



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

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO
POR LIGNINA PROVENIENTE DE EUCALIPTO**

Lorayne de Sousa Santos

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

Campina Grande-PB, 28/06/2019

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO
POR LIGNINA PROVENIENTE DE EUCALIPTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB, 28/06/2019

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

LORAYNNE DE SOUSA SANTOS

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

CAMPINA GRANDE – PB

JUNHO / 2019

*À minha avó materna, Luiza, aos meus pais,
Naná e Verinha, e à minha irmã, Lorynne, por serem
minha própria vida, meu lar.*

AGRADECIMENTOS

“Precisamos dar um sentido humano às nossas construções. E, quando o amor ao dinheiro, ao sucesso nos estiver deixando cegos, saibamos fazer pausas para olhar os lírios do campo e as aves do céu.”

(Érico Veríssimo)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de produção de asfalto em um estágio de destilação	12
Figura 2 - Esquema de produção de asfalto por dois estágios de destilação....	13
Figura 3 – Estrutura molecular da lignina	20
Figura 4 – Processo de deslignificação	22
Figura 5 – Perda de massa das amostras	31
Figura 6 – Penetração retida (%)	34
Figura 7 – Variação do ponto de amolecimento	37
Figura 8 – Variação da viscosidade rotacional a 135°C	41
Figura 9 – Variação da viscosidade rotacional a 150°C	41
Figura 10 – Variação da viscosidade rotacional a 177°C	42
Figura 11 – Viscosidade rotacional	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações para cimento asfáltico de petróleo (CAP)	14
Tabela 2 – Especificações para cimento asfáltico de petróleo (CAP)	15
Tabela 3 – Nova especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo (CAP)	16
Tabela 4 – Composição da lignina	23
Tabela 5 – Amostras utilizadas	28
Tabela 6 – Ensaio realizados	28
Tabela 7 – Perda de massa do CAP 50/70	29
Tabela 8 – Perda de massa do 3% Eucalipto	29
Tabela 9 – Perda de massa do 6% Eucalipto	30
Tabela 10 – Perda de massa do 9% Eucalipto	30
Tabela 11 – Perda de Massa	30
Tabela 12 – Penetração do CAP 50/70	32
Tabela 13 – Penetração da amostra 3% Eucalipto	32
Tabela 14 – Penetração da amostra 6% Eucalipto	32
Tabela 15 – Penetração da amostra 9% Eucalipto	33
Tabela 16 – Penetração Retida (%)	33
Tabela 17 – Ponto de Amolecimento do CAP 50/70	35
Tabela 18 – Ponto de Amolecimento do 3% Eucalipto	35
Tabela 19 – Ponto de Amolecimento do 6% Eucalipto	35
Tabela 20 – Penetração da amostra 9% Eucalipto	36
Tabela 21 – Variação do Ponto de Amolecimento	36
Tabela 22 – Índice de Susceptibilidade Térmica (IST)	37
Tabela 23 – Viscosidade Rotacional do CAP 50/70	38
Tabela 24 – Viscosidade Rotacional do 3% Eucalipto	39
Tabela 25 – Viscosidade Rotacional do 6% Eucalipto	39
Tabela 26 – Viscosidade Rotacional do 9% Eucalipto	39
Tabela 27 – Viscosidade Rotacional a 135°C	40
Tabela 28 – Viscosidade Rotacional a 150°C	40
Tabela 29 – Viscosidade Rotacional a 177°C.....	40

Tabela 30 – Temperaturas de Usinagem e Compactação antes do RTFO..... 43

Tabela 31 – Temperaturas de Usinagem e Compactação após o RTFO 43

RESUMO

Para a maioria das aplicações rodoviárias, os asfaltos convencionais têm bom comportamento, satisfazendo plenamente os requisitos necessários para o desempenho adequado das misturas asfálticas sob o tráfego e sob as condições climáticas. No entanto, para condições de volume de veículos comerciais e peso por eixo crescente, ano a ano, em rodovias especiais ou nos aeroportos, em corredores de tráfego pesado canalizado e para condições adversas de clima, com grandes diferenças térmicas entre inverno e verão, tem sido cada vez mais necessário o uso de modificadores das propriedades dos asfaltos. Deste modo, este estudo tem como objetivo principal avaliar as propriedades físicas do ligante asfáltico modificado por adição de lignina proveniente do eucalipto. Foram realizadas as misturas da lignina ao ligante asfáltico nos teores de 3%, 6% e 9% e foram realizados os ensaios de ponto de amolecimento, viscosidade e penetração antes e após envelhecimento. A adição de lignina promoveu melhorias nas propriedades físicas do ligante asfáltico em estudo.

Palavras-chave: ligante asfáltico modificado; lignina do eucalipto; propriedades; pavimentação.

ABSTRACT

For most road applications, conventional asphalts perform well, fully satisfying the requirements for the proper performance of asphalt mixtures under traffic and under climatic conditions. However, for commercial vehicle volume and growing axle weight, year-on-year, on special highways or at airports, on heavy-duty canalized traffic corridors and for adverse weather conditions, with large thermal differences between winter and summer, the use of asphalt property modifiers has become increasingly necessary. Thus, this study has as main objective to evaluate the physical properties of the modified asphaltic binder by addition of lignin from eucalyptus. The mixtures of lignin to the asphalt binder were carried out at 3%, 6% and 9%, and softening point, viscosity and penetration tests were performed before and after aging. It is expected that the addition of lignin promotes the improvement of the physical properties of the asphalt binder under study.

Key words: modified asphalt binder; eucalyptus lignin; properties; paving.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	09
1.1 JUSTIFICATIVA.....	10
1.2 OBJETIVOS.....	Erro! Indicador não definido.1
1.2.1 Objetivo Geral	Erro! Indicador não definido.1
1.2.2 Objetivos Específicos.....	Erro! Indicador não definido.1
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 ASFALTO.....	12
2.2 ASFALTO MODIFICADO POR POLÍMEROS.....	17
2.3 LIGNINA	20
2.4 LIGNINA DE EUCALIPTO COMO MODIFICADOR DE LIGANTE ASFÁLTICO.....	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.1 MATERIAIS.....	24
3.2 MÉTODOS	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	28
4.1 RESULTADOS	28
4.2 DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	44
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	47
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	47
REFERÊNCIAS.....	50

1. INTRODUÇÃO

O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento, promovendo conforto e segurança aos usuários. Esse revestimento de pavimentos flexíveis são compostos por uma mistura basicamente constituída de agregados e ligantes asfálticos. As tensões e deformações induzidas na camada asfáltica pelas cargas do tráfego estão associadas ao trincamento por fadiga dessa camada (MEDINA, 1997). Ao longo do tempo, com o crescente número de veículos em circulação e as mudanças climáticas aliados ao crescimento da população, os revestimentos asfálticos passam a apresentar um desempenho mecânico aquém do esperado, que justificam os diversos problemas de deterioração que os pavimentos tem enfrentado e a necessidade de restauração, impulsionam a busca de materiais e tecnologias capazes de possibilitar a construção de rodovias com melhor qualidade.

A escassez gradual do petróleo, juntamente com impacto ambiental causado para sua obtenção, tem estimulado a procura do uso de novas tecnologias sustentáveis, tentando, basicamente, garantir uma vida com qualidade para as atuais e futuras gerações, juntamente com o desenvolvimento da nação. Sendo assim, o estudo e o desenvolvimento de materiais para pavimentação tem crescido bastante, o uso de modificadores das propriedades dos asfaltos tem sido cada vez mais necessário, entre eles, podemos citar os asfaltos naturais, gilsonita ou asfaltita, mas especialmente polímeros de vários tipos que melhoram o desempenho do ligante (BERNUCCI et al.,2006).

Alternativas baseadas em recursos renováveis e ainda reaproveitados de processos industriais vem ganhado espaço, como a lignina, que é um polímero natural e que já demonstrou grande potencial em algumas pesquisas a partir de sua associação com o ligante asfáltico, principalmente por apresentar propriedades antioxidantes (SANTOS, 2017).

A lignina proveniente do eucalipto é um constituinte prejudicial para a produção de celulose por meio de processos químicos, por isso, procura-se removê-la, o máximo possível, sem causar danos consideráveis às fibras durante as operações de cozimento e branqueamento na fabricação do papel (EMBRAPA, 2000). O principal aproveitamento dessa lignina é a queima em caldeiras para a produção de energia renovável pela indústria papeleira, porém, por ainda restar um excedente, esse material é descartado, o que vem despertando o interesse de um emprego mais nobre para a lignina e mais rentável para os produtores de papel. "O desafio é justamente extrair a lignina e encontrar aplicações que possam agregar mais valor do que a queima e a produção de energia", diz Fábio Figliolino, gerente-executivo de pesquisa, desenvolvimento e inovação da Suzano Papel e Celulose, situada em Limeira - SP.

