemática a Figura 2 relaciona os passos da análise da composição química dos ligantes asfálticos pelo método SARA. Já a Figura 3 ilustra a representação esquemática dos componentes do asfalto (SHELL, 2003).

**Figura 1:** Equipamentos utilizados na análise



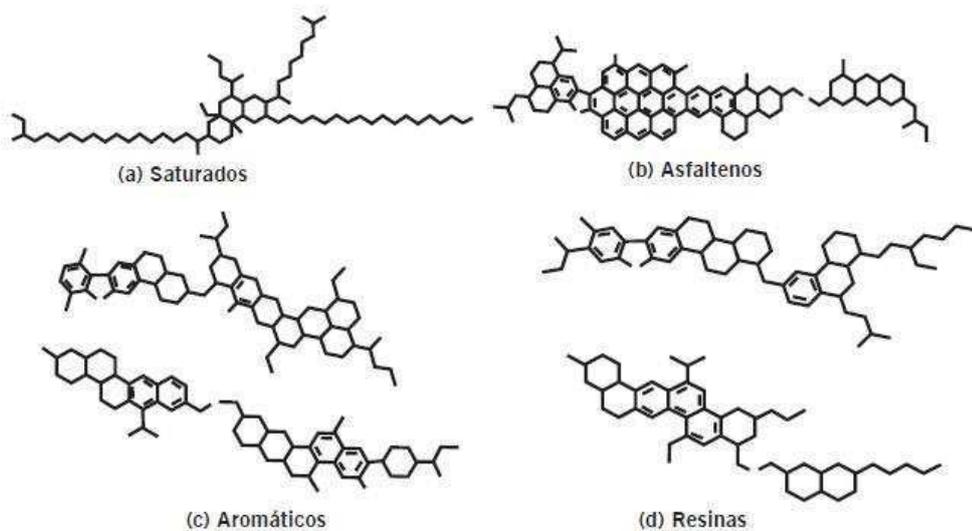
**FONTE:** Bernucci et al., (2004)

**Figura 2:** Esquema da análise química do ligante asfáltico



**FONTE:** Bernucci et al.,(2004)

**Figura 3:** Representação esquemática dos componentes dos asfaltos



**FONTE:** Shell (2003)

Os asfaltenos são aglomerados de compostos polares e polarizáveis formados por associações intermoleculares, constituídos de hidrocarbonetos naftênicos condensados e de cadeias saturadas curtas, sendo sólidos amorfos

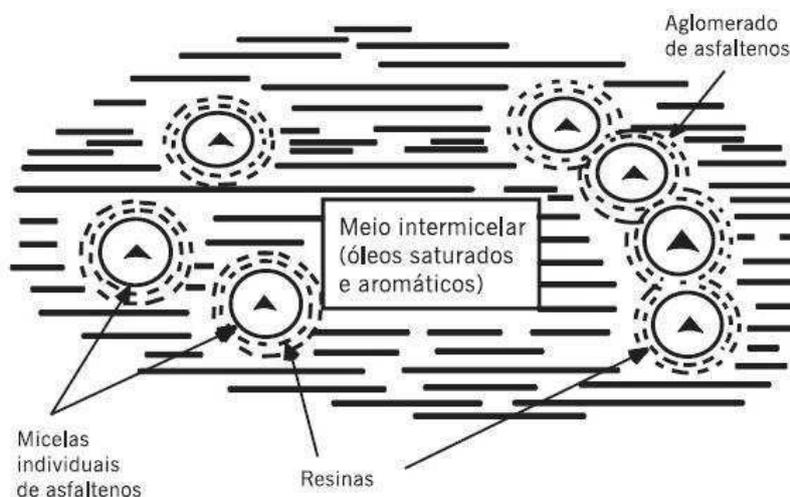
pretos ou marrons, eles têm grande efeito nas características reológicas do CAP, e constituem de 5% a 25% do CAP (SHELL, 2003).

As resinas são solúveis em n-heptano. São compostos de hidrogênio e carbono, com pequena proporção de oxigênio, enxofre e nitrogênio. São sólidos ou semi-sólidos marrom escuros, sendo de natureza polar e fortemente adesiva. As proporções de resinas e asfaltenos governam o comportamento como solução (Sol) ou como gelatina (Gel) do CAP (BERNUCCI et al., 2008).

Os componentes aromáticos são de baixa massa molar e em maior proporção no asfalto, sendo o meio de dispersão e peptização dos asfaltenos. Esses componentes formam um líquido viscoso amarelo polar, com cadeias não-saturadas de carbono, constituindo de 40 a 65% do total do asfalto. Os saturados são cadeias retas e ramificadas de hidrocarbonetos, sendo óleos viscosos não-polares transparentes, compondo de 5 a 20% dos asfaltos (BERNUCCI et al., 2008).

Outra modelagem existe para representação da estrutura química do CAP é o modelo de Yen ou modelo de micelas (Yen, 1991) está representado na Figura 4. Uma micela é um aglomerado de moléculas em uma solução coloidal. Um colóide é uma mistura que consiste de grandes moléculas simples, dispersas em uma segunda substância (LEITE, 1999; HUNTER, 2000).

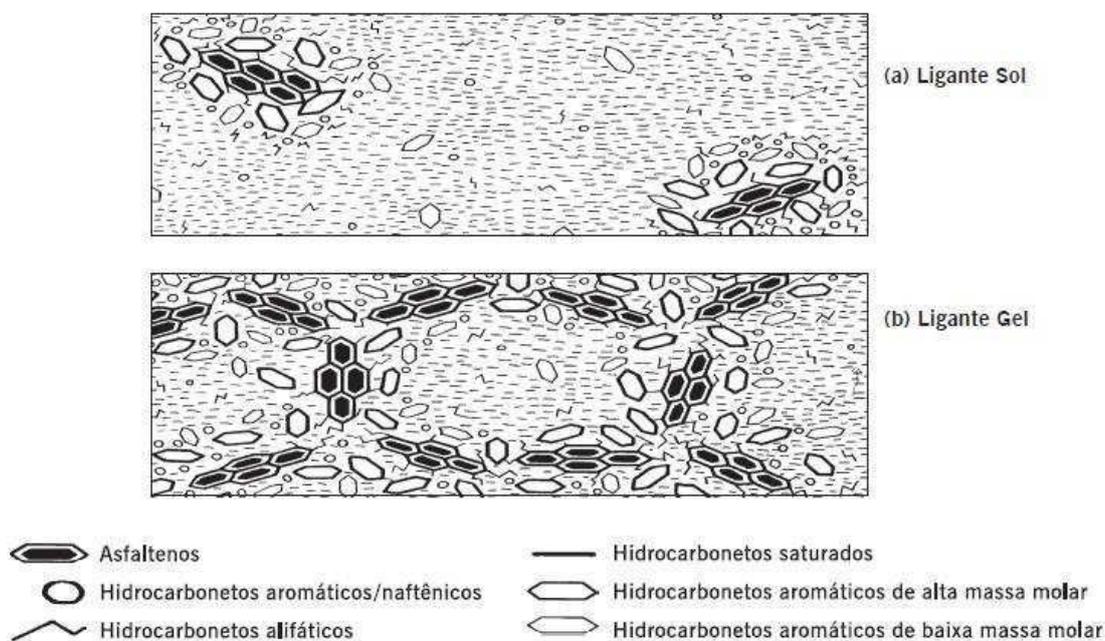
**Figura 4:** Modelo de micelas



**FONTE:** Yen (1991)

Em presença de quantidade suficiente de resinas e aromáticos, os asfaltenos formam micelas com boa mobilidade e resultam em ligantes conhecidos como Sol. Porém, se as frações não estão bem balanceadas, há formação de estruturas de pacotes de micelas com vazios internos que resultam em ligantes de comportamento conhecido como Gel, caso dos asfaltos oxidados utilizados em impermeabilizações. Esse comportamento Gel pode ser minimizado com o aumento de temperatura (LEITE, 1999; SHELL, 2003). A Figura 5 ilustra a representação esquemática dos comportamentos Sol e Gel.

**Figura 5:** Representação esquemática do ligante asfáltico de comportamento Sol e Gel



**FONTE:** Shell ( 2003)

A proporção de cada fração desses quatro componentes dos ligantes varia de acordo com o óleo de origem e com o processo de produção, e depois de aplicado nas obras há variação ao longo do tempo, sendo que em geral o conteúdo de asfaltenos proporcionalmente aumenta, o de resinas mais ou menos se mantém e o de aromáticos decresce, mantendo-se pouco variável o teor de saturados (BERNUCCI, 2008).

Embora a composição química possa ser relacionada com as propriedades físicas dos vários componentes do CAP, nota-se que asfaltos de

composições químicas diferentes podem apresentar características físicas similares, desde que derivados de óleos diferentes. Portanto, é impossível definir componentes individuais mínimos em termos químicos como garantia de comportamento adequado de um ligante do ponto de vista de desempenho na pavimentação (SHELL, 2003).

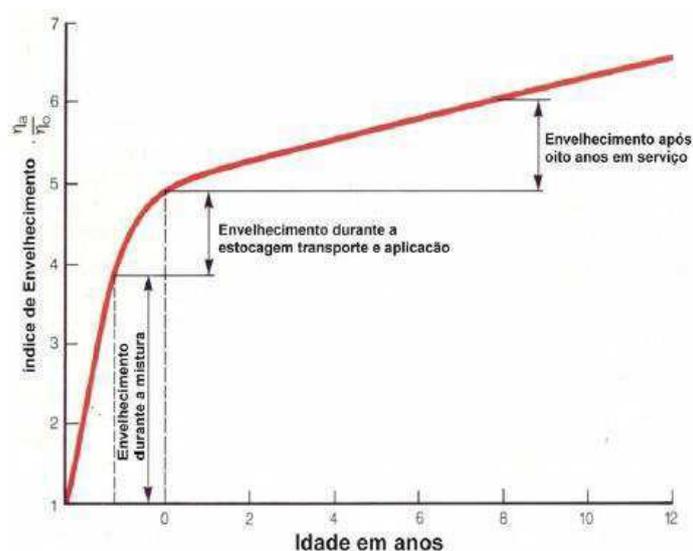
### 2.3 Envelhecimento do ligante asfáltico

O envelhecimento do ligante asfáltico é definido como o processo de endurecimento que este sofre ao ser estocado, usinado, aplicado e em serviço, este fenômeno altera as propriedades físicas, químicas e reológicas que causam um aumento de sua consistência (TONIAL, 2001). Um dos grandes desafios da pavimentação, na atualidade, é reduzir o envelhecimento do ligante asfáltico, durante todo o seu ciclo de produção.

O ligante asfáltico quando em contato com o ar oxida lentamente, assim como outras substâncias orgânicas. O que ocorre é uma associação de grupos polares oxigenados, com a formação de micelas de alto peso molecular e geração do aumento da viscosidade do ligante asfáltico. Com estas transformações as moléculas maiores e mais complexas fazem com que o ligante asfáltico endureça e tenha menor flexibilidade (TONIAL, 2001).

A Figura 6, extraída do Shell Bitumen Handbook, mostra como ocorre o fenômeno de envelhecimento do ligante asfáltico. Na Figura, o Índice de envelhecimento é representado pela razão  $\eta_a/\eta_0$ , onde  $\eta_a$  representa a viscosidade em uma dada condição de envelhecimento e  $\eta_0$ , representa a viscosidade inicial do ligante asfáltico.

