



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG

Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - CTRN

Unidade Acadêmica de Engenharia Civil - UAEC

Área : Geotecnia

**EFEITO DA ADIÇÃO DE LIGNINA NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE
LIGANTES ASFÁLTICOS**

Dannylo Araújo Galdino

Orientadora: Dr^a. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça.

Campina Grande, abril/2021

**EFEITO DA ADIÇÃO DE LIGNINA NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE
LIGANTES ASFÁLTICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande, abril/2021

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

**EFEITO DA ADIÇÃO DE LIGNINA NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE
LIGANTES ASFÁLTICOS**

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: Dr^a. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça
Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues

Campina Grande, abril/2021

FOLHA DE APROVAÇÃO

DANNYLO ARAÚJO GALDINO

UMA REVISÃO SOBRE O EFEITO DA ADIÇÃO DE LIGNINA NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE LIGANTES ASFÁLTICOS

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 Gonçalves 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

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu o dom da vida e me abençoa todos os dias com sua graça.

Aos meus pais, Maria e Manoel, por todo o esforço que fizeram para tornar possível a realização deste sonho, pelo amor incondicional, exemplo e por todo o apoio.

À minha companheira Yanka Almeida, por sempre estar ao meu lado, me motivando e não deixando desistir dos meus sonhos.

À professora Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça pela orientação e paciência necessária à conclusão desse trabalho. .

À instituição UFCG, que me proporcionou a chance de expandir os meus conhecimentos e contribuir de forma significativa no meu papel de cidadão na sociedade.

Aos Professores que contribuíram com a minha formação durante os anos que estive na UFCG, especialmente ao professor Eduardo Enéas de Figueiredo (in memoriam) da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da UFCG.

RESUMO

O sistema de transporte rodoviário é o principal meio logístico do Brasil, sendo responsável por grande parte do transporte de todas as cargas no território e locomoção de pessoas. No entanto, apesar do alto grau de dependência do país em relação as rodovias, é notável que grande parte da malha rodoviária brasileira apresenta diversos tipos de manifestações patológicas, que são decorrentes do aumento imprevisto de cargas rodoviárias, falta de manutenção preventiva e materiais aplicados de baixa resistência e durabilidade. Dessa forma, as modificações de ligantes asfálticos possui como principal objetivo, encontrar aditivos que misturados aos ligantes asfálticos, possam aumentar a resistência dos pavimentos às deformações causadas por esforços mecânicos ou por variações térmicas, trazendo também como consequência, melhorias das condições de segurança e conforto para os usuários das rodovias e a redução dos custos com manutenções em curtos períodos de tempo. De modo geral, essa pesquisa tem como objetivo fazer um comparativo das propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados por adição de lignina. Foram realizados ensaios especiais como o de viscosidade rotacional e o testes de fluência e recuperação sob tensões múltiplas, que tiveram o objetivo de determinar os parâmetros de percentual de recuperação e compliância não recuperável do asfalto, todos antes e após o envelhecimento a curto prazo (RTFO). Observou-se que os ligantes modificados por adição de lignina se apresentaram mais resistentes à deformação permanente, variação de temperatura, mas principalmente ao envelhecimento, comprovando que a utilização da lignina, de um modo geral, se mostrou viável, se comparada ao ligante convencional. Além disso, podendo também chegar à conclusão que teores mais elevados de lignina, em torno de 9%, são os mais indicados para melhora dos índices de recuperação deformável do asfalto.

Palavras-chave: Cimento asfáltico de Petróleo, Pavimento asfáltico, lignina

ABSTRACT

The road transport system is the main logistical means in Brazil, being responsible for a large part of the transport of all cargo in the territory and locomotion of people. However, despite the country's high degree of dependence on highways, it is notable that a large part of the Brazilian road network presents several types of pathological manifestations, which are due to the unforeseen increase in road loads, lack of preventive maintenance and mandatory materials. Low resistance and durability. Thus, as modifications of asphaltic binders have as main objective, to find additives that mixed with asphalt binders, can increase the resistance of the pavements to deformations caused by mechanical efforts or by thermal variations, also bringing, as a consequence, improvements in the conditions of safety and comfort. For highway users and reduced maintenance costs in short periods of time. In general, this research aims to make a comparison of the rheological properties of asphalt binders modified by the addition of lignin. Special tests were carried out, such as rotational viscosity test and the creep and recovery tests under multiple stresses, which aim to determine the parameters of percentage of recovery and non-recoverable compliance of the asphalt, all before and after short-term aging (RTFO) It was observed that the ligands modified by the addition of lignin are more resistant to heat dissipation, temperature variation, but mainly to aging, proving that the use of lignin, in general, proved to be viable rheologically, if compared to the ligand conventional. In addition, it may also come to the conclusion that levels of lignin are the most suitable for improving the rates of deformable recovery of asphalt.

Keywords: Asphalt Petroleum Cement, Asphalt pavement, Lignin

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Revestimento de pavimento : Concreto-Cimento e asfáltico.....	16
Figura 2 - Fissuras em Pavimento.....	18
Figura 3 - Afundamento em Pavimento.....	18
Figura 4 - Desgaste em Pavimento.....	19
Figura 5 - Painéis de deterioração em Pavimento.....	20
Figura 6 - Condições Gerais do Pavimento.....	21
Figura 7 - Dados de Pavimentação.....	22
Figura 8 - Unidades básicas da estrutura de ligninas.....	24
Figura 9 - Estrutura hipotética de lignina.....	25
Figura 10 - Viscosímetro Rotacional Brookfield.....	29
Figura 11 - Reômetro de cisalhamento dinâmico.....	30
Figura 12 - Viscosidade dos ligantes antes e após RFTO – 135 °C.....	31
Figura 13 - Viscosidade dos ligantes antes e após RFTO – 150 °C.....	32
Figura 14 - Viscosidade dos ligantes antes e após RFTO – 177 °C.....	33
Figura 15 - Compliância não recuperáveis à 100 Pa e 3200 Pa à 64°C.....	36
Figura 16 - Porcentagem de recuperação à 100 PA e 3200 Pa à 64°C.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de Transportes	21
Tabela 2 - Composição elementar da Lignina.....	26
Tabela 3 - Classificação de volume do tráfego baseado no valor de Jnr a 3200 Pa.....	35

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1 Justificativa.....	11
1.2 Objetivos.....	12
1.2.1 Objetivo Geral.....	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1 Histórico.....	13
2.2 Cimento asfáltico de Petróleo : Definições , composição e aplicações.....	14
2.3 Pavimentos asfálticos : Definição e classificação.....	14
2.4 Estudo das patologias.....	16
2.5 Modal Rodoviário Brasileiro.....	20
2.6 Manutenção de Pavimentos.....	22
2.7 Uso de aditivos.....	23
2.8 Lignina.....	24
2.9 Principais tipos de lignina e o processo Kraft.....	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 Materiais.....	27
3.2 Métodos.....	28
3.2.1 RTFO (Estuda de filme fino Rotativo).....	28
3.2.2. Caracterização das propriedades reológicas.....	28
3.2.2.1. Viscosidade Rotacional.....	28
3.2.2.2. Fluência e recuperação sob tensões múltiplas – MSCR.....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1 Viscosidade Rotacional.....	30
4.2 Fluência e recuperação sob tensões múltiplas – MSCR.....	35
5. CONCLUSÕES.....	38
6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	39
7. REFERÊNCIAS.....	40
1. INTRODUÇÃO	

A malha rodoviária nacional possui 1.563,6 km, sendo responsável pela movimentação de mais de 60% das mercadorias e de mais de 90% dos passageiros, o transporte rodoviário enfrenta graves problemas com a baixa qualidade da infraestrutura no Brasil: apenas 12,4% da malha rodoviária é pavimentada (CNT,2019) e desse valor, os pavimentos flexíveis representam aproximadamente 95% de toda pavimentação da malha rodoviária brasileira pavimentada (DNIT,2018) , que tem como componente principal o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).