Considerando os altos custos relacionados à aquisição de materiais novos para serem usados na construção de pavimentos, a lignina excedente das fábricas de papel é uma alternativa sustentável de proporcionar o estudo do seu comportamento quando adicionada ao ligante asfáltico, com a intenção de modificá-lo e melhorar suas propriedades físicas, caracterizando-as, além de reduzir o dano que se causa à natureza com o seu descarte.

1.1 JUSTIFICATIVA

As rodovias constituem um dos principais sistemas de transporte utilizados para o deslocamento de pessoas e bens. Entretanto, nas últimas décadas, o aumento do volume de tráfego, das cargas transportadas por eixo e da pressão dos pneus, tem ocasionado a degradação prematura dos revestimentos asfálticos.

A pavimentação asfáltica brasileira, assim como de outros países, necessita constantemente de avaliação e renovação devido à deterioração dos pavimentos, notadamente dos pavimentos asfálticos. As patologias existentes são originárias do mau uso da via devido a grandes solicitações para as quais o pavimento não foi projetado, de deficiências na execução do processo

construtivo, do emprego de materiais com propriedades insuficientes para atender à necessidade, e ainda das condições climáticas atuantes.

Assim, a modificação do ligante asfáltico com a lignina visa aumentar a resistência às deformações permanentes, trincas ocasionadas por fadiga ou por variações térmicas, além de, conseqüentemente, melhorar as condições de segurança e conforto das rodovias e reduzir custos com manutenções.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este projeto tem como objetivo principal estudar as propriedades físicas do ligante asfáltico CAP 50/70 modificado por adição de lignina proveniente de eucalipto.

1.2.2 Objetivos Específicos

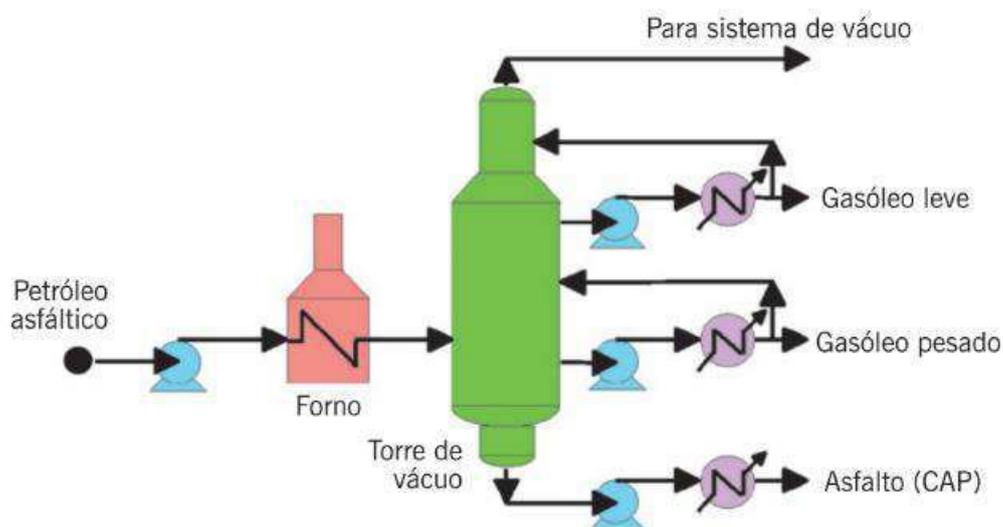
- Caracterizar fisicamente o ligante asfáltico CAP 50/70 modificado por adição de lignina do eucalipto nos teores de 3%, 6% e 9% antes e após envelhecimento a curto prazo;
- Comparar as propriedades físicas obtidas para o CAP 50/70 modificado por adição de lignina proveniente de eucalipto às propriedades apresentadas pelo CAP 55/75 SBS.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ASFALTO

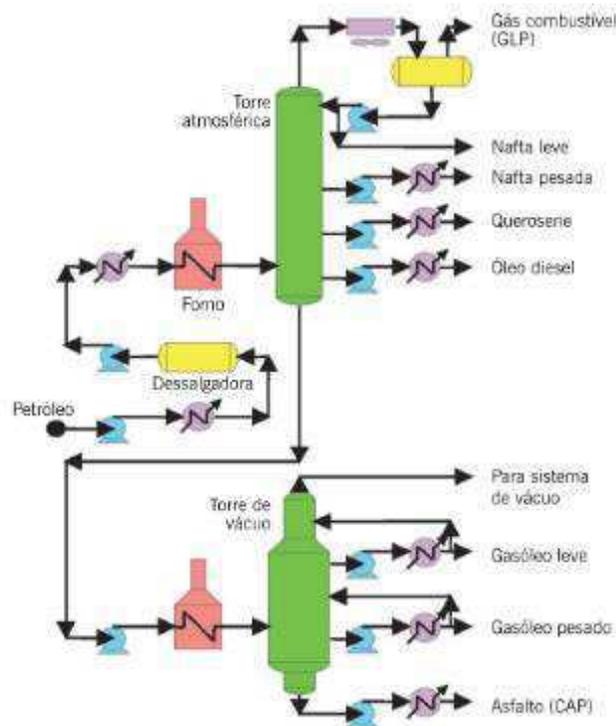
“O asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo” (BERNUCCI et al., 2006). Veja os esquemas de produção de asfalto nas figuras 1 e 2 a seguir.

Figura 1 – Esquema de produção de asfalto em um estágio de destilação



Fonte: (BERNUCCI et al., 2006)

Figura 2 – Esquema de produção de asfalto por dois estágios de destilação



Fonte: (BERNUCCI et al., 2006)

Por ser impermeabilizante, resiste à maioria dos ácidos, álcalis e sais; além de proporcionar união entre os agregados, agindo como um ligante que permite certa flexibilidade. Isto faz com que o asfalto seja um dos mais antigos materiais de construção utilizados pelo ser humano. Já o vocábulo *termoviscoplastico* indica que esse produto é afetado por variações de temperatura, que fazem com que sua viscosidade seja alterada, podendo ocasionar deformações plásticas. E, apesar da baixa reatividade, ele pode sofrer envelhecimento por oxidação lenta quando em contato com a água e o ar.

Ainda segundo Bernucci et al., 2006, no Brasil o asfalto é denominado CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) quando este se apresenta semissólido a baixas temperaturas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas. Ou seja, a característica de termoviscoelasticidade aproxima-se do desempenho real do material, sendo então considerada como modificadora mais comum do seu comportamento mecânico, sendo suscetível à temperatura de serviço, à velocidade, ao tempo e à intensidade de carregamento.

O CAP é composto por cerca de 95% de hidrocarbonetos e 5% de heteroátomos, a exemplo do oxigênio, do enxofre, do nitrogênio e dos metais, como o níquel e o ferro, unidos por ligações covalentes. Por isso, é quase totalmente solúvel em benzeno, tricloroetileno e bissulfeto.

Segundo Bernucci et al. (2006):

A penúltima especificação brasileira de CAP, vigente de 1922 até julho de 2005, separava em duas famílias de ligantes, os especificados por penetração e os especificados pela viscosidade absoluta, considerando requisitos para esses parâmetros e para outros ensaios físicos [...]. Por viscosidade os asfaltos brasileiros eram subdivididos em três grupos: CAP 7, CAP 20 e CAP 40, sendo esses números associados ao início da faixa de viscosidade de cada classe. Por penetração, havia quatro classes de asfalto: CAP 30-45, CAP 50-60, CAP 85-100 e CAP 150-200, sendo esses números associados à faixa de penetração obtida no ensaio.

As tabelas 1 e 2 trazem as especificações para CAP vigente até 2005, considerando a classificação por penetração e por viscosidade, respectivamente. Já a tabela 3 traz a nova especificação brasileira de CAP.

