



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

**EFEITO DA ADIÇÃO DO ÓLEO DE COPAÍBA NO COMPORTAMENTO
FÍSICO DO LIGANTE ASFÁLTICO CONVENCIONAL**

FABIANO TOMAZ DANIEL VITÓRIO

Orientadores: Carina Silvani
Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça.

Campina Grande-PB

Dezembro/2018

**EFEITO DA ADIÇÃO DO ÓLEO DE COPAÍBA NO
COMPORTAMENTO FÍSICO DO LIGANTE ASFÁLTICO
CONVENCIONAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB

Dezembro/2018

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

FABIANO TOMAZ DANIEL VITÓRIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Campina Grande
como requisito para obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Civil.

Área de habilitação: Geotécnica.

Sub-área: Pavimentação.

Orientadores:

Dr^a Carina Silvani

PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

CAMPINA GRANDE – PB

DEZEMBRO/2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

FABIANO TOMAZ DANIEL VITÓRIO

EFEITO DA ADIÇÃO DO ÓLEO DE COPAÍBA NO COMPORTAMENTO FÍSICO DE LIGANTES ASFÁLTICOS CONVENCIONAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 14/12/2018 perante a seguinte Comissão Julgadora:

<hr/> <p>Prof.^a Dr.^a Carina Silvani Orientadora Departamento de Engenharia Civil Centro de Tecnologia e Recursos Naturais Universidade Federal de Campina Grande</p>	<hr/> <p><i>Aprovado</i></p>
<hr/> <p><i>Ana M^a G. Duarte Mendonça</i> Prof.^a Dr.^a Ana Maria Gonçalves Duarte Orientadora Departamento de Engenharia Civil Centro de Tecnologia e Recursos Naturais Universidade Federal de Campina Grande</p>	<hr/> <p><i>Aprovado</i></p>
<hr/> <p><i>Aline F. N. de Azevedo</i> Prof.^a Dr.^a Aline F. Nóbrega Azeredo Membro Interno Departamento de Engenharia Civil Centro de Tecnologia e Recursos Naturais Universidade Federal de Campina Grande</p>	<hr/> <p><i>Aprovada</i></p>
<hr/> <p><i>Tássila Ramos Porto</i> Tássila Ramos Porto Membro Externo Departamento de Engenharia Civil Centro de Tecnologia e Recursos Naturais Universidade Federal de Campina Grande</p>	<hr/> <p><i>Aprovado</i></p>
<hr/> <p><i>Aline Dayana Alves de Lima Marcelino</i> Aline Dayana Alves de Lima Marcelino Examinador Externo Universidade Federal da Paraíba</p>	<hr/> <p><i>Aprovado</i></p>

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que em sua infinita bondade me deu toda força necessária para chegar até aqui e enfrentar todas as situações durante minha graduação.

À minha família por todo apoio durante minha graduação, como também pelo esforço por eles empreendido para que eu pudesse estudar com toda tranquilidade possível e também por nunca desconfiar da minha capacidade.

À minha inesquecível avó Marilena Tomaz (in memoriam), a qual dedico esta vitória, e posso dizer sem sombra de dúvidas que grande parte da pessoa que eu me tornei foi devido a seus ensinamentos dos valores que hoje fundamentam minha existência.

À minha namorada, Brenda Cardoso, pela paciência e entendimento nos momentos nos quais tive que me ausentar por diversos motivos relacionados a graduação, e seu grande apoio em todas as situações que enfrentei durante esses anos.

À Prof. PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça, minha orientadora, que durante esses meses se mostrou bastante solícita a sanar minhas dúvidas me dando orientação correta nos momentos que eu precisei, direcionando o trabalho da melhor maneira possível.

À Conrado César e Christian por todo auxílio durante os ensaios e aprendizados transferidos, como também a todos os funcionários do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da UFCG.

A todos os amigos que pude fazer durante esses anos na UFCG, sem os quais nada disso seria possível, agradecimento especial a: Éricles Alves, Gustavo Alves, Jordan Carneiro, Sinvaldo Júnior, Luís Antônio, Nicolas Mateus, Rodrigo Araújo, João Vítor e Rodolfo Sousa dentre tantos outros que participaram destes anos de grande aprendizado. Obrigado por todos os grandes momentos!

A minha família, namorada e amigos, pela
dedicação, companheirismo, apoio e incentivo,
DEDICO.

“Os temas mais complexos podem ser explicados ao menos inteligente dos homens, caso ele ainda não tenha uma opinião formada sobre eles, mas o assunto mais banal não pode ser esclarecido ao mais inteligente dos homens caso ele esteja convencido de que já conhece sem sombra de dúvida o que tem diante de si.”

Leon Tolstoi.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Deformações permanentes	22
Figura 2: Trincas por fadiga.....	22
Figura 3: Esquema da análise química do ligante asfáltico.	26
Figura 4: Ensaio de recuperação elástica	30
Figura 5: Árvore de Copaíba.....	32
Figura 6: Extração do óleo de copaíba.....	34
Figura 7: Principais dipertenos detectados no óleo de copaíba.....	35
Figura 8: Fluxograma das atividades executadas.....	37
Figura 9: Misturador mecânico	38
Figura 10: Estufa do RTFO.....	40
Figura 11: Penetrômetro	41
Figura 12: Execução do ponto de amolecimento	42
Figura 13: Viscosímetro Brookfield	43
Figura 14: Resultados de perda de massa	44
Figura 15: Resultados do ensaio de penetração	46
Figura 16: Penetração retida	47
Figura 17: Resultados do ensaio de ponto de amolecimento	48
Figura 18: Variação do ponto de amolecimento	49
Figura 19: Resultados do ensaio de viscosidade rotacional.	50
Figura 20: Curvas da viscosidade rotacional antes do RTFO	51
Figura 21: Resultado da viscosidade rotacional após o envelhecimento	52
Figura 22: Curvas da viscosidade rotacional após o RTFO	53
Figura 23: Índice de envelhecimento	54
Figura 24: Temperatura de usinagem dos ligantes estudados	55
Figura 25: Temperatura de compactação antes do envelhecimento – RTFO	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Nova especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo (CAP)	24
Tabela 2: Normas dos ensaios.....	39

