



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

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO LIGANTE
ASFÁLTICO MODIFICADO POR ADIÇÃO DE LIGNINA**

Clara Rayssa Romero Rodrigues Souza

Orientadores: John Kennedy Guedes Rodrigues
Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

Campina Grande-PB, 05 de Dezembro de 2019

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO LIGANTE
ASFÁLTICO MODIFICADO POR ADIÇÃO DE LIGNINA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB, 05 de Dezembro de 2019

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

CLARA RAYSSA ROMERO RODRIGUES SOUZA

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: Pavimentação.

Orientadores: John Kennedy Guedes Rodrigues
Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

CAMPINA GRANDE – PB

Dezembro de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me concede toda a força, paciência e me protege em tudo o que eu faço.

Aos meus pais, Joselito de Souza e Eliane Rodrigues, que sempre me apoiaram e fizeram de tudo pra que eu chegasse até aqui, e aos meus irmãos Carlos e Thyago.

A minha tia, Maria Aparecida, que foi essencial durante toda a minha caminhada nesse curso, me dando apoio e auxílio nos momentos mais difíceis enfrentados ao longo de toda a minha formação.

Aos meus amigos da escola, que me ajudaram em momentos difíceis e de necessidade, Amanda, Yasmin, Diego, Natália, Ana Carolina, Vitória, Larissa, Guilherme e Heloísa compartilhando momentos que levarei pra o resto da vida.

A todos os meus amigos da faculdade que foram essenciais para que essa jornada se tornasse mais leve, Larissa, Sávio, Camilla, Vitória, Carlos, Manoel, Igor, João, Matheus Grismino, Matheus Barbosa, Marcela e Erick.

Agradeço a todos os meus familiares que contribuíram de alguma forma nessa caminhada difícil, me incentivando e dando forças.

In memoriam, ao meu avô, Geraldo Lourenço, que não pôde me acompanhar até o final da graduação, mas que certamente estará feliz com essa conclusão, ao lado do nosso bondoso Deus.

A minha professora coorientadora Ana Maria Duarte, por toda a paciência, apoio e direcionamento dedicados à mim, durante a pesquisa e ao longo da minha formação. Também agradeço ao meu orientador John Kennedy pela oportunidade.

Serei eternamente grata a todos.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais,
Joselito e Eliane, minhas razões de vida,
por todo apoio incondicional e por
sempre depositarem em mim tamanha
confiança.

EPÍGRAFE

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”

(Santa Teresa de Calcutá)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Consumo aparente de asfalto no Brasil em milhões de m ³ /ano.	16
Figura 2: Cadeia produtiva do pavimento asfalto.	18
Figura 3: Estrutura de pavimento tipo de concreto.	19
Figura 4: Camadas de um pavimento flexível convencional.	20
Figura 5: Esquema básico do ensaio	22
Figura 6: Modelo de equipamento utilizado para ensaio de ponto de fulgor ...	23
Figura 7: Procedimento de realização do ensaio de ductilidade.	24
Figura 8: Pitch Lake de Trinidad e Tobago.	25
Figura 9: Classificação de misturas asfálticas quanto à temperatura.	27
Figura 10: Relação entre o envelhecimento do asfalto e tempo de vida do mesmo	28
Figura 11: Ligante asfáltico 50/70.	31
Figura 12: Lignina do Eucalipto.	31
Figura 13: Fluxograma das etapas da pesquisa.	32
Figura 14: Entufa RTFO (Rolling Thin Film Oven)	34
Figura 15: Ensaio de penetração sendo executado	36
Figura 16: Execução do ensaio de ponto de amolecimento	37
Figura 17: Viscosímetros utilizados para medição das viscosidades dos ligantes asfálticos.	38
Figura 18: Variações da perda de massa.	39
Figura 19: Ensaio de penetração para os ligantes	40
Figura 20: Ensaio de ponto de amolecimento para os ligantes	41
Figura 21: Variação do ponto de amolecimento	42
Figura 22: Viscosidade rotacional à 135°C	43
Figura 23: Viscosidade rotacional à 150°C	44
Figura 24: Viscosidade rotacional à 177°C	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Comparativo de custo entre asfalto borracha e o convencional 26

Quadro 2: Porcentagens referentes à composição molecular da lignina..... 29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Nomenclatura das amostras da pesquisa.....	33
Tabela 2: Ensaios para caracterização dos ligantes asfálticos.....	35

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	Asfaltos diluídos
AMP	Asfaltos modificados por polímero
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSC	Calorimetria Diferencial Exploratória
EAP	Emulsões asfálticas de Petróleo
FDC	Fundação Dom Cabral
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
LTDA	Limitada
NBR	Norma Brasileira
PAIC	Pesquisa Anual da Indústria da Construção
RTFO	Rolling Thin Film Oven
SINICESP	Sindicato da Indústria da Construção Pesada do Estado de São Paulo
SUPERPAVE	Superior Performing Asphalt Pavements
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TLA	Trinidad Lake Asphalt
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

RESUMO

O grande crescimento econômico do país nas últimas décadas impulsionou muitos avanços em diversos setores, sejam eles tecnológicos, sociais, políticos e ambientais. Com isso, a movimentação de pessoas e produtos tornou-se muito mais intensa, e para acompanhar esse crescimento foi necessário desenvolver também os meios de transporte responsáveis por esse serviço. Dentre eles, a malha rodoviária é o mais importante meio de circulação de pessoas e objetos, e por esse fator, o número de problemas e patologias que surgem nesse tipo de sistema é considerável e recorrente. A fim de minimizar essa frequente problemática na pavimentação de estradas, várias instituições universitárias e empresas estão dando foco a agentes modificadores de ligantes asfálticos, para melhorar suas propriedades e conseqüentemente sua vida útil, isto significa dizer em uma redução de gastos públicos com reparos e reformas nessas estruturas. Desse modo, esta pesquisa teve como objetivo analisar o comportamento físico do ligante asfáltico CAP 50/70 modificado por adição de lignina, antes e após o envelhecimento a curto prazo - RTFO. Foram realizados ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional. Verificou-se que a incorporação de lignina ao ligante asfáltico nos teores em estudo proporcionou benefícios como diminuição da deformação permanente, aumento da vida de fadiga, e maior resistência ao envelhecimento precoce.

Palavras-chave: Pavimentação; Ligante Asfáltico; Lignina.

ABSTRACT

The great economic growth of the country in the last decades has impelled many advances in diverse sectors, be they technological, social, political and environmental. With this, the movement of people and products became much more intense and to accompany this growth was necessary to develop also the means of transportation responsible for this service. Among them, the road network is the most important means of movement of people and objects, and by this factor, the number of problems and pathologies that arise in this type of system is considerable and recurrent. In order to minimize this frequent problem in road paving, several university institutions and companies are focusing on asphalt binder modifying agents to improve their properties and consequently their useful life, this means in a reduction of public expenses with repairs and renovations structures. In this mode, this research aimed to analyze the physical behavior of the modified line addition CAP 50/70 asphalt binder before and after a short duration period - RTFO. Penetration, softening point and rotational viscosity tests were performed. The incorporation of line into the asphalt binder in the studies under study has been found to offer benefits such as reduced permanent formation, increased fatigue life and greater resistance to premature aging.

Key words: Paving; Asphalt Binder; Lignin.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa.....	13
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo Geral.....	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
1.3 Organização do Trabalho de Conclusão de Curso -TCC.....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Ligantes Asfálticos	16
2.2 Caracterização dos ligantes asfálticos	21
2.3 Modificação de ligantes asfálticos.....	24
2.4 Propriedades Térmicas de Ligantes Asfálticos	26
2.5 Usos e aplicações da lignina.....	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1 Materiais.....	31
3.2 Métodos	32
3.2.1 Preparação das Misturas.....	32
3.2.2 Nomenclatura das amostras	33
3.3 Determinação das propriedades físicas dos ligantes	34
3.3.1 Ensaio de penetração.....	35
3.3.2 Ponto de amolecimento	36
3.3.3 Viscosidade rotacional.....	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 Envelhecimento a curto prazo.....	39
4.2 Ensaio de Penetração	40

4.3	Ensaio de Ponto de Amolecimento	41
4.4	Ensaio de Viscosidade Rotacional	42
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	46
	REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

Os investimentos já realizados na malha rodoviária brasileira representam uma porcentagem considerável na economia do país, principalmente por tratar-se de uma nação com dimensões continentais, contudo, segundo o estudo: “Projeções para a Infraestrutura de Logística de Transportes no Brasil”, em 2018 pela Fundação Dom Cabral (FDC), mesmo se forem realizados todos os investimentos previstos na malha rodoviária, o país ainda enfrentará sérios problemas no cenário da infraestrutura de transporte.

Por diversos motivos, o asfalto é o principal componente na pavimentação dessas rodovias, dentre eles: promover uma ótima união dos agregados; ser impermeabilizante; apresentar durabilidade, além de boa resistência a vários fatores agressivos, como alguns ácidos (ONOFRE, 2013).

A formação do asfalto utilizado na pavimentação provém da destilação do petróleo e pode sofrer variações em seu comportamento de acordo com a origem do mesmo, do processo utilizado para seu refino e das condições de uso a que foi submetido (SINICESP, 2010).

Apesar de apresentarem bom desempenho no cumprimento dos requisitos necessários para o tráfego de veículos em sua composição convencional, os ligantes asfálticos estão, cada vez mais, passando por inúmeras modificações em sua composição a fim de melhorar as características reológicas desses materiais. Isso se deve ao considerável e constante aumento no número de veículos comerciais mais pesados ou pelos impactos que regiões com grandes diferenças climáticas proporcionam no comportamento mecânico do pavimento, como o surgimento de trincas, como mostra a matéria publicada em 2010 pelo Sindicato da Indústria da Construção Pesada do Estado de São Paulo.

As modificações realizadas estão relacionadas, principalmente, com a melhoria no processo de resistência à fadiga e à deformação permanente, além da resistência às trincas térmicas de fadiga/térmicas (SINICESP, 2010), implicando na otimização das características adesivas e coesivas do material.

