



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

Renan Camilo de Lima Paulo

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO
MODIFICADO POR ADIÇÃO DE ÓLEO DE COPAIBA**

Campina Grande-PB, 05 de dezembro de 2019

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO
MODIFICADO POR ADIÇÃO DE ÓLEO DE COPAIBA**

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**

Renan Camilo de Lima Paulo

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: Prof^a. Dr^a. Carina Silvani
Prof^a. Dr^a. Ana Maria Gonçalves Duarte
Mendonça

CAMPINA GRANDE – PB

Dezembro de 2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

RENAN CAMILO DE LIMA PAULO

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO POR ADIÇÃO DE ÓLEO DE COPAIBA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 05/12/2019
perante a seguinte Comissão Julgadora:

Prof^ª. Dr^ª Ana Maria Gonçalves Duarte
Orientadora
Dr^ª em Ciências e Eng. de Materiais - UFCG
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Prof^ª. Dr^ª. Carina Silvani
Orientadora
Dr^ª. em Engenharia Civil - UFRS
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Prof^ª. Dr^ª Marília Marcy Cabral de Araújo
Membro Interno
Dr^ª em Estruturas e Construção Civil - UNB
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Loredanna Melyssa Costa
Membro Externo
Doutora em Engenharia de Processos - UFCG
Departamento de Engenharia Civil
UNIFACISA – Centro Universitário

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Antonio Ferreira e Dilene de Fátima, por todo suporte emocional e financeiro durante toda a minha vida.

A minha família, em especial, minha irmã, Mayara Caroline, meus avós, Marlene Lima e Antonio Paulo, e minhas tias, Aparecida Ferreira e Débora Gomes, pelo apoio incondicional ao longo de toda a minha trajetória.

In memoriam, aos meus avós que nos deixaram cedo, António Camilo e Antônia Ferreira, que com toda certeza estariam muito felizes em me ver formado.

A minha professora coorientadora Ana Maria Duarte, pela oportunidade e disponibilidade de ajuda e orientação, além de seus ensinamentos durante a minha formação.

Aos meus amigos e colegas de curso, em especial, Igor Fernandes e Luyse Rebeca, por todos os momentos bons e difíceis que passamos juntos e todo o apoio mútuo que nos proporcionamos durante o curso

As minhas amigas Bianca Muniz e Jucimara Cardoso, por toda paciência e solicitude que sempre demonstraram para me ajudar em diversos momentos de dificuldade e dúvidas.

Muito obrigado!

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu avô, Antônio Camilo (*in memoriam*), que sempre dedicou seus esforços em vida para me propiciar condições de formação, acadêmica e de caráter, e tanto desejou me ver concluindo este curso.

“Nossas virtudes e nossos defeitos são inseparáveis, assim como a força e a matéria. Quando se separados, o homem deixa de existir.”

(Nikola Testa)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema dos ligantes asfálticos.	19
Figura 2 – Consumo de asfaltos nas refinarias da Petrobras.	21
Figura 3 – Classificação dos CAP por penetração e especificações.	23
Figura 4 – Classificação das misturas de acordo com a temperatura.	25
Figura 5 – Árvore de copaíba (<i>Copaifera langsdorffii</i>).	29
Figura 6 – Óleo de copaíba comercializado.	29
Figura 7 – Fluxograma da pesquisa.	33
Figura 8 – Aparelho utilizado para realização do ensaio de penetração	35
Figura 9 – Variação da perda de massa dos ligantes em estudo.	37
Figura 10 – Ensaio de penetração antes e após o RTFO.	39
Figura 11 – Porcentagem de Penetração Retida (PPR).	40
Figura 12 – Ponto de amolecimento dos ligantes puro e modificados.	41
Figura 13 – Variação do ponto de amolecimento (PA) antes e após RTFO.	42
Figura 14 – Viscosidade rotacional antes do RTFO.	43
Figura 15 – Viscosidade rotacional após o RTFO.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nomenclatura das amostras.....	34
Tabela 2 – Ensaio de caracterização reológicas básicas dos ligantes.....	35
Tabela 3 – Temperaturas de usinagem e compactação dos ligantes.	44

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

ABEDA	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfaltos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	Asfaltos diluídos
AMP	Asfaltos modificados por Polímeros
ANP	Agencia Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
cP	Centipoise
DECONCIC	Departamento da Indústria da Construção e Mineração
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EUA	Estados Unidos da América
LTDA	Limitada
PA	Ponto de Amolecimento
Pa·s	Pascal Segundo
RPM	Rotações Por Minuto
RTFO	<i>Rolling Thin-Film Oven Test</i>
SINICESP	Sindicato da Indústria da Construção Pesada do Estado de São Paulo
SUPERPAVE	<i>Superior Performing Asphalt Pavement System</i>
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
WMA	<i>Warm Mix Asphalt</i>
α	Difusividade Térmica
°C	Grau Celsius

RESUMO

A malha rodoviária no Brasil é o principal modal de transporte e meio de circulação de pessoas e bens de consumo, sendo, portanto, fundamental para o crescimento social e econômico do país, bem como a interligação de suas regiões e integração da matriz de transporte brasileira. As principais patologias existentes nos pavimentos flexíveis brasileiros são originárias do elevado número de veículos e acréscimo de suas cargas, como também de condições ambientais e pouco ou ausente manutenção desse modal de transporte. Deste modo, a indústria da pavimentação tem focado no desenvolvimento e utilização de novas técnicas nos últimos anos, como a modificação de ligantes asfálticos, visando minimizar esses defeitos. Ademais, com o uso de modificadores, é possível reduzir as temperaturas de usinagem e compactação dos ligantes, produzindo as chamadas misturas mornas, proporcionando, também, benefícios na temática ambiental, por gerar maior economia de energia despendida e redução na emissão de gases causadores de efeito estufa. Por conseguinte, este estudo tem como objetivo avaliar o comportamento físico e térmico do ligante asfáltico CAP 50/70 modificado por adição de óleo de copaíba nos teores de 1, 2 e 3%. Foram realizados os ensaios de caracterização física, ensaio de envelhecimento a curto prazo (RTFO), ensaio de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional, para determinação das novas propriedades físicas do material e avaliação da perda de massa com o aumento da temperatura. Verificou-se que a adição do óleo de copaíba ao ligante asfáltico promoveu a obtenção da melhoria das propriedades físicas e consequentemente a redução das temperaturas de usinagem e compactação, destacando-se o teor de 3% de óleo de adição de óleo de copaíba que apresentou os melhores resultados para os parâmetros analisados. Entretanto, o ligante modificado com esse teor não se encaixou na classificação de penetração para CAP 50/70, sendo necessário novos testes.

Palavras-chave: Ligante Asfáltico. Caracterização Física. Pavimentação.

ABSTRACT

The highway network in Brazil is the main means of transportation and circulation of people and consumer goods, and is therefore fundamental to the social and economic growth of the country, as well as the interconnection of its regions and integration of the Brazilian transportation matrix. The main pathologies existing in Brazilian flexible pavements originate from the high number of vehicles and the increase of their loads, as well as from environmental conditions and little or no maintenance of this mode of transportation. Thus, the paving industry has focused on the development and use of new techniques in recent years, such as modification of asphalt binders, to minimize these defects. Moreover, with the use of modifiers, it is possible to reduce the machining and compaction temperatures of the binders, producing the so-called warm mixtures, also providing benefits in the environmental theme, by generating greater energy savings and reduction in the emission of gases causing greenhouse effect. Therefore, this study aims to evaluate the physical and thermal behavior of modified asphalt binder CAP 50/70 by addition of copaiba oil in the contents of 1, 2 and 3%. The physical characterization tests were performed: thermodifferential analysis, thermogravimetric analysis, and exploratory differential calorimetry, to determine the thermal properties of the material and to evaluate mass loss with increasing temperature. It was verified that the addition of copaiba oil to the asphalt binder promoted the improvement of physical properties and consequently the reduction of machining and compaction temperatures, highlighting the content of 3% of copaiba oil addition oil that presented the best results for the analyzed parameters.

Key-words: Asphalt Binder. Properties. Paving.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivos.....	15
<i>1.2.1 Objetivo Geral.....</i>	<i>15</i>
<i>1.2.2 Objetivos Específicos.....</i>	<i>15</i>
1.3 Organização do Trabalho de Conclusão de Curso - TCC.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 Ligantes asfálticos.....	17
<i>2.1.1 Tipos de ligantes asfálticos.....</i>	<i>18</i>
<i>2.1.2 Usos e aplicações dos ligantes asfálticos.....</i>	<i>20</i>
2.2 Propriedades e caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo	21
2.3 Misturas asfálticas e modificação de ligantes asfálticos	25
<i>2.3.1 Misturas mornas</i>	<i>26</i>
<i>2.3.2 Modificadores de ligantes e classificação das misturas mornas.....</i>	<i>27</i>
2.4 Propriedades e aplicações do óleo de copaíba.....	28
2.5 Tipos de pavimentos	31
3 MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Materiais.....	31
<i>3.1.1 Ligante asfáltico.....</i>	<i>32</i>
<i>3.1.2 Óleo de copaíba.....</i>	<i>32</i>
3.2 Métodos	32
<i>3.2.1 Procedimento de mistura.....</i>	<i>34</i>
<i>3.2.2 Nomenclatura das amostras</i>	<i>34</i>
<i>3.2.3 Caracterização reológica básica dos ligantes.....</i>	<i>34</i>

3.2.2.1 Ensaio de Penetração	35
3.2.2.2 Ponto de Amolecimento	36
3.2.2.3 Viscosidade Rotacional	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1 Envelhecimento a curto prazo - RTFO	37
4.2 Ensaio de Penetração	38
4.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento	40
4.4 Ensaio de Viscosidade Brookfield.....	42
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	46
5.1 Considerações Finais	46
5.2 Sugestões para pesquisas futuras.....	47
REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

O transporte de cargas e pessoas no Brasil é majoritariamente realizado pelo meio rodoviário. Os poucos investimentos nos setores ferroviários e hidroviários, além do elevado custo do transporte aéreo, justificam a predominância da movimentação por rodovias pavimentadas, como expõe Lucena *et al.* (2016). Entretanto, a eficiência desse modal de transporte está intrinsecamente ligada à resistência e durabilidade das misturas asfálticas, usados na pavimentação dessas rodovias, principalmente no que tange a manutenção de suas características ao longo do tempo (GRAÇA, 2016).

Conforme Mothé (2009), as misturas asfálticas são constituídas principalmente de agregados minerais, materiais de enchimento (*filler*) e um ligante asfáltico. No Brasil, utiliza-se como principal ligante o Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP. Na visão do mesmo, a homogeneidade, resistência ou durabilidade do pavimento estará fortemente ligada ao comportamento deste ligante. De acordo com Nascimento e Faxina (2017), a ruína da camada asfáltica está ligada ao complexo fenômeno de envelhecimento dos ligantes, que promovem alterações químicas e físicas nesses materiais por mecanismos de degradação e trincamento por fadiga e/ou por origem térmica.