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

ANP	Agência Nacional de Petróleo
BBR	Bending Beam Rheometer
CAP	Cimento asfáltico de petróleo
CBUQ	Concreto asfáltico usinado a quente
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes
DSR	Dynamic Shear Rheometer
FTIR	Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças do Clima
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
RTFO	Rolling Thin Film Oven
SARA	Saturates, aromatics, resins, and asphaltenes
SBS	Estireno Butadieno Estireno
TUC	Temperatura de usinagem e compactação
UAEC	Unidade Acadêmica de Engenharia Civil
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

RESUMO

As rodovias constituem um dos principais sistemas de transporte utilizados para o deslocamento de pessoas e bens. Entretanto, nas últimas décadas, o aumento do volume de tráfego, das cargas transportadas por eixo e da pressão dos pneus, tem ocasionado a degradação prematura dos revestimentos asfálticos constituídos com cimentos asfálticos convencionais, tendo como consequência elevados custos de restauração e de manutenção. Para que o ligante asfáltico tenha um desempenho satisfatório no pavimento, ele deve apresentar propriedades diferenciadas no que diz respeito ao comportamento dos demais materiais asfálticos. Este deve apresentar maior coesão e adesão aos agregados, grande resistência ao envelhecimento, susceptibilidade térmica adequada a faixa de utilização de temperatura do pavimento, alta resistência à fadiga e à deformação térmica. Este estudo tem como objetivo avaliar o efeito da adição do óleo de copaíba nos teores de 4% e 5% nas propriedades físicas do ligante asfáltico convencional CAP 50/70. Para avaliar as propriedades físicas foram realizados os ensaios de viscosidade, ponto de amolecimento e penetração. Pôde-se perceber que a mistura se mostrou susceptível ao envelhecimento quando comparado com o ligante puro, como também apresentou uma redução nas temperaturas de usinagem e compactação, onde em uma delas chegou a ter 11°C de diminuição, por outro lado houve uma queda na resistência do ligante.

Palavras-chave: óleo, propriedades, pavimentação.

ABSTRACT

The highways are part of one of the main transport systems used for the movement of people and goods. However, in the last decades, the increasing of the traffic volume, the transported cargos for axle and the tire pressure, has caused the premature degradation of the asphalt coating constituted of conventional asphalt cement, having high restoration and maintenance costs as consequence. For the asphalt binder to have a satisfactory performance on the pavement, it has to present differentiated properties regarding the other asphalt materials behavior. It should present higher cohesion and adherence to the aggregates, great resistance to aging process, thermal susceptibility appropriate to the temperature use range of the pavement, high resistance to fatigue and thermal deformation. This project has the purpose of evaluating the effects of the addition of copaiba oil in the contents of 4% and 5% on the physical and chemical properties of the asphalt binder CAP 50/70 (Brazilian penetration grade). In order to evaluate the physical properties, there will be performed viscosity tests, softening point and penetration tests. For chemical characterization there will be performed the FTIR and SARA techniques. It is expected that the addition of phosphoric acid promotes improvements in the petroleum asphalt binder properties. It was observed that the blend showed to be susceptible to aging when compared to the pure binder, but also showed a reduction in its machining and compaction temperatures, where in one of them it reached 11°C decrease, on the other hand, there was a decrease in the resistance of the binder.

Key words: Oil, properties, paving.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1	JUSTIFICATIVA.....	16
1.2	HIPÓTESE DA PESQUISA	17
1.3	OBJETIVOS	17
1.3.1	Objetivo Geral	17
1.3.2	Objetivos Específicos	17
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	18
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Ligantes Asfálticos.....	19
2.1.1	Conceitos e Classificações	19
2.1.2	Principais Defeitos dos Pavimentos	20
2.1.3	Cimentos Asfálticos de Petróleo	22
2.1.4	Composição Química	24
2.2	Misturas Mornas.....	26
2.2.1	Aditivos Surfactantes	27
2.2.2	Aditivos Orgânicos.....	27
2.3	Asfaltos Modificados por Polímeros	28
2.3.1	Ligantes Modificados com Copolímeros Tipo SBS	29
2.3.2	Óleo de Copaíba	32
2.3.3	Extração do óleo de copaíba.....	33
2.3.4	Composição Química	34
2.3.5	Aplicações do óleo de copaíba	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	Materiais.....	37
3.2	Métodos.....	37
3.2.1	Procedimento de mistura	37
3.2.2	Envelhecimento a curto prazo -RTFO (Estufa de Filme Fino Rotativo).....	39
3.2.3	Ensaio de caracterização física	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1	Envelhecimento a curto prazo	44

4.2 Ensaio de penetração	45
4.3 Ponto de amolecimento	47
4.4 Ensaio de viscosidade rotacional.....	49
4.4.1 Antes do envelhecimento	49
4.4.2 Após o envelhecimento	51
4.4.3 Temperaturas de compactação e usinagem (TCU).....	54
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .	57
5.1 Considerações Finais.....	57
5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras	58
6 REFERÊNCIAS	59

1. INTRODUÇÃO

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem. O uso em pavimentação é um dos mais importantes entre todos e um dos mais antigos. Na maioria dos países, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento. No Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são de revestimento asfáltico, além de ser também utilizado em grande parte das ruas (BERNUCCI et al, 2008).