**Figura 6:** Envelhecimento do ligante asfálticos nas etapas de construção e de utilização do pavimento



**Fonte:** WHITEOAK, 1990

Conforme ilustrado na Figura 6, o envelhecimento do ligante asfáltico ocorre em três etapas: em um primeiro momento ocorre o maior impacto, é quando ocorre a usinagem da mistura asfáltica e representa em torno de 60% do envelhecimento total sofrido pelo ligante; em uma segunda etapa ocorre a estocagem (comum em usinas americanas de grande porte, mas não no Brasil), transporte, espalhamento e compactação, e representa cerca de 20% do envelhecimento total sofrido pelo ligante; na terceira e última etapa, o envelhecimento ocorre ao longo da vida útil do revestimento e se dá devido à ação do meio ambiente e representa em torno de 20% do envelhecimento total sofrido pelo ligante (MORILHA, 2004).

Do ponto de vista físico, o envelhecimento de um ligante asfáltico e caracterizado pelo aumento de sua consistência, de forma geral apresenta-se um aumento da viscosidade associado à uma diminuição da penetração e aumento do ponto de amolecimento, com a perda de suas características aglutinantes (WHITEOAK 1990 & PINTO, 1991). O aumento da consistência influencia o comportamento físico e reológico do ligante asfáltico, tornando este mais duro, logo mais quebradiço, menos dúctil e menos elástico.

O mecanismo de envelhecimento do ligante e da mistura é complexo, porém o seu impacto sobre o desempenho do pavimento é de fácil compreensão. Com o envelhecimento do ligante asfáltico, temos um aumento da rigidez deste, e portanto da mistura asfáltica. Este efeito gera uma tendência de aumento da resistência à formação de trilhas de roda da mistura, o que pode ser considerado um efeito benéfico do envelhecimento. Todavia, tal fenômeno é responsável pelo desenvolvimento e/ou aceleração de inúmeras patologias, como: trincamento e fratura por fadiga, trinca térmica e deterioração devido ao desgaste e à umidade, esforços que podem levar à falência da estrutura do pavimento (MORILHA, 2004).

#### 2.4 Caracterização das propriedades mecânicas

Em um pavimento flexível o revestimento asfáltico deve resistir a repetição das cargas dos diferentes tipos de veículos, o acúmulo dessas solicitações gera a fadiga. O fenômeno é considerado no dimensionamento de um pavimento através da definição de modelos que relacionam o número de repetições de carga com o estado de tensões aplicado (MOTTA, 1991).

Os ensaios para a caracterização das propriedades mecânicas e à fadiga das misturas asfálticas visa a obtenção de parâmetros para a aplicação no dimensionamento racional do pavimento. No Brasil, alguns ensaios laboratoriais para a descrição das características mecânicas é a resistência a tração e o módulo de resiliência por compressão diametral (MORILHA, 2004).

O fenômeno da fadiga é descrito como “um processo de mudança estrutural permanente, localizada e progressiva que ocorre no material quando este é submetido a condições de carregamento que produzam tensões e deformações repetidas em algum ponto (ou pontos), resultando em trincas ou fratura completa do material após um número suficiente de repetições, e também como um fenômeno de fratura sob tensões repetidas de valor máximo menor do que a resistência a tração do material” (PREUSSLER, 1983).

O efeito da fadiga em pavimentos flexíveis materializa-se através de trincas interligadas, conhecidas como “couro de jacaré”, e a sua intensificação é responsável pela separação dos blocos do revestimento provocando a não

transmissão de carga entre eles. O trincamento por fadiga é um defeito frequente nas rodovias brasileiras, e algumas causas para o fenômeno são: a falta de compactação do subleito e/ou das camadas constituintes do pavimento, o que gera um enfraquecimento da estrutura e fissuração precoce do revestimento; drenagem ineficiente; incompatibilidade no projeto quanto à natureza e à espessura das camadas; além de revestimentos asfálticos executados com teores de ligante abaixo do teor de projeto (BERNUCCI et al., 2008).

O módulo de resiliência é importante na avaliação da vida de fadiga de uma mistura asfáltica, porém não é o único que influencia na vida de fadiga (MOTTA, 1993). Módulos de resiliência bem próximos podem resultar em equações de fadiga bem distintas, quando outras características são diferentes na mistura, como: a granulometria, o agregado, e a origem do ligante asfáltico. (MORILHA, 2004)

Com a curva de fadiga de uma mistura asfáltica e prevendo o nível de tensão e deformação que a estrutura estaria sujeita no campo, pode-se estimar a quantidade de passagens do eixo padrão que o pavimento resistirá, logo a vida útil em termos de fadiga do revestimento (BERNUCCI et al., 2008).

A importância de se considerar a viscoelasticidade das misturas, bem como a possibilidade de contabilizar os efeitos de diferentes temperaturas e frequências de carregamento, faz com que o módulo complexo ( $E^*$ ) venha sendo usado preferencialmente no exterior. O ensaio de módulo complexo (dinâmico) pode ser usado para determinar tanto as características elásticas quanto as propriedades viscoelásticas lineares do material (CHRISTENSEN, 1982).

Para a análise de misturas asfálticas algumas são as variáveis a serem analisadas: a natureza, forma e textura dos agregados, sua granulometria, a presença da cal hidratada, a dosagem da mistura em termos de teor de betume e teor de vazios. Podem interferir nos valores de módulo de resiliência e resistência à tração: a forma de empacotamento obtida durante a mistura e a compactação. Logo, a análise das propriedades mecânicas deve ser criteriosa (MORILHA, 2004).

## 2.5 Lignina: origem, estrutura e propriedades

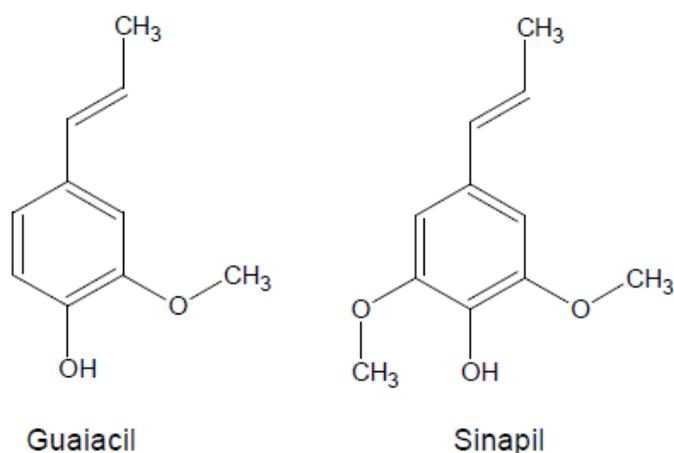
A madeira, quimicamente, é um biopolímero tridimensional formado por celulose, hemicelulose e lignina, numa proporção de 50:20:30 (SANTOS, 2008). A celulose e a lignina tratam-se de polímeros naturais e abundantes da natureza e empregado nos processos industriais para obtenção de fibras celulósicas, as duas macromoléculas são separadas através da deslignificação da madeira, como resultados temos um licor residual, denominado licor negro, que contém a lignina e a hemicelulose (BELGAGEM, 2003).

Os estudos comprovam que a estrutura química macromolecular da lignina é complexa, pois as unidades monoméricas de distribuem de modo irregular e são entrelaçadas por inúmeros tipos de ligações químicas (PILÓ-VELOSO, 1993). A estrutura da lignina varia de acordo com a planta de origem, a sua localização no vegetal, idade da planta, condições ambientais, e outros fatores (BELGAGEM, 2003; HERNÁNDEZ, 2007).

A lignina tem um papel fundamental na madeira, atua como proteção da planta contra micro-organismos indesejáveis, é responsável pela resistência mecânica, pois confere rigidez à parede celular, e transporte de nutrientes, água e metabólitos (PILÓ-VELOSO, 1993; SANTOS, 2008).

A lignina pode ser classificada de acordo com os grupos vegetais (lignina das gymnospermas ou coníferas, lignina das angiospermas ou folhosas e lignina das gramíneas) (D'ALMEIDA, 1988). O que caracteriza os grupos vegetais é a presença de uma ou as duas unidades básicas que constituem a estrutura desse polímero, ilustrada na Figura 7.

**Figura 7:** Unidades básicas da estrutura das ligninas.



**Fonte:** Hernández, 2007

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). A lignina é composta por teores de carbono, hidrogênio e oxigênio, e a Tabela 1 apresenta intervalos de porcentagens desses elementos, de acordo com os grupos das madeiras citadas.

**Tabela 1:** Composição elementar da lignina

<b>Espécie de madeira</b>	<b>Carbono (C)%</b>	<b>Hidrogênio(H) %</b>	<b>Oxigênio (O) %</b>
<b>Coníferas</b>	63 – 67	5 – 6	27 – 32
<b>Folhosas</b>	59 – 60	6 – 8	33 – 34

**Fonte:** D’Almeida 1988

A lignina pode ser isolada por processos laboratoriais ou industriais, dentre estes destaca-se o processo de polpação, neste a separação das fibras de madeira ocorre por meio de energia química e/ou mecânica. Ao utilizar a energia química, a deslignificação é mais elevada se comparada ao processo mecânico. Os processos químicos de obtenção da pasta celulósica são divididos em: ácidos e alcalinos (D’ALMEIDA, 1988).

Dentre os processos de polpação química destaca-se o chamado Kraft, neste a madeira é cozida na solução alcalina contendo reagentes com a

pressão e temperatura elevada. Após o cozimento, despeja-se a madeira num tanque de descargas onde ocorre a separação e lavagem das fibras. O líquido da lavagem passa por um processo de recuperação dos processos químicos envolvidos, e ao final do processo resta um licor negro residual, de cor marrom escura, ali encontra-se a lignina, e este possui viscosidade alta e cheiro característico devido aos compostos reduzidos de enxofre (D'ALMEIDA, 1988).

Dos processos de polpação temos os três tipos de ligninas industriais: a lignina Kraft, os lignosulfonatos e a lignina organosolv. A lignina Kraft é obtida através da acidificação da solução do licor negro, como resultado deste processo ao conseguir isolar a lignina a sua estrutura molecular fica comprometida (HERNANDEZ, 2007). Os lignosulfonatos são obtidos de reações com reagentes inorgânicos. E a lignina organosolv é obtida a partir de reações com solventes orgânicos, catalisadas por ácidas, apresenta característica solúvel, logo são mais reativas e puras (D'ALMEIDA 1988; HERNANDEZ, 2007).

Grande parte das ligninas obtidas possui enxofre em sua composição, isto compromete a sua associação com outros materiais. Todavia, o enxofre presente nas ligninas processadas pode auxiliar na redução da oxidação de ligantes asfálticos, já que esse componente reage com o oxigênio antes do início do fenômeno de envelhecimento do ligante asfáltico (SANTOS, 2017). No entanto, esta questão em conjunto com a variabilidade da estrutura química da lignina é um agravante para sua utilização, portanto o mais adequado seria uma lignina com maior uniformidade, isto favoreceria a previsão das propriedades e facilitaria o trabalho de projetar um pavimento adequadamente (WILLIAMS & MCREADY, 2008).

As indústrias de celulose geram enormes impactos ambientais, é o caso do processo de polpação Kraft, que polui a atmosfera com compostos voláteis de enxofre, e gera a necessidade de processar efluentes aquosos altamente poluidores, o que exige elevados investimentos por tonelada do produto, e a descarga do licor negro em rios. Portanto, é importante a recuperação do licor negro por questões econômicas e, sobretudo, ambientais (SANTOS, 2017).