Essa expressiva porcentagem, reflete a dependência do Brasil em utilizar a malha rodoviária como principal fonte de escoamento industrial e transporte. Dessa forma, o acarretamento de consequências de maneira permanente na qualidade e durabilidade do pavimento gerados pelo alto volume de tráfego é inevitável. Segundo a CNT, 59% da malha rodoviária pavimentada apresentam algum problema e foram considerados regulares, ruins ou péssimas, foram analisados 108.863 quilômetros de rodovias federais pavimentadas e os principais trechos de rodovias estaduais. Na mesma pesquisa, também foram analisados, o número de pontos críticos nas rodovias que teve aumento de 75% em 2019. Segundo a CNT, dos 797 pontos críticos, 130 são erosões na pista, e 639 são trechos com buracos grandes, resultados da degradação do pavimento (CNT,2019).

Essas patologias presentes em diversos pontos da malha rodoviária brasileira, representam um aumento considerável nos custos de restauração das vias, bem como, a existência de problemas mecânicos e conseqüentemente de segurança nos veículos que fazem uso dessas rodovias. Dessa forma, os estudos acerca da modificação do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é realizada com a finalidade de aumentar a resistência dos pavimentos às deformações permanentes, fissuras ocasionadas por fadiga, e/ou por variações térmicas, e, conseqüentemente, proporcionar melhorias nas condições de segurança e conforto das rodovias (SOBREIRO,2014) . Estas modificações acontecem por meio da ação de substâncias modificadoras através de materiais como é o caso do elemento lignina.

A lignina é uma macromolécula tridimensional amorfa encontrada nas plantas terrestres, associada à celulose na parede celular cuja função é de conferir rigidez, impermeabilidade e resistência a ataques microbiológicos e mecânicos aos tecidos vegetais. A lignina representa entre 18% e 35% da massa seca da parede celular dos vegetais

Dessa forma, levando em consideração as excepcionais propriedades que possui, o elemento surge com grande potencial de melhorar as propriedades particulares ao ligante asfáltico utilizado nas rodovias e minimizar muitas das patologias presentes..

Portanto, é de grande relevância econômica e social, estudos que resultem na busca por materiais que atendam às especificações técnicas mínimas exigidas, com o intuito de possibilitar o aumento no desempenho mecânico dos Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).

Deste modo, essa pesquisa tem como principal objetivo analisar o efeito da adição de lignina nas propriedades reológicas do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).

1.1. JUSTIFICATIVA

No Brasil, apesar de grande utilização e dependência das rodovias em diversas atividades relacionadas aos processos econômicos e logísticos, a malha rodoviária brasileira possui baixo percentual de rodovias pavimentadas, além disso, como fator mais agravante, o índice de qualidade das rodovias brasileiras é predominantemente ruim ou péssimo. Sendo assim, é inevitável os estudos e pesquisas de alternativas que possam suprir as deficiências existentes no comportamento de ligantes asfálticos.

Dessa forma , a importância dessa pesquisa é determinada com base na importância da procura por novas alternativas, viáveis economicamente e que atenda às necessidades mecânicas e térmicas solicitadas, que resultem em melhorias nas propriedades físicas dos Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) , assim , proporcionando um significativo avanço na segurança e conforto dos pavimentos que compõem a malha rodoviária do Brasil. Com o fundamento maior de contribuir para o desenvolvimento econômico e logístico do país.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo principal fazer uma revisão dos efeitos provenientes das propriedades reológicas do ligante asfáltico CAP 50/70 modificado por adição da lignina.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Análise das alterações sofridas pela mistura do ligante com a adição da lignina;
- Observação de quais os teores de lignina que proporcionam os melhores resultados relacionados as propriedades reológicas do CAP;
- Analisar as alterações apresentadas para resistência e envelhecimento do ligante após adição de lignina.

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, às suas modificações e aplicações na pavimentação asfáltica.

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

Resultados e Discussões – Neste tópico estão apresentados os resultados que se pretende obter para as propriedades físicas e químicas do ligante asfáltico com a adição do elemento lignina.

Considerações Finais – São apresentadas as considerações obtidas sobre a pesquisa e as sugestões de futuras pesquisas.

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

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Com a finalidade de compreender a presente pesquisa, é de fundamental importância a apresentação de alguns conceitos no contexto da engenharia de pavimentação e as principais características físicas de ligantes asfálticos puros e modificados, assim como, particularidades atreladas à capacidade reológica e composição química destes. Além disso, como complemento à cerca do tema, uma abordagem geral do aditivo modificador em questão, a lignina.

2.1 Histórico

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem, sendo utilizados entre diversas obras de engenharia, mas possuindo destaque na pavimentação de rodovias, sendo uma das utilidades de maior grau de importância entre todas e um dos mais antigos também. Na maioria dos países do mundo, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento das rodovias de rolamento. No Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico, além de ser também utilizado em grande parte das pavimentações de áreas urbanas.

2.2 Cimento Asfáltico de Petróleo: Definições, Composição e Aplicações

Características únicas como proporcionar forte união dos agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável, além disso, ser um material altamente impermeabilizante, durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, bem como, esforços mecânicos solicitados, justifica a utilização em larga escala desse produto na maioria das construções de pavimentos.

Dessa forma, no âmbito da engenharia de pavimentação, é possível existir diversos tipos de asfalto, com cada tipo de asfalto possuindo suas peculiaridades e se destinando a fins específicos. Podendo ser destacados entre os vários tipos de asfaltos, os seguintes:

- Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP): É utilizado em larga escala na construção de pavimentos asfálticos, devido ao fato de possuir características de flexibilidade, durabilidade e alta resistência à maioria dos ácidos, álcalis e sais devido ao seu processo produção derivado a partir de sistemas de refino de petróleo.
- Asfalto Diluído de Petróleo (ADP): Normalmente é utilizado na etapa intermediária da pavimentação, também conhecida como etapa de impermeabilização, podendo ser composta de brita corrida, argila ou solo cimento, dependendo da região a ser pavimentada e suas solicitações.
- Emulsão Asfáltica: É caracterizada pela utilização de produtos compostos por derivados do Cimento Asfáltico de Petróleo dispersos em água e em suspensão a ação de produtos químicos também conhecidos como emulsificantes. Nas misturas asfálticas a frio, essa emulsão também possui o papel de ligante asfáltico.

2.3 Pavimentos Asfálticos: Definição e classificação

O pavimento rodoviário é uma estrutura composta de camadas sobrepostas de espessuras finitas e de composições distintas, construída sobre um solo que passa pelo processo de terraplenagem. Essa estrutura tem finalidade técnica de resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, com o intuito de propiciar conforto, economia e segurança aos usuários

Podem ser classificados em dois modelos estruturais distintos: os pavimentos rígidos e os flexíveis.

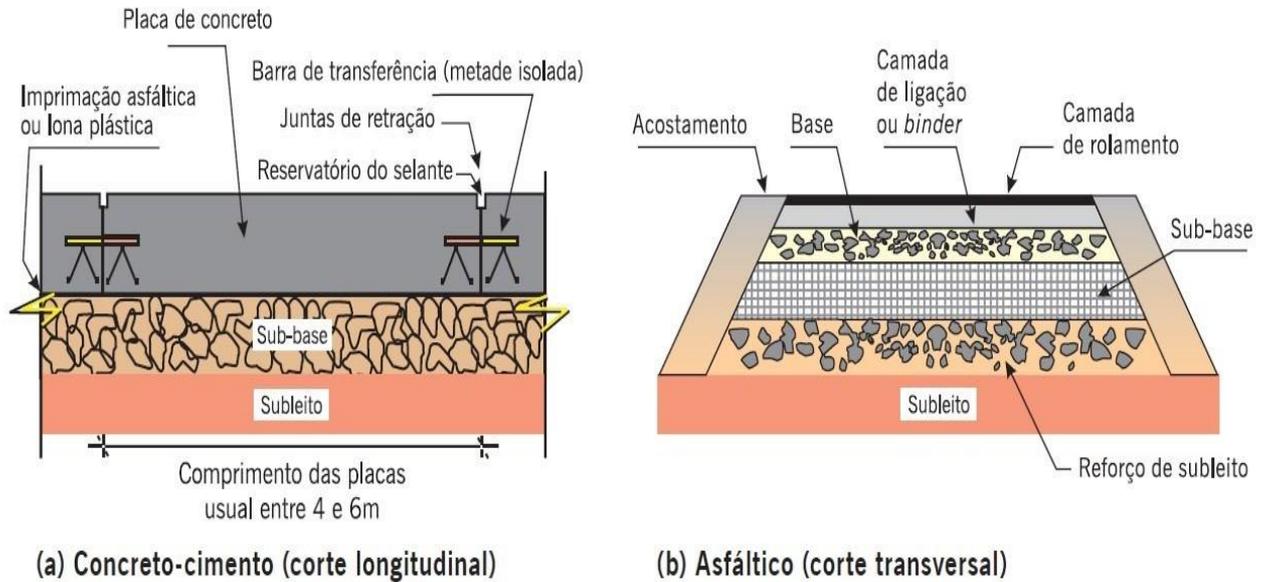
Os pavimentos rígidos, são compostos por placas de concreto de Cimento Portland (PCS). Nesses pavimentos, a estruturas das placas podem ser armadas ou não com barras de aço (Figura 1(a)). Além disso, é característica desse tipo de pavimento, a sua espessura ser determinada de acordo com o grau de resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes.

