



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

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO CAP
50/70 MODIFICADO POR ADIÇÃO DE LIGNINA PROVENIENTE DE PINUS**

Victor Mateus Leite Veloso

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

Campina Grande - PB

28/06/2019

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO CAP
50/70 MODIFICADO POR ADIÇÃO DE LIGNINA PROVENIENTE DE PINUS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande - PB

28/06/2019

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

Victor Mateus Leite Veloso

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

28/06/2019

EPÍGRAFE

“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.”

Ayrton Senna

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Edson Veloso e Maria Inês, os irmãos Felipe Veloso, Maria Celeste, Olga Lanusa e Edson Vinícius, e minha Tia Olga Rosina por todo o apoio, amor, paciência e carinho.

À minha namorada Paula Ferreira por sempre estar ao meu lado me dando forças e me apoiando com todo amor.

Aos meus amigos, principalmente Ana Cristina, Flávio Lucena, Paula Almeida, Raabi Inarair, Ricardo Nóbrega e Wanderson Pio, que sempre estiveram presentes nos melhores momentos assim como nos piores.

À minha professora e coorientadora Dr^a. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça por toda a ajuda e grande conhecimento repassado.

E por fim a todos que contribuíram para que essa caminhada fosse concluída.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Via Ápia em Roma.	16
Figura 2: Pavimentação asfáltica.	17
Figura 3: Cimento Asfáltico de Petróleo	18
Figura 4: Sistema de Refino do Petróleo.....	19
Figura 5: Diagrama de blocos da classificação de ligantes asfálticos segundo o DNER.	20
Figura 6: Classificação de misturas de acordo com a temperatura e consumo de combustível para produção.	22
Figura 7: Exemplo de asfalto modificado (Gap Graded).	22
Figura 8: Lignina em uma célula.	24
Figura 9: Estufa utilizada no ensaio de RTFO.....	26
Figura 10: Ensaio de Penetração.....	26
Figura 11: Equipamento utilizado no ensaio de Ponto de Amolecimento.....	27
Figura 12: Viscosímetro Brookfield.....	28
Figura 13: Perda de massa para cada amostra.	29
Figura 14: Ensaio de penetração antes e após o RTFO.	30
Figura 15: Penetração retida	31
Figura 16: Ponto de Amolecimento antes e após RFTO	32
Figura 17: Índice de Susceptibilidade Térmica.....	33
Figura 18: Viscosidade a 135°C	34
Figura 19: Viscosidade a 150°C	34
Figura 20: Viscosidade a 177°C	35

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Nomenclatura das mostras	25
---	----

RESUMO

As rodovias possibilitam a integração econômica entre as regiões do país e proporcionam grandes benefícios a sociedade, sendo um dos principais sistemas de transportes utilizados para o deslocamento de pessoas e bens. Portanto, é importante que essa infraestrutura seja mantida de forma adequada e satisfatória, para que os problemas relacionados a ela não interfiram nos custos operacionais dos veículos, tampouco elevem os preços dos serviços e bens comercializados. Deste modo, este estudo teve como principal objetivo avaliar as propriedades físicas do ligante asfáltico modificado por adição de lignina proveniente do pinus. Foram realizados ensaios de ponto de amolecimento, viscosidade e penetração para o ligante modificado com lignina nos teores de 3%, 6% e 9%, antes e após envelhecimento. Observou-se que o teor de 3% de lignina conferiu maior resistência e uma tendência a menor desgaste com o envelhecimento, para o teor de 6% de lignina recomenda-se uso para locais com altas variações de temperatura e, para o teor de 9% de lignina obteve resultados satisfatórios em resistência.

Palavras-chave: Asfalto; Resistência; Rodovias.

ABSTRACT

The highways allow the economic integration between the regions of the country and provide great benefits to society, being one of the main transport systems used for the displacement of people and goods. Therefore, it is important that this infrastructure be maintained adequately and satisfactorily, so that the problems related to it do not interfere in the operational costs of vehicles, nor raise the prices of services and goods traded. Thus, this study had as main objective to evaluate the physical properties of the modified asphaltic binder by addition of lignin from pine. Softening point, viscosity and penetration tests were performed for the lignin modified binder at 3%, 6% and 9%, before and after aging. It was observed that the content of 3% of lignin gave a higher resistance and a tendency to less wear with the aging, for the content of 6% of lignin it is recommended to use for places with high temperature variations and, for the content of 9 % lignin obtained satisfactory resistance results.

Key words: Asphalt; Resistance; Highways.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 . JUSTIFICATIVA	13
1.2 . OBJETIVOS	13
1.2.1. Objetivo Geral.....	13
1.2.2. Objetivos Específicos	14
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO.....	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1. HISTÓRICO	15
2.2. LIGANTE ASFALTICO: PROPRIEDADES.....	18
2.3. MODIFICAÇÕES DE LIGANTES ASFÁLTICOS.....	22
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	24
3.2. MATERIAIS	24
3.3. MÉTODOS	24
3.3.1. Produção da mistura do ligante asfáltico com a adição do óleo ...	24
3.3.2. Nomenclatura das amostras	25
3.3.3. RTFO (Estufa de Filme Fino Rotativo).....	25
3.3.4. Caracterização física do ligante asfáltico de petróleo.....	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.2. Envelhecimento a curto Prazo-RTFO.....	29
4.3. Ensaio de Penetração	30
4.4. Ensaio de Ponto de Amolecimento	31
4.5. Suscetibilidade Térmica	32
4.6. Ensaio de Viscosidade Rotacional	33
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	36
5.1 Considerações Finais.....	36
5.2 Sugestões para pesquisas futuras	36
REFERÊNCIAS.....	37

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a extensão de rodovias pavimentadas no Brasil aumentou 23,2%. Enquanto em 2001, o país tinha 170,9 mil quilômetros com pavimento (9,8% do total), em 2015, esse número chegou a 210,6 mil quilômetros (12,2% do total) (AGÊNCIA BRASIL, 2016).

No Brasil a malha rodoviária é a que mais recebe investimentos e conseqüentemente a mais desenvolvida, contudo sua manutenção é feita de forma escassa e falha. De acordo com o Anuário CNT do Transporte, no ano de 2017 as rodovias passaram para um total de 1.720.700,31km de extensão. Contudo, apenas 213.452,81 km são de rodovias pavimentadas, usualmente em asfalto, e 8,9% dessas estão em ótimo estado geral de conservação, mas cerca de 28,2% em estado ruim ou péssimo.

Tendo em vista a existência de rodovias não asfaltadas e a degradação das já pavimentadas atrelado ao crescimento mundial do desenvolvimento sustentável, consequência da alta depreciação do meio ambiente mundial, relacionam materiais biodegradáveis às pavimentações para que assim possa-se ter crescimento em tecnologias sustentáveis.

O asfalto é definido como um material aglutinante não volátil, à prova d'água proveniente do petróleo cru, ou se encontra em jazidas na forma de asfalto natural, solúvel e com alta viscosidade ou praticamente um sólido à temperatura ambiente (ECS, 2000). São várias as suas aplicações além do uso em pavimentação, como o uso elétrico, proteção a corrosão, impermeabilização. Contudo, claramente o seu uso na pavimentação é o mais importante e mais utilizado de todos (LUCENA, 2005).

Existem múltiplas causas para que haja intensa utilização do asfalto em pavimentação, as que se destacam são: a impermeabilização e resistência à ação da maioria dos ácidos, álcalis e sais, propicia grande ligação entre agregados, atua como um ligante possibilitando uma flexibilidade que possa ser controlada; é duradouro, pode ser utilizado após o aquecimento ou emulsionado (BERNUCCI et al., 2008).

No Brasil é utilizada esta denominação de CAP (Cimento Asfáltico de Petróleo) pois o mesmo é semissólido a baixas temperaturas, em temperatura ambiente tende a ser visco elástico e em temperatura mais altas é um líquido,

além disso, para determinadas temperaturas ele se enquadra em limites de consistência (BERNUCCI et al., 2008).

Sabe-se da necessidade de utilização de combustíveis fósseis para desenvolvimento de uma nação, como o petróleo e seus derivados. Acima de 80% da energia e por volta de 90% das substâncias orgânicas do mundo são originárias dos combustíveis fósseis (FERNANDO et al., 2006; INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2011). Sendo assim, é necessário a implementação desses combustíveis, com outras substâncias biodegradáveis, para que haja uma melhor utilização dos mesmos e que se tenham práticas sustentáveis.