A diferença básica existente entre o pavimento asfáltico e os demais é que o mesmo se caracteriza por apresentar uma considerável deformação elástica quando certo carregamento é aplicado nele, resultando numa distribuição uniforme das parcelas de carga sobre suas quatro camadas principais: camada superficial asfáltica, camada de base, camada de sub-base e camada de reforço do subleito, respectivamente (VIANA, 2019).

De acordo com a 22ª edição da Pesquisa CNT de Rodovias, publicada em 2018, dos 107.161 km de rodovias analisados, “50,9% receberam classificação regular, ruim ou péssima”. Por esse motivo, se dá a importância de se investir em tecnologias de modificação e aprimoramento de ligantes asfálticos, para que esses problemas possam ser minimizados.

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, deste modo uma análise detalhada das propriedades físicas se faz necessário para que se possa analisar as modificações em seu comportamento, antes e após envelhecimento a curto prazo – RTFO.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este estudo teve como principal objetivo avaliar as propriedades físicas do ligante asfáltico modificado por adição de lignina, proveniente do eucalipto, nos teores de 3%, 6% e 9%, antes e após envelhecimento a curto prazo.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Avaliar o comportamento físico apresentado para o ligante modificado por adição de lignina antes e após envelhecimento a curto prazo-RTFO;
- ✓ Avaliar a perda de massa ocorrida com o aumento da temperatura para o ligante asfáltico puro e modificado com adição de lignina, nos teores de 3, 6 e 9%, antes e após envelhecimento a curto prazo – RTFO.

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 e organização da pesquisa
- ✓ Fundamentação Teórica – São abordados assuntos relacionados a definição, uso e aplicação de ligantes asfálticos, importância da modificação de ligantes asfálticos e sobre suas propriedades físicas. Além disso, tem-se a abordagem do uso, aplicação e trabalhos envolvendo o uso da lignina em ligantes asfálticos.
- ✓ Materiais e Métodos – São apresentados os materiais utilizados na pesquisa e relatados aspectos considerados importantes sobre os procedimentos da etapa experimental.
- ✓ Resultados e Discussões – São apresentados os resultados obtidos para o comportamento térmico dos ligantes asfálticos.

- ✓ Considerações Finais e sugestões para pesquisas futuras – São apresentadas considerações acerca dos ensaios realizados e as sugestões para futuras pesquisas.
- ✓ Referências – Onde serão identificadas as pesquisas citadas nesse estudo.

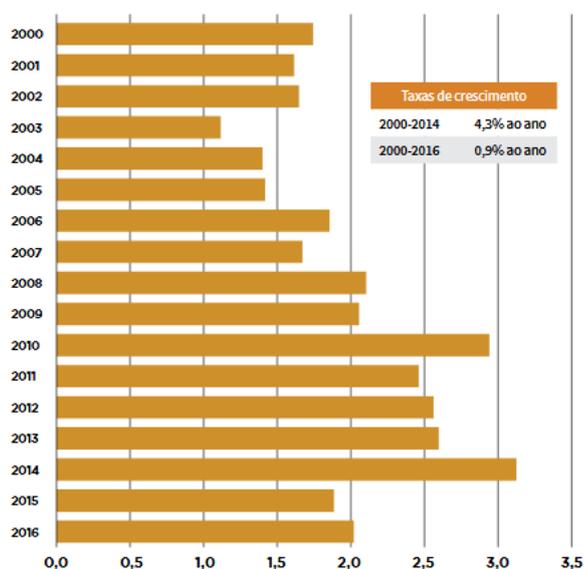
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ligantes Asfálticos

Dentre todos os materiais de construção já utilizados pelo homem, o asfalto é um dos mais antigos e o seu uso em pavimentação é um dos mais importantes também, além de ser comumente utilizado como impermeabilizante de construções civis. Em boa parte dos países do mundo, a principal forma de revestimento se dá pela pavimentação asfáltica, um exemplo disso é o Brasil, que conforme dados da Paic, Pesquisa Anual da Indústria da Construção (IBGE, 2016), quase dois terços do asfalto consumido pelas construtoras no Brasil foi destinado às obras rodoviárias e de infraestrutura urbana.

O crescimento da evolução do consumo de asfalto no país vem se dando de forma significativa e acompanhando a produção do material, com taxa de 0,9% ao ano, nos últimos 16 anos, segundo a ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. A Figura 1 a seguir ilustra essa evolução do consumo de asfalto no mercado brasileiro:

Figura 1: Consumo aparente de asfalto no Brasil em milhões de m³/ano.



FONTE: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2016).

A explicação para o intenso uso deste material se dá pelo fato de que o mesmo age como um ligante que promove uma forte união dos agregados que o compõe permitindo certa flexibilidade de forma controlável. Além disso, o

asfalto apresenta resistência à ação de boa parte dos ácidos, sais e álcalis, boa durabilidade e propriedade impermeabilizante. Contudo, a baixa reatividade química desse material não evita que o mesmo possa um processo de envelhecimento por oxidação lenta através do contato com a água e o ar.

De acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o asfalto pode ser definido como sendo “um material de cor escura e consistência sólida ou semi-sólida, composto de asfaltenos, resinas e hidrocarbonetos pesados, onde os constituintes predominantes são os betumes, que agem como elemento aglutinador. É obtido em estado natural ou por diferentes processos físicos ou químicos, com seus derivados de constância variável e poder aglutinante e impermeabilizante”.

A composição dos revestimentos asfálticos se dá basicamente por materiais pétreos (agregados) e por aglutinantes (ligantes asfálticos), que apresentam a função principal de resistirem às solicitações de cargas oriundas do tráfego e, dessa forma, fazer com que sejam distribuídas às camadas subjacentes do pavimento. Outrossim, devem propiciar boas condições de segurança e conforto aos usuários das vias.

Através da destilação fracionada do petróleo, os produtos asfálticos podem ser obtidos após a remoção das frações mais leves (gasóleo, querosene, gasolina), concentrados no fundo da torre. No Brasil, a caracterização de CAP, cimento asfáltico de petróleo, é utilizada para intitular o asfalto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas. E podem ser encontrados em jazidas naturais, na forma de bolsões de asfaltos, a partir da evaporação das frações mais voláteis do petróleo.

O pavimento asfáltico possui uma cadeia produtiva que se resume basicamente na extração do petróleo, que conseqüentemente envolve os processos de prospecção, exploração, produção e transporte do petróleo bruto, que por fim, segue para as refinarias. Um dos produtos deste refino é o asfalto, e grande parte do mesmo é produzido no Brasil. Para um consumo de cerca de 2 milhões de m³ de asfalto, apenas 867 m³ foram importados (ANP, 2017). Após o refino, o asfalto segue para a distribuição em construtoras de infraestrutura urbana e obras rodoviárias. A Figura 2 ilustra a cadeia de produtividade.

Figura 2: Cadeia produtiva do pavimento asfalto.



FONTE: Deconcic-Fiesp (2009).

A ANP estabelece ainda algumas especificações e classificações que devem ser atendidas de acordo com o tipo de utilização a qual se deseja, a fim de que sejam garantidas todas as necessidades com o mínimo de qualidade exigida. Essas regulamentações estão explícitas em forma de resoluções, tais como: Resolução ANP nº 2/2005, que determina alguns requisitos necessários à autorização e regulamentação para que a atividade de distribuição de asfaltos seja realizada; Resolução ANP nº 19/2005, que designa as especificações necessárias ao uso comercial dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP), no território brasileiro; Resolução ANP nº 32/2010, que estabelece as especificações dos CAP's modificados por polímeros elastoméricos para o ramo comercial em todo o território brasileiro, entre outras.

No Brasil, a tendência do aumento de veículos pesados trafegando em vias, além do transporte de cargas elevadas, aliada a projetos inadequados que não respeitam essas resoluções mencionadas anteriormente e serviços mal fiscalizados e mal executados, implica diretamente na degradação precoce dos pavimentos e em mais dinheiro gasto em reparações e manutenções dos mesmos.

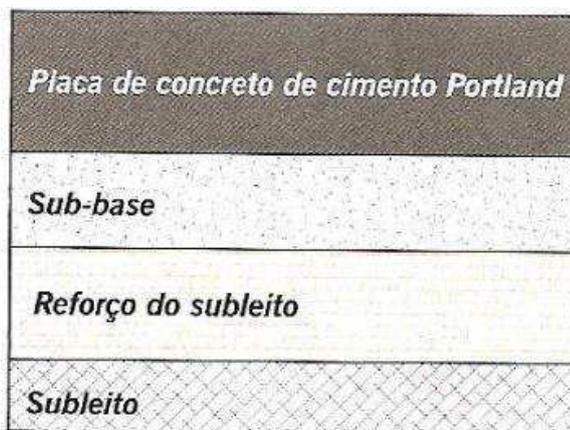
Fengler (2018) cita que os principais e mais recorrentes erros que podem ser encontrados nesses casos são deformações permanentes e fissuras por fadiga. Estes problemas são oriundos em grande parte da má compactação das camadas que sofrem com a densificação complementar excessiva pela ação do tráfego de veículos. Fengler cita ainda que “o desempenho dos pavimentos está diretamente associado à qualidade dos materiais selecionados (ligantes asfálticos, agregados e aditivos), ao seu dimensionamento e aos projetos de misturas e das camadas subjacentes adotadas”, por isso, torna-se de suma importância pesquisar, estudar e analisar qual o melhor material ou o método mais adequado para construção desses pavimentos.

Um ponto importante a se destacar é saber que não se deve confundir o asfalto com o alcatrão, pois apesar de ambos conterem o betume, uma mistura de hidrocarbonetos solúvel no bissulfeto de carbono, apresentam propriedades bastante diferentes. No livro *Pavimentação Asfáltica*, de BERNUCCI (2008), desenvolvido através de um projeto que visa contribuir na formação de engenheiros civis na área de pavimentação, através de uma parceria envolvendo a Petróleo Brasileiro S.A., a Petrobras Distribuidora S.A. e a Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos (Abeda), é destacado que desde que se comprovou seu poder cancerígeno, além de apresentar baixa homogeneidade e qualidade no que diz respeito a ligantes para pavimentação, o alcatrão praticamente não é mais usado nos dias de hoje.

Em relação à classificação, os pavimentos podem ser divididos basicamente em três tipos, os flexíveis, semi-flexíveis e rígidos. Os mais utilizados nos dias de hoje são os pavimentos rígidos e flexíveis. A diferença básica entre ambos é que os pavimentos rígidos possuem pouca deformação e são constituídos, em sua maior parte, por concreto de cimento (SENÇO, 2007).