A lignina é um material de baixo custo, sustentável, com disponibilidade futura em biorrefinarias, e está intrinsecamente associada à utilização de derivados de biomassa, como materiais lignocelulósicos, para aproveitamento energético, combustíveis para transporte e matriz para construção de uma diversidade de substâncias químicas (SOUTO, 2015). As novas tendências tecnológicas convergem para fontes de energia e matérias-primas renováveis, alternativas menos poluentes que minimizam a dependência de fontes fósseis, passam a ganhar destaque no cenário global (SANTOS, 2017).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Para realização desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

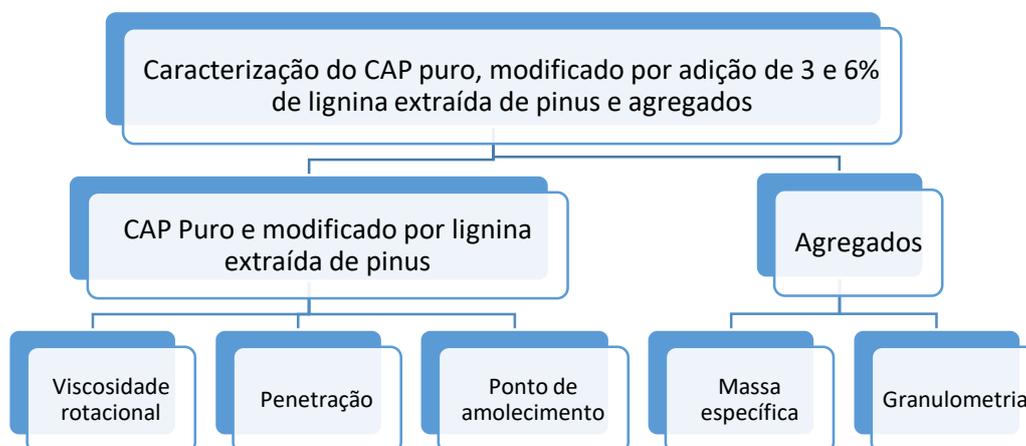
- Ligante puro: O ligante foi obtido da distribuidora Stratura Asfaltos S/A (antiga Ipiranga Asfaltos S/A). Foi utilizado o CAP 50/70.
- Lignina: A lignina utilizada neste estudo foi proveniente do pinus e cedida pelo Laboratório de Química Inorgânica da Universidade Federal de Viçosa.
- Agregados: brita 19mm, brita 9,5mm e pó de pedra fornecidos pelo Grupo Rocha Cavalcante, sediado em Campina Grande-PB.
- Filler: Cal Hidratada, fornecida pela empresa Megaó, comprado no comércio local.

#### 3.2 Métodos

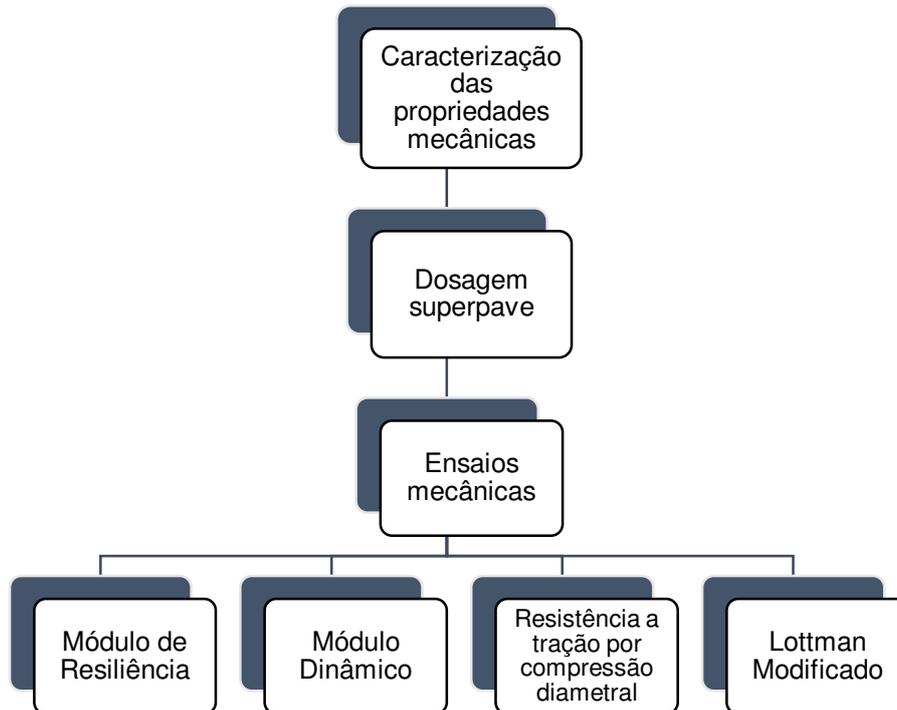
A metodologia utilizada para realização desta pesquisa encontra-se descrita a seguir:

Nesta seção são descritos os procedimentos utilizados e as especificações para caracterização do CAP puro, misturas asfálticas e agregados, conforme aponta a Figura 8. Também são informados os métodos para o estudo do comportamento mecânico das misturas asfálticas, ilustrado na Figura 9.

**Figura 8:** Fluxograma das caracterização do CAP Puro, modificado e agregados.



**Figura 9:** Fluxograma da caracterização das propriedades mecânicas

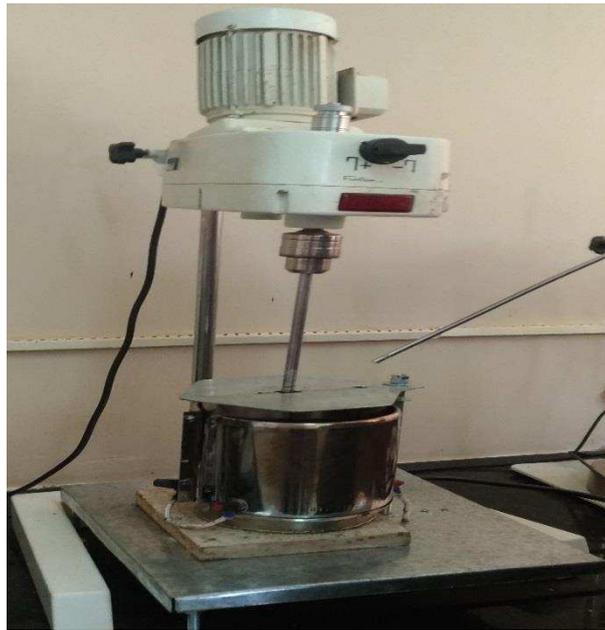


Foram utilizados métodos de ensaios baseados em normas das seguintes entidades: Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), ASTM (American Society for Testing Materials), Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), além da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

### 3.2.1 Caracterização do CAP puro e modificado por 3 e 6% lignina extraída de pinus

O fluxograma da Figura 8 demonstra a sequência de ensaios realizados a partir da caracterização do material, de acordo com a adição da lignina extraída de pinus. Para a modificação do CAP foram adicionadas os teores de 3 e 6% de lignina extraída de pinus em um misturador mecânico (FISATOM, Modelo 722), ilustrado na figura 10. Os parâmetros utilizados para o processo das misturas foram os seguidos por Santos (2017): rotação de 2000 rpm por um tempo de 30 minutos, a temperatura de 160°C +/- 5°C.

**Figura 10:** Misturador mecânico



Finalizada a mistura dos CAPs modificados com os teores, foram então realizados os ensaios de ponto de amolecimento, penetração e viscosidade rotacional (Brookfield), o mesmo procedimento foi realizado para o CAP puro, conforme ilustra a Tabela 2.

**Tabela 2:** Ensaios realizados para caracterização do CAP e misturas asfálticas

<b>Ensaio</b>	<b>Norma</b>
Penetração	DNIT-ME 155/2010
Ponto de amolecimento	DNIT-ME 131/2010
Viscosidade Rotacional	ABNT NBR 15184

### 3.2.2 Propriedades físicas do ligante asfáltico

#### 3.2.2.1 Penetração

O ensaio de penetração visa determinar a consistência e dureza do ligante asfáltico através da penetração vertical, na amostra de ligante, de uma agulha de massa padronizada (100 g) por 5 segundos, à temperatura de 25°C. A consistência do material e a penetração da agulha são inversamente proporcionais. A norma DNIT-ME 155/2010 regulamenta os procedimentos para realização do ensaio. A Figura 14 ilustra o penetrômetro utilizado na realização deste experimento.

**Figura 11:** Penetrômetro utilizado no experimento



### 3.2.2.2 Ponto de amolecimento

O objetivo do ensaio é medir a consistência do CAP, de acordo com a variação de temperatura, indicando a que nível de dureza o asfalto tem determinada consistência. A norma DNIT-ME 131/2010 é responsável por regulamentar os procedimentos para realização do ensaio. A Figura 15 ilustra a realização deste experimento.

**Figura 12:** Ensaio de ponto de amolecimento



**Fonte:** TOMAZ (2018)

### 3.2.2.3 Viscosidade Rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional visa medir a viscosidade do asfalto a altas temperaturas, 135 °C, 150 °C e 177 °C, conforme a ABNT NBR 15184/2004 e ASTM D4402-15. A importância de medir estas grandezas consiste no fato de que a viscosidade relaciona-se com as temperaturas de usinagem e compactação do ligante asfáltico. O viscosímetro rotacional utilizado foi o Brookfield, modelo DV-III ULTRA, ilustrado na Figura 16, acoplado a um controlador de temperatura THERMOSEL e a unidade de medida da viscosidade dinâmica foi a de centipoise (cP).

**Figura 13:** O viscosímetro Brookfield, modelo DV-III ULTRA



### 3.2.3 Caracterização dos agregados

Para caracterização dos agregados (graúdo e miúdo) utilizados neste estudo, foram realizados os ensaios listados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Ensaios realizados para caracterização dos agregados

Ensaio		Norma
Análise granulométrica por peneiramento		DNIT – ME 083/98
Massa específica real dos agregados graúdos		DNIT – ME 081/98
Massa específica real dos agregados miúdos		DNIT – ME 084/95 ASTM D4402-15

#### 3.2.3.1 Granulometria

O ensaio de granulometria dos agregados, ilustrado na Figura 11, foi realizado de acordo com a norma DNIT-ME 083/98, com as seguintes malhas de abertura das peneiras: 0,075mm, 0,18mm, 0,42mm, 2,0mm, 4,8mm, 9,5mm, 12,7mm e 19,1mm. O material utilizado foi colocado em estufa a 110°C por 4 horas para a retirada da umidade e o peneiramento foi realizado

manualmente.

**Figura 14:** Ensaio de granulometria



### 3.2.3.2 Massa específica real dos agregados graúdos

Para a realização do ensaio foram separadas amostras de 3Kg de brita 19mm e 2Kg de brita 9,5mm, foi desprezado o material passante na peneira 4,8mm por meio do peneiramento a seco. As amostras foram lavadas para a retirada de pó e impurezas, em seguida foram colocadas em estufa a 110°C por 4 horas. As amostras foram resfriadas em temperatura ambiente, e colocadas imersas em água à temperatura ambiente por um período de 24 horas.

Após o decorrer das 24 horas o material foi retirado e seco superficialmente para verificação da massa na condição saturada superfície seca. Em sequência o material foi colocado em um recipiente para verificação da massa na condição: submersa, conforme ilustrado na Figura 12. Finalmente, o material foi colocado na estufa por 4 horas novamente, e resfriado à temperatura ambiente para verificação da massa na condição: seca.

**Figura 15:** Agregados graúdos sendo pesados na condição submersa



### 3.2.3.3 Massa específica real dos agregados miúdos

Para a realização do ensaio utilizaram-se duas amostras de 500g de agregado miúdo passante na peneira de 4,8mm e retido na peneira 0,074mm. O material foi imerso em água e ficou em repouso por um período de 24 horas. Em sequência, foi colocado em um tabuleiro metálico e submetido à ação de uma corrente de ar, com a finalidade de secar a amostra de modo uniforme, conforme aponta a Figura 13.

**Figura 16:** Secagem da amostra com circulador de ar quente



Para os agregados estarem sob a condição de saturado superfície seca, utiliza-se um tronco-cônico e compactou-se a superfície suavemente com a haste de compactação com 25 golpes, o agregado deve desmoldar ao retirar o molde. Assim é possível checar se o agregado já se encontra sob a condição de saturado superfície seca.