Assim, este estudo tem como principal objetivo avaliar as propriedades físicas do ligante asfáltico modificado por adição de lignina proveniente do pinus.

1.1. JUSTIFICATIVA

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

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

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

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

1.2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar fisicamente o ligante asfáltico CAP 50/70 modificado por adição de lignina do pinus nos teores de 3%, 6% e 9% antes e após envelhecimento a curto prazo;

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

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

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

Fundamentação Teórica – São abordados assuntos relacionados aos ligantes asfálticos, às suas modificações e aplicações na pavimentação asfáltica.

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

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

Considerações Finais - São apresentadas as etapas de desenvolvimento da pesquisa

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

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão abordados dados bibliográficos relevantes para o desenvolvimento dessa pesquisa, tais como históricos de pavimentação pelo mundo, propriedades físicas do asfalto betuminoso e modificação do mesmo por lignina.

2.1. HISTÓRICO

A utilização de asfalto se mistura com o início da civilização. Possuem registros da aplicação do asfalto 180 mil anos atrás na Síria em EL Kowm Basin. Naquela época o asfalto era empregado, em forma de um tipo de cola, em utensílios domésticos assim como as ferramentas utilizadas para geração de faísca e assim produção de fogo (LESUEUR, 2009).

Existem relatos provindos da antiga era que expõem o emprego da pavimentação durante as construções das pirâmides Egípcias entre os anos de 2600 e 2400 a.C. Possivelmente são as vias mais antigas a serem pavimentadas para a utilização do transporte de mantimentos e equipamentos (BERNUCCI *et al.*, 2006). Segundo Saunier (1936), para facilitar o transporte de pessoas, equipamentos e cargas, era utilizada uma técnica para umedecer as vias por meio de alguns produtos como azeite, musgo molhado e também água.

Foi no Império Romano a criação de um sistema rodoviário com mais de 100.000 Km de extensão, objetivando a locomoção do seu exército de forma mais rápida. É por causa disso que se criou um ditado popular que diz que todos os caminhos levam a Roma e um exemplo disso é a Via Ápia mostrada na Figura 01, a mesma foi de grande importância para o Império. O método utilizado para a concepção dessas vias é resumido abaixo (FRANZ *et al.*, 2012):

Primeiro, o terreno era estaqueado, para ganhar rigidez. Depois, espalhava-se sobre ele bastante calcário grosso – o rudus -, o qual era bem socado. Por fim, vinha uma camada de calcário mais fino – o nucleus – nivelado a capricho. E só então se assentava o revestimento final: grandes pedras chatas, rigorosamente ajustadas, que proporcionavam uma superfície lisa, ótima de se pisar. O que era muito importante, pois, no tempo dos romanos, os exércitos se deslocavam a pé (FRANZ *et al.*, 2012).

Figura 1: Via Ápia em Roma.



Fonte: Roberto Aquilano. Acesso em: 14 de novembro de 2018.

Contudo, com a priorização do trânsito terrestre ao marítimo no Império Romano, não demorou muito para que houvessem transtornos no trânsito de Roma, afinal a dimensão do império e seu grande volume de tropas que precisavam ser deslocadas constantemente aumentavam demasiadamente o fluxo no centro da cidade. Sendo assim, o Imperador Júlio César sentiu a necessidade de banir, durante o dia, o tráfego de veículos sobre rodas como também um limite máximo de carga nos pontos críticos das cidades por motivos de que as vias não suportavam o volume de pessoas, veículos e peso que eram transportados diariamente (HONORATO, 2004).

Alguns anos depois, chegou a vez da Espanha encontrar problemas nas suas vias, ao contrário de Roma, o principal fator causador das complicações eram a segurança de quem utilizava-se dos caminhos, principalmente àqueles que usufruíam da via de Santiago a Compostella. É nesse momento em que as vias públicas são consideradas bem de uso comum para todos os homens e assim não poderiam ser comprados. A partir daí houveram solicitações para uma maior segurança das pessoas que transitavam pelos caminhos, surgindo a Paz do Caminho e assim quem viajava era tão importante quanto o Rei e assim tinham proteção do exército real (HONORATO, 2004).

Entretanto, após a concepção do motor à combustão interna durante a Revolução Industrial (1760-1830) e assim a invenção dos automóveis, que só chegaram em 1897 no Brasil, os problemas relacionados ao transporte de pessoas e bens foram para outro patamar (FRANZ et al., 2012).

Apesar disso, o avanço do setor rodoviário do território brasileiro foi dado apenas em 1946 quando foi instaurado o Fundo Rodoviário Nacional e após isso a criação da Petrobrás em 1953 e posteriormente a primeira fábrica de asfalto da empresa em 1955, produzindo cerca de 116 mil toneladas ao ano de asfalto. A partir daí, começam os projetos de vias rodoviárias para transporte de cargas e passageiros a exemplo da rodovia Transamazônica e a Ponte Rio-Niterói (Mothé, 2009).

Desde o final da década de 90 há um aumento do tráfego de veículos nos grandes centros urbanos fazendo com que as vias necessitem de um pavimento que suporte esforços constantes e de maior intensidade, afinal a camada de revestimento é a responsável por receber a maior parte do esforço. Características impostas por Bernucci *et al* (2008), para que haja um bom exercício da camada de revestimento são: estabilidade, durabilidade e flexibilidade.

É notório a utilização das estradas como o principal modo de transporte de cargas para os portos. Quando comparado a outros países com grandes dimensões fica ainda mais evidente a dependência do Brasil com esse modal. No Brasil cerca de 60% do transporte nacional de cargas é feito através das rodovias diferentemente de países como Estados Unidos, Austrália e China em que o uso do modal rodoviário é de apenas 26%, 24% e 8% respectivamente (Centro de Estudos em Logística - CEL et al., 2002). Na figura 2, tem-se exemplo de pavimentação em rodovias.

Figura 2: Pavimentação asfáltica.



Fonte: Além da inércia. Acesso em: 14 de novembro de 2018.

2.2. LIGANTE ASFALTICO: PROPRIEDADES

O petróleo (do Latin *petra*, pedra e *oleum*, óleo) é descoberto seja nas camadas abaixo da superfície terrestre assim como sob a superfície marítima do planeta. A partir de estudos geológicos, a formação do petróleo é realizada através da ação da natureza, ela torna a matéria orgânica proveniente de animais e vegetais em decomposição, após milhões de anos em camadas profundas de mares e lagos, e sob condições de alta pressão e temperatura transformam a partir de reações termoquímicas os depósitos orgânicos em petróleo (LEVORSEN, 1958 *apud* CORREIA, 2006). Na figura 3 tem-se a representação do CAP.

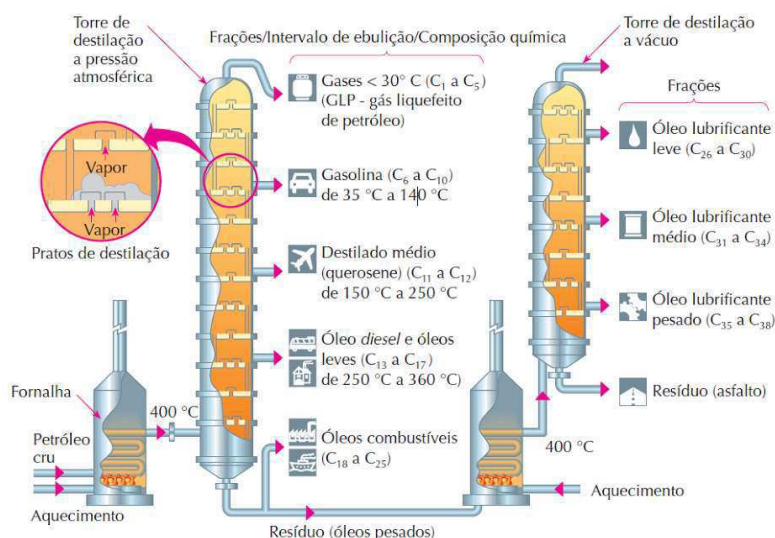
Figura 3: Cimento Asfáltico de Petróleo



Fonte: Novas técnicas de Asfalto. Acesso em: 10 de junho de 2019.

Petróleos ou óleos crus possuem diferenças nas suas propriedades físico-químicas, desde suas colorações, negro e castanhos, até suas consistências entre viscosos e fluídos, possuindo composição química hegemonicamente parafínica, aromática ou naftênica. São estimados cerca de 1.500 tipos de petróleo no planeta terra, em contrapartida, apenas uma baixa porcentagem deles é julgada como apropriada para a produção do asfalto (SHELL, 2003). Os petróleos podem ser diferenciados a partir da quantidade de asfalto em sua composição (PINTO, 1991; LEITE, 1999; SHELL, 2003). Na Figura 4 ilustra-se o sistema de refino de petróleo.