Tabela 1 – Especificações para cimento asfáltico de petróleo (CAP)

Classificação por penetração (Portaria DNC 5 de 18/2/1993) vigente até julho de 2005

Características	Unidade	Valores			
		CAP 30-45	CAP 50-60	CAP 85-100	CAP 150-200
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 60	85 a 100	150 a 200
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100
Índice de Suscetibilidade Térmica		(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	220

Solubilidade em tricloroetileno, mín.	%massa	99,5	99,5	99,5	99,5
Viscosidade Saybolt-Furol, 135°C, mín.	s	110	110	85	70
Efeito do calor e do ar, 163°C por 5h					
Penetração, mín.	%	50	50	47	40
Varição em massa, máx.	%	1,0	1,0	1,0	1,0

Fonte: (BERNUCCI et al., 2006)

Tabela 2 – Especificações para cimento asfáltico de petróleo (CAP)
Classificação por viscosidade (Portaria DNC 5 de 18/2/93) vigente até julho de 2005

Características	Unidade	Valores			
		CAP-7	CAP-20	CAP-40	
Viscosidade a 60°C	P	700 a 1500	2000 a 3500	4000 a 8000	
Viscosidade Saybolt-Furol, 135°C, mín.	s	100	120	170	
Viscosidade Saybolt-Furol, 177°C	s	15 a 60	30 a 150	40 a 150	
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	50	20	10	
Índice de Suscetibilidade Térmica		(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)	(-1,5) a (+1)	
Penetração (100g, 5s, 25°C), mín.	0,1mm	90	50	30	
Ponto de fulgor, mín.	°C	220	235	235	
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	%massa	99,5	99,5	99,5	
Densidade (20/4°C), mín.		0,9990	0,9990	0,9990	
Efeito do calor e do ar, 163°C por 5h					
Razão de viscosidade, máx.		4,0	4,0	4,0	
Varição em massa, máx.	%	1,0	1,0	1,0	

Fonte: (BERNUCCI et al., 2006)

Tabela 3 – Nova especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo (CAP)
(ANP, 2005)

Características	Unidade	Limites				Métodos	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150- 200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol							
a 135°C, mín.		192	141	110	80		
a 150°C, mín.	s	90	50	43	36	NBR	E
a 177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	16 a 60	14950	102
Viscosidade Brookfield							
a 135°C, mín. SP 21, 20rpm, mín.		374	274	214	155		
a 150°C, mín.	cP	203	112	97	81	NBR	D
a 177°C, SP 21		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114	15184	4402
Índice de Suscetibilidade Térmica		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	—	—
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	%massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113

Efeito do calor e do ar a 163C por 85 minutos

Varição em massa, máx.	%massa	0,5	0,5	0,5	0,5		D 2872
Dutilidade a 25°C, mín.	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín. (*)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

Fonte: (BERNUCCI et al., 2006)

Os petróleos ou óleos crus diferem em suas propriedades físicas e químicas, distinguindo-se ou pela maior ou pela menor presença de asfalto em sua composição. Mediante exposto por Bernucci et al. (2006):

A composição química do CAP tem influência no desempenho físico e mecânico das misturas asfálticas, mas sua maior influência será nos processos de incorporação de agentes modificadores tais como os polímeros, [...].

2.2 ASFALTO MODIFICADO POR POLÍMERO

O uso de polímeros como modificadores do asfalto tem por objeto melhorar o desempenho do ligante em rodovias especiais que apresentam condições de volume de veículos comerciais e peso por eixo crescente, corredores de tráfego pesado, além das que estão situadas em regiões que ostentam climas adversos. Entretanto, Bernucci et al. (2006) diz:

Para a maioria das aplicações rodoviárias, os asfaltos convencionais têm bom comportamento, satisfazendo plenamente os requisitos necessários para o desempenho adequado das misturas asfálticas sob o tráfego e sob as condições climáticas.

Diante disso, deve-se compreender o conceito de polímero. Mano (1991) mostra que um polímero é uma macromolécula (molécula gigantesca) sintética constituída de unidades estruturais repetidas (monômeros) em sua longa cadeia. Expõe também que polímeros, compostos por apenas um monômero, são denominados homopolímeros e que, quando compostos por dois ou mais, são chamados copolímeros.

O comportamento do polímero sintético resulta de três fatores: material de partida (monômero), tipo de reação empregado para a sua obtenção e técnica de preparação. Segundo exposto por Bernucci et al. (2006):

Os tipos de reação empregados são:

- poliadição, por exemplo, SBR (borracha estireno-butadieno) e EVA (etileno-acetato de vinila);
- policondensação, por exemplo, ER e PET;
- modificação química de outro polímero, por exemplo, SBS (estireno-butadieno-estireno).

Mano (1985) e Leite (1999) apud Bernucci (2006) classificam os polímeros quanto ao seu proceder frente às variações de temperatura em categorias, que são:

- termorrígidos: são aqueles que não se funde, sofrem degradação numa temperatura limite e endurecem irreversivelmente quando aquecidos uma temperatura que depende de sua estrutura química. [...]. Por exemplo: resina epóxi, poliéster, poliuretano;
- termoplásticos: são aqueles que se fundem e tornam-se maleáveis reversivelmente quando aquecidos. Normalmente consistem de cadeias lineares, mas podem ser também ramificadas. São incorporadas aos asfaltos a alta temperatura. Por exemplo: polietileno, polipropileno, PVC;
- elastômeros: são aqueles que, quando aquecidos, se decompõem antes de amolecer, com propriedades elásticas. Por exemplo: SBR;

- elastômeros termoplásticos: são aqueles que, a baixa temperatura, apresentam comportamento elástico, porém quando a temperatura aumenta passam a apresentar comportamento termoplástico. Por exemplo: SBS e EVA.

Dentre a grande variedade de modificadores, deve-se conhecer as características destes e as propriedades das misturas asfálticas que se deseja melhorar para poder selecionar a alternativa mais apropriada de benfeitoria. Ou seja, a quantidade de polímero que deve ser adicionada ao ligante depende das propriedades finais almejadas.

“Nem todos os polímeros são passíveis de serem adicionados ao CAP [...]. Os asfaltos que melhor se compatibilizam com polímeros são aqueles que apresentam uma certa aromaticidade” (BERNUCCI et al., 2006).

O melhoramento do ligante e o seu custo variam de acordo com a precisão do local em que será aplicado, sendo considerada a variação térmica, as cargas mecânicas que solicitam o trecho, o potencial para deformação permanente e fadiga, e o fato de ou a obra ser nova ou ser apenas um reforço, já que, atualmente, a maior parte dos trabalhos de pavimentação refere-se à manutenção e ao reforço de rodovias existentes. Segundo Bernucci et al. (2006):

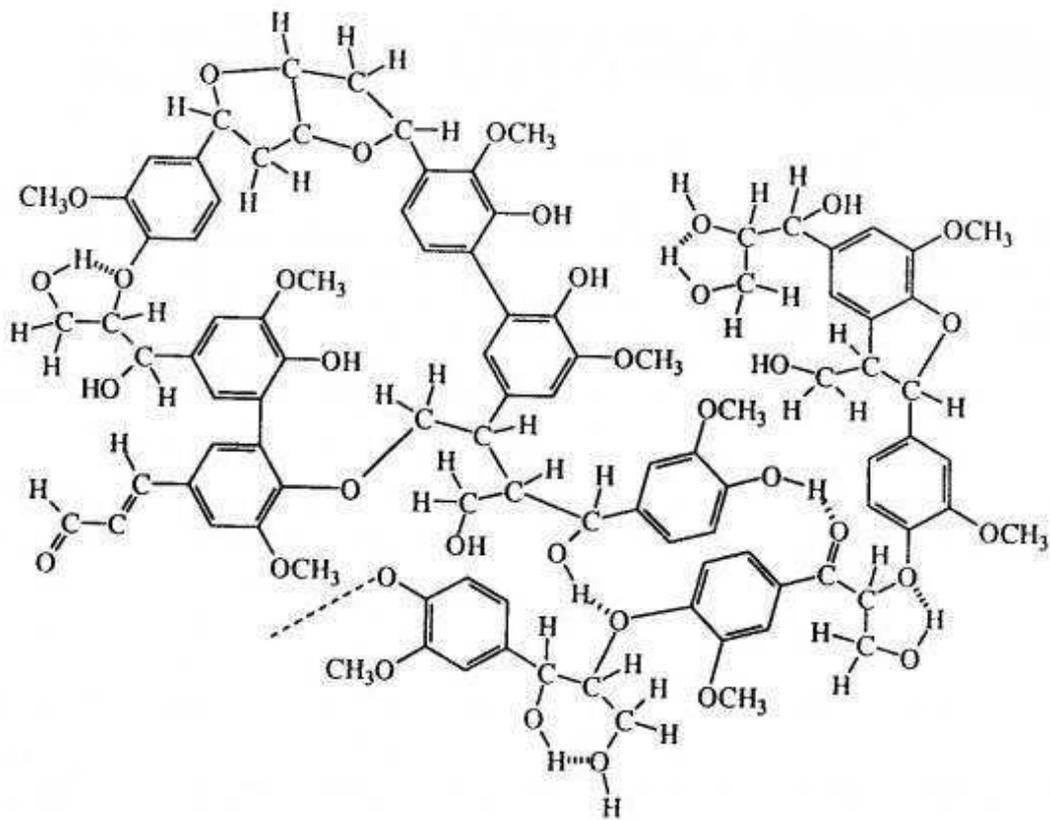
O uso de asfaltos modificados por polímeros pode reduzir a frequência das manutenções e aumentar a vida de serviço de pavimentos de locais de difícil acesso ou de custo muito elevado de interrupção do tráfego para reparos. Locais de tráfego canalizado também podem se beneficiar com o uso de asfaltos modificados. [...] . As deformações resultantes das cargas aplicadas, ou seja, as respostas da mistura asfáltica aos pulsos de carga gerados pelo tráfego em movimento podem ser bastante modificadas pela presença de polímeros no ligante, aumentando ou diminuindo as parcelas de viscosidade e elasticidade do conjunto, para várias faixas de temperatura.