Uma amostra de 500g foi pesada, em seguida foi colocado no picnômetro cuidadosamente, e registrou-se a massa do conjunto. Foi adicionada água destilada até cobrir a amostra de agregado. O picnômetro foi mantido durante 1 hora em um banho a temperatura constante de  $(21 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ . Em seguida, completou-se o picnômetro com água e então foi determinada a massa do picnômetro mais amostra mais água.

O agregado miúdo foi retirado do frasco e seco em estufa a  $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$  até a constância da massa. Após esse processo, foi realizada a determinação da massa específica aparente do agregado miúdo.

### 3.2.4 Propriedades mecânicas das misturas asfálticas

Para a determinação das propriedades mecânicas das misturas asfálticas e CAP puro, foi realizada a dosagem dos materiais, segundo a metodologia superpave, para a confecção de corpos de provas, e assim realizar os ensaios, de acordo com a normas da Tabela 4.

**Tabela 4:** Ensaios realizados para determinação das propriedades mecânicas

Ensaio	Norma
Resistência a tração por compressão diametral	ME 138/94
Módulo de resiliência	ME 135/10
Lottman Modificado	AASHTO T 283
Módulo Dinâmico	ASTM D 3479

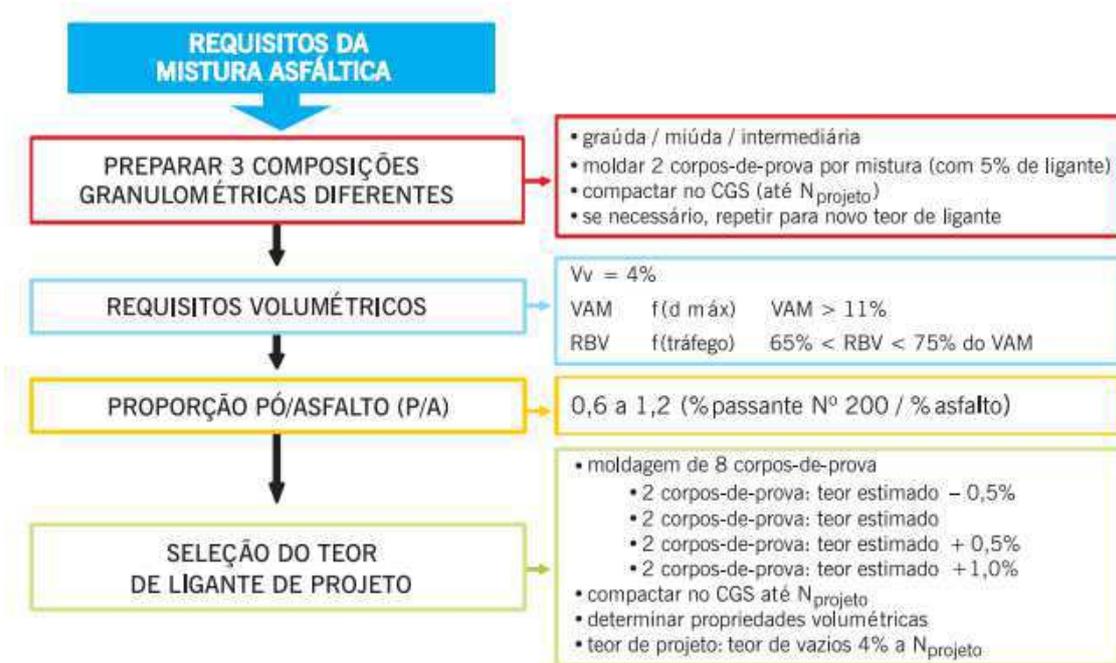
#### 3.2.4.1 Dosagem das Misturas Asfálticas

Foi utilizada a metodologia superpave para a dosagem das misturas asfálticas. A metodologias superpave faz uso de um compactador giratório, o

qual aplica uma energia de amassamento mais representativa da compactação no campo. Quanto a granulometria, a metodologia superpave usa uma modificação da maneira tradicional do Marshall, por meio dos conceitos de pontos de controle e zonas de restrição para a curva granulométrica. As zonas de restrições servem como recomendações e não como especificações a serem seguidas (SALES et. al., 2015).

O Fluxograma da Figura 17 (BERNUCCI et al., 2007) ilustra o processo da dosagem superpave.

**Figura 17:** Fluxograma Dosagem SUPERPAVE



**Fonte:** BERNUCCI et al., (2007)

A compactação dos corpos de provas foi realizada por amassamento com o auxílio do compactador giratório, segundo a norma ASTM D 6925-09 (Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt (HMA) Specimens by Means of the Superpave Gyratory Compactor).

### 3.2.4.2 Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral

O ensaio de compressão diametral, ilustrado na Figura 18, permite simular um plano de ruptura idêntico ao plano de aplicação da carga, e tem por objetivo determinar a resistência à tração de corpos de prova cilíndricos de misturas betuminosas. A norma que regulamenta o ensaio é a ME 138/94 do DNIT. Para a realização do ensaio foram moldados 3 corpos-de-prova no compactador giratório com teor de CAP obtido através da dosagem superpave e com incorporação de lignina proveniente de pinus nos teores definidos: 3 e 6%.

**Figura 18:** Ensaio de compressão diametral



### 3.2.4.3 Módulo de Resiliência

Os ensaios de carga repetida em que a força aplicada atua sempre no mesmo sentido de compressão, de zero a um máximo e depois diminui até anular-se, ou atingir um patamar inferior, para atuar novamente após pequeno intervalo de repouso procuram reproduzir as condições de campo. A amplitude e o tempo de pulso dependem da velocidade do veículo e da profundidade em que se calculam as tensões de deformações produzidas.

O ensaio do Módulo de Resiliência (MR) foi realizado segundo a Norma (ME 135/10) do DNIT. Os resultados foram obtidos com o auxílio do *software* UTS0031.39 *Indirect Tensile Modulus Test*, utilizando a prensa UTM-25, ilustrada a Figura 19.

**Figura 19:** Prensa UTM-25 utilizada no ensaio de módulo de resiliência



#### 3.2.4.4 Lottman Modificado

O ensaio de Lottman Modificado, Figura 20, também é conhecido como Ensaio de Resistência ao Dano por Umidade Induzida e avalia a adesividade das misturas asfálticas, Figura 20. O ensaio foi realizado em corpos de provas -

CPs cilíndricos moldados, com volume de vazios de  $7 \pm 1\%$ , segundo a metodologia SUPERPAVE. O ensaio consiste na avaliação de misturas asfálticas quanto a sua suscetibilidade à água, já que este afeta o desempenho e a vida de serviço dos pavimentos. O ensaio foi realizado segundo a norma da AASHTO T 283/ 2014.

**Figura 20:** Ensaio de Lottman Modificado

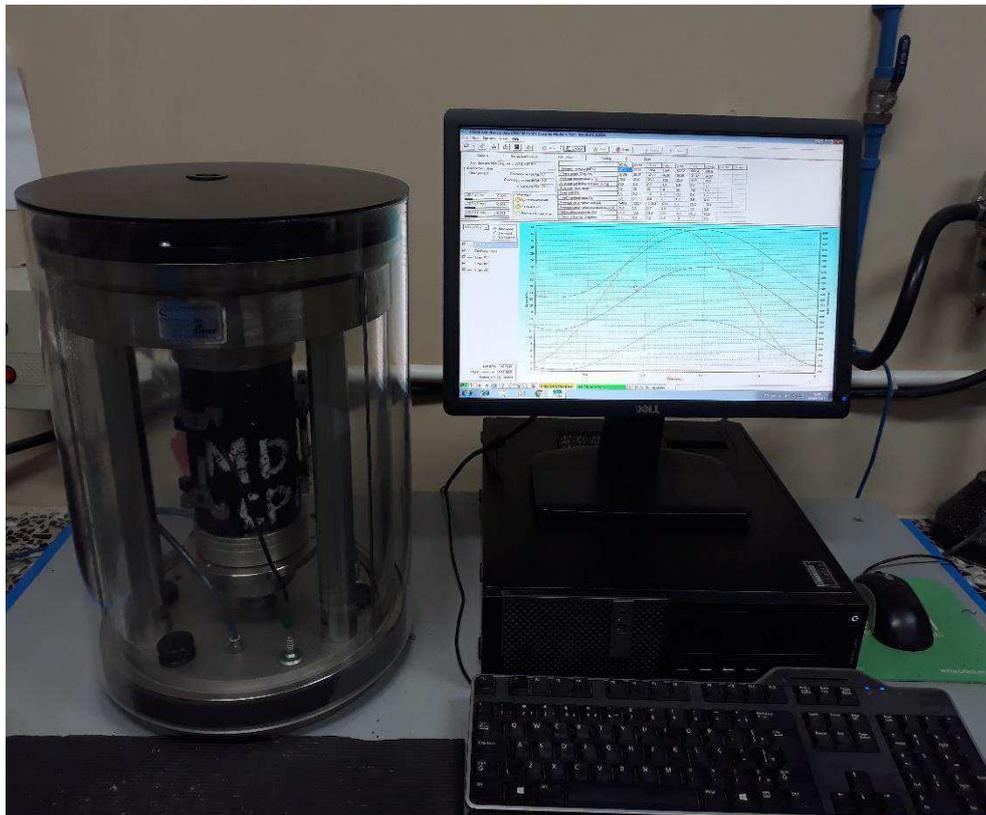


Neste ensaio relacionam-se resistência a tração de amostras com condicionamento (saturação, resfriamento e aquecimento em água) e amostras sem condicionamento, para obtenção da perda de resistência por umidade, esta é dada pela correlação (em porcentagem) entre a RTu das amostras condicionadas e a RT das amostras não condicionadas, para finalmente obter a Relação de Resistência Retida à Tração (RRT).

### 3.2.4.5 Módulo Dinâmico

O ensaio de módulo dinâmico, Figura 21, indica estimativas de rigidez do pavimento asfáltico, através da aplicação de uma tensão de compressão senoidal em corpos de prova sob dada temperatura e frequência de carga. O ensaio mede a tensão aplicada e a deformação axial recuperável da amostra para calcular o módulo dinâmico e ângulo de fase. Neste ensaio foram utilizados dois corpos de prova com 100mm de diâmetro e 150mm de altura, e efetuada a média dos corpos de prova. A norma que regulamente este ensaio é a ASTM D 3479/ 2002. Foram utilizadas as temperaturas de 4°C, 21°C e 37,7°C, e seguidas as recomendações da AMPT.

**Figura 21:** Ensaio de módulo dinâmico



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na etapa experimental desta pesquisa. Nestes encontram a caracterização física dos agregados, do CAP Puro e com adição dos teores de 3% e 6% de lignina extraída de pinus, além dos resultados para os ensaios de caracterização mecânica do CAP puro e modificado com diferentes teores de lignina extraída de pinus.