Em face disso, tem-se buscado, na indústria da pavimentação, a adição de materiais para obter-se uma melhora das características dos ligantes asfálticos, como os já bem difundidos e com resultados satisfatórios, estudos sobre modificação por polímeros. Não obstante, outro ponto bastante contemporâneo, é a problemática ambiental, onde busca-se a usinagem de misturas a temperaturas mais baixas, proporcionando uma maior economia de energia despendida e redução na emissão de gases causadores de efeito estufa durante processos de usinagem e compactação desses materiais (GUERRA, 2019).

Acerca dessa discussão, uma das técnicas recentes é a das chamadas misturas mornas ou “*Warm Mix Asphalt*”. As misturas asfálticas mornas diferem das misturas asfálticas convencionais pelas temperaturas nas quais são produzidas. As misturas asfálticas a frio são executadas em temperatura ambiente, variando entre 20 e 50°C, enquanto as misturas asfálticas a quente são produzidas em temperaturas variando entre 140 e 180°C. As misturas asfálticas “mornas” são

produzidas em temperaturas entre 105 e 135°C. Tais misturas podem propiciar benefícios em relação ao meio ambiente, o ambiente de trabalho e a qualidade final do material asfáltico (BUDNY, 2012; SILVA, 2016).

Dessa forma, abre-se espaço para tecnologias com a utilização de modificadores naturais e reaproveitados de processos industriais, que buscam aliar a modificação de características com o conceito de sustentabilidade, conforme salientou Santos (2017). “Na literatura é possível encontrar pesquisas com produtos naturais associados ao ligante asfáltico, como óleos vegetais de mamona, linhaça, algodão, dendê, soja, milho e moringa” (SANTOS, 2017, p. 18).

Nesse estudo, o ligante será modificado pelo óleo de copaíba, cuja a caracterização do material será analisada, no ligante puro e modificado nos teores de 1, 2 e 3%, por meio do estabelecimento das propriedades físicas fundamentais, proporcionado, como evidencia Mothé (2009), uma maior compreensão das suas propriedades físico-químicas e da forma que estes ligantes atuam nos pavimentos, podendo assim sugerir a melhor composição do ligante para determinado tipo de pavimento.

Assim, o óleo extraído da copaibeira se mostra promissor devido sua ampla utilização, já bastante difundida, em indústrias como a farmacêutica; cosmética; e na própria construção civil, tratando-se de um modificador de fácil obtenção no mercado (Pieri *et al.*, 2009). Ademais, esse óleo-resina surge como uma alternativa renovável e de baixo custo para fabricação de misturas mornas, podendo trazer benefícios técnicos, econômicas e ambientais, no âmbito desse estudo, mediante à análise das novas propriedades desse material.

1.1 Justificativa

A principal pauta de relevância desse estudo se dá na preocupação com o desenvolvimento sustentável, que promove a busca por novas tecnologias que minimizem o impacto ambiental provocado por técnicas usuais na engenharia, sem que ocorra uma diminuição na qualidade durabilidade, economia e segurança dos materiais empregados. Em outros estudos, a utilização de agentes oleicos já se

mostrou como uma alternativa para melhoria da viscosidade durante as operações de usinagem e compactação da mistura asfáltica, melhorando sua trabalhabilidade.

Á face do exposto, a pesquisa com o óleo de copaíba se mostra interessante por se tratar de um modificador renovável de baixo custo e fácil acesso, com potencial de promover a diminuição da temperatura na produção de misturas asfálticas. Como aponta Lucena *et al.* (2016), a adição de aditivos orgânicos ou químico em ligantes asfálticos podem diminuir as temperaturas de operação de usinagem e campo em cerca de 37 °C. Por conseguinte, a importância de realizar-se pesquisas na área de misturas mornas, para se identificar técnicas ou produtos mais efetivos e convenientes para atingir-se essa redução.

O uso dos teores de 1, 2 e 3%, para uma análise preliminar, se justificam ao se estudar na literatura trabalhos que utilizam modificadores naturais, como o líquido de castanha de caju, e óleos de mamonas e moringa, percebe-se que teores no intervalo de 0,5 a 5% são os que apresentam melhores resultados, pois obtém-se uma significativa diminuição das temperaturas de usinagem sem comprometer o desempenho do ligante. (RIBEIRO, 2011; SOUZA, 2012; LUCENA *et al.*,2016)

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo avaliar as propriedades físicas e térmicas do ligante asfáltico puro e modificado por adição de óleo de copaíba nos teores de adição de 1%, 2% e 3%.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o efeito da adição do óleo de copaíba no comportamento físico do ligante asfáltico;
- Determinar a perda de massa ocorrida com o aumento da temperatura para o ligante asfáltico puro e modificado por adição de óleo de copaíba.

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 à ligantes asfálticos e suas definições, tipos, caracterização, propriedades, usos e aplicações; às misturas asfálticas e modificares de ligantes; às propriedades e aplicações do óleo de copaíba; e por fim, os tipos de pavimentos utilizados na malha rodoviária brasileira

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 físico dos ligantes asfálticos, puro e modificados.

Considerações Finais e Sugestões para pesquisas futuras – São apresentadas as considerações acerca da pesquisa e apresentadas sugestões para estudos futuros que contemplem análises sobre o tema proposto.

Por fim, estão as Referências, onde estão listados os estudos citados na pesquisa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, será apresentada uma revisão bibliográfica acerca de ligantes asfálticos suas definições, tipos, usos e aplicações, com ênfase no CAP, ligante utilizado neste trabalho. Ademais, também será abordado as propriedades gerais dos ligantes e, em especial, no que tange a caracterização física, tema deste trabalho.

Também, serão discutidas as formas de modificação dos ligantes e as propriedades do agente modificador utilizado nesta pesquisa: o óleo de copaíba. Finalmente, serão expostos outros trabalhos que contemplam esta temática, traçando correlações e perspectiva de novos resultados com os dados que podem ser alcançados.

2.1 Ligantes asfálticos

Os ligantes asfálticos, ou asfaltos, são uns dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem, possibilitando diversos tipos de usos, desde a agricultura até a indústria. Na pavimentação, se apresenta como um dos mais importantes e um dos mais antigos também, entre todos os outros materiais. Na maioria dos países do mundo, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento das rodovias de transporte. No Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico, além de ser também utilizado em grande parte das ruas (BERNUCCI, 2008).

O SINICESP (2010) corrobora com o exposto ao afirmar que cerca de 97% das rodovias brasileiras possuem pavimento flexível, sendo o asfalto, o componente principal das camadas de rolamento e às vezes de camadas intermediárias da estrutura. Tal uso intensivo se justifica por razões como: proporcionar forte união dos agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável; é impermeabilizante, é durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais, podendo ser utilizado aquecido, diluído em solventes de petróleo ou emulsionado em água, em amplas combinações de esqueleto mineral (BERNUCCI, 2008; SINICESP, 2010).

O órgão estrangeiro Asphalt Institute (2007), dos EUA, define ligantes asfálticos de petróleo, ou apenas ligantes asfálticos, como sendo cimentos asfálticos com ou sem a adição de agentes modificadores, os quais não devem ser maiores do que 250 µm (micrômetros). Em contrapartida, o órgão nacional - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) – traz a seguinte definição:

Asfalto é um material de cor escura e consistência sólida ou semissólida, 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 consistência variável e poder aglutinante e impermeabilizante (ANP).

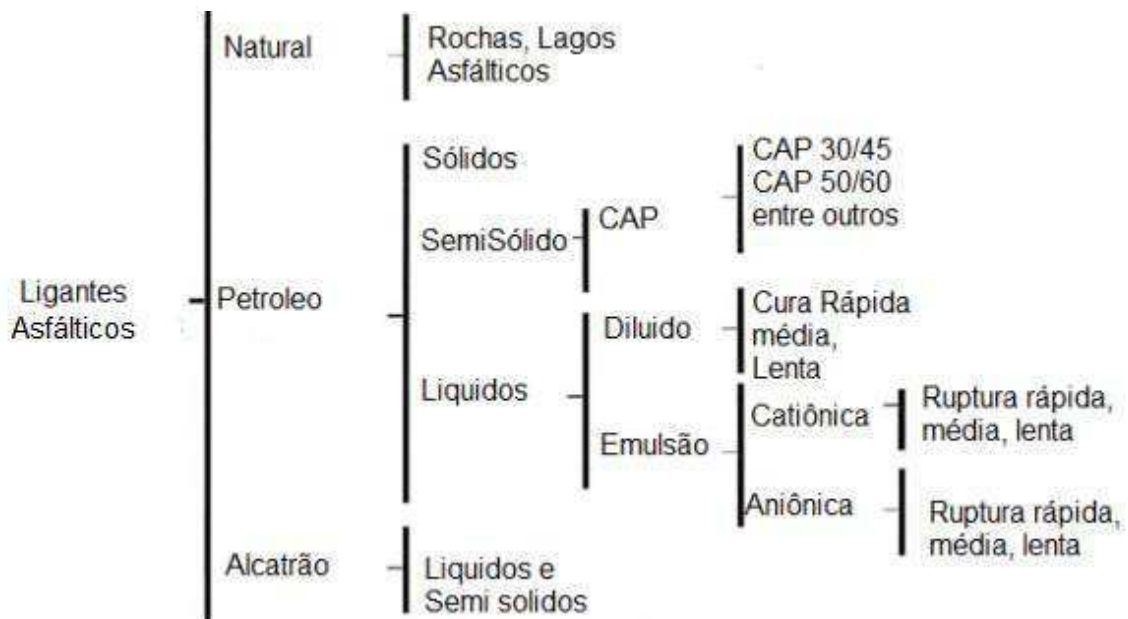
Pizzorno (2010) e Bernucci (2008) explicam que a composição química dos asfaltos complexa e varia consideravelmente em função da natureza dos petróleos e do esquema induzidas nos processos de refino, durante o envelhecimento na usinagem e em serviço. O DNIT (1998 *apud* ROSA JÚNIOR, 2015) define que: “Quimicamente o asfalto é definido como um sistema coloidal constituído por micelas de asfaltenos dispersas em um meio intermicelar oleoso, formado pela mistura de resinas, óleos aromáticos e saturados, chamados maltenos.”

A ANP (201-?) define que o asfalto é um subproduto proveniente da destilação do petróleo, sendo obtido pelo refino do óleo cru, onde este é submetido ao processo de destilação fracionada e, após a remoção das frações mais leves (gasolina, querosene, gásóleo), os produtos asfálticos são obtidos no fundo da torre. Ademais, geralmente se aos asfaltos a uma série de derivados do petróleo, que constituem os tipos de asfalto ou ligantes asfálticos de petróleo.

2.1.1 Tipos de ligantes asfálticos

Segundo Mothé (2009), existem três grandes divisões para os ligantes asfálticos: Ligante asfáltico natural (asfalto natural), alcatrão, e o ligante asfáltico de petróleo (asfalto de petróleo), material utilizado neste trabalho. Uma divisão mais completa é ilustrada na Figura 1.

Figura 1 – Esquema dos ligantes asfálticos.