A primeira aplicação de ligantes modificados por polímeros no Brasil ocorreu em 1974 em um trecho de 275 metros na BR-116, Rio – São Paulo, em que se utilizou o CAP modificado com resina epóxi. Desde então os polímeros vêm sendo usados no ramo da pavimentação, sendo termoplásticos os mais usuais na modificação de CAP, como os copolímeros em bloco de estireno-butadieno (SB), estireno-butadieno-estireno (SBS), estireno-isopreno-estireno (SIS), estireno-etileno-butadieno-estireno (SEBS), acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS) e acetato de vinila (EVA).

2.3 LIGNINA

A palavra lignina, conhecida também como lenhina, é oriunda do latim *lignum* e significa madeira. A lignina está presente na parede celular das plantas terrestres em associação com a celulose e é uma molécula tridimensional amorfa, como mostra a figura 3, que confere rigidez, impermeabilidade e resistência contra os ataques biológicos aos tecidos vegetais.

Figura 3 – Estrutura molecular da lignina



Fonte: (MELDAU, 2006)

A lignina é um dos polímeros naturais mais abundantes no meio ambiente e é obtida através de um processo chamado deslignificação da madeira que gera um licor residual, o licor negro, composto por ela e pela hemicelulose. O processo tradicional de deslignificação ocorre através do cozimento de cavacos de madeira em que, à medida em que a temperatura é elevada, acontece a dissolução destes, através de agentes químicos que penetram na madeira por difusão, e a lignina vai se tornando cada vez menos solúvel, podendo ser removida. Segundo Barrichello e Foelkel (1975):

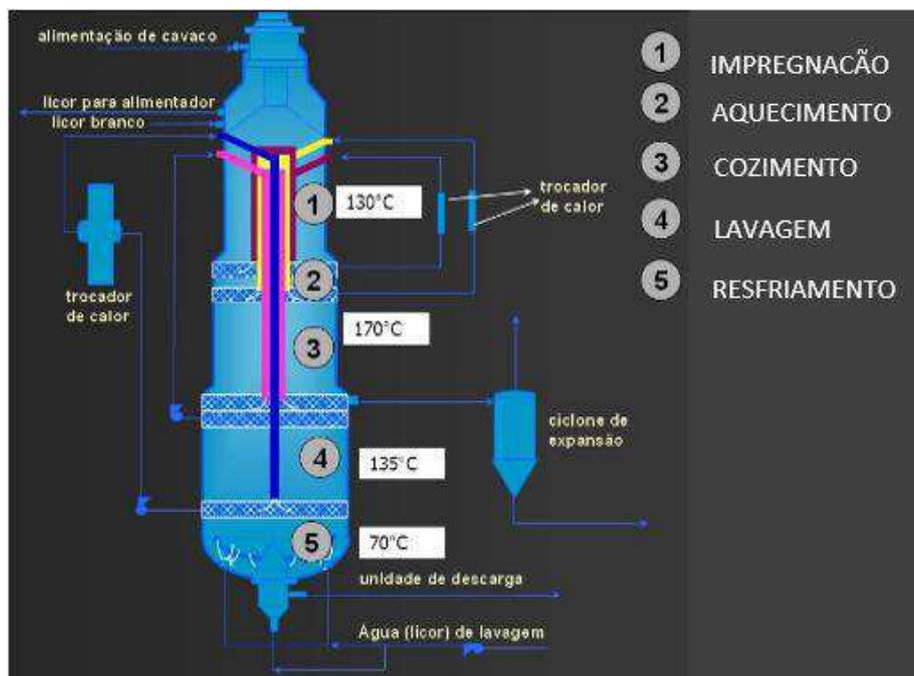
O processo industrial consiste basicamente em:

- a) pré-vaporização dos cavacos
- b) penetração forçada do licor nos cavacos, com a remoção a seguir do excesso
- c) rápido aquecimento dos cavacos impregnados até a temperatura de reação

d) manutenção desta temperatura por um pequeno período de tempo

A figura 4 ilustra como o processo de deslignificação ocorre em um digestor.

Figura 4 – Processo de deslignificação



Fonte: (GOOGLE IMAGES)

A lenhina é formada pela polimerização dos álcoois cumarílico, coniferílico e sinapílico, cuja proporção destes três compostos resulta em diferentes tipos de lignina. A da madeira de coníferas é formada pelos monômeros derivados dos álcoois coniferílico (guaiacila) e cumarílico (hidroxifenila), enquanto na madeira de folhosas é formada pelos monômeros derivados dos álcoois sinapílico (siringila) e coniferílico (guaiacila), já a lignina das gramíneas é composta pelos monômeros derivados dos três tipos de álcoois precursores.

Apesar de ser uma macromolécula de alta complexidade estrutural, haja visto que suas unidades monoméricas não se repetem de modo regular e são trançadas por vários tipos de ligações químicas, apresenta

fundamental importância para a madeira, pois é responsável pelo transporte de água e nutrientes, e pela resistência mecânica que confere rigidez à parede celular. Mesmo com estes atributos, “no entanto, é um componente indesejável na fabricação de papel, devido à característica amarelada que este material e seus derivados causam” (FERNANDES, 2005 apud SANTOS, 2017).

Segundo exposto por Lima et al.(1988), nas indústrias de papel e celulose, as madeiras mais usadas como matéria-prima são as das espécies de pinus (coníferas) e as da espécie de eucalipto (folhosas). “[...], sua estrutura pode variar dependendo da planta de origem, da sua localização no vegetal, idade da planta, condições ambientais, entre outros fatores” (BELGAGEM et al., 2003; HERNÁNDEZ, 2007). Ou seja, a composição da lignina, constituída principalmente de carbono, hidrogênio e oxigênio, costuma variar de acordo com a espécie da flora. Veja a tabela 4 a seguir.

Tabela 4 – Composição 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)

2.4 LIGNINA DE EUCALIPTO COMO MODIFICADOR DE LIGANTE ASFÁLTICO

Através de D’Almeida (1988), sabe-se que os principais grupos funcionais presentes nas ligninas são os metoxilas, hidroxilas, carbonilas, carboxílicos, éteres, ésteres e duplas ligações que também interferem em suas propriedades, fazendo com que sejam necessários procedimentos específicos para incorporá-la aos materiais.

A modificação de ligantes asfálticos com lignina de eucalipto busca melhorar o comportamento mecânico e, conseqüentemente, o desempenho

dos pavimentos, superando algumas desvantagens do ligante puro. Por isso, a fim de perceber a viabilidade do presente estudo, busca-se evidenciar a caracterização física do ligante modificado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para a realização desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

- *Ligante convencional*: CAP 50/70 obtido da distribuidora Stratura Asfaltos S/A (antiga Ipiranga Asfaltos S/A);
- *Ligante modificado*: CAP 55/75 SBS, fornecido pela Empresa JBR, localizada no estado de Pernambuco;
- *Lignina*: extraída do eucalipto, foi cedida pelo Laboratório de Química Inorgânica da Universidade Federal de Viçosa.

3.2 MÉTODOS

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

- *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 RTFO 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.

Tabela 5 – Nomenclatura das amostras

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

➤ *Caracterização física do ligante asfáltico de petróleo:*

- *Penetração:*

O ensaio de penetração determina a consistência do ligante asfáltico através da medida da profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100 g) penetra verticalmente numa amostra de ligante, por 5 segundos, à temperatura de 25°C. O procedimento é regido pela norma DNIT-ME 155/2010.

Inicialmente a amostra foi levada à estufa para aquecimento, até obter uma consistência fluida; foi colocada em um recipiente cilíndrico, metálico e de base plana, cujos diâmetro e altura interna são respectivamente 55 e 35 mm, adequados às amostras com penetração até 200 décimos de milímetro; foi resfriada à temperatura ambiente e, em seguida, colocado em banho d'água.

Foram realizadas 5 determinações para cada amostra, a partir das quais obteve-se uma média que representa a penetração propriamente dita. A partir das médias de penetrações obtidas antes e após o envelhecimento a curto prazo, foi possível determinar também a Penetração Retida do ligante, visando verificar a sensibilidade do material ao envelhecimento à curto prazo.

- *Ponto de Amolecimento:*

O ponto de amolecimento é a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido e atinge a placa inferior da aparelhagem. Este ensaio, também conhecido por Anel e Bola, é regido pela norma DNIT-ME 131/2010.

Como são utilizadas duas bolas no procedimento, as quais são envolvidas pelo asfalto a partir do momento em que este amolece e começa a escoar, resulta na medida de duas temperaturas que não podem ser discrepantes entre si em mais de 1° C.

O ponto de amolecimento foi então a média das temperaturas lidas no termômetro assim que as bolas atingiram a placa de referência do ensaio.