Para a maioria das aplicações rodoviárias, os asfaltos convencionais têm bom comportamento, satisfazendo plenamente os requisitos necessários para o desempenho adequado das misturas asfálticas sob o tráfego e sob as condições climáticas. No entanto, para condições de volume de veículos comerciais e peso por eixo crescente, ano a ano, em rodovias especiais ou nos aeroportos, em corredores de tráfego pesado canalizado e para condições adversas de clima, com grandes diferenças térmicas entre inverno e verão, tem sido cada vez mais necessário o uso de modificadores das propriedades dos asfaltos (BERNUCCI et al, 2008).

Todas as propriedades físicas do asfalto estão associadas à sua temperatura. Em temperaturas muito baixas, as moléculas não têm condições de se mover umas em relação às outras e a viscosidade fica muito elevada; nessa situação o ligante se comporta quase como um sólido. À medida que a temperatura aumenta, algumas moléculas começam a se mover podendo mesmo haver um fluxo entre as moléculas. O aumento do movimento faz baixar a viscosidade e, em temperaturas altas, o ligante se comporta como um líquido. Essa transição é reversível (BERNUCCI et al, 2008).

Diversas tecnologias vem sendo desenvolvidas com o desígnio de minimizar os impactos ambientais originários da ação nefasta do homem. Sendo assim, a problemática do aquecimento global tem suscitado estudos de processos construtivos voltados ao desenvolvimento sustentável. Técnicas inovadoras vem sendo desenvolvidas para reduzir temperaturas de fabricação e aplicação de concreto asfáltico a quente assegurando sua qualidade e desempenho adequado. Sobretudo, em possibilitar a redução do consumo de energia, bem como, a emissão de gases poluentes na atmosfera, contribuindo assim na produção de misturas asfálticas nas usinas com menor energia e propiciando liberação do tráfego mais rapidamente.

Neste contexto, os aditivos naturais, também chamados de aditivos verdes, principalmente os oleaginosos, se constituem, potencialmente, como agente viáveis para reduzir a temperatura de usinagem e compactação (TCU) ao serem integrados ao CAP incorporam as misturas asfálticas. Desta forma, podem ser utilizados como agentes modificados do CAP proporcionando melhorias nas propriedades mecânicas e de susceptibilidade à variação da temperatura.

Sendo assim, o óleo de copaíba, oriundo de fonte renovável e biodegradável, se mostra promissor e potencialmente útil para ser empregado como aditivo na melhoria dos cimentos asfálticos. Assim, pode-se trabalhar com a hipótese de que este óleo venha a ser um contribuinte do CAP com relação as suas propriedades mecânicas, trazendo assim um avanço tecnológico dos procedimentos utilizados na pavimentação asfáltica das rodovias.

1.1 JUSTIFICATIVA

O ligante asfáltico vem sendo amplamente utilizado na pavimentação de rodovias, é um material bastante complexo com uma grande variedade de compostos orgânicos. Há várias razões que fazem com que este material seja tão utilizado, e ele parte do fato de que ele proporciona forte união dos agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável, bem como também se mostra durável e resistente à ação da maioria do ácidos, álcalis e sais.

Embora bastante utilizado, o asfalto vem sofrendo uma degradação cada vez maior, e de acordo com Sobreiro (2014), isso se dá pelos seguintes fatores: aumento no volume de tráfego, excesso de carga transportada por eixo, pressão de enchimento dos pneus elevada e pouco planejamento e realizações de conservação/intervenção, além de causar forte impacto no pavimento. Deste forma buscam-se alternativas que venham a minimizar estes impactos.

Soluções mais eficientes e economicamente viáveis vem sendo desenvolvidas também pensando em baixos impactos aos ecossistemas, essas são chamadas de “Engenharia Verde”, cujo grande desafio é compatibilizar o desenvolvimento econômico com o respeito ao meio ambiente, obtendo êxito a partir do desprendimento de metodologias clássicas, abrindo-se para a experimentação com materiais naturais.

Diante dessas situações, o uso do óleo de copaíba misturado ao CAP é um segmento desta nova forma de pensar a engenharia, e que pode atuar em alguns parâmetros físicos, como também numa diminuição da temperatura de compactação e usinagem.

1.2 HIPÓTESE DA PESQUISA

A hipótese da pesquisa permeia o seguinte campo: “A adição do óleo de copaíba no cimento asfáltico de petróleo pode operar como modificador das propriedades físicas do material utilizado para a pavimentação”. Este estudo irá trabalhar na possibilidade de melhoria dessas propriedades, principalmente no benefício em termos de temperatura de usinagem e compactação (TCU), no desempenho do material modificado.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo principal avaliar o efeito da adição do óleo de copaíba no comportamento físico do ligante asfáltico convencional.

1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar fisicamente o CAP 50/70 com adição de óleo de copaíba antes do envelhecimento a curto prazo;
- ✓ Caracterizar fisicamente o CAP 50/70 com adição de óleo de copaíba após envelhecimento a curto prazo;
- ✓ Comparar os resultados obtidos para o CAP 50/70 modificado por óleo de copaíba aos resultados obtidos para o CAP 50/70 puro.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

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

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

Fundamentação Teórica – São abordados assuntos relacionados aos ligantes asfálticos, tais como sua composição química, como também ao uso de copolímeros em sua composição e ácidos com componentes fosfóricos.

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

Resultados Esperados – São apresentados os resultados que pretende-se obter a partir da incorporação do óleo de copaíba ao CAP 50/70.

Considerações Finais e sugestões para pesquisas futuras – São apresentadas as considerações obtidas sobre a pesquisa e sugestões para novos estudos relacionados ao tema.