Figura 4: Sistema de Refino do Petróleo.



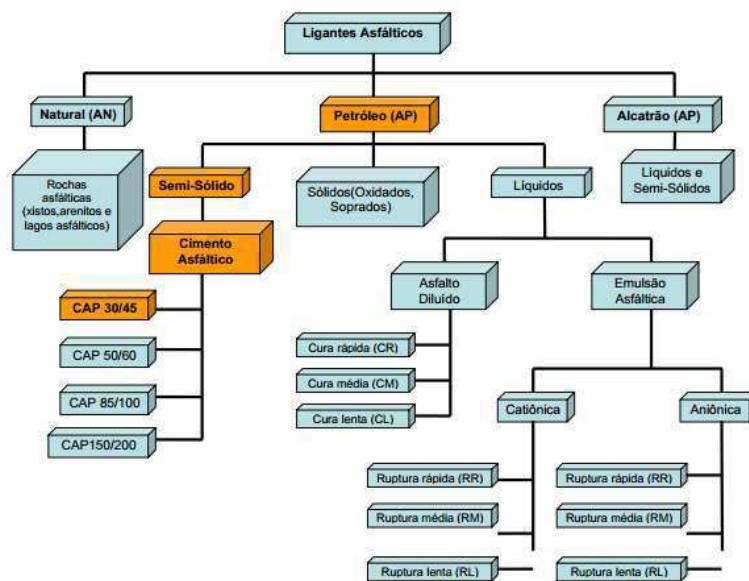
Fonte: Blog de engenharia Química. Acesso em: 14 de novembro de 2018.

De 5 a 25% da composição do CAP é proveniente dos asfaltenos que possuem grande peso molecular e são materiais complexos. Sendo assim, a quantidade de asfaltenos influencia as características do CAP, pois se o teor de asfaltenos for alto mais viscoso é o CAP e quando menor o teor de asfaltenos menor será a viscosidade tendendo a ser um CAP mais fluido diminuindo assim os valores de penetração e aumentando o ponto de amolecimento. Já a susceptibilidade térmica é influenciada a partir da fase maltênica: saturados que então presentes de 5% a 20% na composição do cimento asfáltico petróleo que detêm de peso molecular, o mesmo que influencia de forma negativa na susceptibilidade térmica (BERNUCCI et al., 2007; NEGRÃO, 2006).

O asfalto tende a diminuir sua qualidade à medida que é passado o tempo da sua fabricação na refinaria até o envelhecimento por ocorrência do tráfego e condições climáticas de uma rodovia que contribuem para a perda das propriedades mecânicas. Este é o principal fator causador de problemas nas misturas asfálticas a quente (CEZARO JUNIOR et al., 2008).

Os ligantes asfálticos possuem três grandes divisões como pode ser visto na Figura 5: Ligante asfáltico natural (asfalto natural), ligante asfáltico de petróleo (asfalto de petróleo) e Alcatrão.

Figura 5: Diagrama de blocos da classificação de ligantes asfálticos segundo o DNER.



Fonte: Adaptado de DNER, 1996. Acesso em: 10 de junho de 2019.

Em busca de um rendimento regular do pavimento, deve-se demonstrar propriedades variadas quando são comparados ao comportamento dos demais materiais asfálticos. Para isso, o CAP deve provar possuir grande coesão e adesão aos agregados, tendo adequada susceptibilidade térmica à temperatura do pavimento e assim como às deformações térmicas, resistência à perda das suas propriedades (envelhecimento), consequentemente alta resistência à fadiga (LEITE, 1999).

De acordo com Azevedo *et al* (2009), não há material que atenda em melhores condições que o asfalto quando se trata das funções necessárias para um bom pavimento. Tais seriam: aglutinante (promovendo a ligação entre os agregados e a mistura para suportar o esforço causado pelos veículos), impermeabilizante (evitando danos causados pelas águas que infiltram o pavimento) e flexibilidade (garantindo uma maior resistência às deformações causadas pelas cargas dos veículos).

Entretanto Azevedo *et al* (2009), relata que apesar de ser indispensável o uso de CAP na pavimentação em geral, existem limitações como: resistência à tração deprecia a partir do momento em que o pavimento é flexionado; quando em temperaturas menores a mistura se torna rígida e assim quebradiço, sendo

pouco flexível facilitando o aparecimento de trincas; em temperaturas altas, há o amolecimento e flui que causam as deformações permanentes.

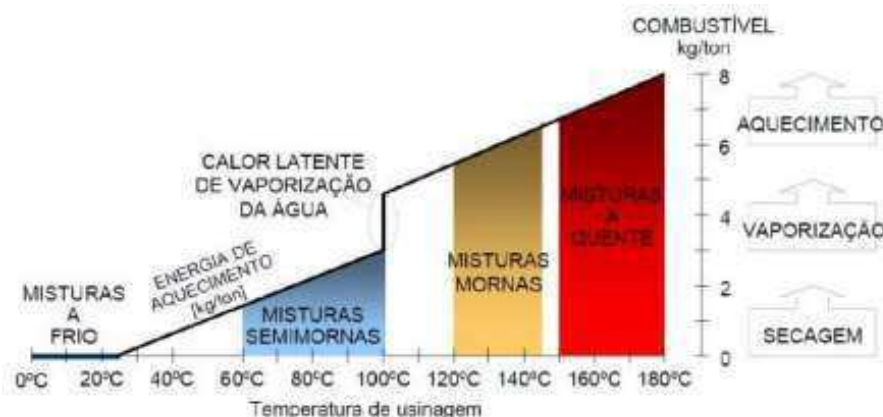
De acordo com Faxina (2006) as principais características exigidas para que um pavimento são: estabilidade, flexibilidade, durabilidade, resistência à derrapagem.

As propriedades físicas do CAP são ligadas à temperatura. Sendo assim em temperaturas amenas a agitação molecular é baixa fazendo com que a viscosidade seja elevada, fazendo com que o pavimento se comporte praticamente como um sólido. Com o aumento de temperatura, a agitação molecular sobe e o distanciamento das moléculas é maior baixando a viscosidade e assim dando mais fluidez para o ligante fazendo-o se comportar como um líquido (MOTTA et al., 2008).

Para Lesueur (2002) as propriedades correlacionadas com a temperatura são importantes para os ligantes asfálticos, pois os mesmos necessitam ser suficientemente rígidos para suportar o tráfego em temperaturas altas como 50°C, e assim não exista o surgimento de deformações permanentes e ainda sim, os pavimentos necessitam de elasticidade a temperaturas intermediárias e extremamente baixas, para que assim resistam a fissuras por fadiga e de origem térmica respectivamente.

Bundny (2012) relata sobre a importância da temperatura tanto para o ligante como a do agregado necessita estar em equilíbrio e aquecidos satisfatoriamente para que a mistura tenha fluidez para o recobrimento. Contudo, o ligante demasiadamente aquecido gera problemas pois após temperaturas acima dos 100°C é dobrada a taxa de oxidação, a cada 10°C adicionados ao ligante, tornando-o menos dúctil, menos elástico e assim frágil podendo sofrer facilmente fissuramentos. Entretanto, com a diminuição da temperatura, no qual encontram as misturas mornas e semimornas, as propriedades físicas do ligante podem ser perdidas, propriedades essas essenciais para um pavimento regular como a coesão e adesão. Além disso, relata Budny (2012), há a possibilidade de prejudicar a secagem do agregado que por sua vez pode aumentar o consumo de combustível da usina, aumentando custos e gerando problemas com a adesividade do material. Na Figura 6 é ilustrado as classificações das misturas com relação à temperatura previamente explanado.

Figura 6: Classificação de misturas de acordo com a temperatura e consumo de combustível para produção.



Fonte: D'ANGELO et al., 2008. Acesso em: 14 de novembro de 2018

2.3. MODIFICAÇÕES DE LIGANTES ASFÁLTICOS

Os recursos do petróleo são escassos na sua natureza e composição pois são necessários milhares de anos para a sua concepção. Em contrapartida, a biomassa vegetal é constituída com compostos heterogêneos como celulose, hemicelulose, lignina, óleos, amido e proteínas. Sendo assim, há uma gama maior de possibilidades para o aperfeiçoamento de pavimentos que possuem como principal base um produto que a cada dia é mais escasso e por esse motivo deve ser utilizado de forma mais eficiente (OCTAVE & THOMAS, 2009).