Fonte: Adaptada de Pizzorno (2010)

Conforme mencionado, os ligantes asfálticos de petróleo compreendem um grupo de subprodutos do petróleo, subdivididos em diversos tipos. Segundo a PETROBRAS (2019), principal responsável pelo fornecimento dos asfaltos básicos no Brasil, existem os seguintes tipos de asfalto:

- Cimentos asfálticos de petróleo – CAP: materiais bastante viscosos, semissólidos ou sólidos à temperatura ambiente, que ao serem aquecidos, tornam-se fluidos e após ao resfriamento, retornam ao seu estado original, apresentando uma característica de comportamento termoplástico, A consistência do CAP depende da quantidade de fração oleosa remanescente, sendo esse um critério utilizado para sua classificação, traduzida pela viscosidade ou penetração.
- Asfaltos diluídos - ADP: constituídos por misturas de CAPs com solventes, onde, de acordo com o tipo de solvente utilizado, obtém-se asfaltos de cura rápida (CR) usando-se nafta, de cura média (CM) usando-se querosene, de cura lenta (CL) usando-se gasolina. Essas misturas são realizadas para aumentar a fluidez do CAP. Os solventes, por serem voláteis, evaporam após a aplicação, deixando o cimento asfáltico rígido;

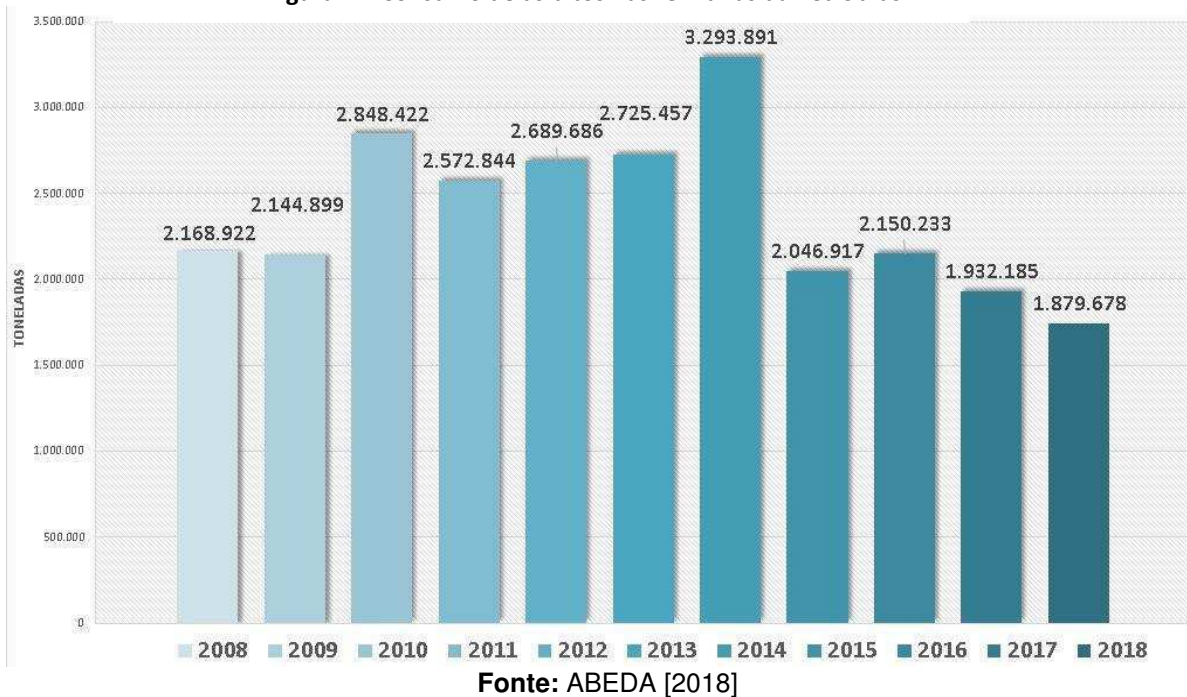
- Emulsões asfálticas: se constituem em pequenas partículas ou glóbulos de CAP, suspensos em água contendo um agente emulsificante. Quando estas emulsões são aplicadas, as partículas de CAP se depositam sobre o agregado mineral, causando a ruptura da emulsão, separando-se da água, resultando em uma camada de cimento asfáltico rígido. As emulsões asfálticas são classificadas como de ruptura rápida (RR), de ruptura média (RM) e de ruptura lenta (RL).
- Asfaltos modificados - AMP: modificações realizadas em cimentos asfálticos de petróleo pela adição de asfaltos naturais como gilsonita (EUA), asfaltita (Argentina) e asfalto de Trinidad. Ademais, podem ser adicionados cal, cimento, sílica, fibras (fibra de vidro, asbestos, fibras de celulose e fibras poliméricas), enxofre elementar ou polímeros (SBR, SBS, EVA) para ampliar a resistência do produto, entre outros;
- Agentes rejuvenescedores: materiais utilizados para reciclar os asfaltos envelhecidos, retirados do pavimento, por sofrerem degradação pela ação do tempo, da temperatura, do ar e da luz solar.

Bernucci (2008) salienta que existem outras técnicas como a de asfalto-espuma, sendo empregada no Brasil, mas que não constitui uma outra classe de material pelo tipo de modificação de curta duração que sofre o CAP convencional nesta condição.

2.1.2 Usos e aplicações dos ligantes asfálticos

Embora existam aplicações de asfaltos para fins de impermeabilização comercial e industrial, com mantas asfálticas e asfalto oxidados, por exemplo, o principal uso do asfalto é na pavimentação rodoviária, portuária e aeroportuária. DECONCIC (2019).

A ABEDA (2018) traz dados acerca da distribuição dos CAP e ADP, realizados pela Petrobras, com o consumo anual desde 2008 até o presente, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Consumo de asfaltos nas refinarias da Petrobras.

Tal gráfico demonstra que houve uma queda no uso do material, possivelmente devido à crise econômica, que atingiu o país por volta de 2014 e ainda está vigente, causando efeitos negativos em diversos setores, incluindo a construção civil. Entretanto, evidencia-se que o uso ainda permanece alto, com mais de 1 milhão e 800 mil toneladas sendo consumidas no ano de 2018, reforçando a premissa deste ser um dos principais materiais utilizados na construção e o principal na indústria da pavimentação.

2.2 Propriedades e caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo

O asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, ou seja, passa do estado sólido para o líquido de maneira reversível, onde é aplicado a altas temperaturas e através do resfriamento adquire as propriedades de serviço. Ademais, o CAP é impermeável à água e pouco reativo. Entretanto, a baixa reatividade química a muitos agentes não evita que esse material possa sofrer um processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água (BERNUCCI, 2008).

O CAP é obtido especialmente para apresentar características adequadas para o uso na construção de pavimentos, proveniente no fundo da torre de destilação a vácuo, de acordo com as especificações brasileiras. À temperatura ambiente são semissólidos e precisam ser aquecidos para adquirir a consistência adequada para serem misturados com os agregados. São flexíveis, impermeáveis, aglutináveis e resistentes a ação da maioria de ácidos, sais e álcalis (DNER, 1999, *apud* MOTHÉ, 2009).

Assim, devido a sua importância no setor, o CAP precisa atender a diversas especificações, onde suas propriedades devem estar em limites estabelecidos por normas reguladoras, para garantir sua qualidade e durabilidade em suas aplicações. Há um tempo, os cimentos asfálticos de petróleo eram classificados pela sua viscosidade, que abrangiam três tipos:

- CAP-7;
- CAP-20;
- CAP-40.

Acerca dos ensaios de viscosidade dos cimentos asfálticos, de acordo com DECONCIC (2009, p. 19), tem-se:

O teste de viscosidade pode ser feito em vários equipamentos que em geral medem relação de tempo ou esforço de escoamento sob determinadas condições. Um dos ensaios mais tradicionais de medida indireta da viscosidade é o realizado no viscosímetro Saybolt Furol. [...] Quanto maior a viscosidade, mais tempo levará para o preenchimento do frasco e o asfalto será mais consistente. A Viscosidade condiciona à faixa de temperatura que será empregada para a produção de misturas asfálticas em usina e, por conseguinte, a faixa de temperatura ideal em pista para sua compressão/compactação. Viscosidade baixa possibilita trabalhar com o asfalto em temperaturas mais baixas para realizar misturas com agregados. Viscosidade alta exige temperaturas mais elevadas para se ter a mesma condição de mistura com agregados.

Entretanto, desde de 2005, por meio da Resolução ANP nº 19, de 11 de julho de 2005 da Agência Nacional de Petróleo (ANP), foi adotada uma nova especificação para os CAPs empregados em serviços de pavimentação. Além da ANP, o DNIT, por meio da Norma 095/2006 (Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação do Material), regulamenta as especificações do CAP, segundo sua procedência (PORTUGAL, 2016). Esta mesma norma, classifica os Cimentos

Asfálticos de Petróleo de acordo com os valores de penetração, como ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Classificação dos CAP por penetração e especificações.

CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	LIMITES				MÉTODO	
		CAP 30 45	CAP 50 70	CAP 85 100	CAP 150 200	ABNT	ASTM
Penetração (100 g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 45	50 70	85 100	150 200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, mín	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade SayboltFurol	s					NBR 14950	E 102
a 135 °C, mín		192	141	110	80		
a 150 °C, mín		90	50	43	36		
a 177 °C		40 150	30 150	15 60	15 60		
OU							
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184	D 4402
a 135°C, SP		374	274	214	155		
21, 20 rpm, mín							
a 150 °C, SP		203	112	97	81		
21, mín.							
a 177 °C, SP 21		76 285	57 285	28 114	28 114		
Índice de susceptibilidade térmica (1)		(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)	(1,5) a (+0,7)		
Ponto de fulgor mín	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
Ductilidade a 25° C, mín	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163 °C, 85 min							D 2872
Varição em massa, máx (2)	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5		
Ductilidade a 25° C, mín	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín (3)	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

Fonte: PETROBRAS (2019)

Conforme observado na tabela acima, a ANP classifica o CAP de acordo com o seu “grau de dureza”, onde essa penetração é definida em décimos de milímetros. A penetração é um ensaio que busca avaliar a consistência do asfalto obtido pela penetração de uma agulha padrão, onde quanto maior a penetração mais mole e mais maleável será o produto (ROSA JÚNIOR, 2015).

Dessa forma, conforme essa especificação, o CAP pode ser classificado em:

- CAP 30-45;
- CAP 50-70;
- CAP 85-100;
- CAP 150-200.