Com os resultados de penetração e ponto de amolecimento, será possível obter o Índice de Susceptibilidade Térmica, que indica a sensibilidade da consistência dos ligantes à variação de temperatura (BERNUCCI et al, 2008).

- *Recuperação elástica:*

Recuperação elástica é o ensaio que determina a medida de capacidade de retorno do material asfáltico, após a interrupção da tração mecânica especificada. Três amostras de CAP devem ser despejadas em moldes apropriados e deixar esfriar a temperatura ambiente por 30 minutos, após esse tempo, deve-se submeter o conjunto ao banho d'água por mais 30 minutos. Deve-se então desformar parte do molde e inseri-lo novamente na água por 85 minutos. Após estes processos deve-se encaixar os orifícios do molde em cada extremidade e acionar o ductilômetro, até que o corpo de prova se alongue $(20,0 \pm 0,5)$ cm. Para-se a tração, desligando o equipamento. Imediatamente após, o material asfáltico distendido deve ser cortado no centro, com auxílio da tesoura. Deixar o material no ductilômetro em repouso por 60 min, mantendo a temperatura constante. Em seguida, acionar o ductilômetro em sentido contrário, até que as duas extremidades do corpo-de-prova encostem uma na outra, quando, então, é feita a leitura na escala do equipamento, em centímetros. Salvo indicação em contrário, o ensaio deve ser realizado a $(25,0 \pm 0,5)^{\circ}\text{C}$, com alongamento de 20 cm e velocidade de $(5,00 \pm 0,25)$ cm /min.

- *Viscosidade Rotacional:*

Uma medida importante na caracterização dos CAPs puros e modificados é a viscosidade, pois contém informações sobre processamento, mistura e lançamento do CAP, incluindo utilização nos serviços de pavimentação. O ensaio foi realizado em viscosímetro da marca Brookfield, modelo DVII+ com controlador de temperatura THERMOSEL. O ensaio tem como finalidade determinar as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos convencionais e modificados durante o manuseio e a usinagem da mistura asfáltica a altas temperaturas.

O ensaio foi realizado segundo a norma NBR 15184/2007 considerando as temperaturas de 135, 150 e 177°C e velocidades de 20, 50 e 100 rpm, respectivamente.

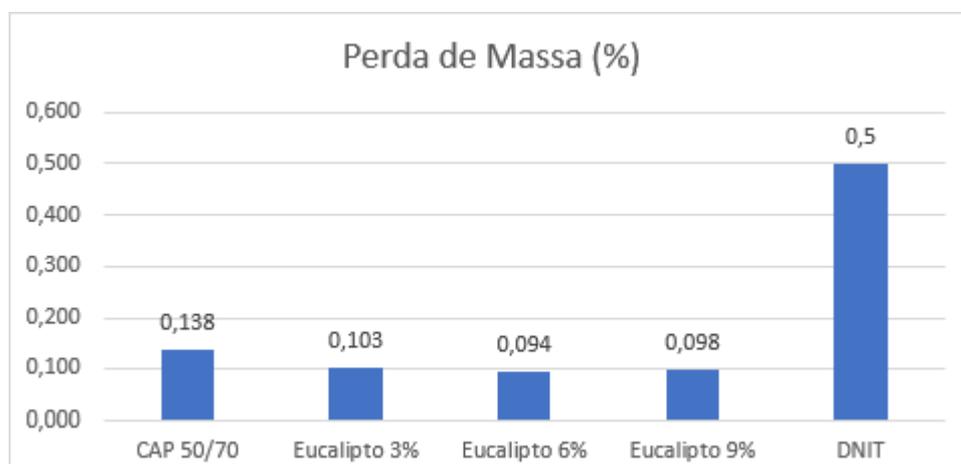
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

- *Envelhecimento a Curto Prazo – Perda de Massa:*

O envelhecimento a curto prazo (RTFO) simula o processo de oxidação do ligante provocado pela usinagem, aplicação e compactação da mistura asfáltica. Como resultado, o procedimento nos fornece a variação de perda de massa das amostras. Este é pré-requisito para os demais ensaios que buscam prever o comportamento dos materiais sob a condição de envelhecimento, daí a sua prioridade.

A perda de massa de cada ligante (puro, 3% de eucalipto, 6% de eucalipto e 9% de eucalipto) foi encontrada a partir de quatro amostras de cada um deles. A Figura 5 apresenta os resultados obtidos.

Figura 5 – Perda de massa das amostras



As perdas de massa para as amostras de ligantes modificados com lignina de eucalipto foram menores comparadas à perda do ligante puro, podendo-se observar uma tendência inversamente proporcional, ou seja, quanto maior o teor de lignina menor a perda de massa. Com isto, pode-se

afirmar que a adição da lignina proporciona uma menor susceptibilidade ao envelhecimento.

Apesar de a variação não ter sido tão ampla, a adição dos teores de lignina resultou numa possível manutenção das propriedades do ligante sujeito à oxidação e à temperatura elevada.

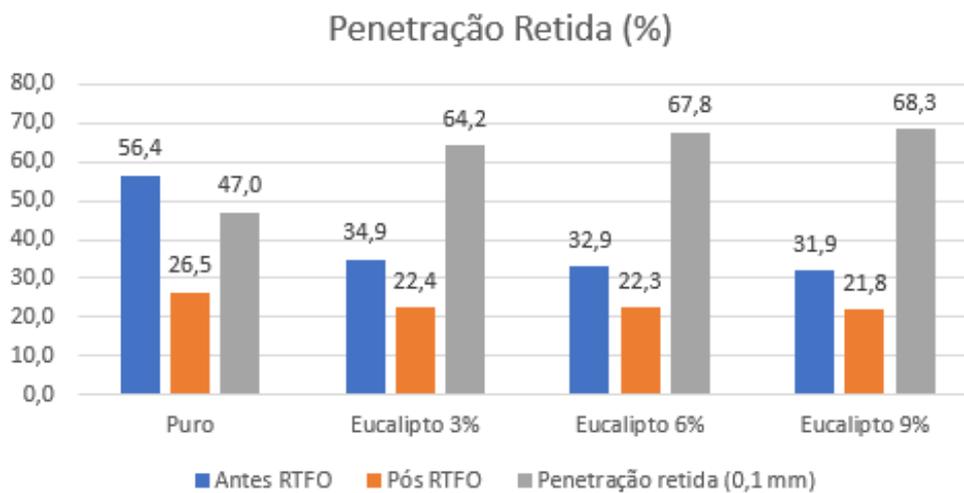
Cravo apud Santos, Rodrigues e Mendonça (2018) diz que o envelhecimento pode ser prejudicial ou benéfico desde que o enrijecimento causado tenha um certo limite, pois quando excessivo, pode levar a trincas térmicas e trincas por fadiga. Quando na medida certa, pode ser útil na resistência à deformação permanente, o que ocorreu com todos os ligantes, já que eles respeitaram o limite máximo imposto pela resolução ANP nº 19/2005 de que a perda de massa de ligantes é de 0,5%.

- *Penetração:*

O ensaio de penetração determina a consistência do ligante à temperatura de 25°C e a penetração está diretamente relacionada à rigidez do pavimento.

No ensaio de penetração foram executadas seis leituras para cada amostra antes e após RTFO e para cada ligante (puro, 3% de eucalipto, 6% de eucalipto e 9% de eucalipto) foram usadas duas amostras. A Figura 6 ilustra os resultados de penetração obtidos.

Figura 6 – Penetração retida (%)



Comparando os resultados antes e após o envelhecimento a curto prazo, obteve-se a penetração retida, que significa o quanto a penetração após o envelhecimento representa da penetração na condição normal. Esse dado é de suma importância para verificar a sensibilidade do ligante ao envelhecimento e para isso a resolução ANP nº 19/2005 define o mínimo de 55% para esse parâmetro. Assim, maiores valores para a porcentagem de penetração retida (PPR) indicam menor sensibilidade ao envelhecimento e vice-versa.

Botaro *et al.* apud Santos, Rodrigues e Mendonça (2018) explica que a incorporação de um grande número de anéis aromáticos presentes na estrutura da lignina, contribui para aumentar a rigidez do ligante. O autor estudou a adição de 1% a 6% de lignina extraída do bagaço da cana-de-açúcar pelo processo organossolv etanol/água na obtenção de blendas de CAP20 e os resultados mostraram uma tendência de diminuição da penetração em função do aumento da concentração da lignina.