De acordo com Júnior (2004) a busca por um pavimento com propriedades físicas superiores, faz com que exista uma maior utilização de polímeros adicionados às misturas asfálticas e de forma demasiada, afinal essas modificações apresentam alguns benefícios ao pavimento como uma maior resistência à deformação permanente, à fadiga, assim como decréscimo dos efeitos causados ao pavimento durante o seu envelhecimento. Entretanto, Júnior explana que existem os efeitos negativos dessa adição de polímeros ao CAP trazendo malefícios como dificultar a trabalhabilidade do ligante durante as etapas de construção fazendo com que a mistura se torne mais complexa para produzir. Na figura 7 tem-se um exemplo de asfalto modificado utilizado no Paraná em 2002.

Figura 7: Exemplo de asfalto modificado (Gap Graded).



Fonte: Sinicesp. Acesso em: 10 de junho de 2019.

Assim como Júnior, Sobreiro (2014) também afirma sobre os riscos de dificultar a trabalhabilidade da mistura com a adição de polímeros apesar disso aumentar a viscosidade do CAP. Para Sobreiro (2014) a tentativa de solução, para esse problema, poderia vir através da utilização de aditivos que, agindo sobre a viscosidade do CAP, melhorem a trabalhabilidade do ligante.

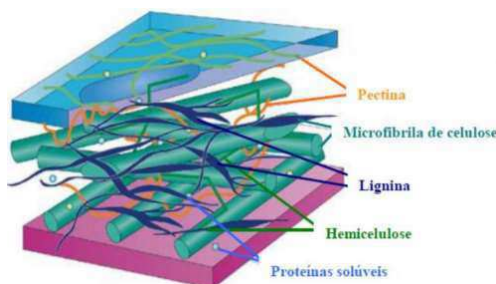
Para Durand (2012) é necessário tomar providências iniciais para a incorporação de modificadores, como os polímeros, afinal de contas as unidades moleculares dos polímeros são maiores do que as moléculas dos ligantes asfálticos, e isso pode gerar impasses na homogeneidade da mistura quando forem inseridos.

Para Mousavioun e Doherty (2009) a produção de biocombustíveis pode alavancar com a evolução dos mercados responsáveis pelos produtos modificados através da lignina. Eles afirmam que por existem vários fatores físico-químicos que indicam um horizonte positivo para os produtos provindos da lignina. Alguns dos fatores positivos encontrados são: fornecer mais estabilidade para a mistura pois os anéis aromáticos contribuem para tal, o fato de que a lignina ter boa compatibilidade com produtos químicos cria-se aberturas para novas possibilidades de transformações químicas. Além disso, possuem propriedades reológicas e visco elásticas ideais para a utilização em elementos de carga.

O estudioso Philipp (1988) afirma que a lignina se refere a combinação de substâncias de composições químicas análogas, mas a parte estrutural difere. As ligninas estão contidas nas paredes celulares das plantas e são associadas com as hemiceluloses, sendo assim não estão correlacionadas apenas por interação física como também através de ligações covalentes.

Para Wardrop (1971) a lignina é uma macromolécula de estrutura complexa composta de um polímero formado por ligações cruzadas e isso contribui positivamente para que haja uma estrutura mais firme. Logo isso justifica o fato de que a lignina é uma das responsáveis pela resistência mecânica das madeiras. Na Figura 8 tem-se a ilustração da localização da lignina em uma célula.

Figura 8: Lignina em uma célula.



Fonte: Afinko polímeros. Acesso em: 14 de novembro de 2018

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.2. MATERIAIS

Para realização desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

- Ligante convencional: O ligante será obtido da distribuidora Stratura Asfaltos S/A (antiga Ipiranga Asfaltos S/A). Será utilizado o CAP 50/70.
- Lignina: A lignina utilizada neste estudo foi extraída do pinus e cedida pelo Laboratório de Química Inorgânica da Universidade Federal de Viçosa.

3.3. MÉTODOS

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

3.3.1. Produção da mistura do ligante asfáltico com a adição do óleo

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 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.

3.3.2. Nomenclatura das amostras

A Tabela 1 apresenta a nomenclatura das amostras que foram utilizados e as suas respectivas porcentagens de lignina Pinus adicionadas ao CAP 50/70 além do ligante puro.

Tabela 1: Nomenclatura das mostras.

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

Fonte: Autor, 2019.

3.3.3. RTFO (Estufa de Filme Fino Rotativo)

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

O procedimento possibilita a identificação de mudanças nas propriedades do asfalto que podem ocorrer durante a usinagem a 150 °C, verificadas por variações nas propriedades de constância. Também pode ser usado para se

determinar a variação de massa indicando assim a volatilidade ou oxidação do asfalto. Na Figura 9 mostra-se o equipamento utilizado para o ensaio de envelhecimento a curto prazo.

Figura 9: Estufa utilizada no ensaio de RTFO.



Fonte: Autor, 2019.

3.3.4. Caracterização física do ligante asfáltico de petróleo

3.3.4.1. 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 como é mostrado na Figura 10. 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.

Figura 10: Ensaio de Penetração.



Fonte: Solução. Acesso em: 10 de julho de 2019

3.3.4.2. 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. O equipamento é visto na Figura 11.

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).

Figura 11: Equipamento utilizado no ensaio de Ponto de Amolecimento.



Fonte: Solotest. Acesso em: 10 de julho de 2019

3.3.4.3. 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 mostrado na Figura 12. 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.

Figura 12: Viscosímetro Brookfield.



Fonte: Autor, 2019.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

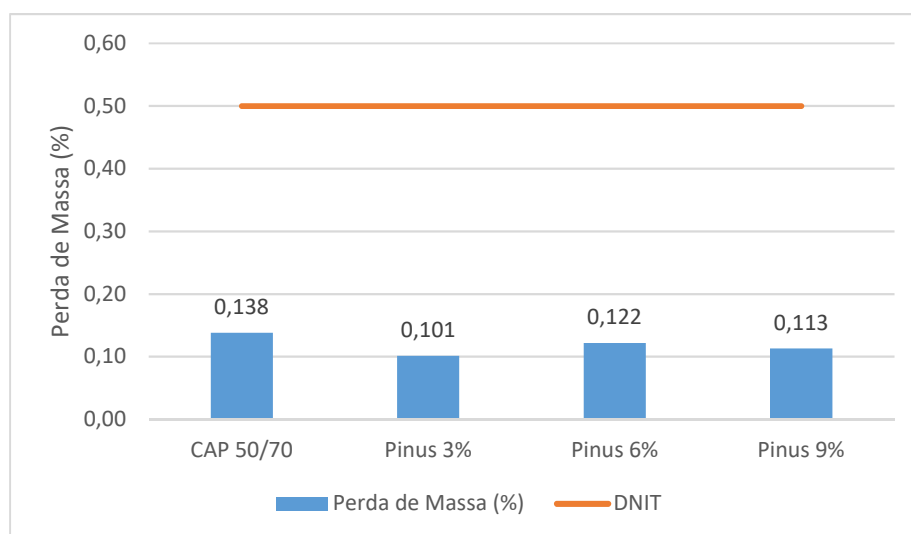
Neste capítulo serão abordados os resultados e discussões obtidos a partir dos ensaios de caracterização do CAP 50/70 com adição de lignina proveniente de Pinus.

4.2. Envelhecimento a curto Prazo-RTFO

Segundo Magalhães (2004), o ensaio RTFO simula o envelhecimento do ligante asfáltico, sabendo assim a qualidade do mesmo após sua usinagem, tendo em vista que o asfalto precisa de uma grande resistência ao envelhecimento.

A Figura 13 ilustra os resultados obtidos para as variações de massa dos ligantes puro e modificados por adição de lignina Pinus após a realização do procedimento de envelhecimento a curto prazo. Os valores obtidos satisfazem a Norma DNIT-095/2006 EM que preconiza variações de massa inferiores a 0,5%.

Figura 13: Perda de massa para cada amostra.



Fonte: Autor, 2019.

Conforme resultados obtidos, verifica-se que a variação de massa dos ligantes modificados para a adição de lignina apresentaram valores inferiores aos obtidos para o ligante puro, indicando uma maior resistência dos ligantes modificados ao envelhecimento a curto prazo.

O envelhecimento químico de um ligante asfáltico ocorre devido a uma associação de reações de oxidação e volatilização (DEHOUCHE *et al.*, 2012).