Além das propriedades de viscosidade e consistência (penetração), Pizzorno (2010) apresenta e explica outras características que especificam o material, bem como seus ensaios de determinação, como seguem:

- Ductilidade: este ensaio permite determinar o comprimento máximo (em cm) que um determinado corpo de prova de um cimento asfáltico pode alcançar quando tracionado a 25°C a uma velocidade de 5 cm/min;
- Ensaios de durabilidade: e curto prazo, os asfaltos sofrem envelhecimento (endurecimento) quando misturados com agregados minerais em usinas devido a seu aquecimento. Já a longo prazo, ocorre durante a vida útil do pavimento que estará submetido a diversos fatores ambientais. Os ensaios de envelhecimento acelerado designados de “efeito do calor e do ar” são usados para tentar simular o envelhecimento do ligante na usinagem. Um novo ensaio de avaliação do envelhecimento do asfalto passou a ser conhecido como Rolling Thin Film Oven Test – estufa de filme fino rotativo (RTFO) ou película delgada rotacional;
- Solubilidade: consiste em um ensaio de pureza para verificar se houve contaminação. Devido ao betume ser uma mistura de hidrocarbonetos de consistência sólida, líquida ou gasosa, completamente solúvel em bissulfeto de carbono (CS₂), que por ser um solvente apolares tem a tendência de solubilizar compostos apolares que constituem o asfalto, portanto a porção insolúvel, que é a impureza é detectada por esse ensaio. Este ensaio também é conhecido também como teor de betume no asfalto.
- Ponto de fulgor: é determinado pela temperatura na qual os vapores emanados durante o aquecimento do CAP se inflamam em contato com a chama. Dessa forma, este ensaio é visto como um indicador na prevenção de incêndio;
- Adesividade: é a qualidade que o agregado deve possuir, de se deixar recobrir por uma película, a qual deve resistir à ação da água, sem se romper, sendo uma das propriedades mais importantes que influenciam a durabilidade para uma mistura de asfalto.
- Suscetibilidade térmica: indica a sensibilidade da consistência dos ligantes asfálticos à variação de temperatura. Portanto, trata-se de uma propriedade importante dos ligantes asfálticos, pois se forem muito suscetíveis à variação

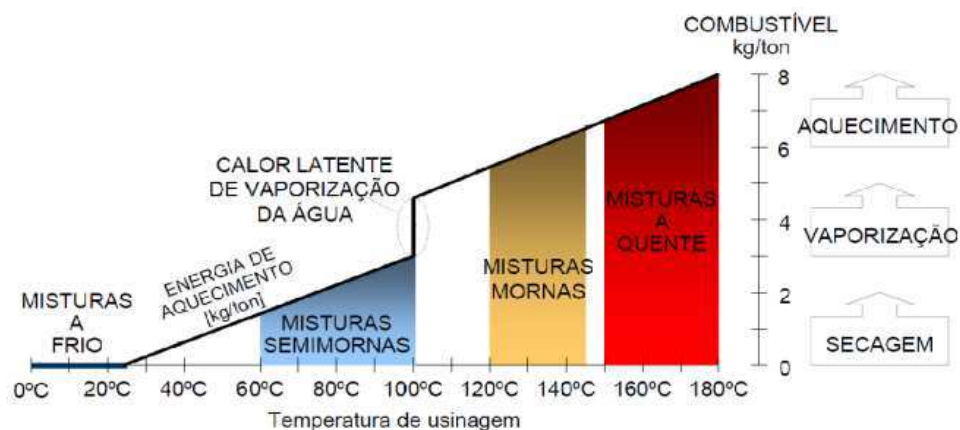
de estado ou de propriedades frente à variação de temperatura, não serão desejáveis na pavimentação, pois é desejável evitar grandes variações de propriedades mecânicas, nas temperaturas de serviço dos revestimentos. Normalmente, calcula-se o Índice de Suscetibilidade Térmica ou Índice de Penetração, pelo procedimento proposto por Pfeiffer e Van Doormaal.

2.3 Misturas asfálticas e modificação de ligantes asfálticos

Misturas asfálticas são resultantes da associação de materiais granulares com ligantes asfálticos. Esta deve ter composição granulométrica definida de acordo com a função e utilização do pavimento, assim como o tipo de ligante asfáltico, que tem como função assegurar as propriedades visco-elástica e proporcionar agregação dos materiais granulares. Juntamente, pode-se haver presença de aditivos, que oferecem a possibilidade de modificar ou adicionar determinadas características às misturas (SALES, 2015).

Ainda de acordo com Sales (2015), as misturas asfálticas podem ser classificadas, quanto à temperatura de usinagem, em quatro tipos: misturas a quente, misturas mornas, misturas semimornas e misturas a frio, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Classificação das misturas de acordo com a temperatura.



Fonte: Sales (2015)

2.3.1 Misturas mornas

Das mencionadas, se destaca o asfalto morno ou mistura morna, cuja expressões têm sido usadas no Brasil para representar a sigla em inglês WMA (*Warm Mix Asphalt*) que agrupa uma série de tecnologias que comportam a redução da temperatura em que as misturas asfálticas são produzidas e/ou aplicadas. Conforme Cavalcanti (2010), estas tecnologias proporcionam a diminuição da viscosidade ou da tensão superficial do asfalto em temperaturas de 20 a 55°C mais baixas que a temperatura das misturas quentes. Assim, há melhoria na trabalhabilidade e na compactação, redução da permeabilidade e do endurecimento da ligante e conseqüente melhoria no desempenho em termos de resistência a formação de trincas.

Silva (2016) complementa o exposto ao afirmar que as misturas semimornas e mornas são consideradas misturas de baixa energia de produção, enquanto que se verifica um alto consumo de combustível na usinagem da mistura a quente, tendo em vista a necessidade da secagem dos agregados pétreos, manutenção da temperatura e redução da viscosidade do asfalto. Em consoante, Portugal (2016) alerta que é desejável a diminuição da temperatura na produção de misturas asfálticas sobretudo por parte da motivação ambiental, enfatizando a importância das reduções das emissões de gases poluentes e do consumo de energia.

Em suma, as misturas mornas ou WMA proporcionam os seguintes benefícios (D'ANGELO *et al.*, 2008, *apud* CAVALCANTI, 2010):

- Redução do consumo de energia;
- Redução da emissão de poluentes (CO₂, SO₂; compostos orgânicos voláteis, CO, NO_x, poeira);
- Melhorias no campo da compactação;
- Facilidade em ser transportado por maiores distâncias, devido a menor perda de temperatura;
- Menor exposição dos trabalhadores aos compostos e fumaças emitidos pela mistura quente;

- Menor taxa de resfriamento, devido à maior proximidade da temperatura de mistura em relação à temperatura ambiente.

2.3.2 Modificadores de ligantes e classificação das misturas mornas

Em virtude do que foi discutido, a indústria da pavimentação tem buscado o investimento em novos processos e tecnologias. Segundo Budny (2012), tais tecnologias tiveram suas primeiras discussões no final da década de 1990, visando o menor consumo de energia de usinagem, melhores condições de trabalho, maiores lucros e menores danos ambientais, entre outros aspectos de qualidade e durabilidade. Isso foi possível graças a utilização de produtos e processos modificadores da forma tradicional de misturas asfálticas a quente.

Rosa Júnior (2015, p. 9) explora outros pontos contendo razões do uso de modificadores nos ligantes asfálticos:

O uso de modificadores para melhorar as propriedades reológicas de um CAP e conseqüentemente de misturas asfálticas tem aumentado a cada ano. Os modificadores são adicionados visando melhorar o comportamento mecânico e conseqüentemente o desempenho funcional dos pavimentos, aumentando a resistência ao acúmulo de deformações permanente e ao aparecimento de trincas por fadiga e de contração térmica, retardando o envelhecimento prematuro do CAP e melhorando a interação entre o este e os agregados (adesividade).

Em virtude do que foi discutido, a indústria da pavimentação tem buscado o investimento em novos processos e tecnologias. Segundo Budny (2012), tais tecnologias tiveram suas primeiras discussões no final da década de 1990, visando o menor consumo de energia de usinagem, melhores condições de trabalho, maiores lucros e menores danos ambientais, entre outros aspectos de qualidade e durabilidade. Isso foi possível graças a utilização de produtos e processos modificadores da forma tradicional de misturas asfálticas a quente.

Existem alguns tipos de modificadores cujo estudos vêm sendo realizados a fim de incorporar os benefícios supracitados. De acordo com o tipo utilizado na mistura, ela é classificada, de acordo com Budny (2012) e Silva (2016), em:

- Aditivo químico de ligantes: a principal vantagem dessa mistura é cobrir mais rapidamente os agregados e de lubrificar as partículas. Seu uso é feito

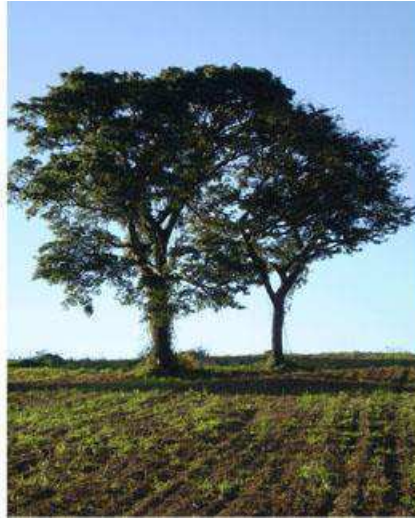
adicionando o produto diretamente ao ligante na hora da usinagem. Alguns exemplos de produtos com esta classificação são: EvothermTM e RedisetTM.

- Espumas de asfalto: este tipo de mistura morna pode ser feito com uso de zeólitas, que devido a sua propriedade de reterem água, permitem a espumação do asfalto ou por adaptação das usinas. As zeólitas são aluminossilicatos hidratados com estrutura molecular aberta (cerca de 20% de vazios) com íons positivos que estão fracamente ligados à estrutura e assim permitem a absorção e liberação de água. As mais utilizadas são: AdveraTM, Aspha-MinTM e WAM FoamTM;
- Aditivos orgânicos: são aditivos utilizados para diminuir a viscosidade do ligante e permitem que a mistura asfáltica tenha melhor trabalhabilidade quando comparada a do ponto de fusão. Alguns exemplos de aditivos orgânicos: SasobitTM, CCbitTM, cera de carnaúba, óleo de moringa, óleo de girassol, entre diversos outros estudados, incluindo o objeto deste estudo: óleo de copaíba.

2.4 Propriedades e aplicações do óleo de copaíba

Extraído das copaíbeiras, o óleo de copaíba é uma rica fonte de compostos ativos, apresentando grande importância, principalmente no ramo medicinal e farmacêutico. A copaíba é uma árvore de grande porte, podendo alcançar 40 metros de altura, 4 metros de diâmetro e pode viver até 400 anos, como ilustrado na Figura 5. Sendo nativas da América Latina, podem ser encontradas no México, Argentina e África Ocidental. No Brasil, são facilmente vistas nas regiões Amazônicas e Centro-Oeste (HECK *et al.*, 2012).

Figura 5 – Árvore de copaíba (*Copaifera langsdorffii*).



Fonte: Pieri *et al.* (2009)

Na definição de Heck *et al.* (2012) o óleo de copaíba é um líquido transparente, cuja coloração varia do amarelo até o marrom, como ilustrado na Figura 6, apresentando cheiro forte e um sabor amargo. Em relação as suas propriedades, estudos fitoquímicos demonstram que os óleos de copaíba são misturas de sesquiterpenos e diterpenos, sendo o ácido copálico e os sesquiterpenos β -cariofileno e α copaeno, os principais componentes do óleo.

Figura 6 – Óleo de copaíba comercializado.