Como consequência da sua composição material, os pavimentos rígidos exigem menos intervenções de manutenção, auxilia na propagação de luz, ou seja, no período noturno pode auxiliar a iluminação das vias e ainda fornece elevada aderência entre o pneu do veículo e o pavimento. No entanto, o pavimento rígido requer um elevado e adequado controle de execução para todas essas vantagens serem adquiridas com sucesso (VOTORANTIM, 2019).

Os pavimentos denominados de flexíveis, são aqueles em que a composição do revestimento é constituída por uma mistura de agregados, ligantes asfálticos e em algumas ocasiões, aditivos que possibilitem a melhor performance do pavimento (Figura 1). Esse tipo de pavimento é formado por quatro camadas principais: A camada mais superficial que é constituída pelo revestimento asfáltico, base, sub-base e a camada mais profunda, que é o reforço do subleito.

O revestimento asfáltico, por representar a camada superior , tem atribuída as principais funções de resistência direta aos esforços solicitados pelas ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, além disso, impermeabilizar de forma total o pavimento, além de oferecer condições aceitáveis de rolamento para os usuários (conforto e segurança).

Figura 1: (a) Concreto -cimento; (b) Asfáltico



Fonte: BERNUCCI et al., 2008

2.4 Patologias

Os pavimentos que são compostos com cimento asfáltico, mais comum nas rodovias do país, tem uma vida útil entre o período de 8 e 12 anos. No entanto, análises apontam que apenas em sete meses após a conclusão desses pavimentos, as rodovias já sofrem os primeiros problemas de desgaste e o consequente surgimento de problemas estruturais.

Ao longo dessa vida útil de uma rodovia, estudos diversos comprovam que ocorrem solicitações de maneira repetitiva e dinâmicas diariamente nos pavimentos, além disso, oxidação, radiação solar e variação de temperatura, possuem alto grau de influência no poder de alterar significativamente a estrutura química, tornando o pavimento mais rígido e desgastado, assim, propiciando a ocorrência de fissuras e deformações.

Além das ações de deterioração geradas pelas solicitações mecânicas, assim como, o desgaste ocasionado por variações de temperaturas e reações químicas. O envelhecimento do ligante asfáltico é outro problema encontrado que resulta em desgaste do pavimento.

As modificações nas propriedades físicas geradas pelo envelhecimento de um ligante asfáltico são caracterizadas pelo aumento de resistência, ou seja, aumento da viscosidade associada a uma diminuição da penetração e aumento do ponto de amolecimento. Este efeito tende a aumentar a resistência à formação das trilhas de roda da mistura e pode ser considerado como um efeito benéfico. No entanto, o envelhecimento pode resultar também no desenvolvimento de vários problemas no pavimento asfáltico, tais como trincamento e fissuras por fadiga, trincamento gerado por questões térmicas e degradação devido ao desgaste e a alta presença de umidade (MELO, 2014).

Dessa forma, os defeitos de superfície podem aparecer de forma precoce, que são devidos a erros de execução ou inadequações de métodos, ou podem aparecer ao médio ou longo prazo, que são propiciados por consequência da alta utilização da rodovia pelo tráfego e efeitos térmicos ou químicos sobre o pavimento. Entre os erros ou inadequações técnicas que podem levar a redução da vida útil do pavimento, destacam-se os erros de projeto, inadequações na produção e seleção de materiais dosagens realizadas em medidas desproporcionais as de projeto, inadequações nas tomadas de medidas de conservação e manutenção do pavimento.

Os fenômenos que trazem desgaste ou deterioração nos pavimentos, resultantes dos processos de submissão a um estado de tensões e de extensões repetidas, são normalmente denominados de fadiga. Essas ações sobre os pavimentos, trazem diversos resultados, como o aparecimento de fissuras no material que evoluem para o estágio de ruptura completa da base do pavimento.

A norma DNIT 005 (2003), descreve os principais problemas que existem nos pavimentos que constitui a malha rodoviária brasileira, são eles:

- Fissuras: São fendas que surgem nos revestimentos asfálticos que ainda não possuem capacidade de gerar problemas de caráter funcional na estrutura das rodovias, essas fissuras são caracterizadas por possuírem extensões inferiores a 30 cm, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Fissuras em Pavimento



Fonte : DNIT , 2013

- Afundamento: Representa uma deformação de caráter permanente no pavimento, podendo ser apresentada no formato plástico ou de consolidação (Figura 3).

Figura 3: Afundamento em Pavimento



Fonte : DNIT , 2013.

- Desgaste: Causado pela falta de manutenção dos pavimentos após um longo período de uso, acontece na forma de desagregação progressiva dos

componentes do pavimento. Provocado por esforços tangenciais causados pelo tráfego, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4: Desgaste em Pavimento



Fonte : DNIT , 2013

- **Panelas de deterioração:** São representadas por cavidades que se formam no pavimento, sendo gerado por ações de falha de execução ou materiais, como por falta de aderência entre camadas superpostas, podendo alcançar as camadas inferiores do pavimento e gerando o desgaste total (Figura 5).

Figura 5: Panelas de deterioração em Pavimento

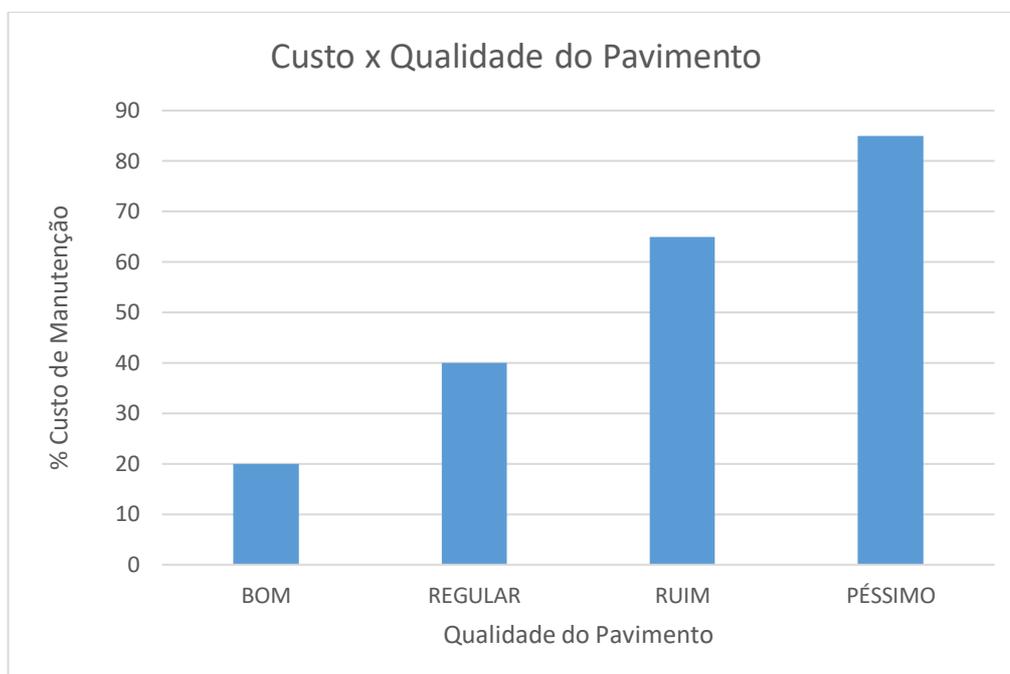


Fonte : DNIT , 2013

2.5 Modal Rodoviário Brasileiro

No Brasil, pode ser verificada que as rodovias apresentam em sua grande maioria, condições gerais ruins dos pavimentos (Figura 6). A consequência direta desse baixo índice de qualidade, é a redução da segurança dos usuários que circulam e também o aumento do consumo de combustível, tempo de viagem e custos de manutenção dos veículos. Em rodovias que o pavimento é considerado péssimo, esse aumento pode chegar a 91,5. Em comparativo com esse alto índice, podemos observar o aumento de custo de manutenção dependendo da qualidade do pavimento.