Por fim, estão as Referências, onde são listadas as pesquisas citadas neste estudo e os Anexos contendo tabelas e gráficos detalhados dos resultados da pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ligantes Asfálticos

2.1.1 Conceitos e Classificações

O ligante asfáltico, amplamente utilizado na pavimentação de rodovias, é um material bastante complexo com uma grande variedade de compostos orgânicos. É originado do petróleo, podendo ser obtido por evaporação natural de depósitos localizados na superfície da terra (asfaltos naturais) ou por destilação em unidades industriais (refinarias de petróleo) (SOBREIRO, 2014).

Há várias razões para o uso intensivo do asfalto em pavimentação, sendo as principais: proporciona 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 ou emulsionado, em amplas combinações de esqueleto mineral, com ou sem aditivos.

De acordo com Bernucci *et al.*, (2008) temos as seguintes definições e conceituações são empregadas com referência ao material:

- ✓ betume: comumente é definido como uma mistura de hidrocarbonetos solúvel no bissulfeto de carbono;
- ✓ asfalto: mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, podendo conter ainda outros materiais, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, em pequena proporção;
- ✓ alcatrão: é uma designação genérica de um produto que contém hidrocarbonetos, que se obtém da queima ou destilação destrutiva do carvão, madeira etc.

Portanto, o asfalto e o alcatrão são materiais betuminosos porque contêm betume, mas não podem ser confundidos porque suas propriedades são bastante diferentes. O alcatrão praticamente não é mais usado em pavimentação desde que se determinou o seu poder cancerígeno, além do fato de sua pouca homogeneidade e baixa qualidade em termos de ligante para pavimentação, derivada da própria forma de obtenção do mesmo (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Embora seja bastante utilizado nas rodovias, o asfalto vem sofrendo cada vez mais uma maior degradação, e isso se dá, de acordo com Sobreiro, (2014), pelos seguintes

motivos: (a) aumento no volume de tráfego; (b) excesso de carga transportada por eixo; (c) pressão de enchimento dos pneus elevada; e (d) pouco planejamento e realizações de conservação/intervenção.

Quanto ao seu comportamento frente às variações térmicas, os polímeros são classificados em categorias como sugerido por Mano (1985, 1991) e Leite (1999):

- ✓ termorrígidos: são aqueles que não se fundem, sofrem degradação numa temperatura limite e endurecem irreversivelmente quando aquecidos a uma temperatura que depende de sua estrutura química. Apresentam cadeias moleculares que formam uma rede tridimensional que resiste a qualquer mobilidade térmica. Por exemplo: resina epóxi, poliéster, poliuretano;
- ✓ termoplásticos: são aqueles que se fundem e tornam-se maleáveis reversivelmente quando aquecidos. Normalmente consistem de cadeias lineares, mas podem ser também ramificadas. São incorporados aos asfaltos a alta temperatura. Por exemplo: polietileno, polipropileno, PVC;
- ✓ elastômeros: são aqueles que, quando aquecidos, se decompõem antes de amolecer, com propriedades elásticas. Por exemplo: SBR;
- ✓ elastômeros termoplásticos: são aqueles que, a baixa temperatura, apresentam comportamento elástico, porém quando a temperatura aumenta passam a apresentar comportamento termoplástico. Por exemplo: SBS e EVA.

Temos que, os tipos de ligantes asfálticos existentes no mercado brasileiro são denominados:

- a) cimentos asfálticos de petróleo – CAP;
- b) asfaltos diluídos – ADP;
- c) emulsões asfálticas – EAP;
- d) asfaltos oxidados ou soprados de uso industrial;
- e) asfaltos modificados por polímero – AMP ou por borracha de pneus;
- f) agentes rejuvenescedores – AR e ARE (BERNUCCI et al., 2008).

2.1.2. Principais Defeitos dos Pavimentos

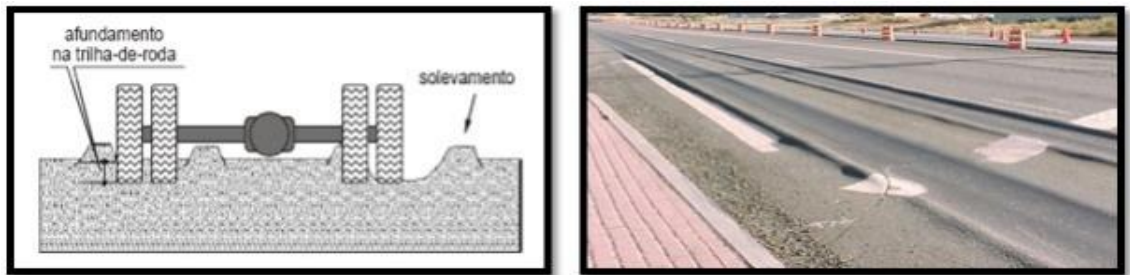
Segundo Joliet & Mallot (2000), o comportamento das misturas asfálticas é afetado tanto pela consistência e reologia dos ligantes asfálticos, quanto pelas

características da matriz pétreo. Desse modo, a mistura asfáltica, desde sua aplicação até o final de sua vida de serviço, é afetada por vários fatores que proporcionam defeitos que prejudicam o desempenho do pavimento. Esses defeitos podem ser classificados de duas maneiras, podem estar associados a problemas estruturais ou apenas funcionais. Um defeito de classe estrutural está atrelado à diminuição da capacidade do pavimento no suporte de cargas, em perder sua integridade estrutural. Os problemas funcionais estão associados às condições de segurança e trafegabilidade do pavimento em termos de rolamento.

Existem vários tipos de defeitos de pavimentos flexíveis, que são especificados e definidos pela norma DNIT 005/2003 – TER. No entanto, os principais defeitos encontrados nas rodovias brasileiras, são: deformação permanente e trincas por fadiga. Vários são os fatores que podem proporcionar os defeitos do pavimento, como projeto, execução das diferentes camadas (aplicação dos materiais), suporte das camadas que compõem o pavimento, entre outros (SOBREIRO, 2014).