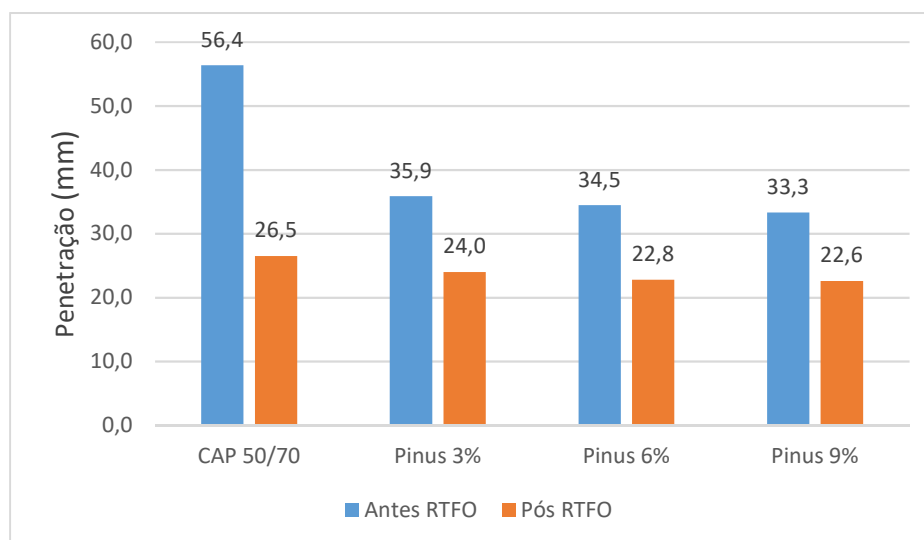
No processo de envelhecimento à curto prazo a perda de massa do material ocorre em consequência desses dois processos químicos.

4.3. Ensaio de Penetração

Através do ensaio de penetração é possível analisar a consistência da mistura consequentemente dispor de propriedades inversamente proporcionais como a elasticidade e rigidez. De acordo com Nascimento (2015) quanto maior o valor de penetração na mistura menos rígido ela é, contudo mais elástica, em contrapartida em valores de penetração mais altos maior a rigidez e menos sua elasticidade. Sendo assim, é necessário a equalização dessas propriedades para obter-se uma boa mistura asfáltica resistente suportando as cargas e para absorver os esforços.

A Figura 14 ilustra os resultados obtidos para o ensaio de penetração antes e após o RTFO.

Figura 14: Ensaio de penetração antes e após o RTFO.



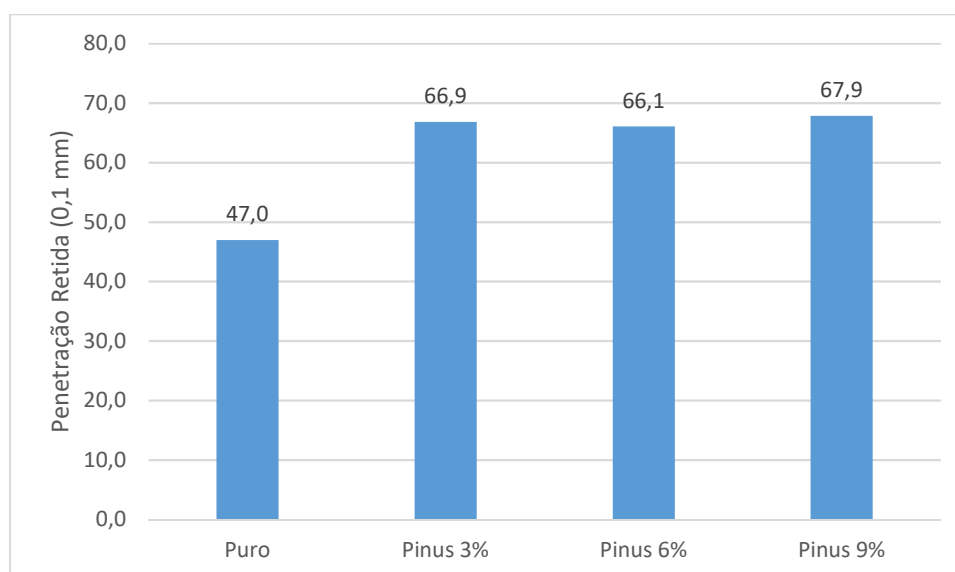
Fonte: Autor, 2019.

De acordo com os resultados ilustrados na Figura 14, quanto maior o teor de lignina proveniente de pinus adicionado ao CAP maior sua viscosidade e assim menor a penetração para as condições antes e após envelhecimento a curto prazo. Para o ligante puro, obteve a maior variação da penetração antes e após o ensaio de RTFO. Contudo, observou-se que os resultados obtidos são superiores aos alcançados para o ligante modificado. Sendo assim, com

porcentagens maiores de pinus, a mistura asfáltica tende a ganhar maior resistência aos esforços, mas, em contrapartida, com diminuição da elasticidade. De acordo com Lima (2008) a diminuição da penetração é um resultado importante, tendo em vista que indica uma maior rigidez do material, e assim resulta em um pavimento mais robusto em termos de suportar as cargas como também resistente a elevadas temperaturas.

A penetração retida é a relação entre a distância de penetração encontrada após e antes o ensaio de RTFO. A amostra do ligante puro adquiriu a menor penetração retida das quatro amostras ficando abaixo do limite mínimo de 60% do regulamento da ANP (Agência Nacional de Petróleo e Gás Natural e Biocombustíveis) (Regulamento Técnico nº3 de 04/2010). Entretanto, para as amostras modificadas, o resultado se deu positivo dado que os valores foram significativamente maiores que 60%, conforme ilustra a Figura 15.

Figura 15: Penetração retida



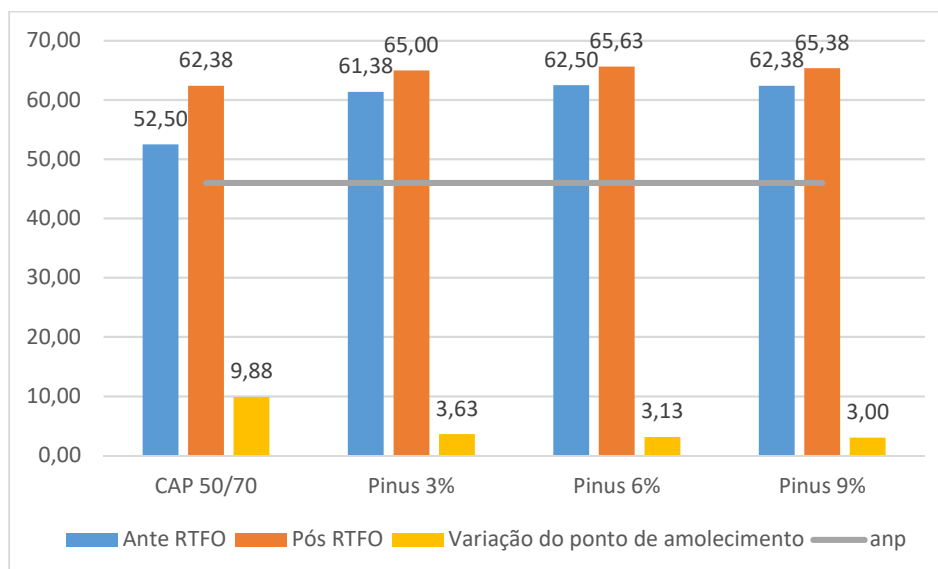
Fonte: Autor, 2019.

4.4. Ensaio de Ponto de Amolecimento

Para esse tipo de mistura, quanto mais alto o ponto de amolecimento, mais energia será necessária para haver sua aplicação e conseqüentemente maior custo. Contudo, o CAP resistirá satisfatoriamente em dias mais quentes exercendo uma maior qualidade em quesitos de deformação permanente tendo em vista que a energia necessária para haver o amolecimento, é superior.

Os resultados mais expressivos foram obtidos para a amostra de CAP 50/70 com adição de 6% de lignina oriunda de pinus, apresentando o maior ponto de amolecimento seja antes ou após o envelhecimento, conforme ilustrado na Figura 16.