Figura 6: Condições gerais do Pavimento



Fonte: CNT , 2019.

Como grande parte do transporte e escoamento econômico do país é realizado por vias terrestres (Tabela 1), a qualidade do pavimento também tem impacto direto no preço final dos produtos comercializados no mercado nacional, consequentemente, pode tirar como conclusão que os preços dos produtos no país são diretamente influenciados pelas condições não ideais dos pavimentos das rodovias brasileiras.

Tabela 1: Matriz de Transportes

Matriz de Transportes		
Modal	Milhões (TKU)	Participação (%)
Rodoviário	485.625	61,1
Ferrovário	164.809	20,7
Aquaviário	108.000	13,6
Dutoviário	33.300	4,2
Aéreo	3.619	0,4
Total	794.903	100,0

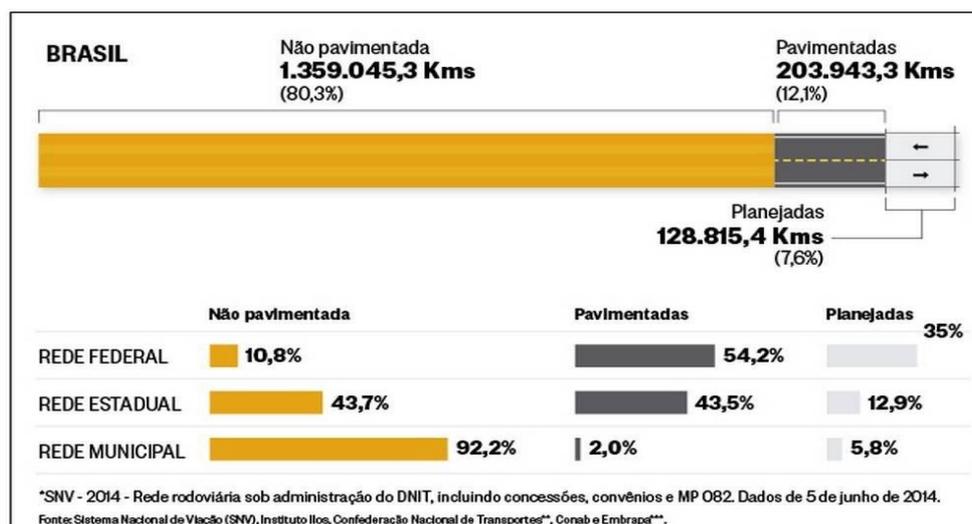
Fonte : CNT , 2016

2.6 Manutenção de Pavimentos

Estudo de qualidade mostram que falhas na gestão e execução são fatores que contribuem para a baixa qualidade do pavimento que formam a malha de estradas brasileiras. Entre motivos que possam ser analisados como fomentadores desse problema, ganha destaque o fato de apesar ser um país dependente da malha rodoviária, o Brasil utiliza metodologias e métodos ultrapassadas para o planejamento e execução de obras, deficiências técnicas de construção, baixo investimento na manutenção das rodovias, falhas de gerenciamento de obras e fiscalização. Dessa forma, a consequência dessas deficiências operacionais, são refletidas nos gastos posteriores de recuperação em curto prazo dos pavimentos. Somente em razão da má qualidade do pavimento, em 2016, o setor de cargas registrou um gasto excedente de 775 milhões de litros de diesel, que provocou um aumento de custos da ordem de R\$ 2,34 bilhões no mercado (CNT, 2019).

No estado atual dos pavimentos da malha rodoviária brasileira (Figura 7), seria necessário investir R\$ 292,54 bilhões em serviços de manutenção que possam deixar as rodovias em condições aceitáveis para o tráfego de veículos. Dessa forma, além da garantia de segurança e conforto para os usuários, também acarretaria na redução de custos dos produtos no mercado e valores de transportes (FGV, 2019).

Figura 7: Dados de Pavimentação



Fonte : CNT , 2014

2.7 Uso de Aditivos

Como a manutenção e recuperação das rodovias exigem altos investimentos, algumas técnicas para a redução de custos na pavimentação é o uso de aditivos nas misturas asfálticas, possibilitando as melhoras de algumas características do pavimento, como a durabilidade e resistência as solicitações e variações de temperatura.

Além disso , com o aumento das demandas por infraestrutura rodoviária e a exigência por períodos de construção cada vez mais curtos , o uso de aditivos possibilita o desenvolvimento de misturas asfálticas que atendam esses requisitos , assim como , desempenhando produtos com alto desempenho e qualidade , que também que possuam o menor impacto possível ao meio ambiente e aos operadores.

O uso do aditivo em ligantes asfálticos , vai depender de qual situação o pavimento se encontre e qual característica seja necessário ser melhorada com o seu uso , por exemplo , a perda de adesividade entre o ligante asfáltico e os agregados podem causar danos aos pavimentos , gerado principalmente pela presença de umidade na interface ligante-agregado. Dessa forma, ocorre a perda de resistência da camada principal do revestimento asfáltico, levando o aceleração do processo de deformações permanentes, aparecimento de fissuras, desagregação e surgimento de buracos, reduzindo de forma considerável a vida útil dos pavimentos (BERNUCCI ,1999).

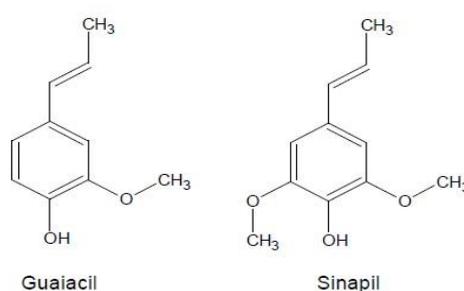
2.8 Lignina

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).

A complexidade da estrutura química macromolecular da lignina foi comprovada por estudos que mostraram que, diferente de outros polímeros naturais, suas unidades monoméricas não se repetem de modo regular e são entrelaçadas por vários tipos 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 tem um papel fundamental na madeira, posto que atua na proteção da planta contra micro-organismos indesejáveis, são responsáveis pela resistência mecânica, conferindo rigidez à parede celular, e ainda pelo transporte de nutrientes, água e metabólitos (PILÓVELOSO et al., 1993; SANTOS, 2008). No entanto, é um componente indesejável na fabricação de papel, devido a característica amarelada que este material e seus derivados causam (FERNANDES, 2005), o que dificulta bastante o processo de branqueamento do produto final. Segundo D’Almeida (1988) a lignina pode ser classificada de acordo com os grupos vegetais (ligninas das gymnospermas ou coníferas, ligninas das angiospermas ou folhosas e ligninas das gramíneas). Os grupos vegetais são caracterizados pela presença de uma ou as duas unidades básicas que constituem a estrutura desse polímero, ilustradas na Figura 8.

Figura 8 – Unidades básicas da estrutura das ligninas.