### 4.1 Caracterização física dos agregados

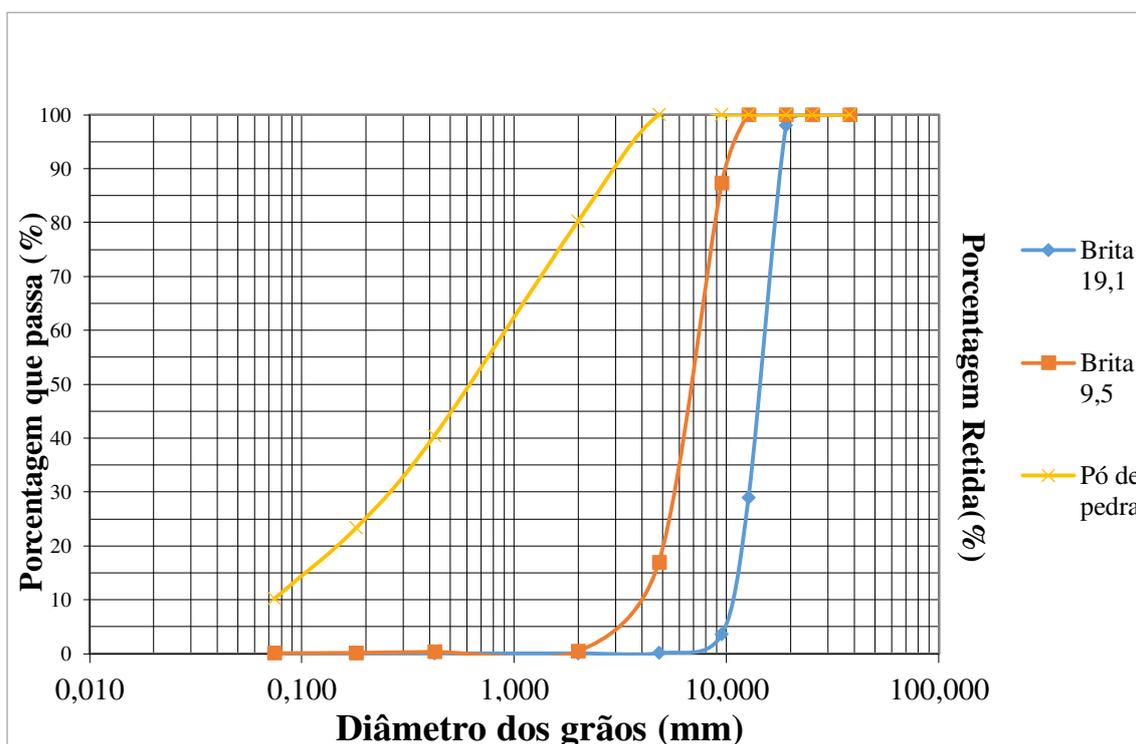
#### 4.1.1 Granulometria

A Tabela 5 e a Figura 22 apresentam a distribuição do tamanho das partículas dos grãos de materiais utilizados na pesquisa.

**Tabela 5:** Distribuição do tamanho das partículas

<b>Quantidade passante (%)</b>				
<b>Peneira (N)</b>	<b>Peneira (mm)</b>	<b>Brita 19</b>	<b>Brita 12,5</b>	<b>Pó de Pedra</b>
1"	25,4	100,00 %	100,00 %	100,00 %
3/4"	19,1	97,29 %	100,00 %	100,00 %
1/2"	12,7	27,97 %	100,00 %	100,00 %
3/8"	9,5	2,86 %	94,30 %	100,00 %
Nº 4	4,8	0,14 %	40,09 %	99,15 %
Nº 10	2,0	0,12 %	6,45 %	77,35 %
Nº 40	0,42	0,12 %	2,86 %	35,14 %
Nº 80	0,18	0,11 %	1,90 %	18,22 %
Nº 200	0,074	0,08 %	1,10 %	6,47%

**Figura 22:** Curva de distribuição granulométrica



#### 4.1.2 Massa Específica

A Tabela 6 apresenta os valores para massa específica real e aparente dos agregados utilizados na pesquisa.

**Tabela 6:** Massa específica dos agregados

<b>Agregados</b>	<b>Massa específica real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Brita 19mm	2,76	2,72
Brita 9,5mm	2,75	2,68
Pó de pedra	2,42	2,44

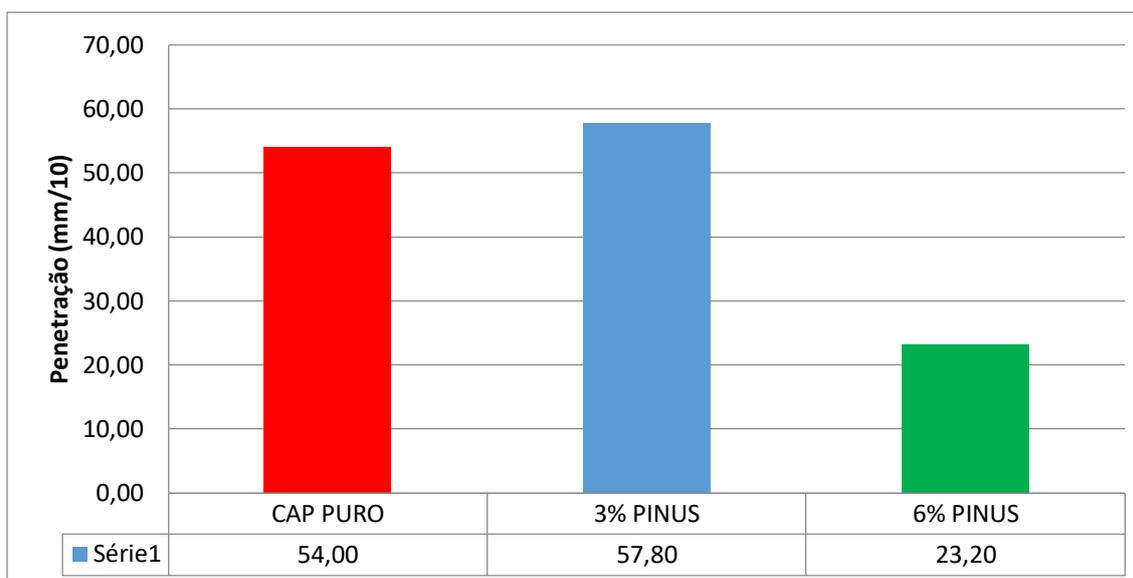
De acordo com Sales (2015), os valores de massa específica real e aparente dos agregados estão dentro dos valores previsto na bibliografia para cada tipo de material. Os dados foram utilizados para a determinação do teor de projeto de CAP na dosagem superpave.

## 4.2 Propriedades Físicas dos ligantes asfálticos

### 4.2.1 Ensaio de penetração

A Figura 23 apresentam os valores obtidos para o ensaio de penetração do CAP puro e modificado com adição de 3% e 6% de lignina extraída de pinus.

**Figura 23:** Gráfico comparativos dos resultados de penetração



Em um primeiro momento a adição de lignina ao ligante asfáltico foi responsável por um aumento da penetração, todavia após a adição de um teor maior, houve um declínio considerável da penetração. Para Luz (2019) a adição de lignina deve reduzir o valor da penetração, o que só foi observado com a adição de 6% de lignina extraída de pinus ao ligante.

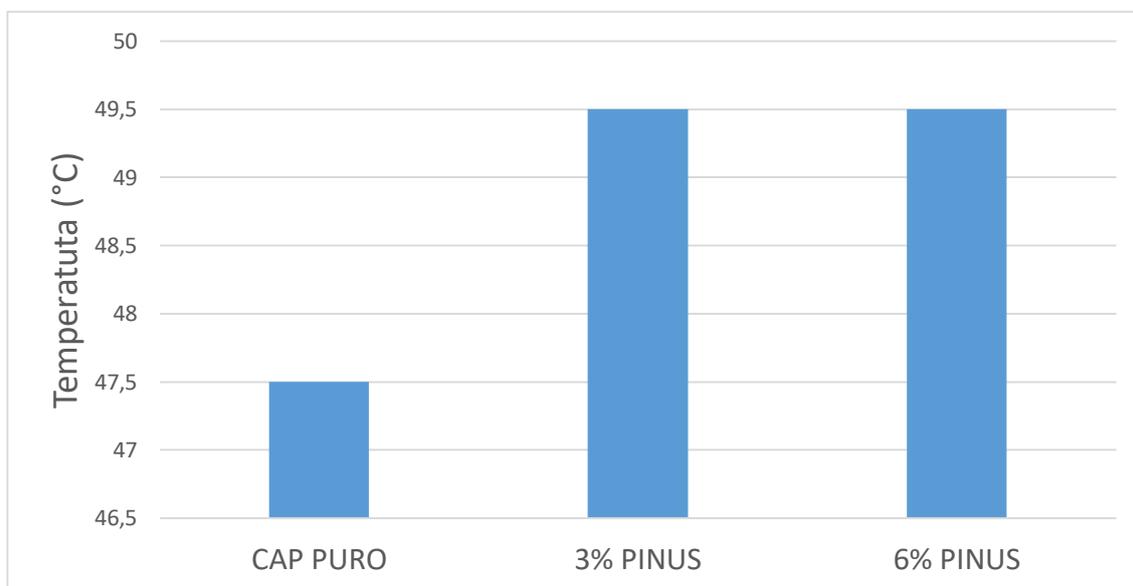
Com relação a estrutura molecular da lignina, a inclusão de uma quantidade elevada de anéis aromáticos, contribuiu para o aumento da rigidez da mistura de CAP 50/70 com a lignina extraída de pinus (BOTARO, 2006).

### 4.2.2 Ponto de amolecimento

O parâmetro liga-se a manutenção das propriedades do ligante a altas temperaturas e ao aumento da resistência a deformação permanente. A resolução da ANP nº 19 /2005 estabelece a temperatura mínima de 46°C para o CAP 50/70, em condições normais.

Esse parâmetro está relacionado com a manutenção das propriedades do ligante a altas 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. Os resultados obtidos para o ensaio estão ilustrados na Figura 24.

**Figura 24:** Ponto de amolecimento dos ligantes puro e modificado



Com a adição de lignina extraída de pinus houve uma tendência de aumento do ponto de amolecimento, se comparado ao CAP 50/70. Todavia o aumento do teor de material vegetal ao ligante não alterou o valor desta propriedade.

Asukar et al. (2016), quando estudaram o uso de dois tipos de ligninas, uma orgânica e outra lignosulfonato processada, nos teores de 5% e 7% observaram, além de uma redução de penetração, um aumento no ponto de

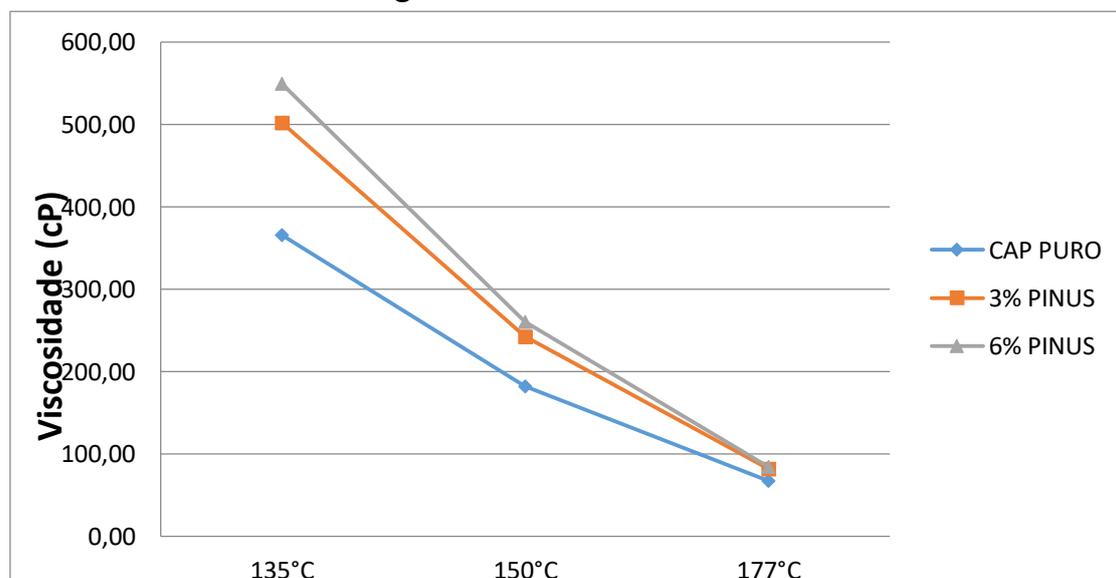
amolecimento com variação significativa de resultados entre as amostras estudadas, chegando à conclusão que essas mudanças dependem do tipo de lignina usada.