O defeito de deformação permanente pode ser definido como o acúmulo de pequenas quantidades de deformações não recuperáveis resultantes da aplicação das cargas dos veículos, ilustrado na Figura 1. Segundo o DNER (1997), a deformação permanente em misturas asfálticas ocorre em duas parcelas: o afundamento plástico e de consolidação. Segundo o glossário de termos técnicos DNIT 005/2003 – TER “o afundamento plástico é a deformação permanente que ocorre em uma ou mais camadas dos pavimentos flexíveis ou semi-rígidos ou ainda no subleito”. No que diz respeito ao revestimento asfáltico, a denominação plástico se refere ao seu comportamento viscoelástico (SOBREIRO, 2014). O DNER (1997) ainda define o afundamento por consolidação como “a deformação permanente que ocorre nos pavimentos flexíveis ou semi-rígidos, devido à consolidação diferencial que se verifica em camadas do pavimento ou subleito”. A Figura 1 ilustra a deformação permanente de um pavimento asfáltico.

Figura 1: Deformações permanentes



FONTE: Sobreiro (2014)

Outro efeito bastante encontrado nas rodovias brasileiras são as trincas por fadiga do revestimento asfáltico sob a ação de cargas repetidas de tráfego. Esse fenômeno pode ser entendido como a deteriorização de um material que está submetido a tensões (carga do tráfego) e deformações repetidas, o que resulta em trincas depois de um determinado número de solicitações (repetição de carregamento), ou seja, ocorre a perda de resistência do material quando é solicitado repetidamente por uma carga. Na Figura 2, pode-se observar o fenômeno de trincas por fadiga, denominado também como fenda existente no revestimento, facilmente detectável, com abertura superior à da fissura, podendo apresentar-se sob a forma de trinca isolada ou trinca interligada (SOBREIRO, 2014). A Figura 2 ilustra as trincas por fadiga.

Figura 2: Trincas por fadiga



FONTE: Sobreiro (2014).

2.1.3 Cimentos Asfálticos de Petróleo

De acordo com Balbo (2007), o CAP, como material ligante possui um comportamento reológico complexo e dependente da temperatura, que com o intemperismo, se altera, perdendo suas propriedades iniciais, tornando-se mais viscoso e mais frágil, é um material que, além de termossuscetível, sofre transformações químicas sendo exposta a radiação solar, as águas ácidas ou sulfatadas, as ações de óleos, graxas, lubrificantes e combustíveis

dos veículos que trafegam pelas vias pavimentadas. Tais ações provocam o processo de oxidação do ligante asfáltico.

São constituídos de 90 a 95% de hidrocarbonetos e de 5 a 10% de heteroátomos (oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais – vanádio, níquel, ferro, magnésio e cálcio) unidos por ligações covalentes. Os cimentos asfálticos de petróleos brasileiros têm baixo teor de enxofre e de metais, e alto teor de nitrogênio, enquanto os procedentes de petróleos árabes e venezuelanos têm alto teor de enxofre (LEITE, 1999).

No Brasil, os asfaltos eram classificados até o ano de 2005 pelo ensaio de penetração (CAP 30/45, CAP 50/60 e CAP 85/100) ou pelo ensaio de viscosidade (CAP 7, CAP 20 e CAP 40), e os números indicam, respectivamente, a penetração (em 1/10 mm) e o valor mínimo para a viscosidade a 60°C (em 10² Poise) (ODA E FERNANDES, 2001).

A penúltima especificação brasileira de CAP, vigente de 1992 até julho de 2005, separava em duas famílias de ligantes, os especificados por penetração e os especificados pela viscosidade absoluta. Por viscosidade os asfaltos brasileiros eram subdivididos em três grupos: CAP 7, CAP 20 e CAP 40, sendo esses números associados ao início da faixa de viscosidade de cada classe. Por penetração, havia quatro classes de asfalto: CAP 30-45, CAP 50-60, CAP 85-100 e CAP 150-200, sendo esses números associados à faixa de penetração obtida no ensaio.

Em julho de 2005 foi aprovada pela Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia (ANP) uma nova especificação de CAP para todo o Brasil, em substituição às duas anteriores mostradas.

Na Tabela 1 a seguir temos as especificações brasileiras para o cimento asfáltico de petróleo (CAP):

Tabela 1: Nova especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo (CAP)

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

(*) Relação entre a penetração após o efeito do calor e do ar em estufa RTFOT e a penetração original, antes do ensaio do efeito do calor e do ar.

FONTE: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2005).

2.1.4 Composição Química

Os petróleos ou óleos crus diferem em suas propriedades físicas e químicas, variando de líquidos negros viscosos até líquidos castanhos bastante fluidos, com composição química predominantemente parafínica, naftênica ou aromática. Existem perto de 1.500

tipos de petróleo explorados no mundo, porém somente uma pequena porção deles é considerada apropriada para produzir asfalto (SHELL, 2003).