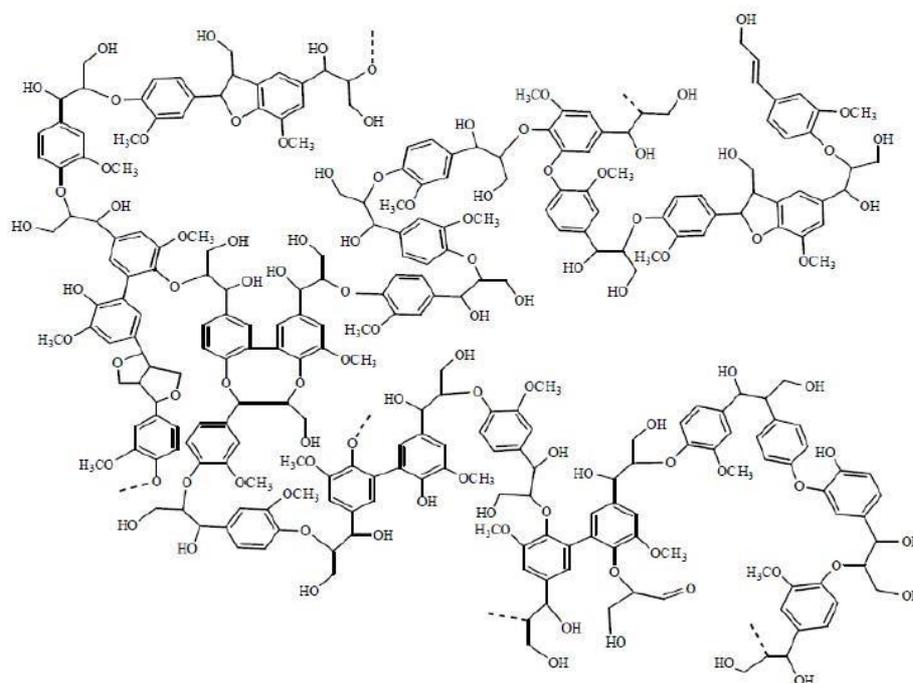


Fonte: HERNÁNDEZ, 2007.

Para Hernandez (2007) há importantes diferenças entre a lignina 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 9 está ilustrada uma estrutura hipotética

de lignina, visto não ser possível a definição de uma estrutura única para sua constituição (CRAVO, 2016).

Figura 9 – Estrutura hipotética de lignina.



Fonte: Adaptado de Souto, 2015.

2.9 Principais tipos da lignina e o Processo kraft

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 composição elementar da lignina consiste de carbono, hidrogênio e oxigênio, como foi observado na Figura 9. A Tabela 2 apresenta intervalos de porcentagens desses elementos de acordo com os grupos das madeiras citadas.

Tabela 2 – Composição elementar da lignina.

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

Fonte: Britt (1970 apud D'ALMEIDA, 1988).

De um modo geral, são diversos os processos pelos quais a lignina pode ser isolada, sejam eles 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).

O principal processo de polpação química alcalina é o chamado Kraft ou Sulfato. Este processo consiste na aplicação de sulfato de sódio (Na_2SO_4), que durante o processo é reduzido à sulfeto. Assim, os principais reagentes deste procedimento são o sulfeto de sódio (Na_2S), além do hidróxido de sódio ($NaOH$), que configuram o meio básico do licor residual. D'Almeida (1988) explica que no processo Kraft, a madeira é cozida na solução alcalina contendo tais reagentes, sob pressão e com temperatura elevada. Após o cozimento, a madeira é despejada num tanque de descarga para as fibras serem separadas e lavadas. O líquido da lavagem passa então por um processo de recuperação dos produtos químicos envolvidos e ao término de todo processo, resta ainda um licor negro residual, de cor marrom escura como o próprio nome sugere, devido à lignina presente, de viscosidade alta e cheiro característico por ocasião dos compostos reduzidos de enxofre.

Dos processos de polpação resultam os três tipos de lignina industriais mais importantes: a lignina Kraft, os lignosulfonatos e a lignina organosolv. Assumpção et al. (1988) afirmou que a lignina Kraft, obtida do processo descrito anteriormente, fica dissolvida no licor negro e pode ser precipitada pela acidificação da solução e o material

tem potencial para pesquisas. No entanto, quando se consegue isolar a lignina, de qualquer maneira, sempre se compromete a sua estrutura molecular (HERNANDEZ, 2007). Os lignosulfonatos são polímeros de lignina sulfonada e são geralmente obtidos de reações com reagentes inorgânicos como o sulfito do processo assim também intitulado. Já a lignina organosolv, resultante do processo Organosolv, é obtida a partir de reações com solventes orgânicos, catalisada geralmente por ácidos, e apresenta característica solúvel, o que as tornam mais reativas, além de serem mais puras (D'ALMEIDA, 1988; HERNANDEZ, 2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - MATERIAIS

Para realização desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

- Ligante: Foi utilizado o CAP 50/70 , fornecido pelo Empresa JBR, localizada no estado de Pernambuco.
- Lignina Modificada : A lignina utilizada neste estudo foi cedida pelo Laboratório de Química Inorgânica da Universidade Federal de Viçosa.
- Ligante Pinus e Eucalipto : As ligninas 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.

3.2 – METÓDOS

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

3.2.1 RTFO (Estufa de Filme Fino Rotativo)

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

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

3.2.2 Caracterização das propriedades reológicas

3.2.2.1. 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 D 4402- 15, e contribui significativamente na definição das temperaturas de usinagem e compactação do asfalto. O viscosímetro rotacional utilizado foi o Brookfield, modelo DV-III ULTRA, acoplado a um controlador de temperatura THERMOSEL, ilustrado na Figura 10, além de um spindle nº 21 para a amostra do CAP convencional e um spindle nº 27 para as amostras dos CAP modificados.

Figura 10 – Viscosímetro rotacional Brookfield.



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 foi medida, antes e após o envelhecimento a curto prazo, em todas as amostras.

3.2.2.2. - Fluência e recuperação sob tensões múltiplas – MSCR

O teste realizado no reômetro (Figura 11), através da norma ASTM D7405-15, é realizado na temperatura de 64°C do PG do ligante envelhecido. São realizados 20 ciclos de 10 segundos, onde nos 10 primeiros são aplicadas uma tensão de 100 Pa (tráfego normal) e nos outros 10, uma tensão de 3,2 kPa (tráfego intenso). Em cada ciclo, a tensão foi aplicada em 1 segundo e relaxada nos 9 segundos restantes. Como resultado do teste tem-se parâmetros, compliância não recuperável (Jnr) e Porcentagem de Recuperação , indicadores mais fiéis da deformação permanente do asfalto.