A Figura 3 ilustra um tipo de estrutura de pavimento rígido.

Figura 3: Estrutura de pavimento tipo de concreto.

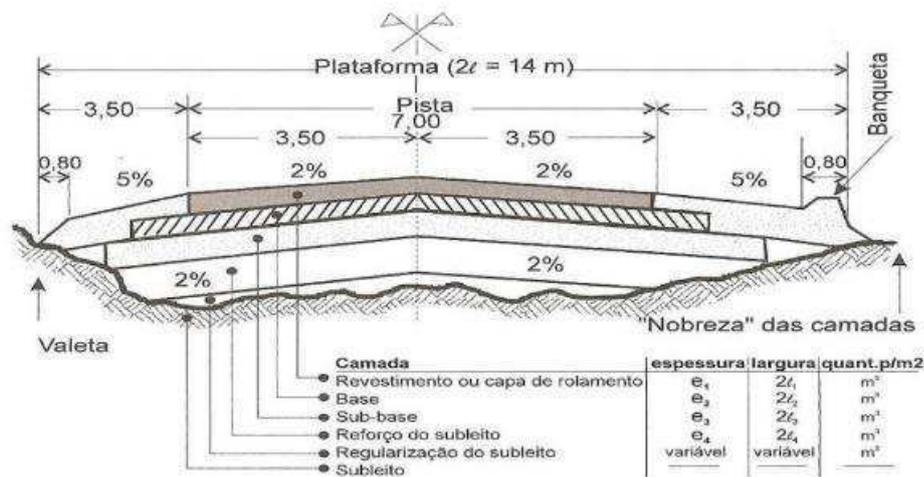


FONTE: Bernucci et al. (2008)

Já os pavimentos flexíveis são aqueles em que, quando aplicada uma certa tensão, sua deformação não leva ao rompimento da estrutura, de forma que as cargas se distribuem uniformemente entre as camadas (SENÇO, 2007).

A Figura 4 ilustra as camadas de um pavimento flexível convencional, composto por capa de rolamento, base, sub-base, reforço do subleito, regularização do subleito e subleito.

Figura 4: Camadas de um pavimento flexível convencional.



FONTE: Senço (2007).

A qualidade dos ligantes que fazem parte da composição dos pavimentos vai interferir diretamente no comportamento dos pavimentos flexíveis, pois esses materiais são os responsáveis por manter a união dos agregados e, conseqüentemente, a estabilidade estrutural da mistura. Ao decorrer do tempo, esses ligantes ficam expostos a diversos agentes agressivos, como a alta carga do tráfego de veículos e aos efeitos da chuva, fazendo com que sejam submetidos a processos de deterioração.

A partir disso, estudos envolvendo o uso de modificadores de ligantes asfálticos estão sendo cada vez mais recorrentes no meio acadêmico brasileiro, a fim de melhorar essa problemática enfrentada no desempenho de materiais asfálticos e, dessa forma, aumentar a sua vida útil.

Essas misturas asfálticas apresentam propriedades e características particulares de cada um de seus componentes. Os agregados são os responsáveis por promover a resistência a deformações permanentes sofridas pelo pavimento, enquanto que os ligantes influenciam diretamente na resistência à fadiga.

Onofre (2013) analisou os fatores que influenciam na deformação permanente das misturas asfálticas pra cada um desses dois componentes,

citados anteriormente. De forma separada temos que, para os agregados, as características em relação à angularidade, forma e textura são as mais influentes na resistência à deformação permanente. A mesma ainda cita diversos trabalhos na literatura que mostram isso como Stiadly et al., (2002) que concluiu que agregados com maior angularidade proporcionam a misturas asfálticas maior resistência à deformação permanente. Outro exemplo é o de Mahmoud e Bahia (2004) que comprovaram que a textura mais rugosa dos agregados é também a responsável por promover essa uma maior resistência.

Já se tratando dos ligantes, a temperatura é um fator que influencia diretamente na sua consistência, pois quanto maior for a aquela, mais fluido será o ligante e menos ele influenciará no processo de resistência à deformação permanente.

2.2 Caracterização dos ligantes asfálticos

No final da década de 90, a produção de cimento asfáltico de petróleo era de cerca de 2 milhões de toneladas anuais (Leite, 1999), sendo 60% vindos de petróleos brasileiros, 20% argentinos e árabes e 20% vindo da Venezuela. Segundo a Petrobrás, hoje em dia a empresa possui 15 refinarias espalhadas por diversos estados brasileiros, responsáveis por transformar o óleo bruto nos diversos produtos conhecidos e utilizados atualmente, como os ligantes asfálticos.

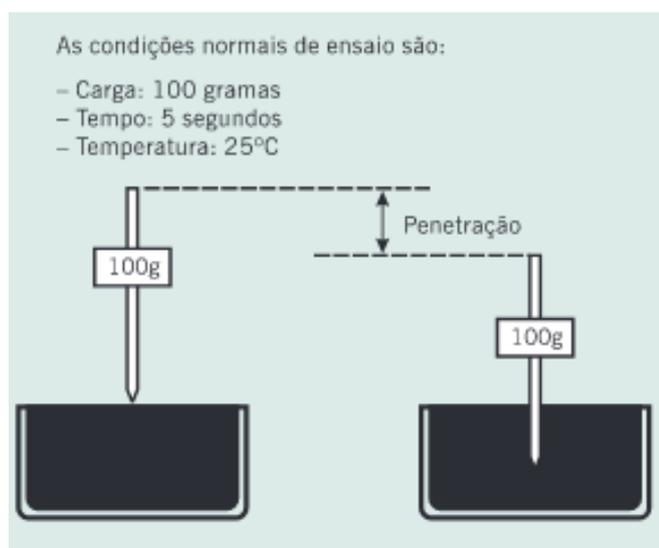
De acordo com BERNUCCI (2008), no mercado brasileiro, os tipos de ligantes asfálticos existentes são os:

- Cimentos asfálticos de petróleo – CAP;
- Emulsões asfálticas – EAP;
- Asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial;
- Asfaltos diluídos – ADP;
- Asfaltos modificados por polímero – AMP ou por borracha de pneus – AMB;
- Agentes rejuvenescedores – AR e ARE.

Dentre todos esses ligantes, o mais utilizado é o cimento asfáltico de petróleo e para que seu uso seja adequado e atenda as necessidades que se desejam, é necessária à realização de alguns ensaios físicos para que a categorização seja feita de forma correta, alguns desses ensaios podem ser citados a seguir como o ensaio de penetração (consistência), pureza, ponto de fulgor e ductilidade.

A consistência do CAP é definida através do ensaio de penetração, onde uma agulha penetra um volume padrão de cimento asfáltico, à temperatura de 25°C e durante um intervalo de tempo de 5 segundos. O procedimento é realizado três vezes e o valor médio dos três é o adotado. Quanto menor for a penetração da agulha, maior será a consistência do CAP. A norma que regulamenta este ensaio é a DNIT 155/2010. A Figura 5 ilustra uma representação esquemática do que é feito durante o procedimento.

Figura 5: Esquema básico do ensaio

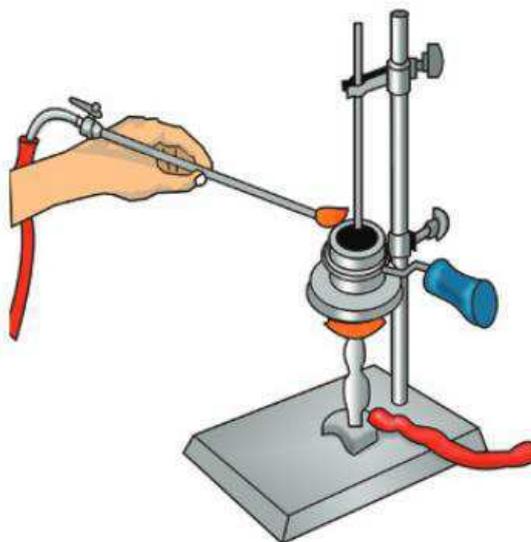


FONTE: Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros (2008).

Já o ensaio de solubilidade, é utilizado para medir a quantidade de betume presente na mistura asfáltica e, assim, determinar o grau de pureza da amostra. A norma regulamentadora deste ensaio é a ABNT NBR 14855/2015, e o procedimento consiste na dissolução da amostra de asfalto em um solvente, sendo então filtrada. A quantidade de material que ficar retido representa as impurezas do CAP, geralmente é requerido que no mínimo 99% do asfalto sejam solúveis.

Já no que diz respeito à segurança de manuseio do asfalto durante o transporte, estocagem e usinagem, é realizado o ensaio de ponto de fulgor. Neste procedimento, é determinada a menor temperatura na qual o vapor que provém do aquecimento do ligante asfáltico, quando em contato com uma chama padrão, é capaz de inflamar. A norma que regulamenta este ensaio é a DNIT 131/2010. A Figura 6 ilustra o equipamento utilizado para realização do ensaio.

Figura 6: Modelo de equipamento utilizado para ensaio de ponto de fulgor



FONTE: Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros (2008).

A ductilidade de um material é a propriedade que representa o grau de deformação que o material suporta até a sua fratura. No caso dos cimentos asfálticos, o ensaio mede a capacidade dos mesmos se alongarem na forma de um filamento antes de se romper. A ductilidade é obtida por meio da medição do alongamento em centímetros.

Os corpos de prova possuem dimensões padrão com largura inicial de 10mm, imergidos em água a uma temperatura de 25°C. A norma responsável por regulamentar este ensaio é a ABNT NBR 6293/2015. A Figura 7 ilustra o procedimento de ensaio.

Figura 7: Procedimento de realização do ensaio de ductilidade.



FONTE: Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros (2008).

Além desses ensaios que são responsáveis por caracterizar algumas propriedades dos ligantes asfálticos, o CAP pode ser produzido em quatro tipos de padrões que levam em conta diferentes graus de penetração e viscosidade. Os dois mais utilizados na construção brasileira são o CAP 30-45 e o CAP 50-70. Ambos podem ser utilizados para diferentes tipos de misturas asfálticas, o que vai diferir nesse uso são as propriedades de cada pavimento, como: geometria da via; drenagem; temperatura ambiente; terreno da fundação; entre outras (SINICESP, 2017).