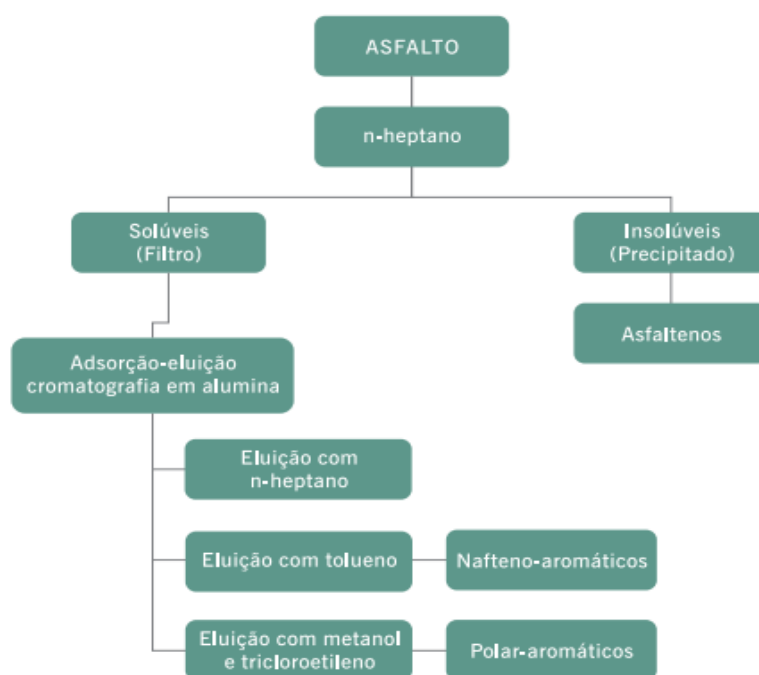
Os petróleos distinguem-se pela maior ou menor presença de asfalto em sua composição. Petróleos venezuelanos, como o Boscan e o Bachaquero, são reconhecidos mundialmente como os de melhor qualidade para a produção de asfalto para pavimentação (PINTO, 1991; LEITE, 1999; SHELL, 2003).

Atualmente no Brasil existem petróleos com qualidade semelhante ao Bachaquero que são utilizados para a produção de asfalto. No Brasil e em outros países são raras as plantas de produção de asfalto a partir de um único petróleo, sendo mais comuns unidades de refino que produzem asfalto a partir da mistura de diversos petróleos (BERNUCCI *et al.*, 2004).

Ligantes asfálticos são materiais complexos de hidrocarbonetos contendo vários compostos químicos, sendo a maioria com peso molecular relativamente alto. Análises realizadas em ligantes asfálticos originados de diferentes petróleos mostram que a maioria desses materiais contém de 82 a 88% de carbono, de 8 a 11% de hidrogênio, de 0 a 6% de enxofre, de 0 a 1,5% de oxigênio e de 0 a 1% de nitrogênio. Essa composição pode variar de acordo com o material de origem, o processo de fracionamento, as modificações induzidas no processo e o envelhecimento do material durante sua vida útil (SHELL, 2003).

A composição química também varia com o tipo de fracionamento a que se submete o ligante asfáltico, sendo o método mais moderno atualmente empregado, normalizado pela ASTM D 4124-01, aquele que separa as seguintes frações: saturados, nafteno-aromáticos, polar-aromáticos e asfaltenos. Os asfaltenos são separados primeiro por precipitação com adição de n-heptano, e os outros constituintes, englobados na designação genérica de maltenos, são solúveis no n-heptano e separados por cromatografia de adsorção. Na Europa utiliza-se método similar conhecido como SARA (S de saturados, A de aromáticos, R de resinas e A de asfaltenos), sendo a separação dos constituintes realizada por cromatografia de camada fina com detecção por ionização de chama (Leite, 1999; Shell, 2003). A Figura 3 ilustra o esquema de análise química de ligantes asfálticos.

Figura 3: Esquema da análise química do ligante asfáltico.



FONTE: Bernucci et al. (2004).

Em geral, os ligantes asfálticos são classificados pela penetração, porém ligantes asfálticos de mesma classificação não apresentam, necessariamente, a mesma composição química e o mesmo comportamento reológico quando misturados com polímeros e ácidos (LOEBER *et al.*, 1998). Apesar de ser uma prática comum, a modificação de ligantes asfálticos, mediante adição de modificadores diversos, tem interação e compatibilidade com o ligante asfáltico de base como fatores importantes, pois influenciam diretamente no comportamento mecânico do material final. Altos teores de asfaltenos diminuem a compatibilidade do polímero com o ligante asfáltico e a aromaticidade dos maltenos devem permanecer entre certos limites para atingir um bom nível de compatibilidade (LEUSEUR, 2009).

2.2 Misturas Mornas

Segundo Vitorino (2018) para a produção de misturas asfálticas convencionais devemos aquecer o ligante asfáltico bem como os agregados em temperaturas que variam entre 150°C e 175°C para que o ligante seja capaz de envolver os agregados formando assim uma mistura homogênea. Para a obtenção de tais temperaturas existe um processo que requer uma alta quantidade de energia que geralmente ocorrem devido a queima de combustíveis fósseis, que por sua vez liberam uma grande quantidade de gases tóxicos

nocivos ao homem e ao meio ambiente. Se torna clara então a necessidade de redução deste consumo de energia e por consequência a emissão destes gases, o que abre espaço para as misturas asfálticas mornas. Estas são capazes de manter as mesmas qualidades de uma mistura a quente gerando melhores ambientes de trabalho, melhor trabalhabilidade, maiores lucros, qualidade, durabilidade e menos danos ao meio ambiente.

2.2.1 Aditivos Surfactantes

São tecnologias que se baseiam na introdução de aditivos surfactantes no asfalto, ou em emulsões com elevado teor de resíduo asfáltico com o intuito de produzir misturas mornas e semimornas. Estes produtos, geralmente atuam fortemente na adesividade do material melhorando a ligação entre o agregado e o ligante, além de melhorar o processo de recobrimento. Foi verificado que os aditivos surfactantes não causam alteração nas propriedades de consistência do asfalto, que são medidas nos ensaios de viscosidade, penetração e ponto de amolecimento. Testes de viscosidade de ligantes com e sem um aditivo (Revix) em um reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) permitiu constatar, que não houve mudança nesta propriedade, apesar da variação dos níveis de temperatura, porém, foram verificadas várias diferenças quando voltados os olhos para a propriedade de lubrificação do asfalto (MOTTA, 2012).