Figura 16: Ponto de Amolecimento antes e após RTFO



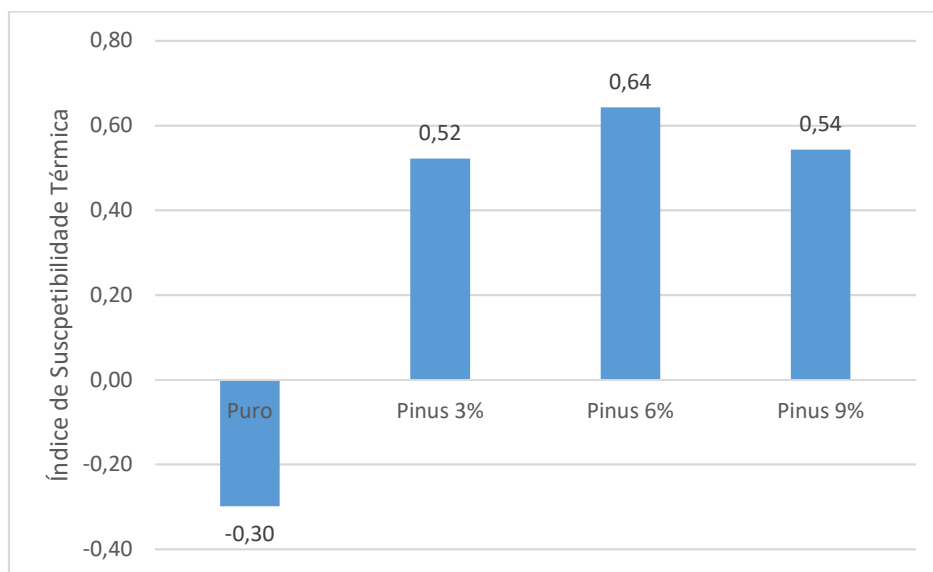
Fonte: Autor, 2019.

Conforme observa-se na Figura 16, a lignina oriunda de pinus promove uma melhora à mistura em seu estado não envelhecido assim como no estado envelhecido. Portanto, o efeito sobre a mistura modificada é mais significativo em seu estado inicial. Todavia, apesar da relativa diferença entre o ligante puro e as demais amostras no estado inicial, todas atendem ao limite mínimo exigido pela ANP de 46°C.

4.5. Suscetibilidade Térmica

A suscetibilidade térmica é a quantidade em que a mistura pode resistir às variações de temperatura diárias sem que perca consistência e ductibilidade. Sabendo disso, possui grande relevância na área de pavimentação pois tem relação com o surgimento de fissuras graças a alta consistência e deformação permanente por ação da alta temperatura (Petrobrás, 2015).

A Figura 17 ilustra os resultados para os índices de suscetibilidade térmica.

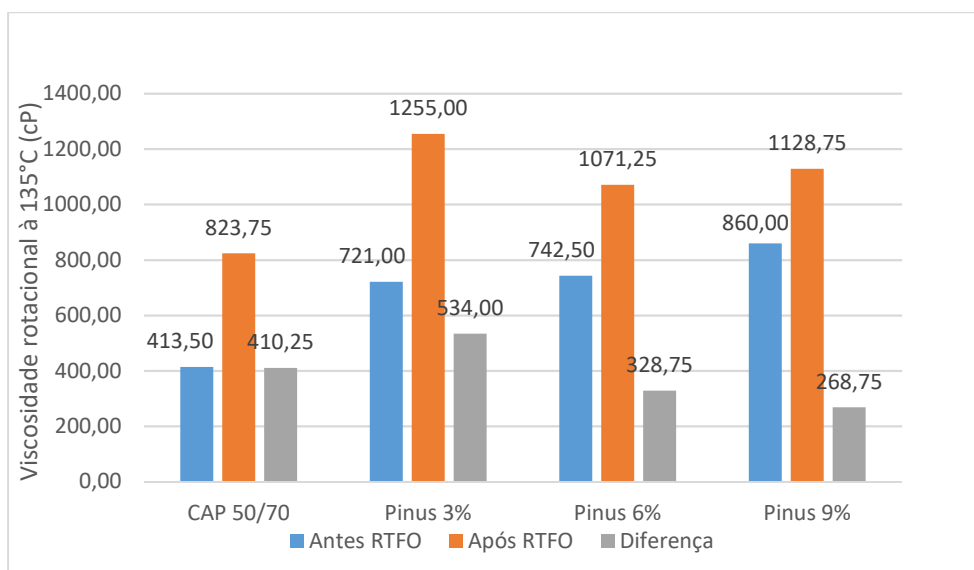
Figura 17: Índice de Susceptibilidade Térmica

Fonte: Autor, 2019.

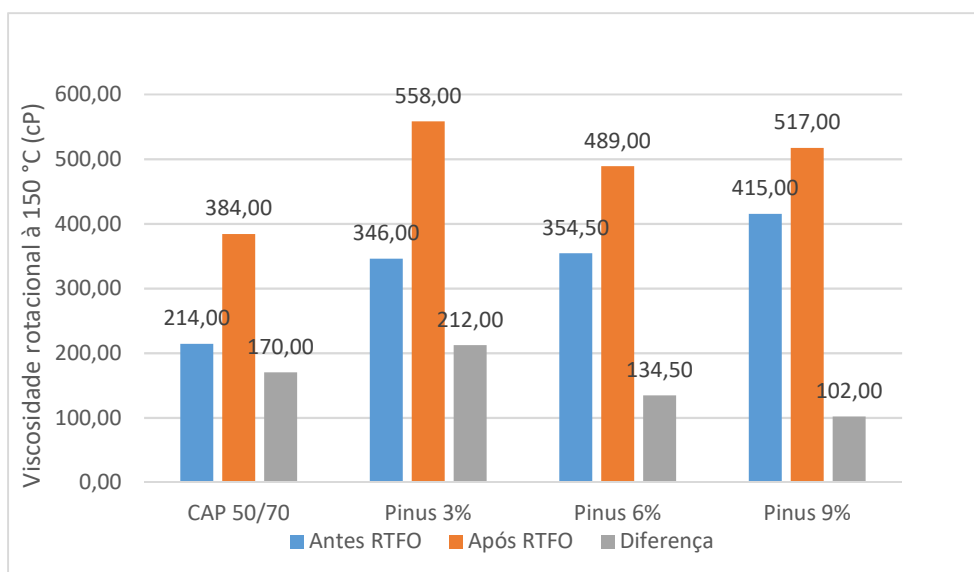
Segundo a norma do DNIT 095/2006 é estabelecido uma faixa de aprovação para o índice de susceptibilidade térmica entre -1,5 a +0,7. Em vista disso, todas as amostras tiveram resultado positivo, comparando a essa norma, e assim não sofrem significativamente a variação de temperatura.

4.6. Ensaio de Viscosidade Rotacional

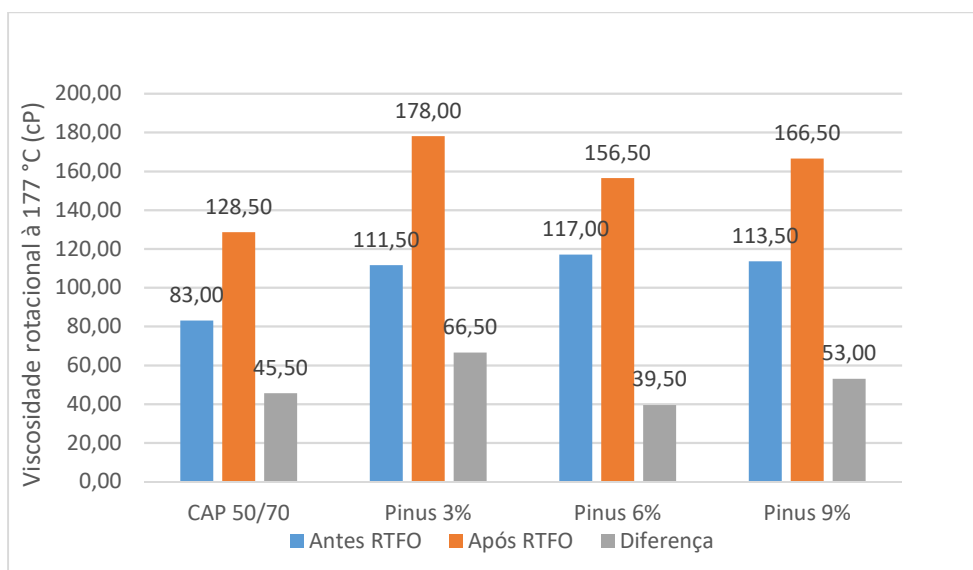
Com os resultados deste ensaio, é possível aferir a viscosidade da mistura em temperaturas relativas ao processo de produção, transporte, usinagem e compactação (Manoel, 2015). Os resultados obtidos estão ilustrados nas Figuras 18, 19 e 20.