2.3 Modificação de ligantes asfálticos

Os asfaltos modificados são materiais à base de CAP, aos quais são adicionados borrachas ou polímeros, produtos naturais, como asfalto de Trinidad Lake Asphalt (TLA) e asfaltita, entre outros aditivos.

Existem vários depósitos naturais de asfalto em todo o mundo, que resultam da infiltração de óleo mineral no solo, sejam em lagos ou sob a forma de rochas porosas que armazenam o material. Um exemplo disto é o Trinidad Lake Asphalt (TLA) é caracterizado como um asfalto natural e que é encontrado no Pitch Lake de Trinidad e Tobago (COSTA et al., 2008). De maneira geral, os asfaltos naturais são utilizados como matéria-prima para calafetação de

embarcações, argamassa, além de seu uso na pavimentação. A Figura 8 ilustra o lago de onde o TLA é extraído.

Figura 8: Pitch Lake de Trinidad e Tobago.



FONTE: TripAdvisor (2015).

Esses aditivos são utilizados com a função de promover melhorias nas propriedades mecânicas da camada asfáltica, na resistência tanto aos efeitos de temperaturas elevadas, como na resistência à variação das mesmas, pois ambas podem causar deformações permanentes nos revestimentos asfálticos. Além disso, tais aditivos melhoram a resistência à contínua carga de tráfego, aumentando sua vida útil (SINICESP, 2017).

No que diz respeito ao asfalto modificado com adição de borracha de pneu, ou asfalto borracha, como é popularmente conhecido, pode ser realizado de duas formas, via seca: onde a borracha entra como agregado, já que a mesma é adicionada diretamente no misturador da usina, e por via úmida: a adição da borracha se dá a quente, resultando em uma mistura mais homogênea e com um maior aproveitamento das propriedades de elasticidade e resistência características da borracha. A norma que regulamenta esse material é a DNIT 111/2009-EM.

As vantagens do uso do asfalto borracha podem ser citadas em diferentes segmentos, como em questões técnicas: proporcionando maior resistência a deformações e fissuras, questões ambientais: os pneus recebem uma destinação alternativa, ao invés de serem descartados no meio ambiente e questões econômicas: apesar do custo de produção ser maior que o do asfalto

convencional, a quantidade utilizada de asfalto de borracha é menor para um mesmo trecho de pavimento (GRECA, 2009). O Quadro 1 apresenta detalhadamente o comparativo entre asfalto borracha e o asfalto convencional.

Quadro 1: Comparativo de custo entre asfalto borracha e o convencional.

	Grandezas	Cálculo	Unidades	Tipo de Asfalto		Diferença (%)
				CAP 50/70	AMB	
A	Quantidade de massa Asfáltica no CBUQ Produzido	-	Ton.	26.250,00	18.375,00	-30,0
B	Custo de Usinagem/Aplicação por tonelada de CBUQ aplicado	-	R\$/Ton.	200,00	230,00	15,0
C	Quantidade de massa x custo de usinagem/aplicação	AxB	R\$	R\$ 5.250.000,00	R\$ 4.226.250,00	-19,5
D	Teor de Asfalto	-	% Peso	5,00	5,50	10,0
E	Custo de asfalto por tonelada	-	R\$/Ton.	1.150,00	1.550,00	34,8
F	Custo de Asfalto no CBUQ	AxDxE	R\$	R\$ 1.509.375,00	R\$ 1.566.468,75	3,8
G	Custo Total da Obra	C + F	R\$	R\$ 6.759.375,00	R\$ 5.792.718,75	-14,3

FONTE: GRECA (2009)

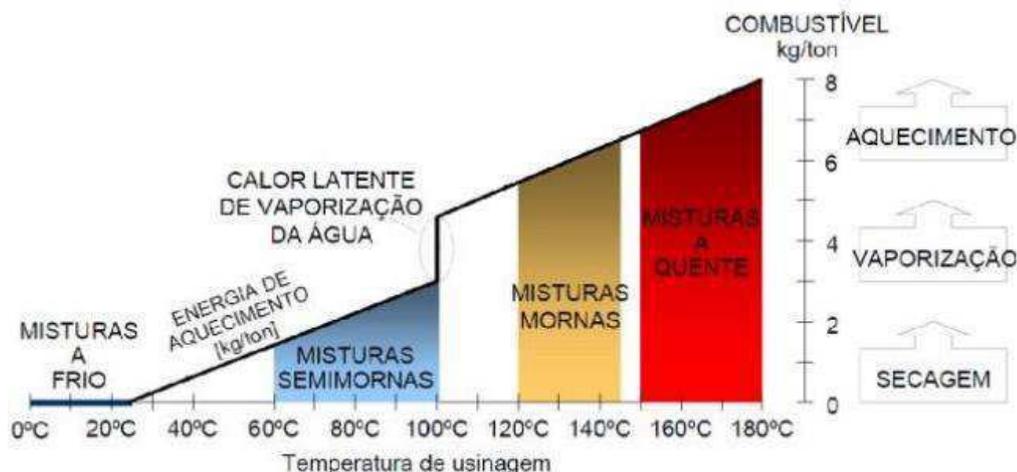
O asfalto modificado por polímero ou asfalto polímero é comumente utilizado em obras de pavimentação e infraestrutura urbana no país e proporciona uma maior estabilidade que o asfalto convencional. Dentre esses polímeros, os do tipo elastômeros termoplásticos são os mais recorrentes na modificação do asfalto. A norma regulamentadora do mesmo é a DNIT 129/2011-EM.

2.4 Propriedades Térmicas de Ligantes Asfálticos

As misturas asfálticas podem ser classificadas, em relação a temperatura de usinagem na qual são submetidas, em quatro grupos: misturas a frio, misturas semimornas, misturas mornas e misturas a quente. Outro fator que influencia nessa divisão diz respeito à quantidade de combustível que é utilizado no processo de produção. Na Figura 9, pode-se observar que as misturas que apresentam baixa energia são as misturas semimornas e mornas. Devido à necessidade de manutenção da temperatura, diminuição da viscosidade e

secagem dos agregados pétreos, verifica-se o alto consumo de combustível no processo de usinagem da mistura a quente.

Figura 9: Classificação de misturas asfálticas quanto à temperatura.



FONTE: (D'ANGELO *et al.*, 2008, *apud* CAVALCANTI, 2010).

Dentre esses quatro tipos de misturas asfálticas, a mais utilizada atualmente em obras de pavimentação é a mistura à quente, devido às boas propriedades de resistência e durabilidade. As mesmas são submetidas a temperaturas que vão de 150°C e chegam a 180°C.

Tendo em vista a baixa resistência que apresenta aos esforços de veículos que trafegam nos pavimentos, as misturas a frio são produzidas por meio de emulsões asfálticas e sem a necessidade de aquecimento. Como mostra a Figura 9, esse tipo de mistura é submetido a um valor de temperatura entre 20°C e 40°C. Já as misturas mornas e semimornas são executadas com temperaturas variando entre 100°C e 150°C, e 60°C e 100°C respectivamente. O que diferencia as mesmas, além do intervalo de temperatura de usinagem, são as tecnologias empregadas para produção de cada uma.

A manutenção das faixas específicas de temperatura para cada tipo de mistura é de fundamental importância na garantia da qualidade do asfalto, pois os ligantes precisam estar devidamente aquecidos para que o material se mantenha homogêneo e em harmonia com a temperatura do agregado. (BUDNY, et al., 2012).

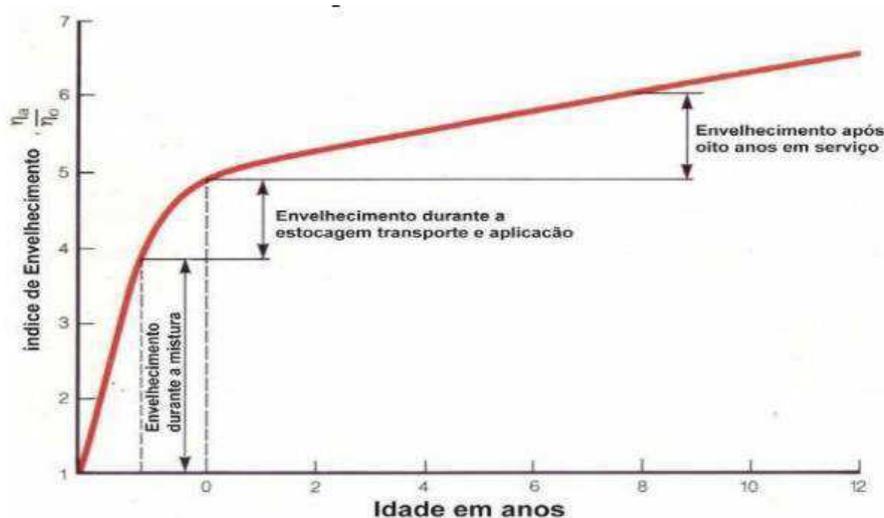
2.5 Usos e aplicações da lignina

Os materiais que constituem o asfalto, como o ligante e o agregado, estão em constante mudança devido aos fatores externos e ambientais aos quais estão expostos e que contribuem para o seu envelhecimento, como alta temperatura e exposição ao ar. Além disso, o volume de ligante também está diretamente relacionado a esse processo (FERNÁNDEZ, 2013).

O envelhecimento de misturas asfálticas está relacionado com a reologia das mesmas e, conseqüentemente, implica no aumento do ponto de amolecimento, no módulo de cisalhamento e na viscosidade, que reduz a penetração. Esse envelhecimento é causado devido à atuação de três mecanismos: volatilização do ligante constituinte do asfalto, que consiste na perda de massa do asfalto, por evaporação, provocada pelo aumento da temperatura durante o processo de produção, armazenamento, transporte e aplicação; a oxidação durante a vida útil; por fim, o endurecimento estérico, que diferentemente dos outros dois mecanismos mencionados anteriormente, pode ser revertido por meio do trabalho mecânico ou com o aumento da temperatura (SWIERTZ, 2010).

A Figura 10 ilustra a relação existente entre o tempo de vida do pavimento e o comportamento do envelhecimento do mesmo ao longo de cada etapa.