#### 4.2.3 Viscosidade Rotacional

O estudo da viscosidade do ligante asfáltico está ligado a determinação da consistência adequada que este deve apresentar para uma excelente cobertura dos agregados quando feita a mistura, além da consistência indicada para utilização em campo. Esta propriedade ainda relaciona-se com a determinação das temperaturas de usinagem e compactação.

A Figura 25 apresenta as viscosidades rotacionais do CAP puro (50/70), e modificado com a adição dos teores de 3% e 6% de lignina extraída de pinus, nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C.

**Figura 25:** Ensaio de Viscosidade



Existem normas que determinam valores mínimos para a viscosidade do ligante asfáltico, segundo a Resolução ANP 19/2005 para todas as temperaturas de ensaio, a 135°C deve ser menor que 274 cP. A metodologia superpave indica que o valor máximo a 135°C é de 3000Cp. Logo todos as amostras se encontram de acordo com as especificações técnicas. Verificou-se um aumento da viscosidade com a adição de 3% de lignina, se comparado ao

CAP, e um conseqüente incremento, com o aumento do teor de 6% da substância vegetal.

Viscosidades muito elevadas dificultam a trabalhabilidade e bombeamento durante a mistura com os agregados na construção de pavimentos Yan et al., (2016). 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. Gama (2016)

As temperaturas de usinagem e compactação foram calculadas por meio da relação entre a média das viscosidades e temperatura, sabe-se que uma TU tem viscosidade rotacional de  $0,17 \pm 0,02$  e uma TC correspondente a viscosidade rotacional de  $0,28 \pm 0,03$  Pa.s. Os valores encontrados para este parâmetro encontram-se na Tabela 8.

**Tabela 7:** Temperaturas de usinagem e compactação para o ligante puro e modificado

<b>Amostra</b>	<b>Usinagem (°C)</b>	<b>Compactação (°C)</b>
CAP 50/70	152	138
3% Pinus	161	146
6% Pinus	162	148

A norma DNIT - ME 385/1999 estabelece que, para ligante asfáltico modificado, a temperatura máxima de aquecimento não deve ser superior a 180°C, porém apesar dessa resolução não ser específica para o material incorporado com a lignina optou-se por tomá-la apenas como base para uma comparação dos resultados. Dessa maneira, os valores foram inferiores a temperatura máxima sugerida. (LUZ, et al, 2019).

#### 4.3 Dosagem das Misturas Asfálticas

Para a pesquisa foi estimado um teor de ligante inicial de 4,5%, então foram compactados corpos de prova com variação sobre teor inicial de 4,5% nas seguintes proporções:  $\pm 0,5\%$  e  $+1\%$ , ou seja: 4,0%; 4,5%; 5,0% e 5,5%.

Na Tabela 9 são apresentados os resultados dos parâmetros volumétricos deste fase de dosagem.

**Tabela 8:** Parâmetros volumétricos

Ligante %	%Gmm Nicial	%Gmm Nprojeto	%Gmm Nmáximo	VAM (%)	Vv (%)	RBV (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
4,0	88,05	93,83	94,92	17,14	6,17	75,60	2,400
4,5	93,96	94,98	95,05	16,23	5,02	74,67	2,545
5,0	95,89	95,99	95,96	15,32	4,01	73,77	2,523
5,5	90,20	99,06	96,72	14,54	2,52	73,07	2,497

Legenda:

Gmm - Massa Específica Máxima Medida da Mistura

VAM - Vazios do Agregado Mineral

Vv - Volume de vazios

RBV - Relação Betume x Vazios

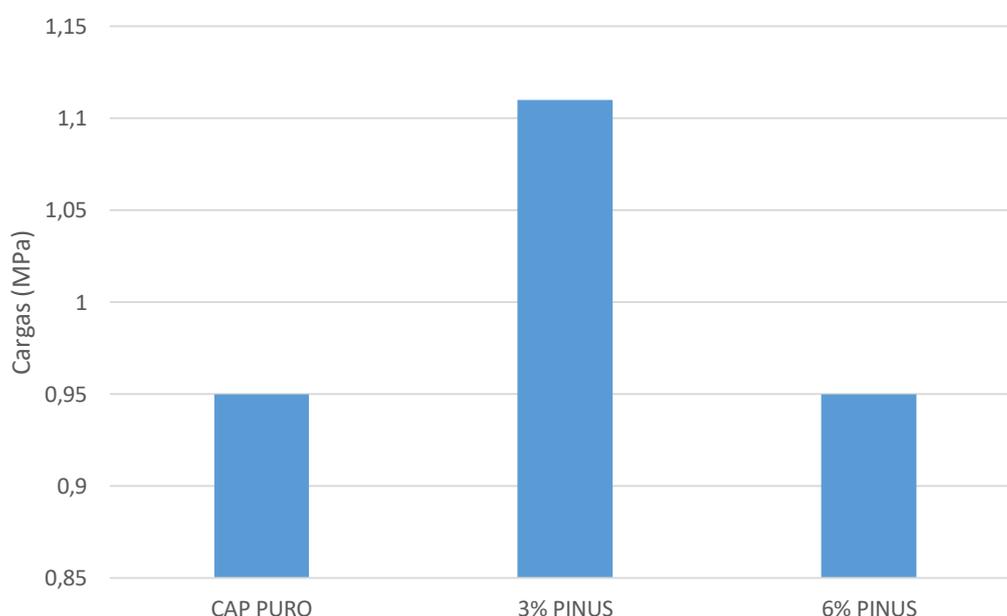
A partir destes parâmetros foi possível definir o teor de projeto, que para o presente trabalho foi de 4,9%, este foi utilizado para a composição das misturas e determinação das propriedades mecânicas.

## 4.4 Propriedades mecânicas das misturas asfálticas

### 4.4.1 Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral

O ensaio de resistência à tração indireta por compressão diametral foi realizado conforme os procedimentos DNIT-ME 138/94. Para cada uma das amostras foram moldados três corpos de provas, e efetuado a média dos três valores, e de forma indireta foi medido a resistência a tração, em MPa, conforme a Figura 26 ilustra,

**Figura 26:** Resistência à tração para o CAP puro e modificado por lignina



A Norma do DNIT ES031/2006 estabelece os limites mínimos para misturas asfálticas destinadas a camadas de rolamento, segundo esta a 25°C a resistência mínima possui valor de 0,65 MPa, portanto todos as três amostras atendem as solicitações da norma do DNIT.

Observou-se um aumento acentuado da resistência a tração ao misturar o teor de 3% de lignina extraída de pinus ao CAP 50/70, todavia o mesmo não ocorreu ao elevar o teor de lignina na amostra pra 6%, e o valor da resistência para esta amostra foi igual a verificada para o CAP puro, essa redução na resistência a tração para a amostra de 6% pode ser atribuída a falta de controle

da temperatura de compactação, no momento que o procedimento foi realizado, sendo este efetuado a uma temperatura inferior a desejável

As amostras que possuíam lignina foram compactadas em temperaturas mais elevadas, esperava-se que ambas possuísem valores mais elevados de resistência a tração, o que poderia ser atribuído à maior interação ligante/agregado, todavia isto só foi verificado para o teor de 3%.

#### 4.4.2 Módulo de Resiliência

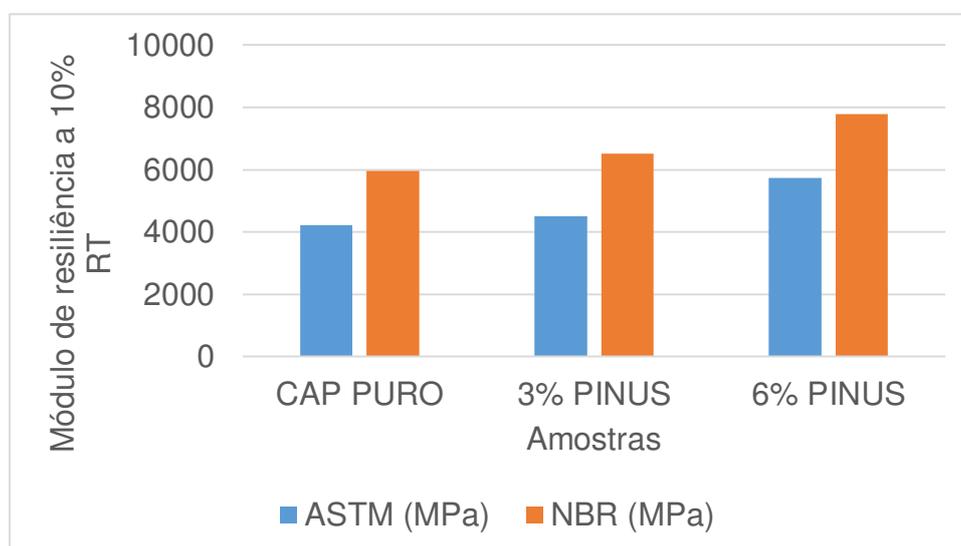
Na Tabela 10 e Figura 27 são apresentados os resultados obtidos para as misturas estudadas com o ligante puro e modificado, para a norma americana (ASTM) e norma brasileira (NBR), as normas medem pontos dos gráficos gerados para o ensaio distintos, por isso os valores tão diferentes entre ambas.

**Tabela 9:** Módulo de resiliência conforme normas NBR e ASTM

Amostras	CAP PURO	3% PINUS	6% PINUS
ASTM (MPa)	4222	4497	5731
NBR (MPa)	5958	6521	7783

Conforme resultados obtidos, verifica-se um aumento do módulo de resiliência a partir da incorporação da lignina extraída de pinus ao ligante asfáltico. Portanto, uma tendência de aumento da rigidez com a adição de material vegetal ao CAP 50/70.

**Figura 27:** Comparativo do módulo de resiliência

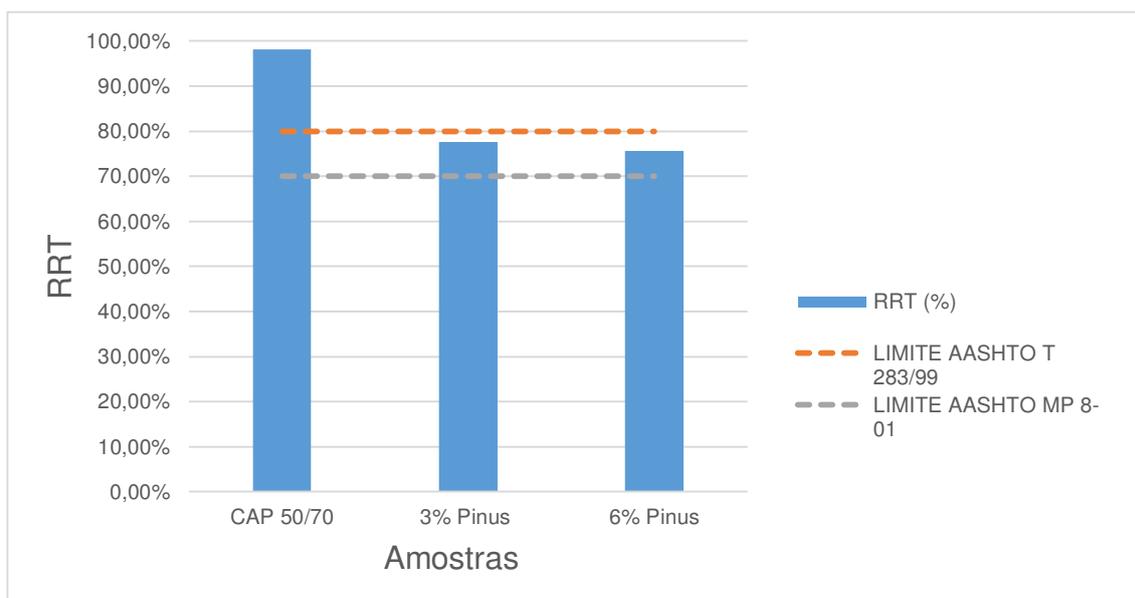


Para Brown et al. (2010), o módulo de resiliência de misturas asfálticas faz referência ao módulo de elasticidade deste material. Desta forma quanto mais rígido o material for, maior será o MR. Todavia, ligantes excessivamente rígidos que não possuem elasticidade, podem resultar ao pavimento uma vida de fadiga menor. Para compreender melhor o efeito da rigidez e resistência das amostras, é necessário uma análise mais aprofundada por meio da análise de outros ensaios, como o ensaio de módulo dinâmico e fadiga (CARVALHO, 2018).