Figura 18: Viscosidade a 135°C

Fonte: Autor, 2019.

Figura 19: Viscosidade a 150°C

Fonte: Autor, 2019.

Figura 20: Viscosidade a 177°C

Fonte: Autor, 2019.

É notório a diferença da viscosidade, em todas as amostras, de 135°C até 177°C pois a viscosidade está relacionada ao espaçamento entre as moléculas e assim quanto menor essa distância maior será a viscosidade, mas quando aumenta-se a temperatura há o afastamento dessas moléculas devido a agitação molecular e assim diminuindo a coesão dessa mistura e consequentemente a viscosidade.

A amostra de CAP 50/70 com 3% de lignina obteve as maiores viscosidades e assim adquire uma maior resistência em comparação as demais amostras.

Pode ser observado que a amostra, que possui a adição de 3% de lignina proveniente de pinus, obtêm a maior diferença, em comparação com as outras, após o envelhecimento da mesma nas três temperaturas. Com isso, demonstra que a amostra irá adquirir uma maior viscosidade e rigidez após seu envelhecimento trazendo uma mistura mais resistente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 Considerações Finais

Conforme os objetivos específicos deste estudo, pôde considerar que: Ocorreram melhoras nas propriedades físicas do CAP 50/70 mediante a adição de lignina proveniente de pinus. Sendo assim, para as três porcentagens de lignina adicionada, ocorreram melhorias significativas, entretanto em alguns casos a melhora não foi crescente com o aumento da quantidade de lignina adicionada ao CAP 50/70.

Para o ensaio de RTFO a amostra com 3% de lignina obteve os melhores resultados. Ainda assim, todas as amostras foram satisfatórias cumprindo com o limite estabelecido pelo DNIT. No ensaio de penetração, as melhorias foram alcançadas através do aumento da porcentagem de lignina na mistura. Com isso a amostra com 9% de lignina obteve os melhores resultados antes e depois do envelhecimento.

Em relação ao ponto de amolecimento a amostra com 6% de lignina obteve os melhores resultados tendo um melhor desempenho físico em temperatura mais altas em comparação as outras amostras demonstrando ser uma opção quando se tratar de um asfalto preparado para sofrer com variações de temperatura.

Para o ensaio de viscosidade rotacional a amostra possuindo 3% de lignina adquiriu o melhor resultado e assim sendo a que obtêm a maior resistência dentre os teores utilizados neste estudo.

Portanto, o teor de 3% de lignina confere maior resistência e tende a ter um menor desgaste com o envelhecimento. Enquanto isso, a amostra possuindo 6% de lignina é recomendável para locais com altas variações de temperatura.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

- Estudo e execução de um trecho de rodovia experimental utilizando os CAPs Modificados por adição de lignina;
- Estudos de Propriedades Reológicas de CAPs Modificados com diferentes teores de lignina pinus;

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 15184/2004. Materiais Betuminosos**: Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional, São Paulo – SP.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 15235/2009. Materiais Asfálticos**: Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional, São Paulo – SP.
- AZEVEDO, P. N.; FILHO, A. F. S.; **Asfalto Modificado com Polímeros (SBS)**. 2009. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Católica do Salvador, Salvador, 2009.
- BARTHOLOMEU, Daniela B.; Filho, José V. C. **Impactos econômicos e ambientais decorrentes do estado de conservação das rodovias brasileiras**: um estudo de caso. 2008. Trabalho científico – Revista de Economia e Sociologia Rural. Brasília, 2008.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica – formação básica para Engenheiros**. 1ed., ABEDA, Rio de Janeiro, 2007.
- BUDNY, J. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas morna**. 2012. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. COPPE-Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2012.
- CAVALCANTI, Alan B. **Softpave: Estudo e desenvolvimento de uma ferramenta para o auxílio à dosagem de misturas asfálticas pelo método superpave**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, 107f, Brasil, 2013.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Anuário CNT do transporte – estatísticas consolidadas**. 229f, Brasília – DF, 2018.
- CRAIDE, Sabrina. **Extensão de rodovias pavimentadas cresceu 23% nos últimos 15 anos**. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-05/extensao-de-rodoviaspavimentadas-cresceu-23-nos-ultimos-15-anos-diz-cnt>, Acesso em: 15 de novembro de 2018.
- DA SILVA, Gutemberg G. **Estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas**. 2016. 125f Dissertação (Mestrado em

Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Brasil, 2016.

De Cezaro Junior, T. **Estudo das Propriedades Mecânicas das Misturas Asfálticas Convencionais e Modificadas**. 2008. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 095/2006. Cimentos asfálticos de petróleo – especificação de material**. Rio de Janeiro – RJ, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 131/2010. Materiais asfálticos – determinação do ponto de amolecimento através do método do anel e bola**. Rio de Janeiro – RJ, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 155/2010. Materiais asfálticos – determinação da penetração**. Rio de Janeiro – RJ, 2010.

DURAND, G.; GUEIT, C.; MARTIN, H. (2012) **Assessment of bitumens for emulsions and modified binders: characterization by gel permeation chromatography**. In: 5th EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, Istanbul, 2012.

FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso de resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha**. 2006. Tese (Doutor em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FRANZ, Cristine. M; SEBERINO, JOSÉ R. V. **A história do trânsito e sua evolução**. 2012. 24f. Monografia (Pós-graduação em Gestão, Educação e Direito de Trânsito), Joinville, 2012.

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.

LESUEUR, D. (2002). **La Rhéologie des Bitumes: Principes et Modification. Rhéologie**.

- LIMA, C. K. M. **Estudo da Incorporação de Resíduo Industrial Polimérico ao CAP**. 2008. Dissertação (Mestre em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
- LUCENA, M. C. C. **Caracterização Química e Reológica de Asfaltos Modificados por Polímeros**. 2005. Tese (Doutorado em Química Inorgânica) – Instituto de Química, Universidade Federal do Ceará, 2005.
- MAGALHÃES, S.T. **Misturas Asfálticas de Módulo Elevado para Pavimentos de Alto Desempenho**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.
- MORAIS, Sérgio A. Lemos de; Evandro A. do Nascimento; Dárley C. de Melo. **Análise da madeira de pinus oocarpa: parte I – estudo dos constituintes macromoleculares e extrativos voláteis**. 2005. Trabalho científico – Revista de Economia e Sociologia Rural. Viçosa, 2005.
- MOTHÉ, Michelle G. **Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica**. 2009. 182f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2009.
- MOTTA, Laura M. G. da, et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro, 2008.
- NASCIMENTO, Thalita C. B. **Efeito dos envelhecimentos termo oxidativo e foto-oxidativo sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados**. 2015. 274f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Engenharia de São Carlos, Brasil, 2015.
- NEGRÃO, D.P. **Estudo de Asfaltos Modificados por Polímeros do tipo RET para Aplicações em Pavimentos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- OLIVEIRA, Fernanda de C. **Oxidação de lignina proveniente de resíduos lignocelulósicos agroindustriais para obtenção de compostos químicos aromáticos de maior valor agregado**. 2015. 199f. Dissertação (Doutorado em Biotecnologia Industrial), Universidade de São Paulo, Brasil, 2015.
- PHILIPP, P.; D'ALMEIDA, M. L.O. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. 2ª ed. São Paulo: IPT, 1988.

ROSA JÚNIOR, José M. **Estudo das propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo (CAP50/70) modificado com polímeros funcionalizados**. 2015. 78f Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Brasil, 2015.

SALES, Patrícia de M. **Avaliação das características físicas e mecânicas de misturas asfálticas modificadas com adição do CCBIt**. 2015. 90f Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, Brasil, 2015.

SANTOS, Iris D. **Influência dos teores de lignina, homocelulose e extrativos da densidade básica e contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado**. 2008. 57f Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade de Brasília, Brasil, 2008.

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

SOBREIRO, F.P. **Efeito a adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

PETROBRÁS. **Asfalto – informações técnicas**. Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

WARDROP, A. B. **Occurrence and Formation in Plants**. In: **SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. Lignins, occurrence, formation, structure and reactions**. New York: John Wiley, 1971.

APÊNDICES

Tabela 2: Resultados obtidos para perda de massa do ligante asfáltico CAP 50/70.

Ligante Puro (50/70)			
Antes RTFO	Após RTFO	Perda de massa (g)	Perda de Massa (%)
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: Autor, 2019.

Tabela 3: Resultados do RTFO no ligante com adição de 3% pinus.