Figura 10: Relação entre o envelhecimento do asfalto e tempo de vida do mesmo



FONTE: Adaptado de Whiteoak (1991 apud MORILHA JUNIOR, 2004).

Diante desse processo de envelhecimento que as misturas asfálticas são constantemente submetidas e da necessidade cada vez maior do uso de fontes renováveis para fazer parte da composição desses materiais, a lignina vem sendo usada como ligante asfáltico para o aumento da resistência a deformações plásticas daquelas (WANG & DEREWECKI, 2013).

A lignina pode ser definida como um dos polímeros naturais mais abundantes da natureza, ao lado da celulose, que resulta do processo de separação por meio da deslignificação da madeira. A lignina tem a função biológica de proteger o tecido vegetal contra a oxidação juntamente com a ação de microrganismos. Além disso, ela não apresenta estrutura química definida, mas sua composição é feita por em sua maior parte por carbono, hidrogênio e oxigênio (WILDA et al., 2012).

As madeiras mais utilizadas como matéria prima nas indústrias de papel são coníferas e as folhosas, a composição comentada anteriormente apresenta porcentagens diferenciadas de acordo com cada espécie de madeira (Britt apud D'ALMEIDA, 1988), conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2: Porcentagens referentes à composição molecular 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).

Em consequência das propriedades antioxidantes da lignina, que inibem o processo de oxidação do produto asfáltico, por meio da doação de hidrogênio para radicais livres, essa substância apresenta várias aplicações, além de ser utilizada como ligante asfáltico, tais como: apresentar a capacidade de produção de fibras de carbono, devido ao melhor custo quando comparada com outros materiais; produção de bioprodutos de forma eficiente.

Williams & McCready (2008) realizaram estudos com quatro produtos à base de milho para fabricação de etanol, três deles possuíam uma porcentagem de 10% a 12% de lignina em sua composição, enquanto que um deles não apresentava lignina para servir como parâmetro comparativo para os demais.

Essa pesquisa tinha o objetivo de determinar a melhor proporção de lignina a ser utilizada com o ligante.

Foram realizados ensaios de desempenho, de estabilidade e ensaios de espectroscopia de infravermelho para estabelecer a quantidade de compostos resultantes do envelhecimento oxidativo. Após estes ensaios, foram obtidos resultados que mostraram que as propriedades de altas temperaturas foram beneficiadas com a adição da lignina, pois houve um aumento da rigidez do ligante. Contudo, as propriedades de baixas temperaturas foram prejudicadas.

Foi mostrado também que os produtos que não apresentaram lignina envelheceram bem mais do que os que apresentavam. A diminuição de compostos de envelhecimento oxidativo, reforça a teoria de que a lignina atua como antioxidante, através da espectroscopia de infravermelho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Os materiais usados na pesquisa são:

Ligante asfáltico

O ligante asfáltico usado na pesquisa foi doado pela empresa JBR Engenharia LTDA, classificado como CAP 50/70, convencional. A amostra foi denominada de “Ligante Puro”, como ilustrado na Figura 11.

Figura 11: Ligante asfáltico 50/70



FONTE: Dados da pesquisa (2019)

Lignina

A lignina utilizada na pesquisa foi proveniente do eucalipto, a mesma está ilustrada na Figura 12 e foi doada pela empresa Klabin, produtora e exportadora de papéis do Brasil.

Figura 12: Lignina do Eucalipto.

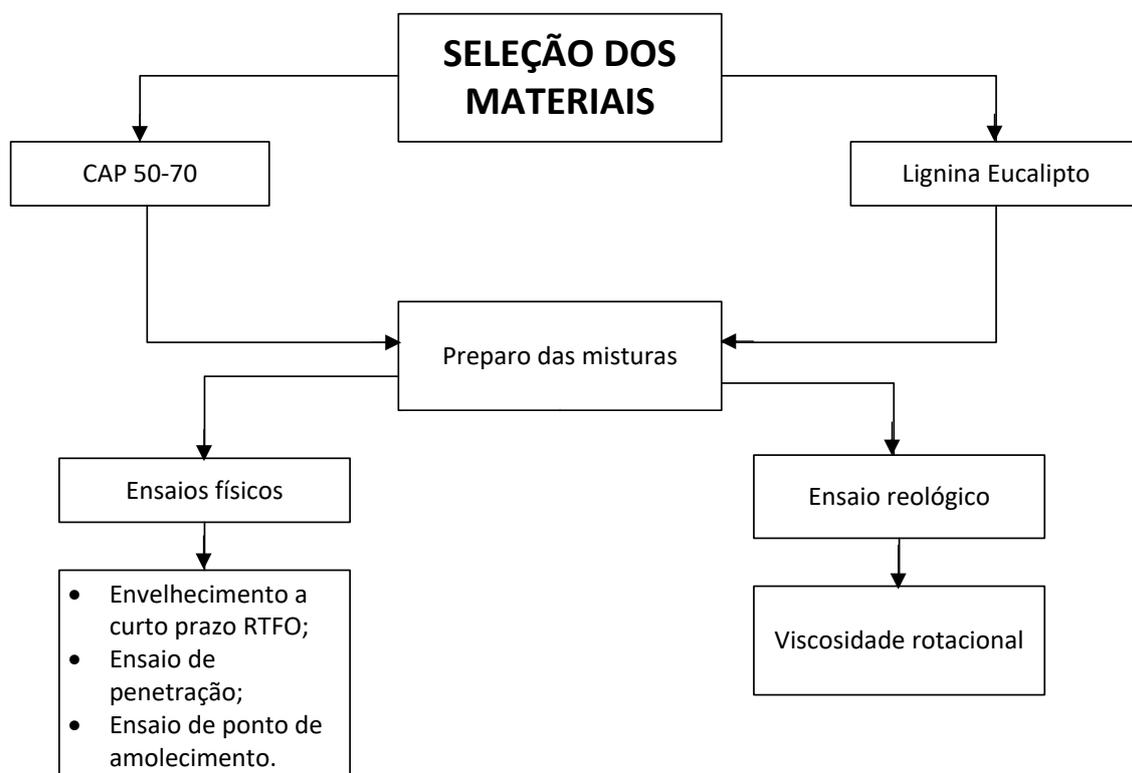


FONTE: Dados da pesquisa (2019)

3.2 Métodos

O programa experimental da pesquisa constituiu-se em duas etapas. Na primeira fase foi realizada a incorporação da lignina ao CAP 50/70 nos teores de 3%, 6% e 9%, na segunda etapa foram realizados os ensaios de caracterização física e reológica do ligante puro e modificado por adição de lignina. A Figura 13 ilustra o fluxograma das etapas da pesquisa.

Figura 13: Fluxograma das etapas da pesquisa



FONTE: Dados da pesquisa (2019)

3.2.1 Preparação das Misturas

Para o desenvolvimento da pesquisa, teores de lignina foram introduzidos ao ligante puro (CAP 50/70). As quantidades introduzidas no ligante tiveram como base o estudo de Santos (2017), onde a autora utilizou os teores de 3%, 6% e 9% de material orgânico, com isso, optou-se por incorporar esses teores para cada teor utilizado de lignina. Para a realização das misturas foi usado um

agitador mecânico FISATOM, Modelo 722. Os parâmetros utilizados para o processo das misturas foram seguidos de acordo com Santos (2017) onde foram usados uma rotação de 2000 rpm por um tempo de 30 minutos a uma temperatura de 160°C +/- 5°C.

Nesse processo, o ligante asfáltico puro foi aquecido em estufa, a uma temperatura de 150°C, em seguida foi reservada uma quantidade de 1200 g de ligante puro no agitador mecânico, onde foi aguardada a estabilização da temperatura de trabalho supracitada para efetuar o acréscimo da lignina nos teores de estudo. Posteriormente, a mistura foi retirada, esfriada à temperatura ambiente e, acondicionada em recipiente fechado para utilização posterior.

3.2.2 Nomenclatura das amostras

Na Tabela 1 encontram-se as amostras usadas na pesquisa e suas respectivas nomenclaturas para identificação.

Tabela 1: Nomenclatura das amostras da pesquisa.

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

FONTE: Dados da pesquisa (2019)

Procedimento de envelhecimento a curto prazo (RTFO)

O processo de usinagem provoca um desgaste no ligante asfáltico, rompendo ligações e volatizando alguns componentes, por isso é importante analisar a mistura antes e após uma simulação desse envelhecimento a curto prazo efetuado por meio da utilização do Rolling Thin Film Oven (RTFO) (Figura 14).

A execução dos ensaios seguiu as indicações preconizadas pela NBR 15235/2009 e foi realizado para todas os ligantes estudados nesta pesquisa. A

realização da simulação do envelhecimento dos ligantes durou 85 minutos, sob a temperatura de 165 °C, onde amostras de 35 gramas já aquecidas ficaram rotacionando e submetidas a aplicação de jatos de ar a cada 3 ou 4 segundos, de acordo com a norma.

Figura 14: Entufa RTFO (Rolling Thin Film Oven)



FONTE: Dados da pesquisa (2019).

Após finalizado o procedimento foi verificada a variação de massa que o ligante sofreu utilizando a Equação 1. As amostras envelhecidas foram novamente caracterizadas por meio dos ensaios empíricos e reológico de viscosidade rotacional.

$$\Delta M = \left(\frac{M_{inicial} - M_{final}}{M_{inicial}} \right) \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

ΔM = variação em massa (%)

$M_{inicial}$ = massa do CAP antes do RTFO (g)

M_{final} = massa do CAP após o RTFO (g)

3.3 Determinação das propriedades físicas dos ligantes

A determinação das propriedades físicas por meio de ensaios empíricos foi realizada pelo fato de serem ensaios atualmente utilizados pelas normas brasileiras na classificação dos ligantes asfálticos. Os procedimentos de ensaios

utilizados estão apresentados nas normas apresentadas na Tabela 2 e brevemente descritos em seguida.

Tabela 2: Ensaios para caracterização dos ligantes asfálticos.