Fonte: EQUIPE Editorial Tua Saúde (2018)

Na literatura, tem-se bastante relatos de sua utilização na medicina e na indústria farmacêutica, devido suas indicações terapêuticas anti-inflamatórias e cicatrizantes - características que se mostram como opções viáveis nos tratamentos

de diversas doenças. A partir desses fatores é importante constar que esse óleo-resina é bastante utilizado como fitoterápico, principalmente pela população que não tem acesso a produtos farmacêuticos e ao serviço de saúde (PEDRO, 2017).

Pieri *et al.* (2009) destaca diversos outros usos do óleo, como:

- Combustível na iluminação pública: Pelo fato de ser fonte muito rica e renovável de hidrocarbonetos, o óleo-resina tem sido intensamente avaliado como uma fonte de combustível, tendo sucesso comprovado, quando em mistura na proporção 1:9 com o óleo diesel;
- Na indústria de perfumes: óleo essencial de copaíba é muito, servindo como um excelente fixador de odores, combinando perfeitamente suas notas frescas e acres com essências portadoras de notas florais;
- Secativo: Na indústria de vernizes;
- Solvente: em pinturas de porcelanas;
- Aditivo, na confecção de borracha sintética;
- Na indústria de cosméticos: por suas propriedades emolientes, bactericidas e anti-inflamatórias, na fabricação de cremes, sabonetes, xampus e amaciantes de cabelo.

Embora o uso como aditivo modificador de misturas asfálticas ainda seja bastante recente, o óleo de copaíba se apresenta como uma possível alternativa para redução das temperaturas de produção e confecção de misturas mornas, tanto por suas características e versatilidade de uso, supracitadas, como pela questão de ser um material fácil de ser encontrado, de baixo custo e renovável.

À vista disso, como pontua, Lucena *et al.* (2016), é possível atingir essa redução, que se mostra desejável em aspectos como a busca por melhores resultados de trabalhabilidade e menor envelhecimento do ligante asfáltico, podendo possibilitar melhor desempenho do pavimento e aumentar a resistência ao trincamento, além da economia nos custos de execução devido a redução do consumo de energia combustível. Todavia, se faz necessário conhecer as características da nova mistura, incluindo suas novas propriedades térmicas, para posterior uso em pavimentos.

2.5 Tipos de pavimentos

Define-se como pavimento um sistema de várias camadas sobrepostas, com diferentes espessuras, com a finalidade de suportar esforços provenientes do tráfego e resistir às ações do meio ambiente, principalmente à umidade e temperatura, de modo a proporcionar conforto e segurança aos usuários e reduzir o custo global dos transportes (TRAMONTINI, 2007; HELLMANN, 2008).

Hellmann (2008) apresenta que os pavimentos são classificados quanto à deformabilidade em duas categorias, que se diferem pelos materiais utilizados nas camadas superiores. Os pavimentos rígidos possuem camadas superiores constituídas de cimento Portland e os pavimentos flexíveis, com camadas superiores constituídas por materiais betuminosos ou asfalto. Sob essas camadas, em ambos os pavimentos, normalmente existem duas camadas de materiais britados, designadas por sub-base e base. Além dessas nomenclaturas, Hellmann (2008) acrescenta que na literatura existe, também, o pavimento dito semirrígido quando, sob o revestimento betuminoso, tem-se uma base cimentada.

Utilizados em praticamente toda a malha pavimentada brasileira, os pavimentos flexíveis têm seu desempenho condicionado por um complexo conjunto de fatores, dentre eles as propriedades térmicas e mecânicas das camadas que o constituem, cujos mais severos defeitos que ocorrem em estruturas flexíveis se refletem no revestimento (SPECHT *et al.*, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção serão discriminados os materiais e as metodologias de realização dos ensaios dessa pesquisa.

3.1 Materiais

Para realização deste estudo foram utilizados um ligante asfáltico puro e um modificador natural, o óleo de copaíba.

3.1.1 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”.

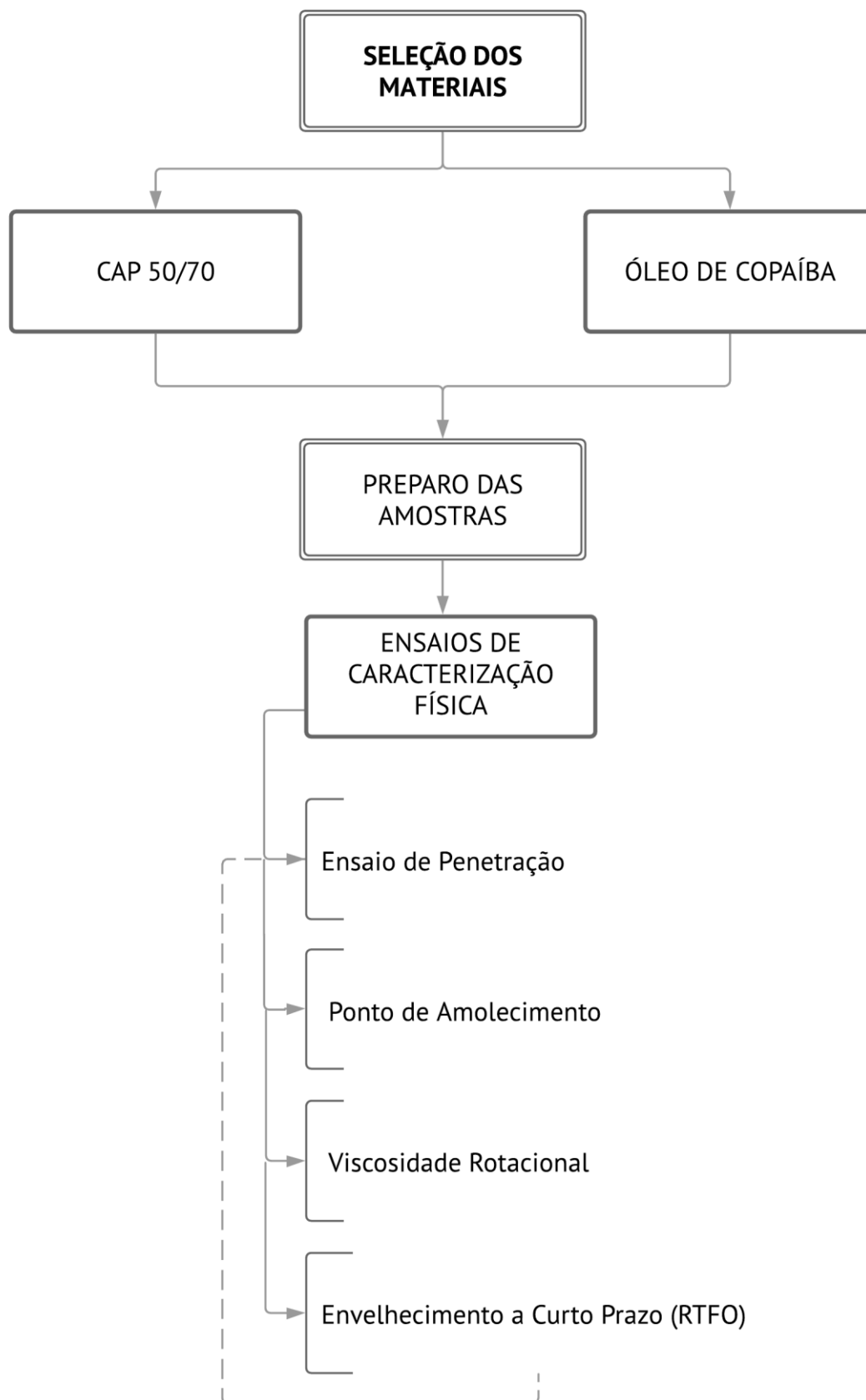
3.1.2 Óleo de copaíba

O óleo de copaíba utilizado foi facilmente adquirido na feira central em Campina Grande/PB.

3.2 Métodos

A Figura 7 ilustra o fluxograma das etapas da pesquisa, que se inicia com a seleção dos materiais, seguida pela retirada e preparo das amostras do ligante puro e modificado a fim de, por fim, realizar-se os ensaios de caracterização física do ligante puro e do novo material modificado.

Figura 7 – Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Dados da pesquisa (2019)

3.2.1 Procedimento de mistura

A produção do ligante modificado ocorreu a partir da adição de teores do óleo de copaíba nos teores de 1, 2 e 3%, em um misturador mecânico (FISATOM, Modelo 722). Para que ocorresse a mistura do material, primeiramente as amostras de ligante puro foram aquecidas em estufa a uma temperatura de aproximadamente 120°C. Posteriormente este ligante foi colocado em um misturador mecânica com rotações de 300 rpm. Quando se atingiu uma temperatura de 160°C, adicionou-se as percentagens de óleo de copaíba e a partir daí elevou-se as rotações para 2.000 rpm, mantendo a mistura por 30 minutos em cada um dos teores para a obtenção do material perfeitamente homogeneizado.

Passados então o tempo de 30 minutos de agitação, a mistura foi retirada do aparelho para esfriar em temperatura ambiente e ser estocada da maneira adequada. A metodologia utilizada nestes procedimentos tomou como base trabalhos realizados por Faxina (2006) e Souza (2012).

3.2.2 Nomenclatura das amostras

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

Tabela 1 – Nomenclatura das amostras.

Amostras	Nomenclatura
Ligante puro convencional	CAP 50/70
CAP 50/70 + 1% óleo de copaíba	1% óleo de copaíba
CAP 50/70 + 2% óleo de copaíba	2% óleo de copaíba
CAP 50/70 + 3% óleo de copaíba	3% óleo de copaíba

Fonte: Dados da pesquisa (2019)

3.2.3 Caracterização reológica básica dos ligantes

Foram utilizados ensaios para estabelecer as propriedades físicas fundamentais do ligantes asfálticos puro e modificado.

A fim de caracterizar os ligantes asfálticos foram realizados os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional, antes e após o procedimento de RTFO, seguindo a metodologia apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Ensaio de caracterização reológicas básicas dos ligantes

Procedimento	Metodologia
Penetração	DNIT 155/2010-ME
Ponto de amolecimento	DNIT 131/2010-ME
Viscosidade Rotacional	ABNT NBR 15184
Envelhecimento a curto prazo (RTFO)	ABNT NBR 15235/09

Fonte: Dados da pesquisa (2019)

3.2.2.1 Ensaio de Penetração

Segundo DNIT (2010), penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra verticalmente na amostra de material sob condições prefixadas de carga, tempo (5 segundos) e temperatura (25°C).

O procedimento foi realizado para se obter três medidas individuais de penetração, a média é aceita se a diferença entre as medidas desses. A Figura 8 ilustra o equipamento utilizado para a realização desse ensaio.

Figura 8 – Aparelho utilizado para realização do ensaio de penetração



Fonte: Dados da pesquisa (2019)

3.2.2.2 Ponto de Amolecimento

O ponto de amolecimento é uma medida empírica determinada pela menor temperatura na qual uma esfera metálica passa por um anel, ambos padronizados, preenchido com o material betuminoso e percorre uma determinada distância, sob condições pré-estabelecidas. É um método desenvolvido para medir a temperatura na qual o asfalto possui uma determinada consistência.