#### 4.4.3 Lottman Modificado

Os resultados de RRT para as amostras de ligante puro e modificado estão ilustrados na Figura 28.

**Figura 28:** Resistência retida a tração



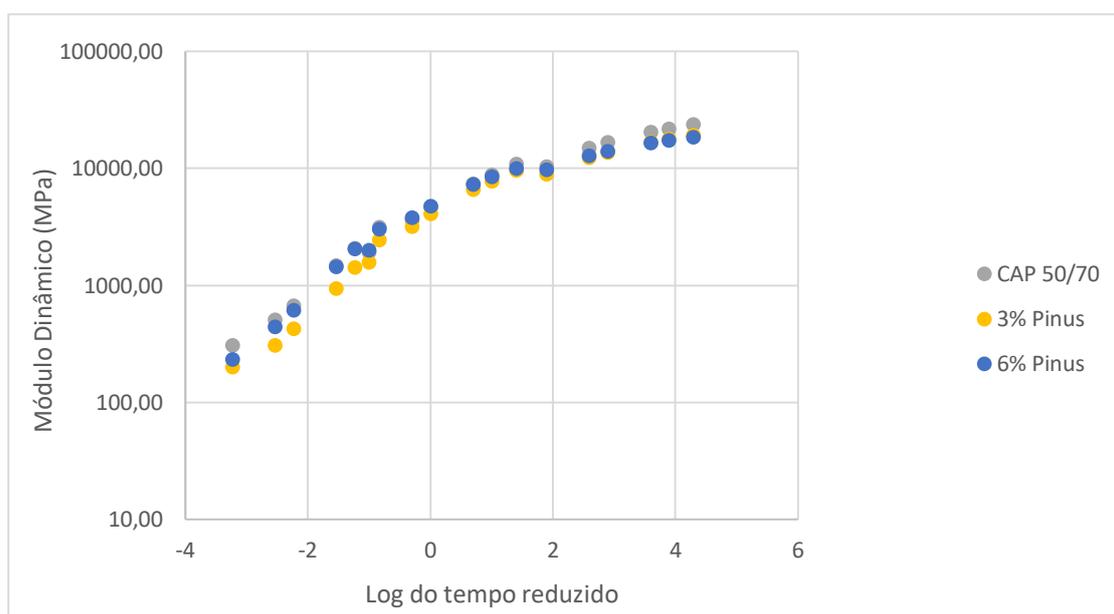
Para o ensaio de Lottman Modificado alguns valores mínimos para o parâmetro RRT são estabelecidos. A AASHTO T283/99 estabelece o valor mínimo de 80%, caso seja seguida a metodologia superpave, já a MP 8-01 da AASHTO estabelece um limite inferior de 70% para o critério RRT. Logo, observando a Figura 28, verifica-se que todas as amostras atendem o critério da MP 08-01, todavia as misturas modificadas com lignina extraída de pinus não atenderam ao critério da AASHTO T 283/99.

Para a MS-2 Asphalt Mix Design Methods (2014), a utilização de um limite inferior de 70%, condicionada a experiências, considera que RRT inferiores a 60% são inaceitáveis, pois indicam elevada sensibilidade ao dano por umidade. Desse modo, todas as amostras possuíam limites de RRT aceitáveis, apesar da adição de lignina extraída de pinus ao ligante asfáltico evidenciar uma redução da adesividade e manutenção de sua resistência após ciclos de umidade, o que indica menor resistência durante a vida útil do pavimento (CARVALHO, 2018).

#### 4.4.4 Módulo Dinâmico

Com os dados do ensaio foram traçadas e estudadas curvas mestras do módulo dinâmico em função do tempo. A metodologia utilizada para traçar as curvas foi o método apresentado no “E\*, Dynamic Modulus: Test Protocol – Problems na Solutions” do Departamento de Transportes dos EUA. Na Figura 29 estão ilustradas as curvas mestre para o ligante puro e modificado.

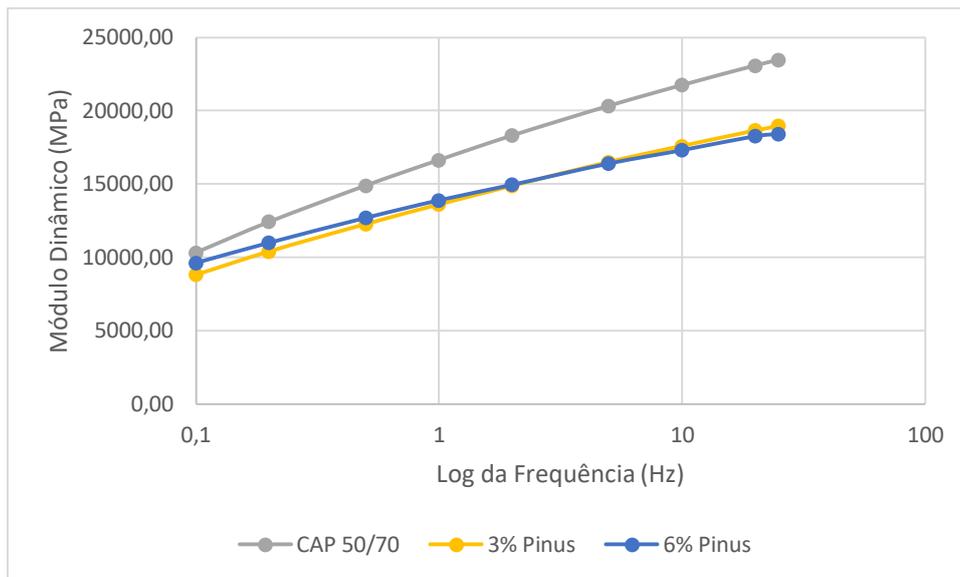
**Figura 29:** Curvas mestras para o ligante puro e modificado



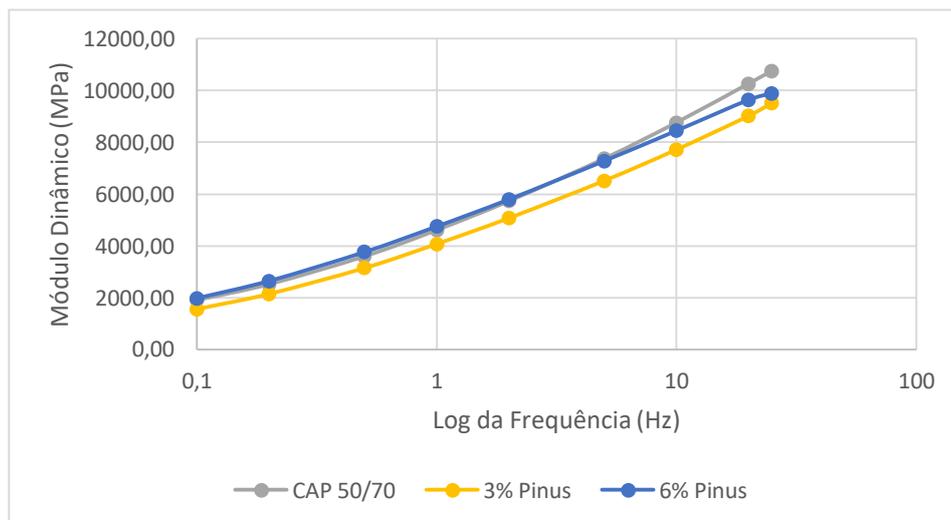
Verificou-se que tanto nas zonas de alta frequência reduzida (elevado volume de tráfegos), quanto nas de baixa frequência reduzida (baixo volume de tráfego) o CAP 50/70 sempre apresentou rigidez superior ao das misturas com adição de lignina extraída de pinus.

As Figuras 30, 31 e 32 apresentam as curvas mestras que agruparam os valores do módulo dinâmico de todas as misturas para cada uma das temperaturas de ensaio. Notou-se que com a introdução da lignina para a temperatura de 37°C, o teor de 6% teve a sua rigidez bem próxima a do CAP puro, já o teor de 3% teve sempre uma rigidez inferior se comparada às demais amostras.

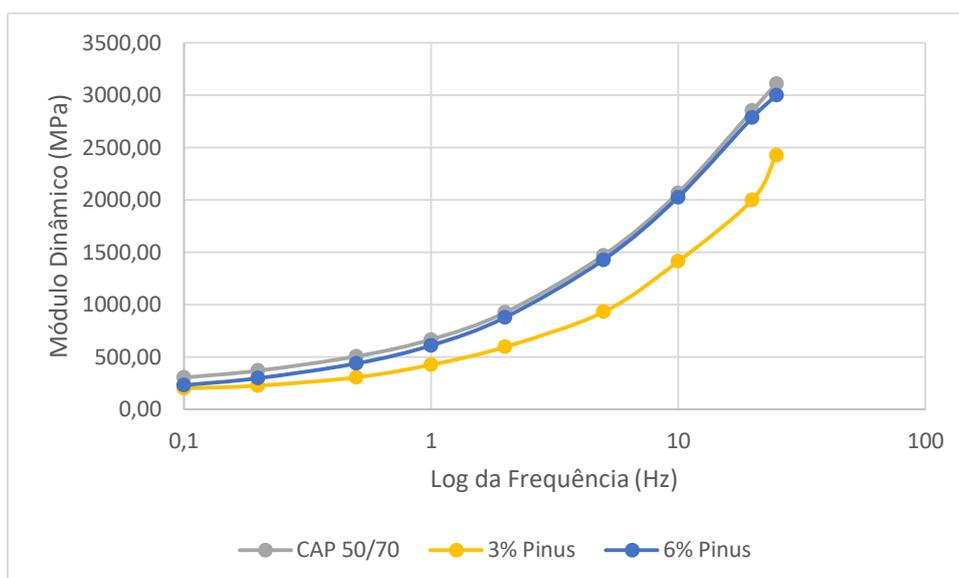
**Figura 30:** Módulo dinâmico das misturas à 4°C



**Figura 31:** Módulo dinâmico das misturas à 21°C



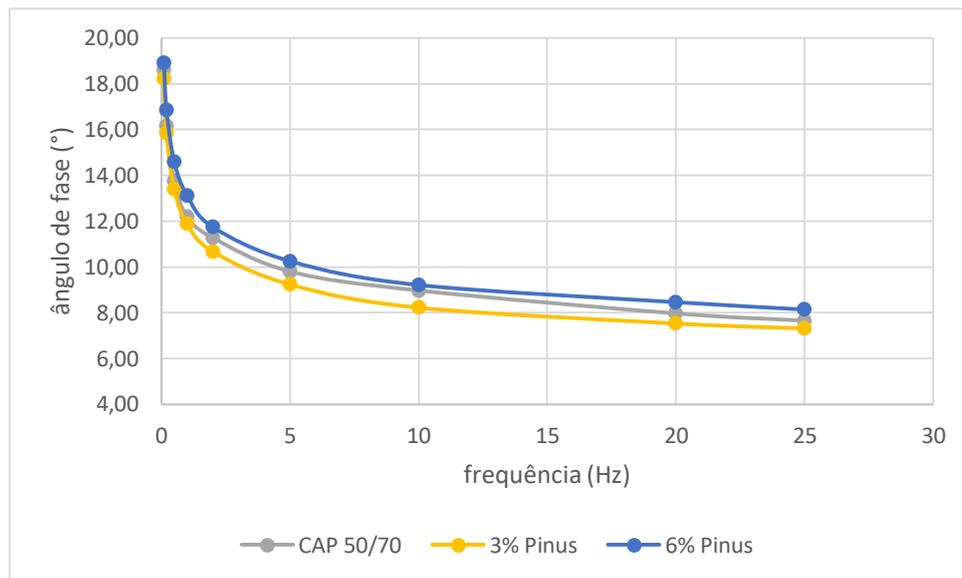
**Figura 32:** Módulo dinâmico das misturas à 37°C