Ensaio	Norma técnica
Penetração	DNIT - ME 155/2010
Ponto de Amolecimento	DNIT - ME 131/2010
Viscosidade Rotacional	NBR 15184/2004
Envelhecimento a curto prazo – RTFO	NBR 15235/2009

FONTE: Dados da pesquisa (2019)

3.3.1 Ensaio de penetração

O ensaio de penetração é um dos ensaios que determina a consistência do ligante asfáltico utilizado pelas normas brasileiras. Na execução do experimento foi medida a profundidade, em décimos de milímetro que uma agulha de massa padronizada (100 g) penetrou verticalmente na amostra de ligante com volume padronizado, durante 5 segundos, à temperatura de 25°C. Quanto maior a consistência do ligante menor a penetração da agulha padrão. O procedimento foi conduzido pela norma DNIT-ME 155/2010 e executado com o equipamento ilustrado na Figura 15.

Figura 15: Ensaio de penetração sendo executado

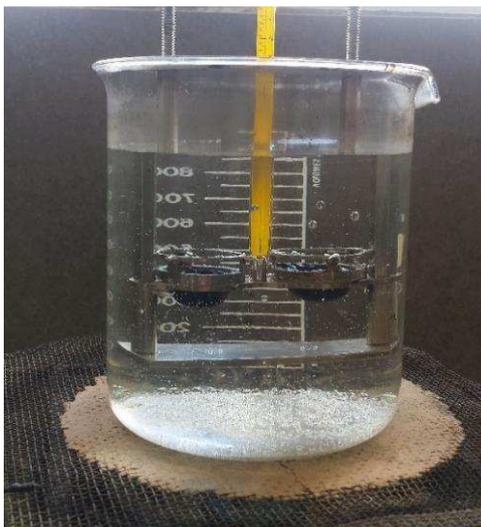


FONTE: Dados da pesquisa (2019)

3.3.2 Ponto de amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento é usado na definição do ponto de fusão de ligantes asfálticos, onde o ligante é submetido a um aquecimento gradual em banho de água a uma taxa de $5^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$. Este é regido pela norma DNIT-ME 131/2010. Duas amostras de ligante foram colocadas no béquer em anéis padronizados sob carga de duas bolas de aço com dimensões e peso também padronizadas, daí o ensaio é popularmente conhecido como ensaio de anel e bola. Uma placa de referência foi alocada próxima ao fundo do béquer, onde quando o ligante começa a escoar fazendo com que as esferas toquem esta placa. Neste momento foram documentadas as temperaturas do ensaio, que não podem diferir mais que 1°C entre as duas amostras ensaiadas. O ponto de amolecimento foi, então, a média das temperaturas lidas no termômetro e foi determinado para as amostras antes e após o envelhecimento a curto prazo. Este ensaio e a penetração possuem uma relação inversamente proporcionais, pois quando o ligante apresenta elevação do ponto de amolecimento consequentemente deve apresentar menor penetração da agulha padrão. Dessa maneira são classificados como ensaios que medem a consistência dos ligantes asfálticos. A Figura 16 ilustra a execução do ensaio de ponto de amolecimento.

Figura 16: Execução do ensaio de ponto de amolecimento



FONTE: Dados da pesquisa (2019)

Obtidos os resultados dos ensaios de penetração e de ponto de amolecimento torna-se possível calcular o índice de susceptibilidade térmica ou índice de penetração do ligante que indica a sensibilidade da consistência dos ligantes à variação de temperatura (BERNUCCI *et al.*, 2007) representado pela Equação 2.

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

Onde:

$(T^{\circ}C)$ = Ponto de amolecimento

PEN = Penetração a 25°C, 100 g, 5 segundos.

3.3.3 Viscosidade rotacional

Esse ensaio é usualmente utilizado pelas normas brasileiras para classificação dos ligantes asfálticos, apesar de fazer parte da metodologia SUPERPAVE e ser classificado como ensaio reológico. Por meio desse teste é possível encontrar as temperaturas utilizadas na usinagem e compactação, ele ainda merece destaque devido a possibilidade de identificar propriedades de consistência relacionadas ao bombeamento e estocagem (MARINHO FILHO, 2017).

A execução do ensaio seguiu a norma da NBR 15184/2004 que constitui na disposição de um cilindro com ranhuras padronizadas (spindle) dentro de uma cubeta com 8 gramas de ligante. Logo em seguida, foi efetuado um torque com uma haste interligada ao cilindro. O ligante foi então aquecido em temperaturas pré-estabelecidas por norma, de 135, 150 e 177°C, a 20, 50 e 100 rpm, respectivamente. O viscosímetro usado foi o Brookfield, modelo DV-III ULTRA, ligado a um controlador de temperatura conforme ilustrado na Figura 17. Os valores das viscosidades dos ligantes asfálticos puro e modificados foram medidas antes e após o envelhecimento a curto prazo, em todas as amostras.

Figura 17: Viscosímetros utilizados para medição das viscosidades dos ligantes asfálticos.



FONTE: Dados da pesquisa (2019).

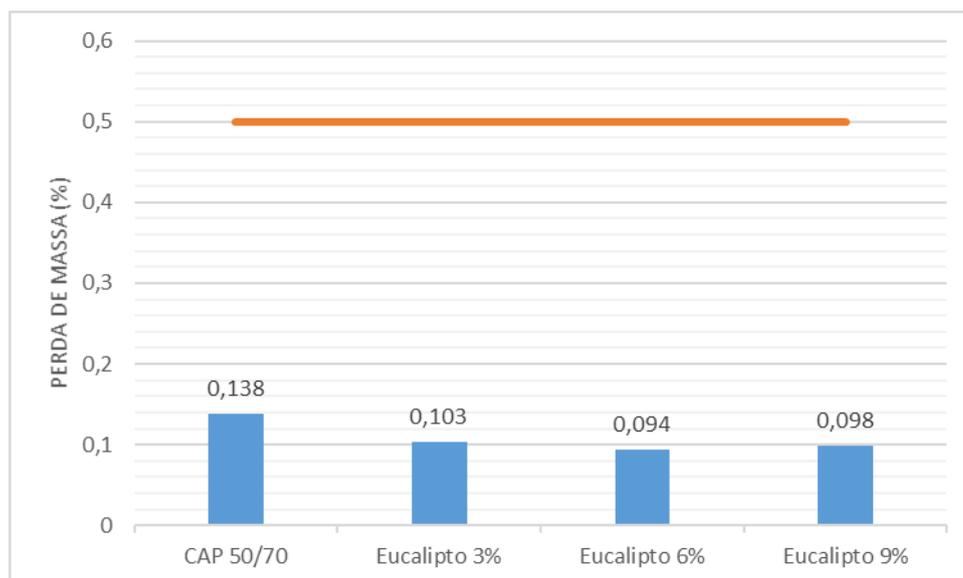
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão abordados os resultados referentes aos ensaios realizados na caracterização física do ligante a fim de avaliar o comportamento apresentado para o ligante puro, antes e após envelhecimento a curto prazo - RTFO e o ligante asfáltico modificado por adição de lignina nos teores de 3%, 6% e 9%, antes e após envelhecimento a curto prazo – RTFO. Além disso será avaliada a perda de massa ocorrida com o aumento da temperatura de ambos os ligantes.

4.1 Envelhecimento a curto prazo

No que diz respeito aos resultados das variações de perda de massa dos ligantes puro e modificados com a adição da lignina Eucalipto após o procedimento de envelhecimento à curto prazo, os resultados encontrados (Figura 18) estão dentro do que a norma DNIT- ME 095/2006, com variações abaixo de 0,5%. Desta forma, as amostras puderam ser utilizadas para a realização dos demais ensaios.

Figura 18: Variações da perda de massa.



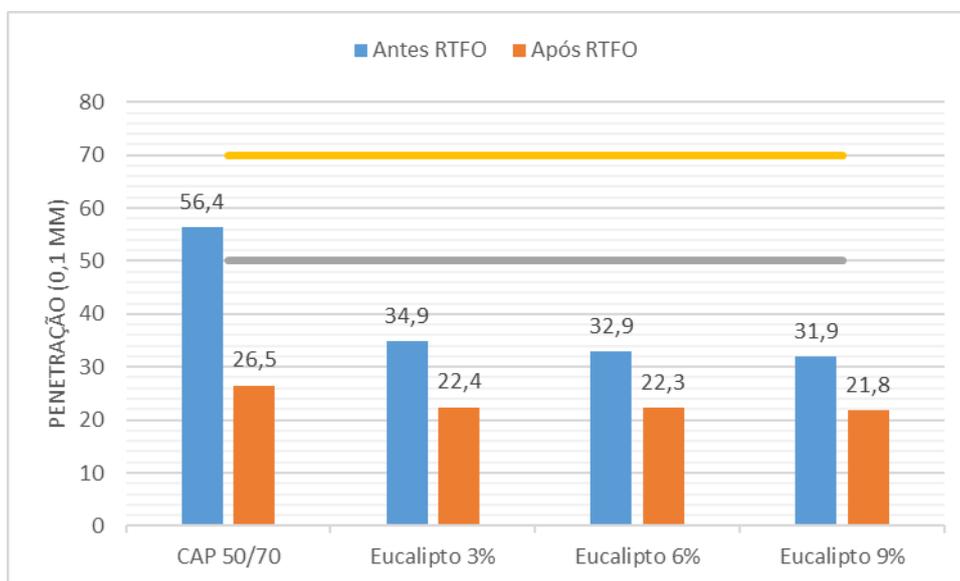
FONTE: Dados da pesquisa (2019)

Quando feita uma comparação com o ligante puro, os demais apresentaram variações de massa relativamente inferiores, ou seja, o processo de volatilização foi menor. Dessa forma, à medida que forem envelhecendo, os ligantes modificados com a adição de lignina Eucalipto, provavelmente apresentarão uma resistência maior ao enrijecimento e outros problemas enfrentados de forma recorrente nos pavimentos, como fadiga e deformações.

4.2 Ensaio de Penetração

A Figura 19 ilustra os resultados obtidos com o ensaio de penetração antes e após envelhecimento a curto prazo tanto para o ligante puro, quanto para os ligantes modificados. Deve-se considerar que a resolução nº 19 da Agência Nacional de Petróleo - ANP (2005) estabelece um intervalo entre 50mm e 70mm para valores de penetração do CAP 50/70 em ligantes puro, explicando assim os valores abaixo dessa faixa para os ligantes modificados, que não entram nessa resolução.