Neste ensaio, duas bolas de aço com peso e dimensões especificadas foram posicionadas no centro de um anel metálico padronizado, cada. O conjunto foi colocado dentro de um béquer contendo água à temperatura normal. Aqueceu-se a água contida no béquer a uma taxa controlada a fim de provocar o amolecimento do ligante asfáltico. Ao amolecer, o ligante não suportou mais o peso da bola, fazendo com que as esferas se desloquem para o fundo do béquer e, ocorrendo isso, anotou-se a temperatura na qual as esferas tocam a placa do fundo do conjunto padrão de ensaio. Caso a diferença de temperatura entre as duas amostras exceda 2°C, tem-se a necessidade de realizar novamente o ensaio.

3.2.2.3 Viscosidade Rotacional

O ensaio de viscosidade rotacional permite determinar a viscosidade dos ligantes e suas propriedades de consistência. É utilizada nas análises relacionadas com as operações de bombeamento e a estocagem dos ligantes asfálticos. A partir dos dados obtidos neste ensaio foi possível obter-se a curva viscosidade-temperatura.

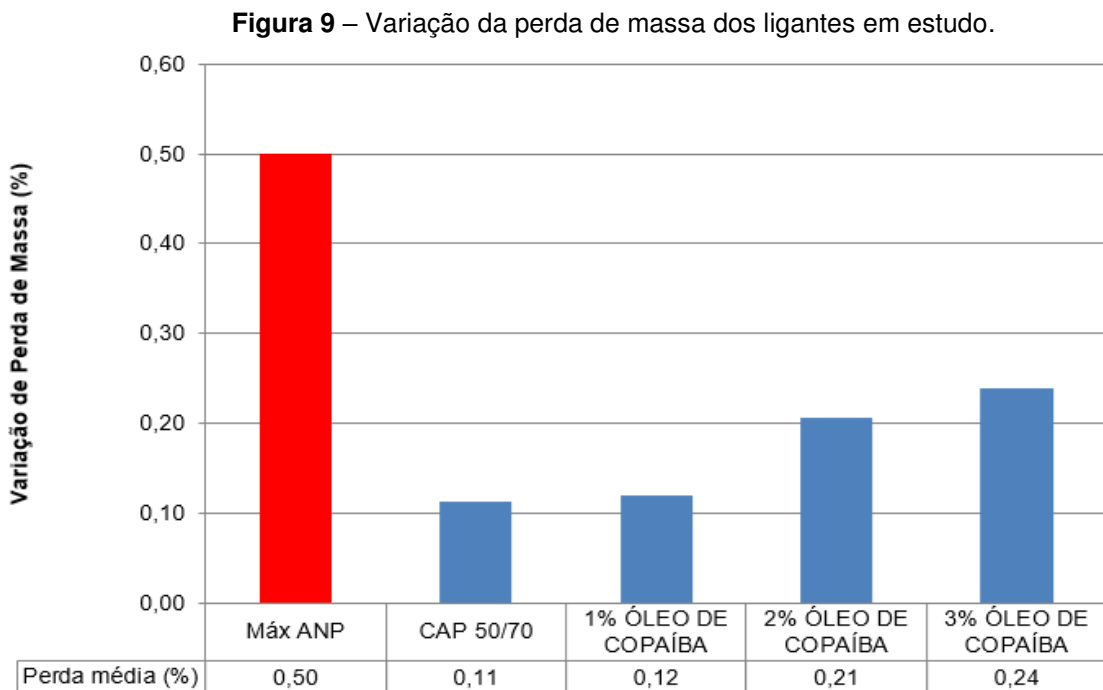
Utilizou-se um controlador de temperatura, juntamente ao viscosímetro rotacional, o qual permitiu fazer a medição do torque necessário para que a haste de prova (Spindle) rodasse ao ser mergulhado no ligante à temperatura, resistência à penetração e ponto de amolecimento já definidos, sob velocidade constante e uniforme. A rotação obtida determinou uma força necessária para vencer a resistência que a viscosidade do material fluido oferece ao movimento rotacional. O ensaio foi realizado nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram expressos os resultados dos ensaios de caracterização física realizados com o ligante puro e modificado e serão discutidas e analisadas as mudanças provocadas pelo óleo de copaíba no ligante asfáltico, em teores de 1, 2 e 3%.

4.1 Envelhecimento a curto prazo - RTFO

A Figura 9 ilustra os resultados das perdas de massa (%) do ligante puro e modificado, nos teores estabelecidos, após o envelhecimento.



Fonte: Dados da pesquisa (2019)

De acordo com os resultados obtidos verifica-se que o ligante puro exibiu menor perda de massa. Os outros ligantes modificados pelo óleo de copaíba obtiveram uma maior de perda de massa, aumentando gradualmente com o aumento dos teores de óleo. Este fato deve-se, provavelmente, a perda de componentes do óleo.

Considerando as especificações SUPERPAVE, em SHRP (2004), a perda de massa deve ser inferior a 1%, ao passo que, para a Resolução da ANP nº 19/2005,

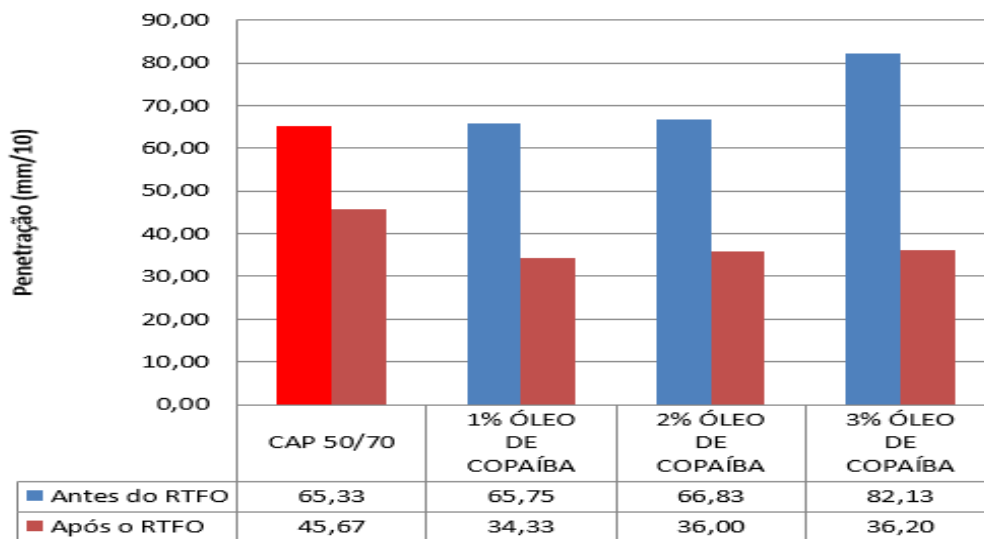
em ANP (2005), essa perda para ligantes puros deve ser de no máximo 0,5%. Deste modo, observa-se que todos os ligantes em questão se enquadraram nos critérios estabelecidos pelas normas referenciadas.

Segundo Cravo (2016), o envelhecimento pode ser prejudicial ou benéfico desde que o enrijecimento causado tenha um certo limite, pois quando excessivo, pode levar a ocorrência de trincas térmicas e por fadiga e, quando atuante de maneira razoável, pode ser útil na resistência à deformação permanente.

Conforme indicado por Tayth *et al.* (2014), os ensaios de envelhecimento como RTFO e o PAV podem não ser adequados a aplicação em ligantes modificados com óleos. Explicando ainda que quanto maior o teor do óleo, mais sujeito ao envelhecimento será o ligante modificado em razão da solubilização de parte da fração asfáltica. Assim, os tempos e temperaturas, de usinagem e compactação, devem ser inferiores aos tradicionalmente utilizados a fim de não promover o envelhecimento prematuro.

4.2 Ensaio de Penetração

O ensaio de penetração permite verificar a consistência do ligante à temperatura de 25°C, conforme preconiza a norma DNIT 155/2010-ME, estando a medida da penetração intimamente relacionada à propriedade de rigidez do pavimento. A Figura 10 ilustra os resultados obtidos para o ensaio de penetração do ligante em estudo.

Figura 10 – Ensaio de penetração antes e após o RTFO.

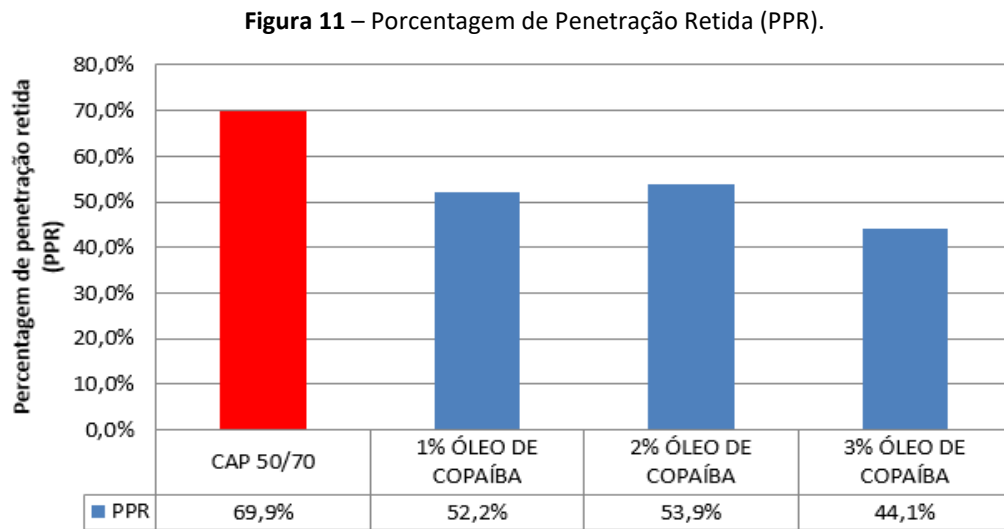
Fonte: Dados da pesquisa (2019)

De acordo com os resultados obtidos verifica-se que o aumento do teor do óleo de copaíba promoveu um aumento crescente na penetração do ligante. Esse acontecimento já era previsto, posto que trabalhos como o de Souza (2012), Costa (2015), Cavalcante (2016) e Portugal (2016), que dispuseram de estudos com a adição de modificadores oleicos a ligantes asfálticos, compreenderam a redução da rigidez do ligante com o aumento crescente da adição do agente modificador.

Conforme estabelece a Resolução ANP nº 19/2005 para esse parâmetro o intervalo é de 50 a 70 décimos de milímetro, cujos valores classificam o próprio ligante base utilizado nesta pesquisa. O resultado do ligante sem adição de óleo de copaíba e os ligantes modificados de 1% e 2% atenderam ao critério da especificação da ANP. Apenas o ligante de 3% não se enquadra no intervalo, pois apresentou aumento da penetração, obtendo um valor superior ao previsto para o ligante puro (ANP, 2005).

Comparando os resultados obtidos para o ligante em estudo antes e após o envelhecimento, obteve-se a penetração retida, que demonstra o quanto a penetração após o envelhecimento retrata a penetração na condição normal. Esse aspecto é de substancial relevância para analisar a sensibilidade do ligante ao envelhecimento e para esse fim a Resolução ANP nº 19/2005 estabelece o mínimo de 55% para essa variável. Desta forma, evidencia-se que maiores valores para a porcentagem de penetração retida (PPR) apontam uma menor sensibilidade ao

envelhecimento. A Figura 11 ilustra os resultados obtidos para a penetração retida do ligante em estudo.