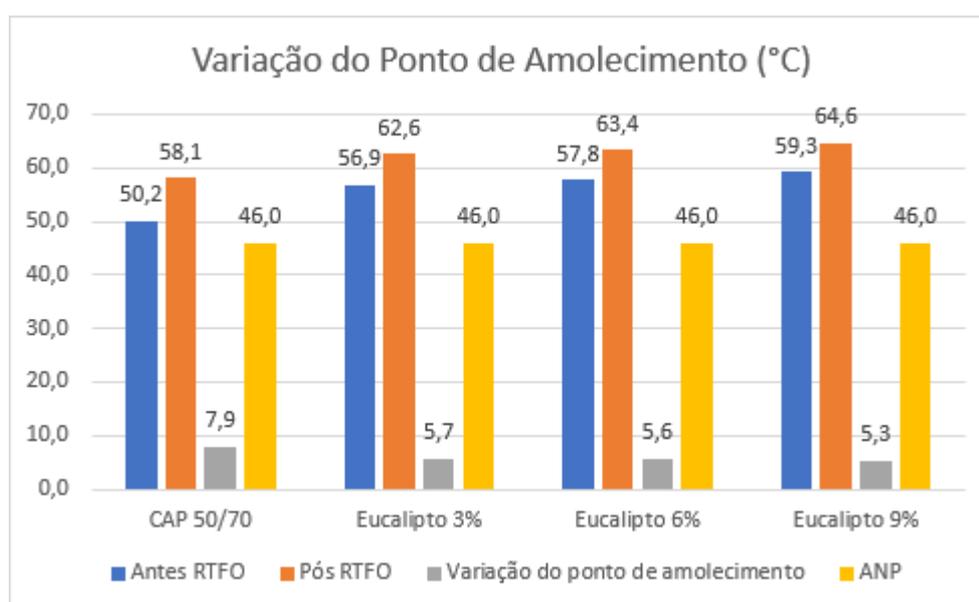
Os resultados dos ligantes modificados por adição de lignina superaram o CAP 50/70, seguindo a tendência de que quanto maior o teor de lignina maior a porcentagem de penetração retida (PPR), o que tornou o ligante mais resistente ao envelhecimento e mostrou positivamente que a variação da rigidez foi menor para estes casos.

- *Ponto de Amolecimento:*

No ensaio de ponto de amolecimento foram executadas três leituras para cada amostra antes e após RTFO e para cada ligante (puro, 3% de eucalipto, 6% de eucalipto e 9% de eucalipto) foram usadas duas amostras.

A Figura 7 exibe a média correspondente ao ponto de amolecimento de cada amostra antes e após RTFO, como também a variação do ponto de amolecimento, que é dado pela diferença entre o valor encontrado após e antes do RTFO. Além de mostrar que o ponto de amolecimento de todas as amostras respeitou o limite mínimo estabelecido pela ANP.

Figura 7 – Variação do ponto de amolecimento



Verificou-se que houve o aumento do ponto de amolecimento do ligante com o acréscimo de lignina. Isto é vantajoso, pois quanto maior o ponto de amolecimento, menor a ocorrência de deformações e menos sensível à temperatura o ligante se torna, mantendo suas propriedades até temperaturas mais elevadas, fato que pode ser observado com o notável acréscimo em 8,5°C no ligante com 9% de lignina comparado ao ligante puro (após RTFO).

A menor variação dos pontos de amolecimentos observada nos ligantes modificados por adição de lignina em relação ao ligante puro reflete a influência da mesma na resistência ao envelhecimento.

- *Viscosidade:*

O ensaio de viscosidade rotacional foi executado três vezes para cada amostra antes e após RTFO, às temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C, e para cada ligante (puro, 3% de eucalipto, 6% de eucalipto e 9% de eucalipto) foram usadas duas amostras.

As Figuras 8, 9 e 10 apresentam a variação da viscosidade rotacional das amostras a 135°C, 150°C e 177°C, respectivamente. E a Figura 11 ilustra a viscosidade de cada amostra sob as temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C antes e após RTFO.