Figura 19: Ensaio de penetração para os ligantes



FONTE: Dados da pesquisa (2019)

A partir dos resultados obtidos pode-se aferir que a adição da lignina fez com que a consistência sofresse um aumento, já que a penetração foi reduzida em ambos os casos, antes e após o envelhecimento. Para efeito de comparação,

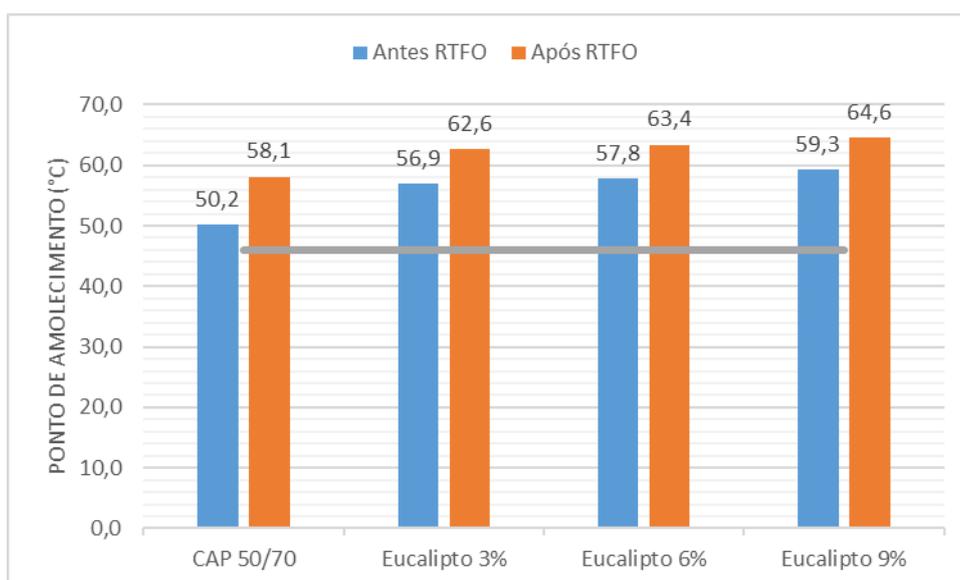
estes resultados são considerados aceitáveis, pois estudos feitos por autores como CARLOS (2016) e SANTOS (2017), relatam que o aumento da propriedade da consistência do ligante após a adição de lignina é considerado normal.

Após submetidos ao procedimento de envelhecimento a curto prazo, não somente os ligantes modificados, mas como também o puro, apresentaram um aumento de suas respectivas consistências, revelando assim um aumento na dureza do material que é resultante do processo de oxidação das amostras. Bulatovic et al. (2014) traz em seus estudos que essa alteração química dos ligantes após envelhecimento se dá por causa do aumento de asfaltenos no material.

4.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento

Os resultados obtidos do ensaio de Ponto de Amolecimento, que apresenta parâmetros regidos também pela resolução nº 19 da Agência Nacional de Petróleo – ANP/2005, para o ligante puro e os ligantes modificados com lignina Eucalipto estão ilustrados na Figura 20 a seguir. A partir disto, pode-se perceber um aumento na temperatura de ponto de amolecimento em todos os ligantes, demonstrando uma maior resistência a alterações provocadas pela elevação da temperatura.

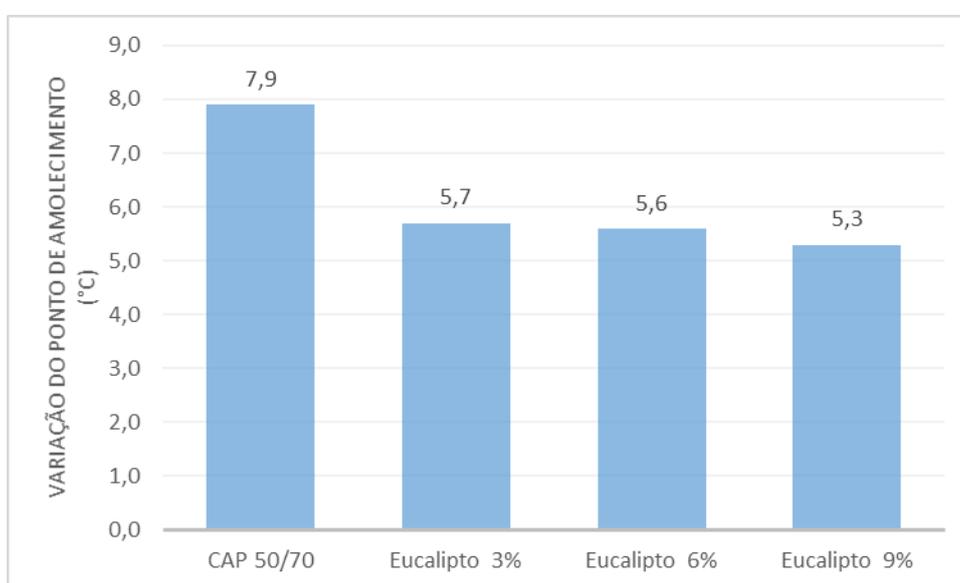
Figura 20: Ensaio de ponto de amolecimento para os ligantes



FONTE: Dados da pesquisa (2019)

De acordo com a norma DNIT - EM 95/2006, após realizado o procedimento de envelhecimento a curto prazo, o ponto de amolecimento do material não deve variar um máximo de 8°C, comparando-se ao ligante após o RTFO. Após calculadas essas variações, os resultados foram ilustrados na Figura 21 e podem ser considerados aceitáveis, pois nenhum apresentou uma variação de temperatura maior que a especificada por norma. Contudo, os ligantes modificados apresentaram variações menores do que as obtidas pelo ligante puro, demonstrando que, devido à presença do aditivo, os materiais tendem a apresentar uma maior resistência ao envelhecimento.

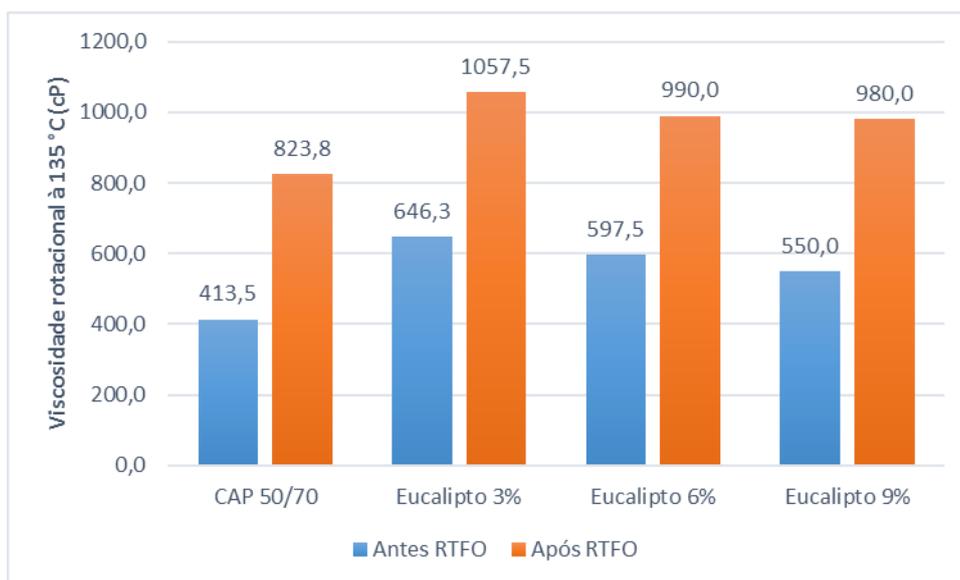
Figura 21: Variação do ponto de amolecimento



FONTE: Dados da pesquisa (2019)

4.4 Ensaio de Viscosidade Rotacional

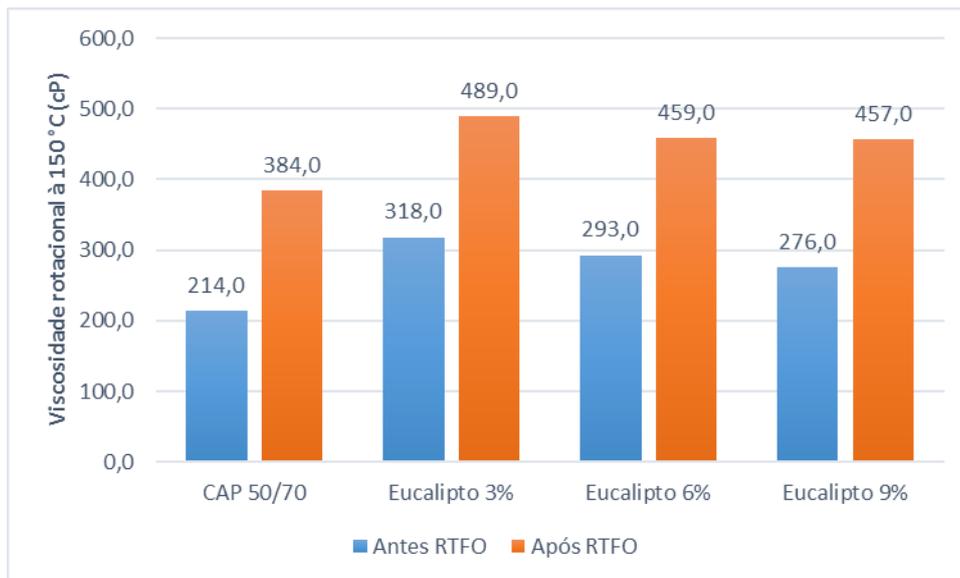
Levando-se em conta que o material necessário para realização de pavimentação asfáltica deve ter uma boa trabalhabilidade em campo, a determinação do parâmetro da viscosidade no ligante é de fundamental importância, pois está diretamente associada as elevadas temperaturas que permitem uma boa trabalhabilidade entre ligantes e agregados (SANTOS, 2017). Os resultados da viscosidade à 135°C antes e após o processo RTFO estão representadas na Figura 22 a seguir:

Figura 22: Viscosidade rotacional à 135°C

FONTE: Dados da pesquisa (2019)

O limite mínimo estabelecido pela Resolução ANP n° 19/2005 para valores de viscosidade do ligante, realizados em ensaios a temperatura de 135°C, é de 247 cP. Já para o limite máximo, o método utilizado pelo SUPERPAVE, à temperatura de 135°C é de 3000 cP. Portanto, todos os dados encontrados estão dentro dos parâmetros aceitáveis.