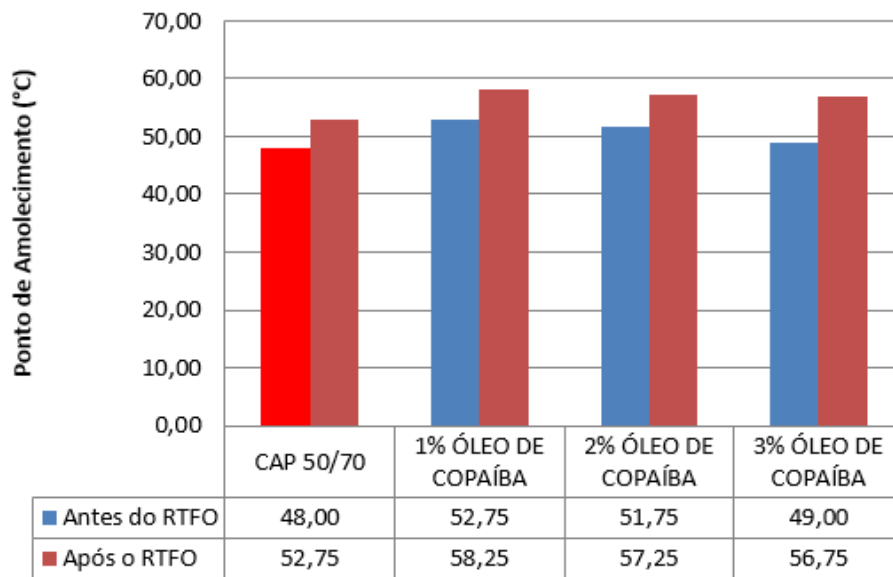


Fonte: Dados da pesquisa (2019)

Verifica-se que os resultados obtidos para o ligante modificado por adição de óleo de copaíba foram inferiores aos valores obtidos para o ligante puro, notou-se que todos os CAPs modificados utilizados na pesquisa apresentaram as penetrações reduzidas consideravelmente após serem submetidas ao envelhecimento a curto prazo. Diante dessa situação, nenhum dos ligantes modificados atingiu o valor preconizado por norma.

4.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento

A Figura 12 ilustra os resultados obtidos para o ponto de amolecimento dos ligantes em estudo.

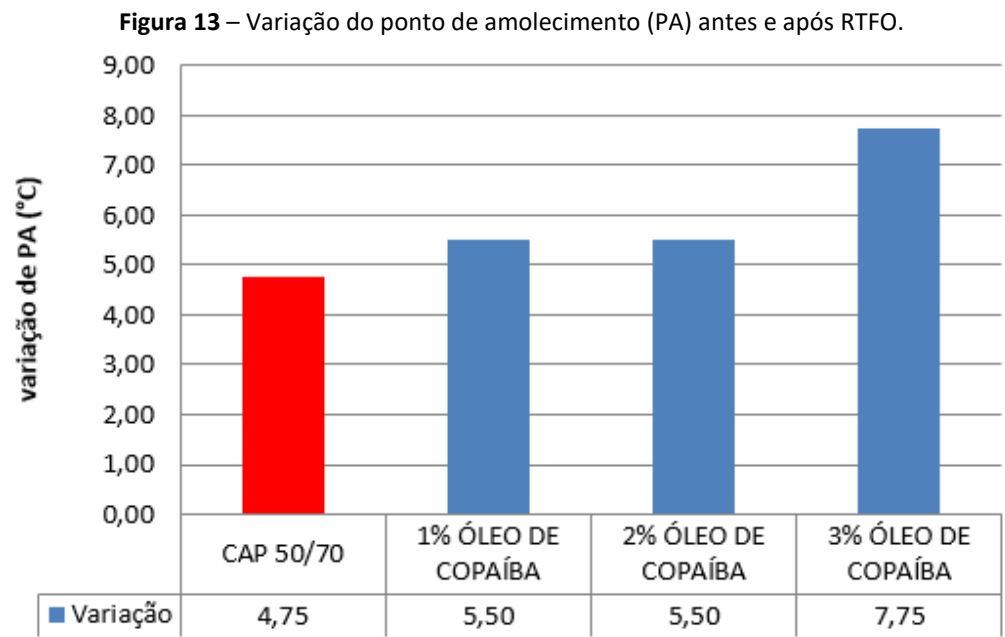
Figura 12 – Ponto de amolecimento dos ligantes puro e modificados.

Fonte: Dados da pesquisa (2019)

Conforme exposto na Figura 12 verifica-se que houve um aumento do ponto de amolecimento para o ligante modificado por óleo de copaíba quando comparado ao ligante puro. O aumento do ponto de amolecimento indica uma menor incidência de deformações e menor fragilidade do ligante à elevação da temperatura, o que permite conservar as propriedades a temperaturas mais elevadas. Notou-se que o ligante modificado com óleo de copaíba com teor de 1% mostrou um ponto de amolecimento superior aos demais, neste caso, 52,75°C, fato que pode ser observado com o acréscimo em 4,75°C comparado ao ligante puro.

A Resolução ANP nº 19/2005 determina a temperatura mínima de 46°C para o ponto de amolecimento na condição normal, deste modo, observa-se que os ligantes em estudo apresentaram resultados que se enquadraram dentro do limite estabelecido (ANP, 2005).

Após o envelhecimento a curto prazo - RTFO, esse parâmetro é limitado a uma variação de no máximo 8°C comparado ao ligante sem envelhecimento. A Figura 19 ilustra os resultados obtidos para a variação do ponto de amolecimento dos ligantes em estudo.



Fonte: Dados da pesquisa (2019)

Conforme resultados obtidos, verifica-se que a maior variação dos pontos de amolecimentos foi obtida para os ligantes modificados por adição de óleo de copaíba, refletindo a susceptibilidade do referido óleo na resistência ao envelhecimento. Percebe-se maior variação para o ligante com 3% de óleo de copaíba e conseqüentemente maior sensibilidade ao envelhecimento.

4.4 Ensaio de Viscosidade Brookfield

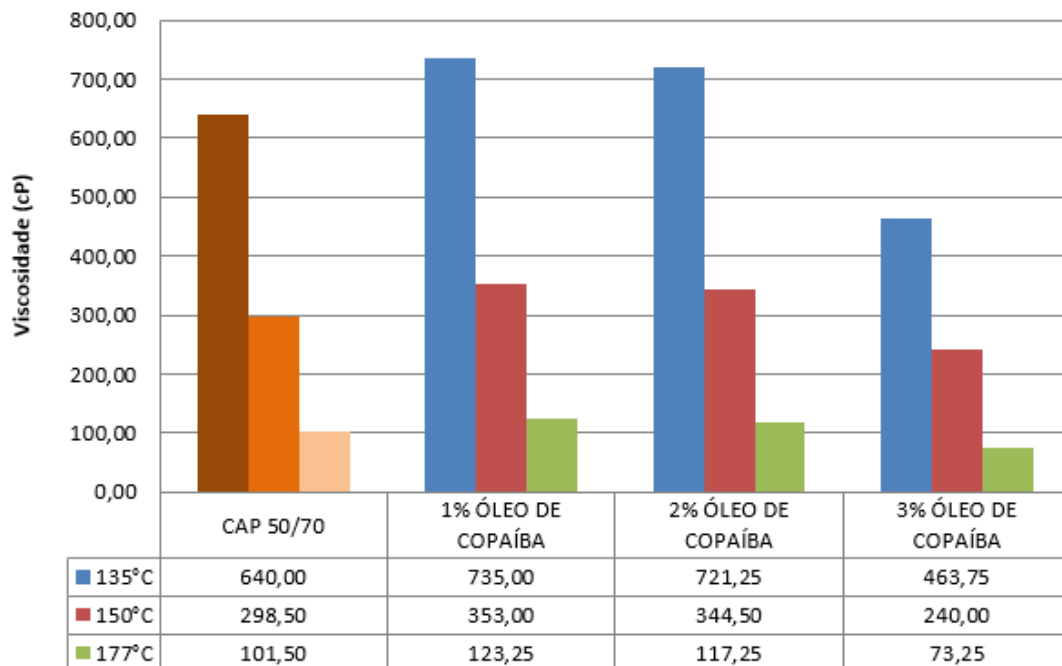
As Figuras 20 e 21 apresentam os resultados do ensaio de viscosidade rotacional obtidos para o ligante puro e modificado por adição de óleo de copaíba.

Figura 14 – Viscosidade rotacional antes do RTFO.



Fonte: Dados da pesquisa (2019)

Figura 15 – Viscosidade rotacional após o RTFO.



Fonte: Dados da pesquisa (2019)

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que ocorreu uma redução da viscosidade do ligante para as condições antes e após o procedimento de envelhecimento a curto prazo (RTFO) diante do aumento do teor de óleo de copaíba, obtendo-se a menor viscosidade para o ligante modificado com óleo de

copaíba no teor de 3,0%. Este desempenho demonstra uma diminuição nas temperaturas de mistura e compactação. Ribeiro (2011) obteve resultados semelhantes ao realizar pesquisas com a adição do Líquido da Castanha de Caju (LCC) ao ligante nos seguintes teores: 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%, alcançando as maiores reduções da viscosidade para o teor de 2% do líquido.

Conforme resultados obtidos, verifica-se que a viscosidade rotacional obtida para os ligantes em estudo atende ao mínimo exigido pelas especificações técnicas da Norma 095/2006 do DNIT (DNIT, 2006). Considerando os valores estabelecidos pela Resolução ANP nº 19/2005, apenas os valores das viscosidades do ligante puro e do ligante modificado com teor de 3% de óleo de copaíba atenderam aos valores mínimos (274 cP – 135°C e 112 cP – 150°C) e intervalo (28-114 cP – 177°C) da especificação com suas respectivas temperaturas.

Os ligantes modificados por adição de óleo de copaíba nos teores de 1 e 2% de óleo de copaíba obtiveram viscosidade de 123,25 cP e 117,25 cP, respectivamente, nas temperaturas de 177°C após o envelhecimento a curto prazo, estando acima do intervalo 28-114 estipulado pela referida resolução. Além disso, segundo a especificação SUPERPAVE, o limite máximo de 3 Pa·s na temperatura de 135°C para a viscosidade também foi atendido em todos os resultados (SHRP, 2004). A Tabela 3 expressa os resultados das temperaturas de usinagem e compactação.

Tabela 3 – Temperaturas de usinagem e compactação dos ligantes.