Figura 11 – Reômetro de cisalhamento dinâmico

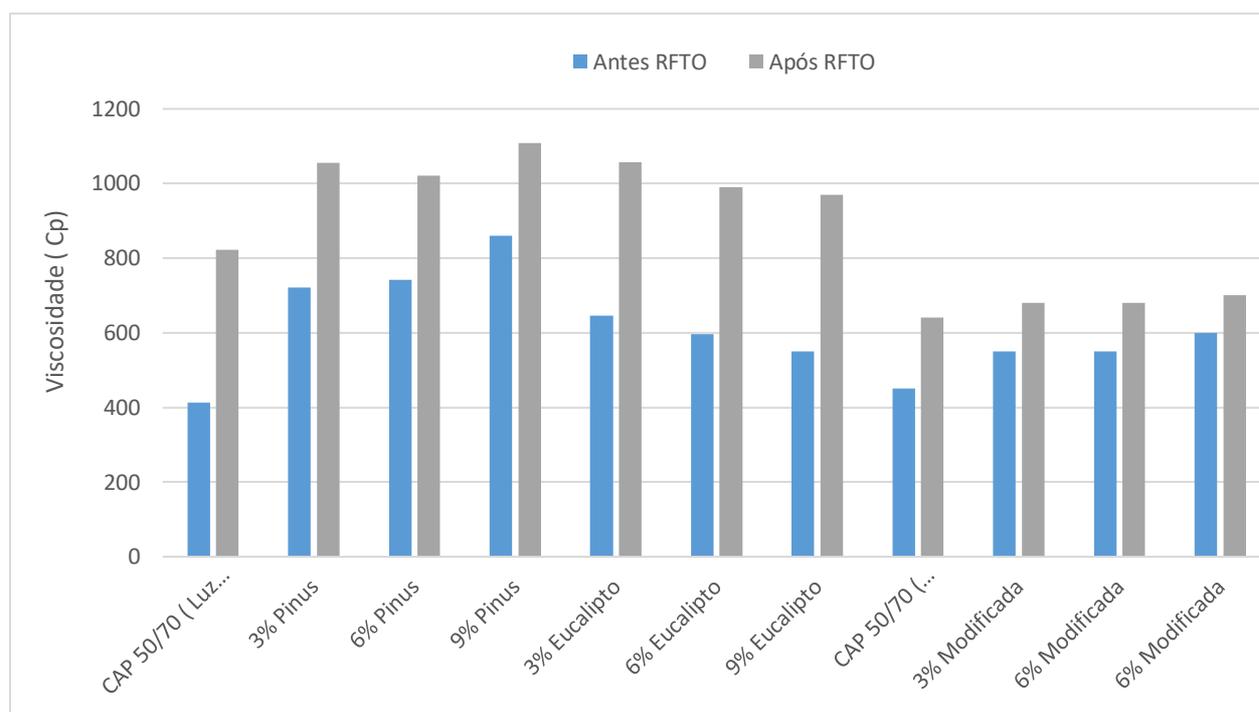


4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

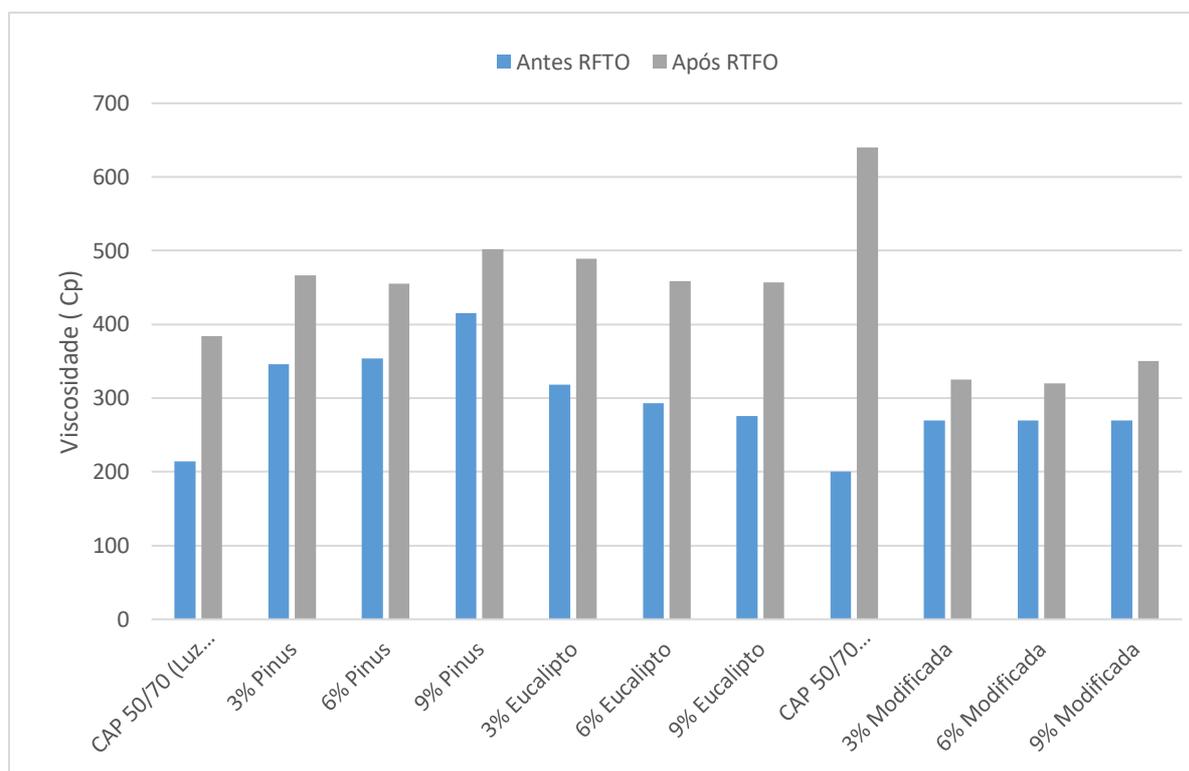
Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos por meio dos ensaios reológicos para os ligantes asfálticos puro e modificados com a lignina, além das respectivas discussões.

4.1 - Viscosidade Rotacional

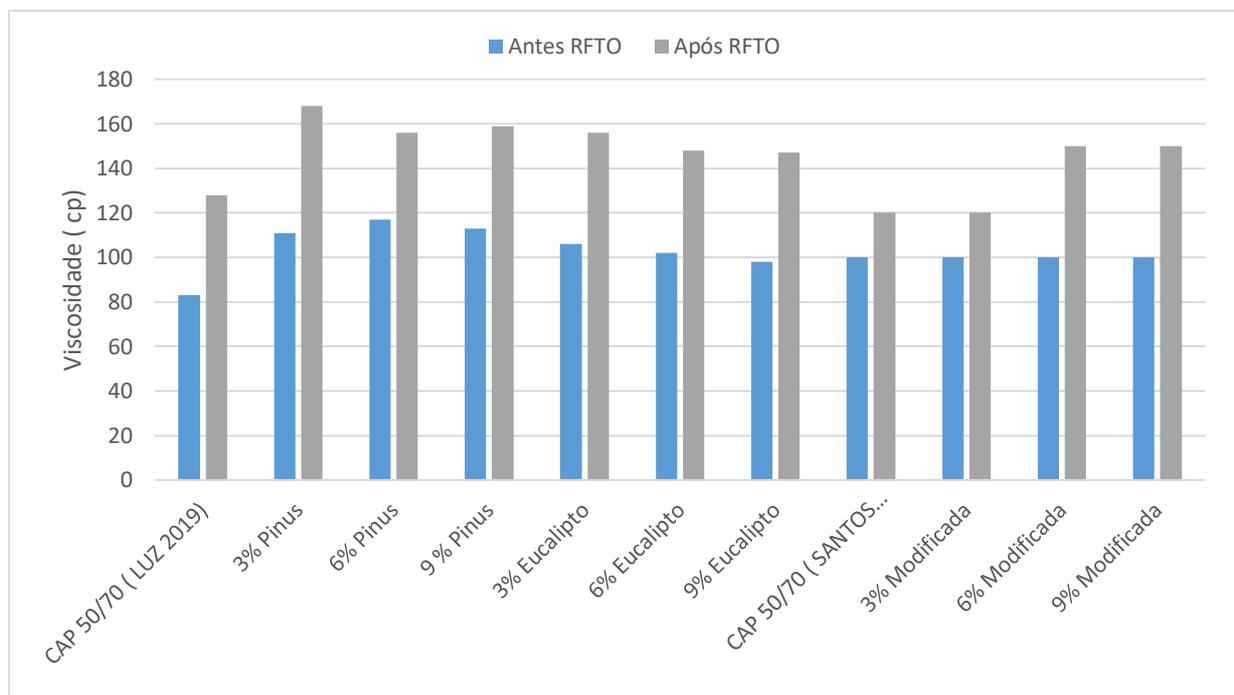
A Figura 12 ilustra o comportamento apresentado pelos ligantes quando submetidos ao ensaio no viscosímetro Brookfield para as temperaturas de 135°C.

Figura 12 – Viscosidade dos ligantes antes e após RTFO – 135°C

A Figura 13 ilustra o comportamento apresentado pelos ligantes quando submetidos ao ensaio no viscosímetro Brookfield para as temperaturas de 150°C , antes e após o RTFO.

Figura 13 – Viscosidade dos ligantes antes e após RTFO – 150°C

A Figura 14 ilustra o comportamento apresentado pelos ligantes quando submetidos ao ensaio no viscosímetro Brookfield para as temperaturas de 177°C , antes e após o RTFO.

Figura 14 – Viscosidade dos ligantes antes e após RTFO – 177°C

Analisando os gráficos para as temperaturas de 135°C , 150 °C e 177°C para Santos (2017), considerando os ligantes na condição não envelhecida, observa-se um aumento da viscosidade com o acréscimo dos teores de lignina em relação ao ligante puro, principalmente nas temperaturas mais baixas do ensaio (150° C < T < 150° C), com um destaque maior para o ligante com 9% de lignina, que percentualmente apresentou aumento significativo em relação aos demais.