Quando comparado com os ligantes modificados, o material puro apresentou uma viscosidade inferior, fazendo indicativo da propriedade de fluidez alta e, conseqüentemente, melhor trabalhabilidade com os agregados. Já no que diz respeito ao Ensaio de Viscosidade Rotacional realizado à temperatura de 150°C, os resultados podem ser mostrados na Figura 23.

Figura 23: Viscosidade rotacional à 150°C

FONTE: Dados da pesquisa (2019)

Todos os dados encontraram-se dentro dos parâmetros permitidos à realização do Ensaio de Viscosidade Rotacional à 150°C, sendo o limite mínimo de 112 cP, de acordo com a Resolução ANP nº 19/2005.

Os resultados obtidos do procedimento, desta vez à 177°C, estão expostos na Figura 24.

Figura 24: Viscosidade rotacional à 177°C

FONTE: Dados da pesquisa (2019)

Todas as amostras estão dentro dos valores aceitáveis, pois o intervalo desejado para a viscosidade nessa temperatura, de acordo com a ANP nº19/2005, é de 28-114 cP. Como já era esperado, o procedimento de RTFO foi responsável pelo aumento da viscosidade, quando comparados os materiais, puro e modificado, antes e depois do envelhecimento das amostras.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 Considerações Finais

Com base nos objetivos específicos da pesquisa, e de acordo com os resultados obtidos pode considerar que:

Os ligantes modificados por adição de lignina proporcionaram maior dureza e menor ponto de fusão permitindo suportar maiores temperaturas em campo e contribuindo de maneira positiva na resistência a deformação e ao envelhecimento.

O aumento da resistência a deformação deve-se a diminuição da penetração e conseqüentemente aumento da consistência do material modificado. Juntamente com essa redução verificou-se o aumento do ponto de amolecimento o que corrobora ainda mais essa afirmação. O aumento da resistência ao envelhecimento foi notado pelas menores variações dessas mesmas propriedades antes e após o procedimento de envelhecimento a curto prazo nos ligantes modificados.

Os ligantes modificados com lignina submetidos ao envelhecimento RTFO demonstraram menor perda de massa, indicando que esta incorporação reduziu a volatilidade de componentes do ligante. Além disso, a avaliação do índice de envelhecimento e dos parâmetros empíricos, antes e após esse procedimento, mostram que a adição da lignina contribuiu para retardar o envelhecimento a curto prazo e conseqüentemente aumentar a vida útil dos ligantes modificados.

Além disso, deve-se levar em consideração a questão ambiental que está atrelada a esses resultados, pois um material que seria descartado por indústrias de papel, provavelmente de forma inadequada, será utilizado como aditivo para amenização dos problemas encontrados no processo de pavimentação asfáltica.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

Para melhor abordagem sobre o conteúdo tratado nessa pesquisa, sugere-se realizar os seguintes estudos adicionais:

- Avaliar as propriedades térmicas e reológicas dos ligante modificado por lignina antes e após envelhecimento a curto prazo;

- Estudar a interferência da adição de lignina nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas;
- Realizar uma análise de custo-benefício da utilização desse material como aditivo no procedimento de pavimentação asfáltica.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Diones Henrique. **Análise comparativa do asfalto borracha com o asfalto convencional e o asfalto com adição de polímeros**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Universitário de Formiga – UNIFOR-MG, Formiga, 2015. Disponível em: https://repositorioinstitucional.unifor.br:21074/xmlui/bitstream/handle/123456789/296/TCC_DionesHenriqueAraujo.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Acesso em: 20 jun. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14855**: Ligantes asfálticos - Determinação da solubilidade em tricloroetileno. São Paulo, 2015.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6293**: Ligantes asfálticos - Determinação da ductilidade. São Paulo, 2015.

BERNUCCI. L. B. *et. al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Asfalto**. 2017. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/petroleo-e-derivados2/asfalto>. Acesso em: 19 jun. 2019.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Resolução nº 19**, de 11 de julho de 2005. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2005/julho&item=ranp-19--2005>.

Acesso em: 20 jun. 2019.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Resolução nº 2**, de 14 de janeiro de 2005. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2005/janeiro&item=ranp-2-2005>. Acesso em: 20 jun. 2019.

- BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Resolução nº 32**, de 21 de setembro de 2010. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2010/setembro&item=ranp-32--2010>. Acesso em: 20 jun. 2019.
- BUDNY, Jaelson. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.
- BULATOVIC, V. O.; REK, V.; MARKOVIC, J. Rheological Properties of Bitumen Modified with Ethylene Butylacrylate Glycidylmethacrylate. **Polymer Engineering & Science**, v. 54, n. 5, p. 1056–1065, 2014.
- CAVALCANTI, Leonardo Santana. **Efeito de alguns modificadores de ligante na vida de fadiga e deformação permanente de misturas asfálticas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp134263.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2019.
- COSTA, C., NOGUEIRA, L., GIOIA, J., **Mistura Asfáltica com o Uso de Modificador TLA (Trinidad Lake Asphalt)**. 39ª Reunião Anual de Pavimentação – RAPv. Recife, Pernambuco, BRA, 2008.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias**. 2018. Disponível em: [https://pesquisarodovias.cnt.org.br/Downloads/Edicoes//2018/Relat%C3%B3rio%20Gerencial/Pesquisa%20CNT%20\(2018\)%20-%20ALTA.pdf](https://pesquisarodovias.cnt.org.br/Downloads/Edicoes//2018/Relat%C3%B3rio%20Gerencial/Pesquisa%20CNT%20(2018)%20-%20ALTA.pdf). Acesso em: 17 jun. 2019.
- DECONCIC. **Estudo da cadeia produtiva do asfalto: diagnóstico de problemas e proposições de aprimoramento**. São Paulo: FIESP, 2009.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE – **DNIT – EM 095/2006**. Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação de material, Rio de Janeiro, 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE – **DNIT – EM 111/2009**. Pavimentação flexível - Cimento asfáltico modificado por borracha de pneus inservíveis pelo processo via úmida, do tipo “Terminal Blending” - Especificação de material. Rio de Janeiro, 2009.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE – **DNIT – EM 129/2011**. Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material. Rio de Janeiro, 2011.

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.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTE – **DNIT – ME 155/2010**. Material Asfáltico – Determinação da penetração, Rio de Janeiro, 2010.

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.

FENGLER, R.Z. **Caracterização de ligantes e misturas asfálticas modificados com a adição de trinidad lake asphalt**. 2018. (Dissertação em Engenharia Civil) – Instituto de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

GRECA ASFALTOS. **Utilização do Asfalto Borracha em Relação ao Asfalto Convencional**. 2009. Disponível em: https://servicos.unitoledo.br/repositorio/bitstream/7574/236/1/santos_silva_bertequini_2017.pdf. Acesso em: 20 jun. 2019.

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). **Pesquisa Anual da Indústria da Construção 2015**. Rio de Janeiro: IBGE, 2016. Disponível em: <https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/industria/paic/2015/default.shtm>. Acesso em: 21 jun. 2019.

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

LIMA, C. S. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará/Fortaleza, 2008.

LUZ, Priscila Maria Sousa Gonçalves. **Avaliação Reológica do Ligante Asfáltico 50/70 Modificado com Lignina das Madeiras Pinus e Eucalipto**. (Dissertação em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

MAHMOUD, A. F. F. e H. Bahia (2004) **Using the Gyrotory Compactor to Measure Mechanical Stability of Asphalt Mixtures, Wisconsin Highway Research Program**. Projeto Número 0092-01-02.

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

ONOFRE, F. C.; V. T. F. C. Branco; J. B. Soares e A. L. Faxina. 2013. **Avaliação do Efeito de Ligantes Asfálticos Modificados na Resistência à Deformação Permanente de Misturas Asfálticas Densas**. Transportes, v. 21, n. 3, p. 14-21. DOI:10.4237/transportes.v21i3.685.

ROSA JÚNIOR, José Manoel. **Estudo das propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo (CAP50/70) modificado com polímeros funcionalizados**. 2015. (Dissertação em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SALES, Patrícia de Macedo. **Avaliação das características físicas e mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição do CCBit**. 2015. (Dissertação em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.

SANTOS, Nataliene Silva dos. **Propriedades reológicas do ligante asfáltico (CAP 50/70) modificado por adição de lignina**. 2017. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

SILVA, Gutemberg Gonçalves da. **Estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, 2016.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. Vol. 1. 2ª ed. ampl. São Paulo: PINI, 2007, 761p.

SINICESP. **Ligantes asfálticos**. São Paulo: [s. n.], 2010. Disponível em: <http://sinicesp.org.br/materias/2010/bt05a.htm>. Acesso em: 19 jun. 2019.

STIADY, J., A. Hand e T. White (2002). **Quantifying Contributions of Aggregate Characteristics Using PURWheel Laboratory Tracking Device**. Aggregate Contribution to Hot-Mix Asphalt Performance – ASTM STP 1412, 1-15, Orlando, Florida, EUA, Novembro.

Swiertz D, 2010. **Asphalt aging characteristics, rheological implications and laboratory techniques**, Madison: University of Wisconsin.

TRIPADVISOR. 2015. **La Brea Pitch Lake, Trinidad**. Disponível em: https://www.tripadvisor.com.br/LocationPhotoDirectLink-g147388-d150283-i87965595-La_Brea_Pitch_Lake-Trinidad_Trinidad_and_Tobago.html. Acesso em: 19 jun. 2019.

VIANA, D. 2019. **Guia da Engenharia: Entenda o que é um pavimento asfáltico**. Disponível em: <https://www.guiadaengenharia.com/pavimento-asfaltico/>. Acesso em: 20 jun. 2019.

WANG, H.; DEREWECKI, K. **Rheological Properties of Asphalt Binder Partially Substituted with Wood Lignin**. Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements, p. 977-986, 2013.

Wilda, P.J., Huijgena, W.J.J.; Heeresb H.J.,2012. **Pyrolysis of wheat straw-derived organosolv lignin**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 93 95–103.

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