Amostra	Temp. Usinagem (°C)		Temp. Compactação (°C)	
	Intervalo	0,17 Pa·s	Intervalo	0,28 Pa·s
CAP 50/70 Puro	157,5 – 166	161,8	146 – 150,5	148,3
CAP 50/70 + 1% Óleo de Copaíba	156,5 – 165	160,8	143,5 – 149	146,3
CAP 50/70 + 2% Óleo de Copaíba	154 – 163	158,5	142 – 147	144,5
CAP 50/70 + 3% Óleo de Copaíba	151,5 – 160	156,8	140 – 145	142,5

Fonte: Dados da pesquisa (2019)

Conforme resultados obtidos, verifica-se que a maior variação de temperatura foi obtida para o ligante puro e para o ligante com teor de 3% de óleo de copaíba atingindo uma redução de 5°C na temperatura de usinagem e, aproximadamente, 6°C na temperatura de compactação. Entretanto, deve-se salientar que o ligante com o teor de 3% não ficou dentro do intervalo de classificação do CAP 50/70, no ensaio de penetração realizado nesse estudo, sendo necessário novos testes para se verificar se houve alguma inconformidade ou desvio na realização deste ensaio.

Segundo Souza (2012) a incorporação do óleo de mamona no teor de 5% promoveu uma redução da viscosidade do ligante, resultando na redução das temperaturas de mistura e de compactação em aproximadamente 8°C.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Por fim, serão realizadas as conclusões dos resultados obtidos na pesquisa tangente aos objetivos traçados e serão propostas sugestões para estudos complementares acerca do tema.

5.1 Considerações Finais

Conforme os objetivos estabelecidos neste estudo, pode-se considerar que:

- A adição de óleo de copaíba tornou o ligante susceptível ao envelhecimento quando comparado com o ligante puro, já que ele se torna muito rígido quando submetido as condições de envelhecimento a curto prazo;
- A redução da resistência à deformação foi atingida com o aumento da penetração e conseqüente diminuição da consistência, assim como na diminuição do ponto de amolecimento;
- Para o ensaio de viscosidade rotacional, observou-se que a incorporação do óleo de copaíba reduziu a viscosidade do ligante, o que já era esperado, devido a menor consistência analisada nos dados dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento;
- Para as temperaturas de usinagem e compactação ocorreu uma redução com o aumento do teor de óleo utilizado, verificando-se uma redução mais efetiva para o teor de 3% de óleo de copaíba com uma diminuição de 5 °C nas temperaturas de usinagem, promovendo uma economia de energia durante o aquecimento do ligante asfáltico na usina de asfalto. Entretanto esse teor não atendeu as especificações de classificação do CAP 50/70 no ensaio de penetração.

De um modo geral, o óleo de copaíba pode ser uma alternativa viável para emprego como aditivo redutor das temperaturas de produção. O teor de 3% que promoveu um melhor desempenho avaliado para este fim, em termos gerais para determinação das propriedades física. Porém, nos ensaios de penetração, o ligante modificado nesse teor não se enquadrou no intervalo do CAP 50/70, se fazendo necessário a realização de novos testes para verificar se houveram falhas na

realização deste ou se esse é um comportamento padrão do novo material. Uma possível aplicação que viabilizaria a adição do óleo de copaíba ao ligante asfáltico seria em utilizá-lo em regiões e locais em que as condições de sensibilidade de envelhecimento são atenuadas, pois a partir dele é possível obter um menor risco de desgaste do ligante asfáltico.

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 reológicas dos ligante modificado por óleo de copaíba antes e após envelhecimento a curto prazo;
- Realizar novos ensaios de caracterização física, principalmente no teor de 3% do óleo de copaíba, para atestar os resultados obtidos nesse estudo e confirmar se este é o teor adequado para utilização na prática;
- Estudar a interferência da adição de óleo de copaíba nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas.

REFERÊNCIAS

- ABEDA. **Segmento – como funciona**. In: MERCADO. [Rio de Janeiro]: [s. n.], [2018?]. Disponível em: <http://www.abeda.org.br/mercado/>. Acesso em: 21 jun. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Resolução ANP nº 19, de 11 de julho de 2005 DOU 13 de julho de 2005** - Retificada DOU 25 de julho de 2005 – Retificada DOU 17 de março de 2006. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2005/julho&item=ramp-19--2005>. Acesso em: 27 nov. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Asfalto**. Rio de Janeiro: [s. n.], [20--?]. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/petroleo-e-derivados2/asfalto>. Acesso em: 21 jun. 2019.
- ASPHALT INSTITUTE. **Asphalt Binder Testing** 1. ed. EUA: MS-25, 2007. BUDNY, Jaelson. **Avaliação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Mornas**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2012.
- BERNUCCI, L. B. *et. al.* **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA ,2008.
- CAVALCANTE, Fabiano Pereira. **Efeito da adição dos óleos de Ricinus Communis e Linus Usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- 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, D. B.; CAVALCANTE, F. P.; RODRIGUES, J. K. G.; MENDOÇA, A. M. G. D.; LIRA, Y. C. **Influência da adição do óleo de linhaça nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo**. 44º RAPV e 17º ENACOR. Maceio/AL, 2015.
- CRAVO, Margareth Carvalho Coutinho. **Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástique e matriz de agregados finos**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- DECONCIC. **Estudo da cadeia produtiva do asfalto: diagnóstico de problemas e proposições de aprimoramento**. São Paulo: FIESP, 2009.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. Diretoria de Planejamento e Pesquisa / IPR. **NORMA DNIT 095/2006 - EM:**

Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material. Rio de Janeiro: DNIT, 2006. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-material-em/dnit095_2006_em.pdf. Acesso em: 27 nov. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **NORMA DNIT 155/2010 - ME: Materiais Asfálticos – Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2010.

EQUIPE Editorial Tua Saúde. Óleo de Copaíba: para que serve e como. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <https://www.tuasaude.com/oleo-de-copaiba/>. Acesso em: 26 de jun. 2019.

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

GRAÇA, Denes Carlos Santos da; CARDOSO, Gisélia; CAVALCANTE, Erinaldo Hilário. Dosagem de mistura asfáltica com CAP 50/70 modificado com borra de petróleo. **Scientia Plena. São Cristóvão**, v. 12, n. 5, p. 1-9, 2016. Disponível em: www.scientiaplenu.org.br/sp/article/view/3018/1434. Acesso em: 24 jun. 2019.

GUERRA, Tamires Dantas. **Utilização do óleo de canola para redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas.** 2019. (Dissertação em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/bitstream/riufcg/3333/1/THAMIRES%20DANTAS%20GUERRA%20-%20DISSERTAÇÃO%20%28PPGECA%29%202019.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2019.

HECK, Michele Cristina; VIANA, Lílian Ávila; VICENTINI, Veronica Elisa Pimenta. Importância do óleo de Copaifera sp. (COPAÍBA). **SaBios: Rev. Saúde e Biol.**, Campo Mourão, PR, v. 7, n. 1, p. 82-90, jan./abr., 2012. Disponível em: <http://revista2.grupointegrado.br/revista/index.php/sabios2/article/view/992/413>. Acesso em: 27 jun. 2019.

HELLMANN, Liliane. **Determinação de propriedades térmicas de materiais de pavimentação.** 2008. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Departamento de Física, Estatística e Matemática, Departamento de Tecnologias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ), Ijuí, RS, 2008. Disponível em: <http://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-102095/determinacao-de-propriedades-termicas-de-materiais-de-pavimentacao>. Acesso em: 27 jun. 2019.

LUCENA, Lêda Christiane de F. Lopes; SILVEIRA, Iarly Vanderlei da.; COSTA, Daniel Beserra da. Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da *Moringa Oleífera Lam* para uso em misturas mornas. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 21, n. 1, p. 72-82, 2016. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/3558>. Acesso em: 24 jun. 2019.

MOTHÉ, Michelle Gonçalves. **Estudo do Comportamento de Ligantes Asfálticos por Reologia e Análise Térmica**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <http://186.202.79.107/download/estudo-do-comportamento-de-ligantes-asfalticos.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2019.

NASCIMENTO, Thalita Cristina Brito; FAXINA Adalberto Leandro. Avaliação dos efeitos da radiação ultravioleta sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com PPA e copolímeros SBS e SBR. **TRANSPORTES**, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 1-9, 2017. Disponível em: <https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1100/628>. Acesso em: 25 jun. 2019.

PEDRO, Laís dos Santos Freitas. **A ação antimicrobiana e anti-inflamatória do óleo resina de copaíba no tratamento de doenças cutâneas**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Farmácia) – Faculdade Pitágoras, Poços de Caldas, 2017. Disponível em: <https://repositorio.pgsskroton.com.br/bitstream/123456789/19638/1/LAIS%20DOS%20SANTOS%20FREITAS%20PEDRO.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2019.

PETROBRAS. **Asfalto: informações técnicas**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/public/downloads/manual-de-asfalto.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2019.

PIERI, F. A.; MUSSI, M. C.; MOREIRA, M. A. S. Óleo de copaíba (*Copaifera* sp.): histórico, extração, aplicações industriais e propriedades medicinais. **Rev. bras. plantas med.**, Botucatu, SP, v. 11, n. 4, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-05722009000400016>. Acesso em: 27 jun. 2019.

PIZZORNO, Bianca de Sousa. **Efeito do solvente e da temperatura na morfologia superficial do cimento asfáltico de petróleo**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

PORTUGAL, Antonio Carlos. **Avaliação reológica de cimentos asfálticos de petróleo modificados com óleo de soja e de milho**. 2016. (Dissertação em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

RIBEIRO, Edelto de Almeida. **O efeito da modificação de ligante asfáltico com o Líquido da Castanha de Caju (LCC) na resistência ao dano Por umidade em misturas asfálticas**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE. Disponível em: http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/3681/1/2011_dis_earibeiro.pdf; Acesso em 30 nov. 2019.

ROSA JÚNIOR, José Manoel. **Estudo das propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo (CAP50/70) modificado com polímeros fucionalizados**. 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 CCBt.** 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.

SHRP. **The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays – SHRP-A407.** 2004. Strategic Highway Research Program. National Research Council, Washington DC, USA. Disponível em: <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-A-407.pdf>. Acesso em 01 dez. 2019.

SILVA, Gutemberg Gonçalves da. **Estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016. Disponível em: <http://www.ppgeca.ufcg.edu.br/dissertacoes-menu/dissertacoes-2016/send/16-dissertacoes-2016/51-estudos-reologicos-de-aditivos-utilizados-na-fabricacao-de-misturas-mornas>. Acesso em: 26 jun. 2019.

SINICESP. **Ligantes asfálticos.** São Paulo: [s. n.], 2010. Disponível em: <http://sinicesp.org.br/materias/2010/bt05a.htm>. Acesso em: 22 jun. 2019.

SOUZA, J.L.S. **Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com Óleo de Mamona.** 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

SPECHT, Luciano Pivoto; BORGES, Pedro A. Pereira; HELLMANN, Liliane. Determinação das propriedades térmicas de concretos asfálticos com diferentes tipos de ligantes. **Rev. Tecnol.** Fortaleza, v. 29, n. 2, p.198-210, dez. 2008. Disponível em: <https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/37/4491>. Acesso em: 27 jun. 2019.

TRAMONTINI, Ramone. **Modelagem matemática da transferência de calor em pavimentos rígidos e flexíveis.** 2007. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) Departamento de Física, Estatística e Matemática, Departamento de Tecnologia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI), Ijuí, RS, 2007. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp033019.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2019.