2.2.2. Aditivos Orgânicos

Ao serem misturados com o ligante os aditivos orgânicos possuem a capacidade de modificar suas propriedades reológicas resultando principalmente na redução de sua viscosidade. Silva apud Vitorino (2018) afirma que tais mudanças ocorrem ao elevarmos a temperatura do ligante acima do seu ponto de amolecimento. A escolha do tipo e da taxa de aditivo orgânico utilizados para a produção de uma mistura morna deve ser feita de modo cauteloso, visando à temperatura na qual ocorre o ponto de amolecimento destes produtos e à temperatura esperada na vida de serviço do pavimento, a fim de se obter uma redução do risco de deformação permanente e também minimizar o potencial de trincamento por baixas temperaturas. Isto se deve ao fato de que pode haver uma redução drástica da viscosidade do ligante, além de existir o risco de um forte enrijecimento da mistura asfáltica devido a grandes quantidades de aditivo utilizado.

Os aditivos orgânicos podem ser incorporados antes e durante a usinagem, resultando em uma redução da temperatura de mistura em cerca 30 a 40°C. Após o resfriamento da mistura asfáltica, estes elementos passam por um processo onde os mesmos se cristalizam de modo disperso no ligante, resultando num aumento da rigidez do asfalto e, por consequência, da mistura como um todo (RÜHL, 2014).

2.3 Asfaltos Modificados por Polímeros

A utilização de polímeros como modificadores de ligantes asfálticos é uma prática bastante comum, visto que essa modificação proporciona melhorias no desempenho da camada asfáltica, devido ao aumento de resistência à deformação permanente e à fadiga, bem como a redução dos efeitos prejudiciais do envelhecimento do ligante asfáltico. No entanto, apesar dos efeitos positivos dessa incorporação, tem-se um comprometimento da trabalhabilidade da mistura durante a construção, tornando o processo executivo mais complexo (SOBREIRO, 2014).

Uma das alternativas para tentar solucionar esse problema é adicionar aditivos que melhorem o manuseio do material, atuando na redução da viscosidade do ligante asfáltico.

Nem todos os polímeros são passíveis de serem adicionados ao CAP e nem todo CAP quando modificado por polímeros apresenta estabilidade à estocagem. Os asfaltos que melhor se compatibilizam com polímeros são aqueles que apresentam uma certa aromaticidade. A quantidade de polímero que deve ser adicionada ao ligante é variável e depende das propriedades finais desejadas. É necessário também verificar a adequada dispersão do polímero no CAP, de forma que a matriz polimérica fique fixada na estrutura do asfalto, ocluída nas malhas do mesmo (BERNUCCI *et al.*, 2004).

Para que a modificação do ligante seja viável técnica e economicamente, é necessário que o polímero seja resistente à degradação nas temperaturas usuais de utilização do asfalto, misture-se adequadamente com o asfalto, melhore as características de fluidez do asfalto a altas temperaturas, sem que o ligante fique muito viscoso para a mistura e espalhamento, nem tão rígido ou quebradiço a baixas temperaturas. O asfalto-polímero tem que manter suas propriedades durante a estocagem, aplicação e serviço, deve poder ser processado nos equipamentos convencionais, permanecer estável, física e

quimicamente, ao longo de todas as fases e não necessitar de temperaturas muito diferenciadas para aplicação (BERNUCCI *et al.*, 2004).

2.3.1 Ligantes Modificados com Copolímeros Tipo SBS

Para Silva *et al.*, (2002), o copolímero SBS é tribloco de estireno e butadieno, um exemplo de elastômero termoplástico, composto por domínios rígidos de poliestireno (PS) dispersos em uma matriz flexível elastomérica de polibutadieno (PB). Estes domínios de poliestireno funcionam como pontos de ligação das extremidades das cadeiras do polibutadieno, proporcionando ao material propriedades de resistência e elasticidade. O componente poliestireno é responsável pelo aumento da consistência, conseqüentemente, ponto de amolecimento mais elevado, enquanto o componente polibutadieno confere à mistura um aumento de elasticidade (ROBINSON, 2004).

Ao se adicionar o copolímero SBS ao ligante asfáltico, a fase elastomérica do polímero absorve os maltenos do ligante asfáltico e aumenta seu volume inicial em até 9 vezes (LU & ISACSSON, 1997). Como as cadeiras poliméricas tem peso molecular similar ou maior que os asfaltenos, ambas competem pelo poder solvente da fase maltênica do ligante asfáltico e uma separação de fase pode ocorrer se a quantidade de maltenos dispersos for insuficiente. Esta separação de fase é um indicativo da incompatibilidade do ligante asfáltico de base com o polímero, que pode ser melhorada com a adição de óleos aromáticos. No entanto, um teor muito elevado de aromáticos pode dissolver os blocos de poliestireno e comprometer os benefícios do copolímero SBS (AIREY, 2003; KANABAR, 2010).

Segundo Wen *et al.*, (2002) esta separação de fase pode ocorrer devido à diferença de estocagem em altas temperaturas, partículas do copolímero SBS e o ligante asfáltico de base. Durante a estocagem em altas temperaturas, partículas do copolímero SBS dispersas no ligante asfálticos são acumuladas e flutuam no topo do ligante asfáltico, fazendo com que, ao se avaliar a estabilidade à estocagem, mediante ensaio de ponto de amolecimento, os valores obtidos para o topo do material são superiores quando comparados ao restante, por causa da maior concentração do copolímero SBS.

Uma concentração aceitável do copolímero SBS, em peso, para modificação do ligante asfáltico, está entre 3 a 5%, e sua adição no ligante asfáltico forma uma rede

polimérica contínua que permite modificar significativamente as propriedades do material (LU & ISACSSON, 1997; AIREY, 2003; KANABAR, 2010).