Com o aumento da temperatura, as viscosidades dos ligantes modificados por adição de lignina antes do processo de RTFO , convergiram para praticamente o mesmo valor , em torno de 150°C , e em seguida mantiveram-se constantes entre si, mas tendendo a retornar ao valor da viscosidade do ligante puro em 177°C.

Dessa forma , comparando os ligantes antes e após RTFO, observa-se também que o envelhecimento causou o aumento da viscosidade. Analisando os gráficos para essa situação , foi possível observar que para temperatura de 135°C , os valores de viscosidade dos ligantes modificados , convergiram para praticamente o mesmo valor , e em seguida , com o aumento da temperatura , houve um aumento mais significativo da viscosidade

nas ligninas modificadas com percentual de 6% e 9% .Além disso, percebe-se uma mudança maior na viscosidade do ligante puro em relação aos modificados, o que reafirma a resistência ao envelhecimento devido à adição da lignina no ligante.

Nos ensaios de Luz (2019) , na condição antes do processo de envelhecimento, foi possível notar um aumento da viscosidade com o acréscimo dos teores de lignina em relação ao ligante puro. No entanto, ao comparar os dois tipos de lignina percebeu-se que a medida que eleva a quantidade de lignina Pinus a viscosidade aumenta ao contrário do que ocorre com a lignina Eucalipto que com o aumento do teor utilizado os valores de viscosidade diminuíram.

Analisando os ensaios nas temperaturas de de 135°C , 150°C e 177°C , foi possível concluir que o comportamento foi constante em relação a variação da viscosidade de porcentagem para Lignina Pinus e eucalipto , tendo um comportamento de quase inalteração de valores na redução da visocidade para Liginina eucalipto na temperatura de 177°C.

O aumento excessivo da viscosidade pode influenciar na trabalhabilidade do material, segundo Masce *et al.* (2017) valores elevados poderão provocar um revestimento não uniforme do agregado. E Yan *et al.* (2016) também explicam que viscosidades muito elevadas dificultam na trabalhabilidade e bombeamento durante a mistura com os agregados na construção de pavimentos.

Conforme resultados obtidos para a temperatura de 135°C , 150°C e 177°C, as viscosidades continuaram apresentando a mesma tendência, acréscimo nas condições antes e após o envelhecimento quando comparado com o ligante puro.

Comparando os ligantes antes e após o processo de envelhecimento à curto prazo, observou-se que o envelhecimento causou o aumento da viscosidade.

As variações encontradas nos resultados dos dois tipos de lignina podem ser compreendidas pela diferença nas composições química existentes entre as espécies de coníferas (Pinus) e folhosas (Eucalipto). Segundo Silveira e Milagres (2009) a lignina proveniente do Eucalipto apresenta uma quantidade muito superior de grupos carbonilas em relação a lignina Pinus, podendo indicar uma melhor mistura do ligante asfáltico com o material oriundo da espécie Pinus, que também apresenta grupos hidroxila fenólicos na sua composição química que provoca a estabilização de radicais livres responsáveis pelo processo de oxidação (BATISTA, 2017).

Analisando as viscosidades obtidas nas condições de estudo analisadas, percebe-se uma semelhança bastante significativa entre os resultados nas de Santos (2017) e Luz (2019), exceto pela Lignina eucalipto 9% em Luz (2019), que apresentou um comportamento contrário aos demais resultados de ensaio.

4.2 Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas – MSCR

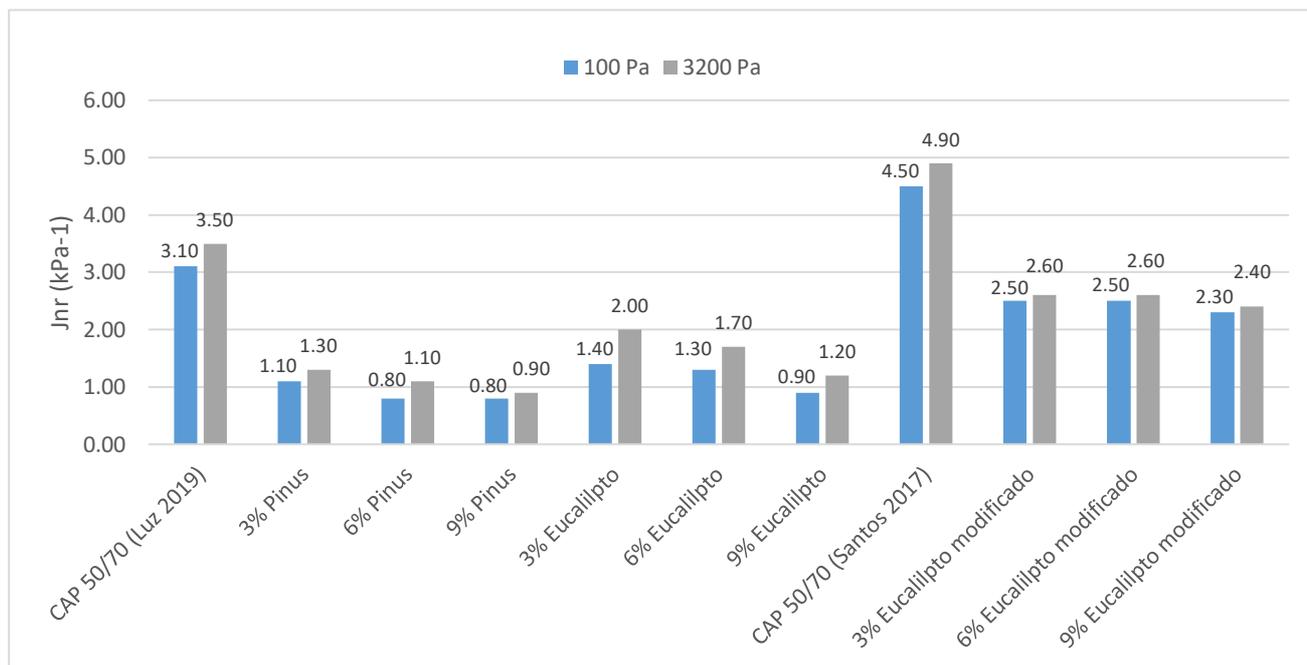
O teste de Fluência e Recuperação sob tensões Múltiplas fornece dois parâmetros mais adequados para indicar a resistência à deformação permanente do material, representados pelo percentual de recuperação (% Rec) e a compliância não-recuperável (Jnr). Com o intuito de comparativo entre resultados iremos analisar apenas a compliância não-recuperável (Jnr). A Tabela 3 apresenta a classificação do tipo de tráfego suportado em relação a compliância não-recuperável.

Tabela 3 - Classificação de volume de tráfego baseado no valor de Jnr a 3200Pa.

Propriedade	Máx.	Tipo de tráfego	Número de passadas de um eixo padrão
Jnr a 3200 Pa	4,0	Padrão (S)	< 10 milhões
	2,0	Pesado (H)	> 10 milhões
	1,0	Muito pesado (V)	> 30 milhões
	0,5	Extremamente pesado (E)	> 100 milhões

Fonte: AASHTO M320 (2016)