Figura 8 – Variação da viscosidade rotacional a 135°C

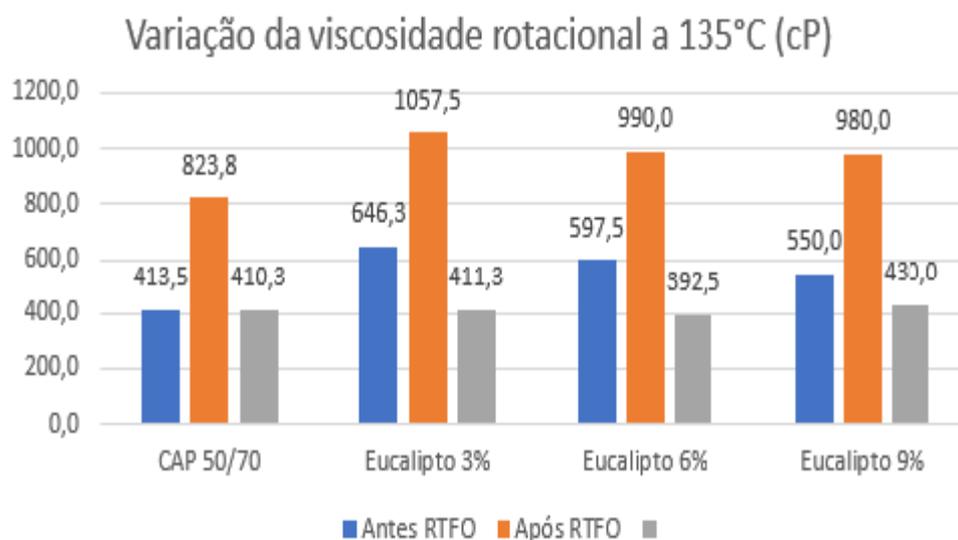


Figura 9 – Variação da viscosidade rotacional a 150°C

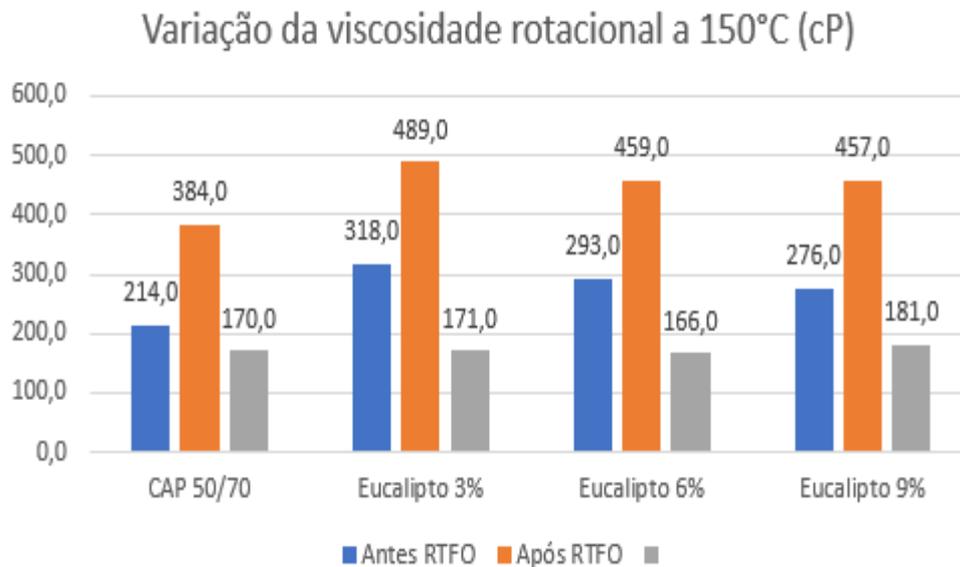


Figura 10 – Variação da viscosidade rotacional a 177°C

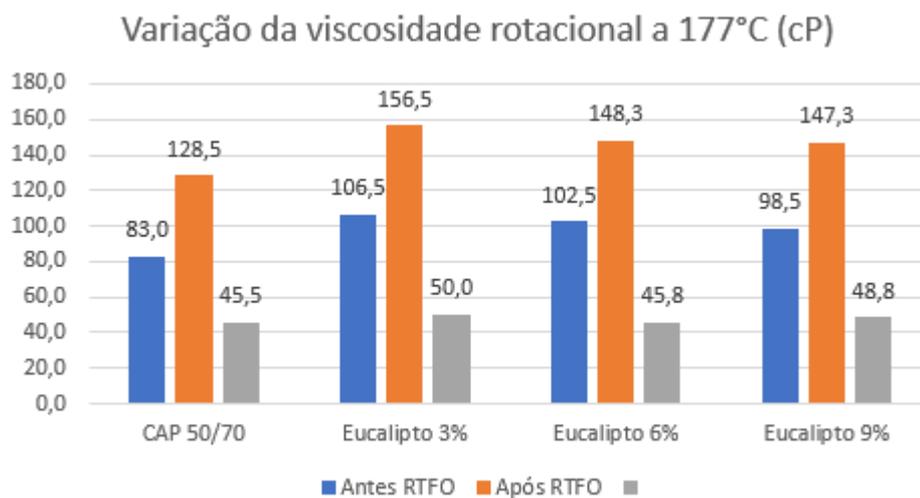
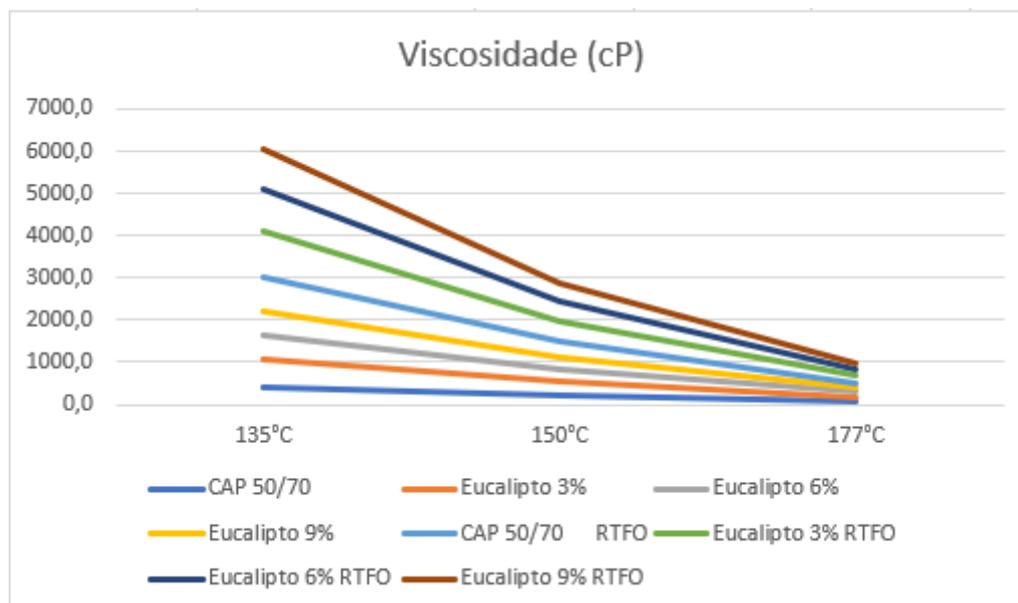


Figura 11 – Viscosidade rotacional



Considerando-se, inicialmente, os ligantes antes do RTFO, observa-se um aumento da viscosidade com o acréscimo dos teores de lignina em relação ao ligante puro, principalmente nas temperaturas mais inferiores de ensaio ($135^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$), com um destaque maior para o ligante com 9%, pois os ligantes com os demais teores não apresentaram variação significativa entre eles.

Ainda sobre os ligantes não envelhecidos, com a elevação da temperatura, as viscosidades dos ligantes modificados diminuem até atingir 150°C e em seguida tendem a manter-se praticamente constantes e convergem para o valor da viscosidade do ligante puro em 177°C . Esse comportamento é evidenciado pela maior inclinação das curvas dos ligantes com adição de lignina e demonstra uma maior variabilidade da viscosidade com a temperatura.

Comparando os ligantes antes e após RTFO, observa-se que o envelhecimento causou o aumento da viscosidade como era previsto. Além disso, percebe-se uma mudança maior na viscosidade do ligante puro em relação aos modificados por adição de lignina, o que indica mais uma vez a resistência ao envelhecimento devido a adição da lignina no ligante.

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

Como era de se esperar, após o RTFO a viscosidade das amostras aumentou, assim como aumentou também com a adição e o aumento do teor de lignina ao ligante asfáltico.

As Tabelas 6 e 7 mostram as temperaturas de usinagem e compactação das amostras antes e após RTFO, respectivamente.

Tabela 6 – Temperaturas de Usinagem e Compactação antes do RTFO

Amostra	Antes do RTFO					
	Usinagem (°C)			Compactação (°C)		
	Intervalo	Valor Médio	Intervalo	Valor Médio	Intervalo	Valor Médio
CAP 50/70	166	160	163	152	144	148
3% Eucalipto	171	168	169	163	158	160
6% Eucalipto	170	167	168	161	156	159
9% Eucalipto	169	166	167	160	154	157

Tabela 7 – Temperaturas de Usinagem e Compactação após o RTFO

Amostra	Após o RTFO					
	Usinagem (°C)			Compactação (°C)		
	Intervalo	Valor Médio	Intervalo	Valor Médio	Intervalo	Valor Médio
CAP 50/70	173	170	172	166	163	165
3% Eucalipto	175	173	174	170	167	168
6% Eucalipto	174	172	173	169	166	167
9% Eucalipto	174	172	173	169	166	167

Ao adicionar lignina de eucalipto ao ligante nos teores de 3%, 6% e 9%, as temperaturas de usinagem e compactação mostraram-se superiores às do ligante puro, o que torna estes processos mais onerosos. Entretanto, antes do RTFO, pode-se observar que quanto maior o teor de lignina, menores as temperaturas acima citadas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adição de lignina ao ligante contribuiu de forma positiva na resistência à deformação e na resistência ao envelhecimento do material quando comparado ao ligante puro (CAP 50/70). A maior resistência à deformação foi verificada através da redução da penetração e consequente aumento da consistência, assim como no aumento do ponto de amolecimento que embasou ainda mais essa afirmação. O aumento da resistência ao envelhecimento foi percebido pelas menores variações dessas mesmas propriedades dos ligantes modificados, antes e após o RTFO.

O Índice de Susceptibilidade Térmica (IST) mais próximo a zero foi outro fator que agregou viabilidade à utilização da lignina, pois indica que houve menor sensibilidade à variação de temperatura.

Em relação à viscosidade rotacional, sua maior variação (aumento) foi proporcionada no ligante com o teor de 9% de lignina à temperatura de 135°C. Esta elevação da viscosidade causou, obviamente, um aumento também na temperatura de usinagem, no entanto, esse valor é considerado insignificante, já que a norma define o intervalo de temperatura conveniente para o ligante ser trabalhado como sendo de 107°C a 177°C.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Avaliar o comportamento de misturas asfálticas utilizando os teores de lignina em estudo;
- Analisar as propriedades térmicas do ligante modificado por adição de lignina nos teores de 3,6 e 9%.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - **ASTM D2872**. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). West Conshohocken, PA, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15184**: Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional. São Paulo, 2007.

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, 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.

BRITT, K.W., *Handbook of Pulp and Paper Technology*, pp.1-537, Van Nostrand Reinhold, New York, (1970)

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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE – **DNIT – ME 131/2010**. Materiais Asfálticos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do Anel e Bola, Rio de Janeiro, 2010.

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

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.

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.

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.

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.

MANO, E.B. Introdução a polímeros. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1985.

_____. Polímeros, produção e aplicação. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1991.

MOTHÉ, M. G. Estudo do Comportamento de Ligantes Asfálticos por Reologia e Análise Térmica. 2009. 204 f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

OSMARI, P. H. Caracterização química, reológica e de morfologia superficial de ligantes asfálticos modificados por diferentes agentes rejuvenescedores. 2016. 113 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

REVISTA BIOMASSA E BIOENERGIA. **Suzano aposta em lignina, presente no Eucalipto, para gerar energia.** Disponível em: <<https://www.biomassabioenergia.com.br/imprensa/suzano-aposta-em-lignina-presente-no-eucalipto-para-gerar-energia/20120927-090326-v714> > Acesso em: 30 de setembro de 2018.

SANTOS, RODRIGUES E MENDONÇA; 2018. Efeito da adição de lignina Kraft proveniente da madeira de eucalipto na reologia do CAP 50/70. *Matéria* (Rio J.), vol. 3, nº 3. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762018000300411>. Acesso em: 10 de junho de 2019.

SANTOS, N. S. Propriedades reológicas do ligante asfáltico (CAP 50/70) modificado por adição de lignina. 2017. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

VICTOR, P. A. Compósitos poliméricos obtidos pela combinação de estireno e lignina. 2014. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

APÊNDICES

Tabela 7 – Perda de massa do CAP 50/70

Amostra	Massa		Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
	Antes do RTFO	Depois do RTFO		
CAP 50/70	209,56	208,92	0,003054018	0,305401794
	210,78	210,55	0,001091185	0,109118512
	219,4	219,14	0,001185050	0,118505014
	217,46	217,42	0,000183942	0,018394187
Média			0,137854877	

Fonte: Autoria Própria

Tabela 8 – Perda de massa do 3% Eucalipto

Amostra	Massa		Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
	Antes do RTFO	Depois do RTFO		
3% Eucalipto	213,580	213,310	0,0012641633	0,126416331
	209,130	208,820	0,0014823316	0,148233156
	218,200	217,900	0,0013748854	0,137488543
	221,580	221,580	0,0000000000	0
Média			0,103034508	

Fonte: Autoria Própria

Tabela 9 – Perda de massa do 6% Eucalipto

Amostra	Massa		Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
	Antes do RTFO	Depois do RTFO		
6% Eucalipto	213,580	213,310	0,0012641633	0,126416331
	209,130	208,820	0,0014823316	0,148233156
	218,200	217,900	0,0013748854	0,137488543

	221,580	221,580	0,0000000000	0
	Média		0,103034508	

Fonte: Autoria Própria

Tabela 10 – Perda de massa do 9% Eucalipto

Amostra	Massa		Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
	Antes do	Depois do		
	RTFO	RTFO		
9% Eucalipto	226,67	226,46	0,000926457	0,092645696
	219,49	219,31	0,000820083	0,082008292
	219,62	219,36	0,001183863	0,118386304
	210,6	210,37	0,001092118	0,109211776
	Média		0,097680097	

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 11 e a Figura 5 apresentam o resumo com as médias de perda de massa de cada ligante e o limite estabelecido pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP).