PINUS 3%			
Antes RTFO	Depois RTFO	Perda de massa (g)	Perda de Massa (%)
214,56	214,29	0,001258389	0,125838926
222,11	221,87	0,001080546	0,108054568
223,65	223,62	0,000134138	0,013413816
222,57	222,3	0,001213101	0,121310150
210,73	210,44	0,001376169	0,137616856
MÉDIA			0,101246863

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 4: Resultados do RTFO no ligante com adição de 6% pinus.

PINUS 6%			
Antes RTFO	Depois RTFO	Perda de massa (g)	Perda de Massa (%)
218,560	218,310	0,001143851	0,114385066
220,890	220,720	0,000769614	0,076961383
212,640	212,300	0,001598947	0,159894658
206,890	206,610	0,001353376	0,135337619
MÉDIA			0,121644682

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 5: Resultados do RTFO no ligante com adição de 9% pinus.

PINUS 9%			
Antes RTFO	Depois RTFO	Perda de massa (g)	Perda de Massa (%)
214,74	214,49	0,001164199	0,116419857
222,83	222,57	0,001166809	0,116680878
210,16	209,95	0,000999239	0,099923868
219,51	219,25	0,001184456	0,118445629
MÉDIA			0,112867558

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 6: Resultados do RTFO para as quatro amostras e limite determinado pelo DNIT.

Material	Perda de Massa (%)	DNIT
CAP 50/70	0,138	0,500
Pinus 3%	0,101	0,500
Pinus 6%	0,122	0,500
Pinus 9%	0,113	0,500

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 7: Distância de penetração para ligante puro.

Ligante Puro (50/70)				
	Antes RTFO (1)	Antes RTFO (2)	Depois RTFO (1)	Depois RTFO (2)
	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: Autor, 2019.

Tabela 8: Distância de penetração para ligante com 3% de pinus.

PINUS 3%				
	Antes RTFO (1)	Antes RTFO (2)	Depois RTFO (1)	Depois RTFO (2)
	36,00	34,00	25,00	23,00
	35,00	35,00	24,00	23,00
	37,00	35,00	24,00	24,00
	36,00	37,00	24,00	25,00
	37,00	37,00	23,00	25,00
	36,20	35,60	24,00	24,00
MÉDIA	35,90		24,00	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 9: Distância de penetração para ligante com 6% de pinus.

PINUS 6%				
	Antes RTFO (1)	Antes RTFO (2)	Depois RTFO (1)	Depois RTFO (2)
	33,00	36,00	20,00	24,00
	35,00	35,00	20,00	23,00
	34,00	34,00	22,00	22,00
	35,00	34,00	25,00	21,00
	36,00	33,00	28,00	23,00
	34,60	34,40	23,00	22,60
MÉDIA	34,50		22,80	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 10: Distância de penetração para ligante com 9% de pinus.

PINUS 9%				
	Antes RTFO (1)	Antes RTFO (2)	Depois RTFO (1)	Depois RTFO (2)
	35,00	32,00	20,00	21,00
	31,00	32,00	22,00	22,00
	31,00	34,00	23,00	23,00
	37,00	33,00	24,00	23,00
	33,00	35,00	25,00	23,00
	33,40	33,20	22,80	22,40
MÉDIA	33,30		22,60	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 11: Distância de penetração e Penetração retida.

Ligante	Antes RTFO	Pós RTFO	Penetração retida (0,1 mm)
CAP 50/70	56,40	26,50	46,99
Pinus 3%	35,90	24,00	66,85
Pinus 6%	34,50	22,80	66,09
Pinus 9%	33,30	22,60	67,87

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 12: Ponto de Amolecimento para CAP 50/70 puro.

Ligante Puro (50/70)				
	Antes RTFO (1)	Antes RTFO (2)	Depois RTFO (1)	Depois RTFO (2)
	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	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 13: Ponto de Amolecimento para CAP 50/70 com 3% de lignina de pinus.

PINUS 3%				
	Antes RTFO (1)	Antes RTFO (2)	Depois RTFO (1)	Depois RTFO (2)
	61,00	61,50	65,00	65,00
	61,50	61,50	65,00	65,00
	61,25	61,50	65,00	65,00
MÉDIA	61,38		65,00	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 14: Ponto de Amolecimento para CAP 50/70 com 6% de lignina de pinus.

PINUS 6%				
	Antes RTFO (1)	Antes RTFO (2)	Depois RTFO (1)	Depois RTFO (2)
	62,00	63,00	65,00	65,50
	62,50	62,50	66,00	66,00
	62,25	62,75	65,50	65,75
MÉDIA	62,50		65,63	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 15: Ponto de Amolecimento para CAP 50/70 com 9% de lignina de pinus.

PINUS 9%				
	Antes RTFO (1)	Antes RTFO (2)	Depois RTFO (1)	Depois RTFO (2)
	62,00	62,50	65,00	66,00
	63,00	62,00	65,00	65,50
	62,50	62,25	65,00	65,75
MÉDIA	62,38		65,38	

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 16: Ponto de amolecimento antes e após o ensaio de RTFO.

Ligante	Ante RTFO	Pós RTFO	ANP	Varição do ponto de amolecimento
CAP 50/70	52,50	62,38	46,00	9,88
Pinus 3%	61,38	65,00	46,00	3,63
Pinus 6%	62,50	65,63	46,00	3,13
Pinus 9%	62,38	65,38	46,00	3,00

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 17: Índice de Suscetibilidade Térmica para o CAP50/70 puro e modificados.

Ligante	Penetração	log	Índice de suscetibilidade térmica
Puro	56,40	1,75127910	-0,30
Pinus 3%	35,90	1,55509445	0,52
Pinus 6%	34,50	1,53781910	0,64
Pinus 9%	33,30	1,52244423	0,64

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 18: Viscosidade para o CAP 50/70 antes e após o RTFO.

Ligante Puro (50/70)						
Temperatura	Antes RTFO			Depois RTFO		
	Medida 1	Medida 2	Média	Medida 1	Medida 2	Média
135°C	417,00	410,00	413,50	840,00	807,50	823,75
150°C	216,00	212,00	214,00	391,00	377,00	384,00
177°C	83,50	82,50	83,00	130,00	127,00	128,50

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 19: Viscosidade para o CAP 50/70 adicionado 3% de pinus antes e após o RTFO.

PINUS 3%						
Temperatura	Antes RTFO			Depois RTFO		
	Medida 1	Medida 2	Média	Medida 1	Medida 2	Média
135°C	832,50	842,50	721,00	1232,50	1277,50	1255,00
150°C	530,00	392,00	346,00	547,00	569,00	558,00
177°C	126,50	128,50	111,50	178,00	178,00	178,00

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 20: Viscosidade para o CAP 50/70 adicionado 6% de pinus antes e após o RTFO.

PINUS 6%						
Temperatura	Antes RTFO			Depois RTFO		
	Medida 1	Medida 2	Média	Medida 1	Medida 2	Média
135°C	740,00	745,00	742,50	1057,50	1085,00	1071,25
150°C	356,00	353,00	354,50	485,00	493,00	489,00
177°C	117,00	117,00	117,00	155,00	158,00	156,50

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 21: Viscosidade para o CAP 50/70 adicionado 9% de pinus antes e após o RTFO.

PINUS 9%						
Temperatura	Antes RTFO			Depois RTFO		
	Medida 1	Medida 2	Média	Medida 1	Medida 2	Média
135°C	860,00	860,00	860,00	1112,50	1145,00	1128,75
150°C	415,00	415,00	415,00	511,00	523,00	517,00
177°C	113,50	113,50	113,50	164,50	168,50	166,50

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 22: Viscosidade para as amostras a 135°C.

Ligante	Antes RTFO	Após RTFO	Diferença
CAP 50/70	413,50	823,75	410,25
Pinus 3%	721,00	1255,00	534,00
Pinus 6%	742,50	1071,25	328,75
Pinus 9%	860,00	1128,75	268,75

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 23: Viscosidade para as amostras a 150°C.

Ligante	Antes RTFO	Após RTFO	Diferença
CAP 50/70	214,00	384,00	170,00
Pinus 3%	346,00	558,00	212,00
Pinus 6%	354,50	489,00	134,50
Pinus 9%	415,00	517,00	102,00

Fonte: Autor, 2019.

Tabela 24: Viscosidade para as amostras a 177°C.

Ligante	Antes RTFO	Após RTFO	Diferença
CAP 50/70	83,00	128,50	45,50
Pinus 3%	111,50	178,00	66,50
Pinus 6%	117,00	156,50	39,50
Pinus 9%	113,50	166,50	53,00

Fonte: Autor, 2019.