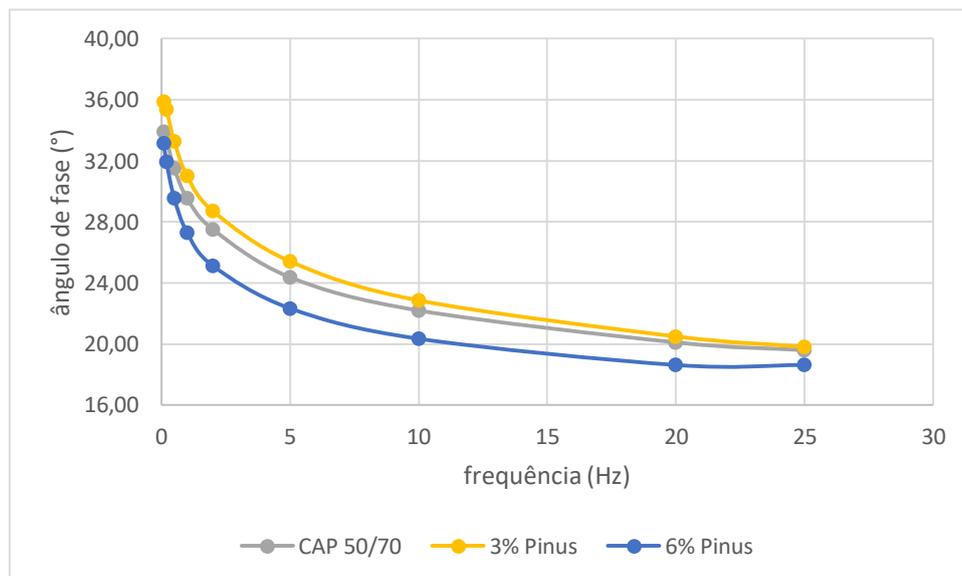
De acordo com os resultados obtidos foi possível verificar que com o aumento da temperatura o comportamento da rigidez alterou-se, as misturas modificadas com lignina tiveram um valor de módulo dinâmico bem mais próximo aos verificados para o CAP puro, se em uma baixa temperatura o módulo dinâmico do CAP puro tinha uma elevada diferença se comparada as misturas com adições, o aumento da temperatura foi responsável por reduzir essa amplitude, de acordo com (LUZ, 2019) a incorporação deste polímero natural ao ligante é responsável por uma melhoria das interações existentes no ligante asfáltico.

Outro parâmetro possível de obter através do ensaio de módulo dinâmico é o ângulo de fase, este trata-se de uma propriedade visco elástica que corresponde à diferença entre o pulso de tensão e o pulso de deformação. As Figuras 33 a 35 apresentam os ângulos de fases verificados para as frequências de carregamento para as três temperaturas do estudo.

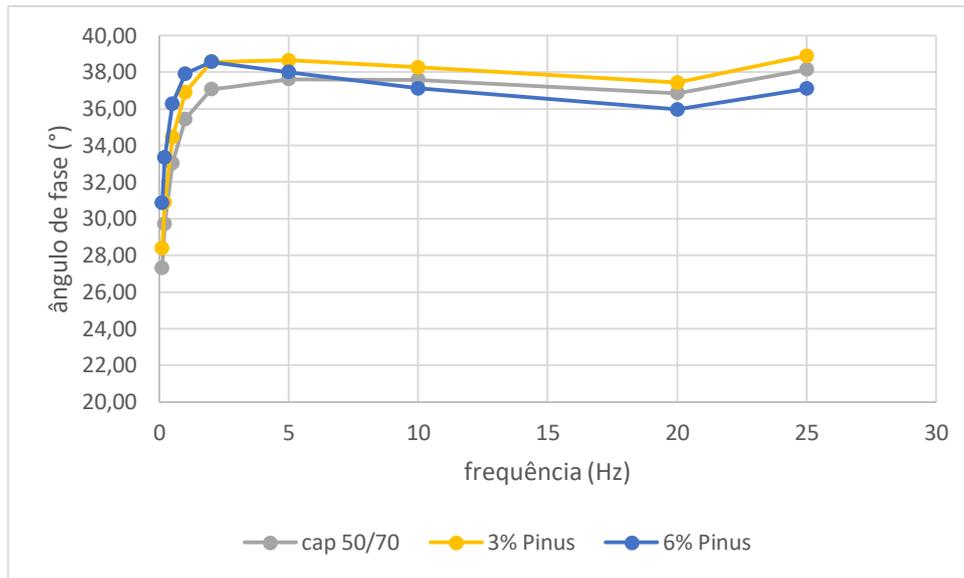
**Figura 33:** Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (T=4°C)



**Figura 34:** Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (T=21°C)



**Figura 35:** Ângulos de fase referentes às frequências de carregamento (T=37,7°C)



Após uma análise dos gráficos de angularidade é possível observar que o ângulo de fase eleva-se com o incremento da temperatura, porém reduz-se com o acréscimo da frequência. A tendência de redução da angularidade com elevação da frequência permanece até a temperatura de 21°C, pois a partir da temperatura de 37,7°C acontece o oposto, com a frequência e o ângulo de fase possuindo uma tendência de crescimento.

Comportamento semelhante foi observado por Costa (2017), no estudo em menor temperatura verificou-se que o ângulo de fase aumenta, o que indica que grande parte da energia é dissipada no comportamento viscoelástico da mistura, logo o ângulo de fase em baixa temperatura e baixa frequência relaciona-se ao ligante, e segue a tendência deste. Por outro lado, para alta temperatura e baixa frequência o ângulo de fase é afetado pelo agregado, e atribui-se grande porção da energia a interação ligante–agregado que resulta em uma tendência de redução do ângulo de fase.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

### 5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modificação do ligante puro 50/70 com lignina extraída de pinus, contribuiu para um aumento da rigidez, devido a incorporação de uma quantidade elevada de anéis aromáticos oriundos de sua estrutura molecular que foram adicionados ao CAP 50/70. Além de uma elevação das temperaturas do ponto de amolecimento, o que indica uma manutenção das propriedades do ligante modificado a altas temperaturas.

Com relação a viscosidade, todas as amostras são válidas para as especificações técnicas adotadas pela metodologia SUPERPAVE. Checou-se que a adição da lignina foi responsável por um aumento da viscosidade, e das temperaturas de usinagem e compactação se comparados ao CAP 50/70. Todas as amostras do estudo possuem temperaturas de usinagem e compactação compatíveis com as normas técnicas.

De acordo com os ensaios mecânicos, a adição do teor de 3% de lignina extraída de pinus foi possível checar um aumento da RT, o que atribui-se a uma maior interação ligante/agregado. Todas as amostras ensaiadas atenderam as solicitações de normas do DNIT

Os ligantes modificados com lignina extraída de pinus apresentaram um módulo de resiliência superior ao observado para o CAP 50/70, portanto indicam uma tendência de aumento da rigidez.

Checou-se através da pesquisa que todas as amostras atenderam os critérios da MP 08-01 com relação aos valores de RRT, e de acordo com a Asphalt Mix Design Method, as informações de RRT observadas são aceitáveis para uso do material. Todavia, as amostras que possuem adição de lignina extraída de pinus possuem valores de RRT inferiores ao CAP 50/70, o que dá indícios de uma menor adesividade e resistência após ciclos de umidade.

A modificação do ligante puro com lignina extraída de pinus foi responsável por um declínio da rigidez para baixas temperaturas, porém com o acréscimo da temperatura a rigidez das amostras que possuíam lignina elevou-se, e a amplitude entre os valores de módulo dinâmico checados para o CAP 50/70 e o das amostras com lignina reduziu.

## 5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Realizar estudos das propriedades mecânicas do ligante modificado com lignina com teores superiores aos utilizados neste estudo
- Caracterizar através da microscopia eletrônica de varredura amostras dos ligantes modificados por adição de lignina

## REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, AASHTO T 283 **Resistance of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) to Moisture Induced Damage**. Washington, D. C, 2007

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.

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

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.

COSTA, L.F, **Análise do uso das fibras do pseudocaule da bananeira em misturas asfálticas SMA**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

CARVALHO, M. A. R, **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com CAP 50/70 modificado por polímero reativo / não reativo e ácidos polifosfórico**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2018.

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.

D'ALMEIDA, M. L. O. Fontes de produção em fábricas de pasta celulósica. 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. 539-559.

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.

HUNTER, R.N. **Asphalts in road construction**. London: Thomas Telford Ed., 2000.

LIMA, A. F.; JARA, E. R. P.; ALFONSO, V. A. Madeira como matéria-prima para fabricação de pasta celulósica. 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. 129-168.

LIMA, C. K. M. L. **Estudo da incorporação de resíduo industrial polimérico ao CAP**. 2008b. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

LEITE, L.F.M. **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. 1999. 266 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1999.

LUZ, P. M. S. G. **Avaliação reológica do ligante asfáltico 50/70 modificado com lignina das madeiras pinus e eucalipto**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

MAITY, S. K. Opportunities, recente trends and challenges of integrated biorefinery: Part I. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 1427-1445, 2015.

MORILHA JR., 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) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MOTTA, L. M. G., **Aspectos do Comportamento das Misturas Asfálticas**. Curso Resiliência e Fadiga de Misturas Asfálticas, IBP, Rio de Janeiro/RJ, 1993.

MOTTA, L. M. G. **Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis – Critérios de Confiabilidade e Ensaio de Cargas Repetidas**. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 1991.

NREL – NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/biomass/biorefinery.html>>. Acesso em: 28 de outubro de 2018.

OLIVEIRA, F. C. **Oxidação de lignina proveniente de resíduos lignocelulósicos agroindustriais para obtenção de compostos químicos aromáticos de maior valor agregado.** Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, Lorena/SP, 2015.

PILÓ-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.

PINTO, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos.** 1991. 478 f. Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

PREUSSLER, E. S., **Estudo da Deformação Resiliente de Pavimentos Flexíveis e Aplicação ao Projeto de Camadas de Reforço.** Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 1983.

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

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

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica, contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado.** 57 f. 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.** 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

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

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.

SOBREIRO, F. P. **Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero**

**SBS.** 2014. 346 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

TONIAL, I. A. **Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na Vida de Fadiga de Pavimentos.** Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ, RIO DE JANEIRO, RJ, 2001.

WHITEOAK, D. **The Shell Bitumen Handbook.** 1990. 4th ed.

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

YAN, K.; HE, W.; CHEN, M.; LIU, W. **Laboratory investigation of waste tire rubber and amorphous poly alpha olefin modified asphalt.** Construction and Building Materials, v. 129, p. 256-265. 2016.

YEN, T.F. **Asphaltene/resin plus oil interconversion: an investigation into colloidal model of asphaltenes.** In: WORKSHOP THE CHEMICAL COMPONENTS AND STRUCTURE OF ASPHALTIC MATERIALS, 1991, Rome, Italy. Proceedings...1991.