Tabela 11 – Perda de Massa

Amostra	Perda de massa (%)	Limite estabelecido pela ANP (%)
CAP 50/70	0,138	
3% Eucalipto	0,103	0,5
6% Eucalipto	0,094	
9% Eucalipto	0,098	

Tabela 12 – Penetração do CAP 50/70

Ensaio	CAP 50/70			
	Antes do RTFO (1)	Antes do RTFO (2)	Depois do RTFO (1)	Depois do RTFO (2)
Penetração	57,00	59,00	30,00	29,00
	52,00	55,00	30,00	30,00

	58,00	55,00	26,00	25,00
	58,00	54,00	24,00	23,00
	58,00	58,00	23,00	25,00
	56,60	56,20	26,60	26,40
Média	56,40		26,50	

Fonte: Autoria Própria

Tabela 13 – Penetração da amostra 3% Eucalipto

Ensaio	3% Eucalipto			
	Antes do RTFO (1)	Antes do RTFO (2)	Depois do RTFO (1)	Depois do RTFO (2)
Penetração	34,00	35,00	23,00	20,00
	35,00	36,00	24,00	23,00
	36,00	35,00	23,00	23,00
	34,00	34,00	20,00	23,00
	34,00	36,00	20,00	25,00
	34,60	35,20	22,00	22,80
Média	34,90		22,40	

Tabela 14 – Penetração da amostra 6% Eucalipto

Ensaio	6% Eucalipto			
	Antes do RTFO (1)	Antes do RTFO (2)	Depois do RTFO (1)	Depois do RTFO (2)
Penetração	36,00	35,00	21,00	25,00
	33,00	34,00	22,00	23,00
	33,00	34,00	22,00	22,00
	31,00	31,00	23,00	21,00
	31,00	31,00	24,00	20,00
	32,80	33,00	22,40	22,20
Média	32,90		22,30	

Tabela 15 – Penetração da amostra 9% Eucalipto

Ensaio	9% Eucalipto			
--------	--------------	--	--	--

	Antes do RTFO (1)	Antes do RTFO (2)	Depois do RTFO (1)	Depois do RTFO (2)
Penetração	34,00	31,00	20,00	20,00
	33,00	32,00	22,00	21,00
	28,00	31,00	22,00	23,00
	35,00	32,00	22,00	23,00
	30,00	33,00	22,00	23,00
	32,80	31,80	21,60	22,00
Média	31,90		21,80	

Tabela 16 – Penetração Retida (%)

Amostra	Antes do RTFO	Após o RTFO	Penetração Retida (0,1 mm)
CAP 50/70	56,4	26,5	47,0
3% Eucalipto	34,9	22,4	64,2
6% Eucalipto	32,9	22,3	67,8
9% Eucalipto	31,9	21,8	68,3

Fonte: Autoria Própria

Tabela 17 – Ponto de Amolecimento do CAP 50/70

Ensaio	CAP 50/70			
	Antes do RTFO (1)	Antes do RTFO (2)	Depois do RTFO (1)	Depois do RTFO (2)
Ponto de Amolecimento	52,00	53,00	63,00	62,00
	52,50	52,50	62,50	62,00
	52,25	52,75	62,75	62,00
Média	52,50		62,38	

Tabela 18 – Ponto de Amolecimento do 3% Eucalipto

Ensaio	3% Eucalipto			
	Antes do RTFO (1)	Antes do RTFO (2)	Depois do RTFO (1)	Depois do RTFO (2)
Ponto de				

Amolecimento	56,50	57,00	64,00	65,00
	57,00	57,00	64,00	65,50
	56,75	57,00	64,00	65,25
Média	56,88		64,63	

Tabela 19 – Ponto de Amolecimento do 6% Eucalipto

Ensaio	6% Eucalipto			
	Antes do RTFO (1)	Antes do RTFO (2)	Depois do RTFO (1)	Depois do RTFO (2)
Ponto de Amolecimento	57,00	58,00	63,00	63,50
	57,50	57,50	64,00	63,00
	57,25	57,75	63,50	63,25
Média	57,50		63,38	

Tabela 20 – Penetração da amostra 9% Eucalipto

Ensaio	9% Eucalipto			
	Antes do RTFO (1)	Antes do RTFO (2)	Depois do RTFO (1)	Depois do RTFO (2)
Ponto de Amolecimento	59,00	-	62,50	63,00
	59,00	59,00	63,00	62,00
	59,00	59,50	62,75	62,50
Média	59,25		62,63	

Tabela 21 – Variação do Ponto de Amolecimento

Amostra	Média do Ponto de Amolecimento		Limite Mínimo pela ANP	Variação do Ponto de Amolecimento
	Antes do RTFO	Após o RTFO		
CAP 50/70	50,2	58,1		7,9

3% Eucalipto	56,9	62,6		5,7
6% Eucalipto	57,8	63,4	46	5,6
9% Eucalipto	59,3	64,6		5,3

Tabela 22 – Índice de Susceptibilidade Térmica (IST)

Amostra	Penetração	log (penetração)	IST
CAP 50/70	56,40	1,75127910	-0,86
3% Eucalipto	34,90	1,54282543	-0,42
6% Eucalipto	32,90	1,51719590	-0,36
9% Eucalipto	31,90	1,50379068	-0,14

Tabela 23 – Viscosidade Rotacional do CAP 50/70

CAP 50/70	Viscosidade Rotacional					
	Antes do RTFO			Após o RTFO		
	Amostra	Amostra	Média	Amostra	Amostra	Média
Temperatura (°C)	1	2		1	2	
135	417,000	410,000	413,50	840,000	807,500	823,75
150	216,000	212,000	214,00	391,000	377,000	384,00
177	83,500	82,500	83,00	130,000	127,000	128,50

Tabela 24 – Viscosidade Rotacional do 3% Eucalipto

3% Eucalipto	Viscosidade Rotacional					
	Antes do RTFO			Após o RTFO		
	Amostra	Amostra	Média	Amostra	Amostra	Média
Temperatura (°C)	1	2		1	2	
135	637,500	655,000	646,25	980,000	1017,500	998,75
150	313,000	323,000	318,00	453,000	465,000	459,00
177	105,000	108,000	106,50	145,500	149,000	147,25

Tabela 25 – Viscosidade Rotacional do 6% Eucalipto

6% Eucalipto	Viscosidade Rotacional					
	Antes do RTFO			Após o RTFO		

Temperatura (°C)	Amostra 1	Amostra 2	Média	Amostra 1	Amostra 2	Média
135	615,000	580,000	597,50	1057,500	1085,000	1071,25
150	295,000	291,000	293,00	485,000	493,000	489,00
177	103,000	102,000	102,50	155,000	158,000	156,50

Tabela 26 – Viscosidade Rotacional do 9% Eucalipto

9%		Viscosidade Rotacional					
Eucalipto		Antes do RTFO			Após o RTFO		
Temperatura (°C)	Amostra 1	Amostra 2	Média	Amostra 1	Amostra 2	Média	
135	547,500	552,500	550,00	990,000	1007,500	998,75	
150	275,000	277,000	276,00	457,000	466,000	461,50	
177	98,000	99,00	98,50	146,500	150,000	148,25	

Tabela 27 – Viscosidade Rotacional a 135°C

Amostra	Viscosidade Rotacional		Variação da Viscosidade
	Antes do RTFO	Após o RTFO	
CAP 50/70	413,5	823,8	410,3
3% Eucalipto	646,3	1057,5	411,3
6% Eucalipto	597,5	990,0	392,5
9% Eucalipto	550,0	980,0	430,0

Tabela 28 – Viscosidade Rotacional a 150°C

Amostra	Viscosidade Rotacional		Variação da Viscosidade
	Antes do RTFO	Após o RTFO	
CAP 50/70	214,0	384,0	170,0

3% Eucalipto	318,0	489,0	171,0
6% Eucalipto	293,0	459,0	166,0
9% Eucalipto	276,0	457,0	181,0

Tabela 29 – Viscosidade Rotacional a 177°C

Amostra	Viscosidade Rotacional		Varição da Viscosidade
	Antes do RTFO	Após o RTFO	
CAP 50/70	83,0	128,5	45,5
3% Eucalipto	106,5	156,5	50,0
6% Eucalipto	102,5	148,3	45,8
9% Eucalipto	98,5	147,3	48,8