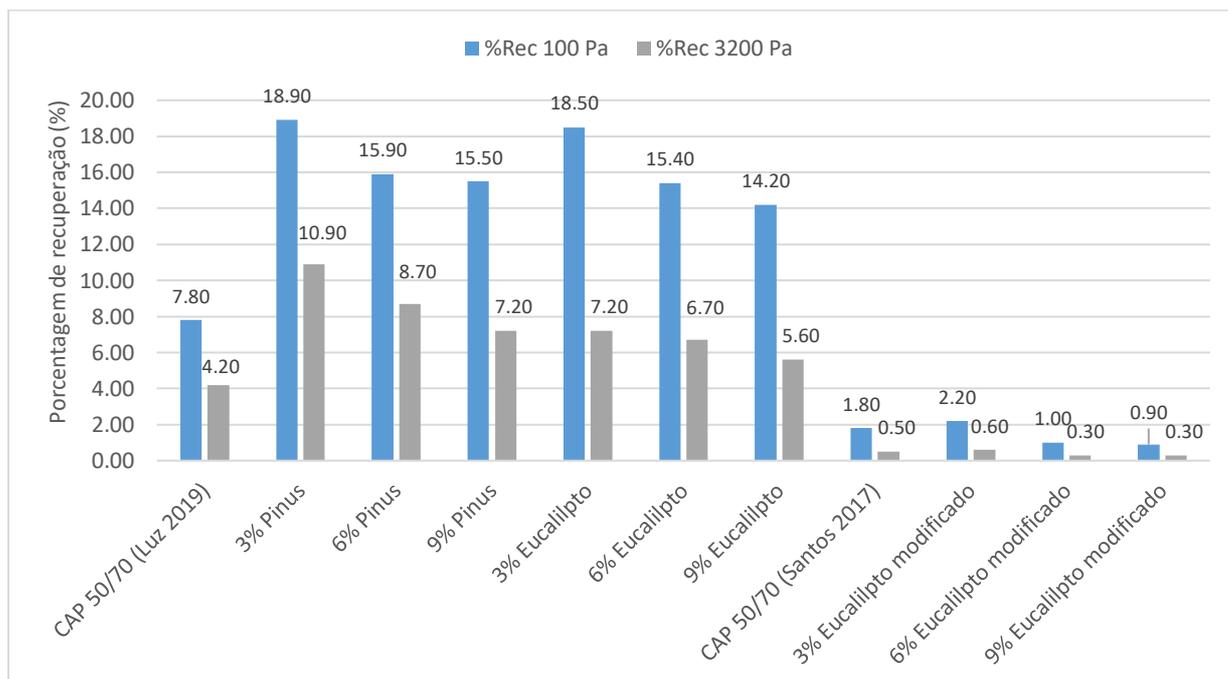
Na Figura 15 são apresentados os resultados entre as compliâncias não-recuperáveis na temperatura que Santos (2017) e Luz (2019) indicaram como sendo 64°C, após testes.

Figura 15 - Compliância não recuperáveis à 100 e 3200 Pa à 64°C

Os resultados da deformação não-recuperável apresentados na figura 15, mostraram um valor muito elevado de deformação para o ligante puro de Santos (2017), ficando inclusive fora da classificação prevista pela AASHTO M320, a qual limita até 4,0 kPa-1 a deformação para o ligante ser enquadrado como ideal para um tráfego padrão com até 10 milhões de passadas de um eixo padrão. Analisando a tabela 3 de classificação, os ligantes modificados por adição de lignina Eucalipto modificado encontram-se entre 2,0 e 4,0 kPa-1, se enquadrando na classificação de tráfego tipo Padrão, apresentando o melhor resultado para o teor de 9%. Já na pesquisa de Luz (2019) verificou-se que todos os teores, com exceção do Pinus 9%, possuíam Jnr entre os limites de 1,0 kPa-1 e 2 kPa-1, desta forma estariam classificados a suportar tráfego pesado (S). Para a amostra Pinus 9% a classificação seria de um tráfego muito pesado (V).

A Figura 16 mostra os valores de porcentagem de recuperação para o teste na temperatura de 64°C.

Figura 16 - Porcentagem de recuperação à 100 e 3200 Pa à temperatura de 64°C



Analisando o percentual de recuperação percebe-se uma diferença bastante significativa entre os resultados das pesquisas alvo do estudo. Para Santos (2017), avaliando o percentual de recuperação percebe-se que os resultados não foram expressivos devido à reduzida recuperação que os ligantes apresentaram tanto a 100 Pa quanto a 3200 Pa. Isso pode ser até de certa forma justificado pela natureza do próprio teste ao considerar a temperatura máxima do PG do ligante, que é a situação mais desfavorável, e a qual eleva o material a uma condição mais difícil de ter o retorno elástico detectado, pela característica fluida que o ligante passa a ter, mas também pela maneira como se comportou os ângulos de fase apresentados, os quais já deram indícios de que o ligante manteve-se sem característica elástica significativa com o acréscimo de lignina ao mesmo. Já para Luz (2019), a incorporação de lignina ao ligante ocasionou um aumento da porcentagem de recuperação, o que significa dizer que, esse polímero natural de alguma forma melhorou as interações existentes no ligante asfáltico aumentando a elasticidade. O teor que atingiu maior recuperação elástica foi o de 3% para a lignina Pinus e Eucalipto.

5. CONCLUSÕES

Com os resultados dos ensaios obtidos e baseado nas análises reológicas realizadas, foi possível validar que a incorporação das ligninas em ligantes asfálticos proporcionaram benefícios como a diminuição da deformação permanente do asfalto, o aumento da vida útil e maiores resistências ao processo de fadiga decorrente das solicitações mecânicas de uso. Além disso, à análise reológica dos ligantes modificados mostraram que a incorporação da lignina aumentou a viscosidade das Ligninas adicionadas ao material ligante nos ensaios realizados.

Diante dos demais resultados da pesquisa, a modificação do CAP 50/70 com a lignina foi benéfica em outros aspectos, pois retardou o envelhecimento e enrijecimento demasiado do material, resultados observados nos ensaios de MSCR, melhorando sua resistência quanto à deformação permanente. De forma geral, a incorporação da lignina indicou-se como uma alternativa viável com relação ao ligante asfáltico 50/70 do ponto de vista reológico, pois atribuiu melhoras significativas nas propriedades reológicas do ligante, se comparada aos índices dos ligantes puro.

Além disso, foi possível observar valores inferiores ao limites citados de tráfego, revelando-se que os ligantes se tornam mais resistentes às solicitações à medida que se acrescentaram teores de lignina mais elevados. Portanto, pode-se inferir que maiores teores de lignina são os mais indicados para reduzir a compliância não recuperável (J_{nr}) do ligante, contanto que os elevados teores destes componentes não levem o ligante a gelificar, pois, sendo assim, a modificação não seria benéfica quanto à sensibilidade diante de mudanças de tensões.

6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Analisar as propriedades mecânicas da mistura asfáltica utilizando um ligante convencional (CAP 50/70) com o teor ótimo de lignina do presente estudo;
- Estudar a associação da lignina com ligante modificado por polímero de característica elástica, como SBS ou Borracha de pneu moído;
- Realizar o ensaio de estabilidade à estocagem;
- Estudar o emprego da lignina como fíler na mistura asfáltica;
- -Realizar uma análise de custo da incorporação desse material no ligante ou diretamente na mistura asfáltica.

7. REFERÊNCIAS

ABLONSKÝ, M.; KOČIŠ, J.; HÁZ, A.; ŠIMA, J. Characterization and comparison by UV spectroscopy of precipitated lignins and commercial lignosulfonates. **Cell. Chem. Technol**, v. 49, n. 3-4, p. 267-274, 2015.

AASHTO M 320: Standard specification for performance-graded Asphalt Binder. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184**: Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional. São Paulo, 2004.

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.

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

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.

DA SILVA, Gutemberg G. da Silva. **Estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas**. 2016. 125f Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Brasil, 2016.

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.

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

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 130/2010. Determinação da recuperação elástica de materiais asfálticos pelo ductilômetro, Rio de Janeiro, 2010.

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.

DOMINGOS, M. D. I.; PAMPLONA, T. F.; FAXINA, A. L.; GIGANTE, A. C. **Viscosidade rotacional de ligantes asfálticos modificados de mesmo grau de desempenho.** Transportes, v. 20, n. 2, p. 15–22, 2012.

DOMINGOS, M. D. I. **Caracterização do Comportamento Fluência-recuperação de Ligantes Asfálticos Modificados Virgens e Envelhecidos.** 2011. 300f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.

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.

FERNANDES, M. R. S. **Efeito de aditivo tipo óleo e enxofre na reologia de asfaltos modificados com SBS**. 2009. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2009

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.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. IBGE mapeia a infraestrutura dos transportes no Brasil. **Divulgação IBGE**, 2014.

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

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.

JORDÃO, M. C. S. **Subprodutos de processos de produção de pasta celulósica. Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. São Paulo: Departamento de Divulgação.

NASCIMENTO, T. C. B. **Efeito dos envelhecimentos termo-oxidativo e foto-oxidativo sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados**. 2015. 274 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade de São Paulo, São Carlos, 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/5070) modificado por adição de lignina.** 2017. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 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.

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.