Como o asfalto é um material termoviscoelástico, suas características vão influenciar diretamente o desempenho das misturas asfálticas, tanto de deformação permanente quanto de fadiga. As deformações resultantes das cargas aplicadas, ou seja, as respostas da mistura asfáltica aos pulsos de carga gerados pelo tráfego em movimento podem ser bastante modificadas pela presença de polímeros no ligante, aumentando ou diminuindo as parcelas de viscosidade e de elasticidade do conjunto, para várias faixas de temperatura (BERNUCCI *et al.*, 2004).

Existe uma infinidade de polímeros, cada qual com seu conjunto de características, porém apenas alguns apresentam propriedades desejáveis na modificação de ligantes asfálticos. Visando ilustrar uma das propriedades mais importantes dos ligantes modificados por polímeros, apresenta-se na Figura 4, o ensaio de recuperação elástica. Pode-se observar na amostra à esquerda, que o ligante modificado, recém seccionado na sua porção central, está retornando a sua posição original. A medição desta capacidade de retorno elástico nos permite caracterizar o aumento da recuperação elástica do ligante asfáltico modificado por polímeros (MORILHA, 2004).

Figura 4: Ensaio de recuperação elástica



FONTE: Morilha (2004)

A melhoria na resistência da mistura à deformação permanente em altas temperaturas é alcançada, ou pelo endurecimento do ligante asfáltico (de tal modo que a respostas elástico do ligante é reduzida, com a correspondente redução na deformação

permanente), ou pelo aumento da componente elástica do ligante asfáltico e, por meio disso, reduzindo a componente viscosa. Conseqüentemente, o aumento da rigidez do ligante asfáltico também eleva a rigidez dinâmica da mistura asfáltica e, por meio disso, melhora-se a capacidade de distribuição de cargas do material e reduz-se as deformações críticas (MORILHA, 2004).

Outro ponto interessante é conhecer o comportamento dos ligantes modificados com o copolímero SBS em relação ao envelhecimento que ocorre no material na usina e na sua aplicação em campo. Quanto às propriedades convencionais, pesquisas realizadas por Domingos e Faxina (2013) destacam que a adição do copolímero SBS no ligante asfáltico reduz a sensibilidade do ligante asfáltico ao envelhecimento a curto prazo quanto à penetração retida e ao incremento do ponto de amolecimento.

A pesquisa realizada por Wu *et al.*, (2008) mostrou que antes do envelhecimento a longo prazo, os valores do ponto de amolecimento dos ligantes asfálticos modificados com SBS são superiores aos do ligante asfáltico de base, devido a estrutura da cadeia polimérica do ligante asfáltico modificado. Com o aumento do tempo de envelhecimento nesta pesquisa até o período de 500 horas, o ponto de amolecimento do ligante asfáltico de base aumentou consideravelmente, enquanto o ligante asfáltico modificando esta propriedade diminuiu. A partir desse limite de horas, ambos os materiais tiveram aumentados os valores desta propriedade, gradualmente, com o tempo de envelhecimento exposto. Os pesquisadores acreditam que esses fatos podem ser explicados porque no ligante asfáltico de base, mais asfaltenos, com alto peso molecular, são formados devido ao processo de envelhecimento, permitindo o aumento da propriedade. Para os ligantes asfálticos modificados com o copolímero SBS, a degradação do polímero e a oxidação do ligante asfáltico de base ocorrem ao mesmo tempo, sendo que o primeiro tende a diminuir a propriedade e o segundo tende a aumentá-la. Este comportamento é dependente do tipo de ligante de base, assim como da estrutura do copolímero SBS.

Quanto ao dano por fadiga, estudos feitos por Bahia *et al.*, (1999) mostram que o efeito do envelhecimento a longo prazo aumenta este dano, em baixos níveis de deformação. Já em estudos realizados por Soenen & Eckmann (2004), constatou-se que amostras envelhecidas apresentam maior resistência à fadiga em baixos níveis de deformação, porém para altos níveis de deformação estas são mais propensas ao dano por fadiga, ou seja, o dano por fadiga aumenta com o aumento da deformação.

2.3.2 Óleo de Copaíba

A origem do nome copaíba relaciona-se ao tupi “cupa-yba”: a árvore de depósito, ou que tem jazida, em alusão clara ao óleo que guarda em seu interior. Popularmente conhecidas como copaibeiras ou paud’óleo, as espécies de copaíba são largamente distribuídas nas regiões amazônica e centro-oeste do Brasil, sendo o óleo de copaíba extraído de várias espécies de *Copaifera* (*Leguminosae-Caesalpinoideae*), exemplo da árvore na Figura 5. No território brasileiro ocorrem mais de vinte espécies (CASCON et al., 2000).

Figura 5: Árvore de Copaíba



FONTE: João Robson (2014).

De acordo com Junior et. al (2005), estas plantas podem chegar a viver por 400 anos, atingindo uma altura de 25 a 40 metros. E por Xena et. al (1998), seu diâmetro varia entre 0,4 e 4 metros, possuem casca aromática folhagem densa, flores pequenas e frutos secos, do tipo vagem. As sementes são pretas e ovóides com um arilo amarelo rico em lipídeos.

Da árvore da copaíba é extraído uma oleoresina, de cor que varia de amarelo ouro a marrom (Lloyd, 1898), dependendo da espécie. Essa oleoresina tem sido utilizado desde a época da chegada dos portugueses ao Brasil na medicina tradicional popular e silvícola para diversas finalidades, e hoje se encontra como um dos mais importantes produtos

naturais amazônicos comercializados, sendo também exportado para Estados Unidos, França, Alemanha e Inglaterra (Veiga Junior & Pinto, 2002).

No Brasil, os óleos de copaíba são amplamente utilizados na medicina popular, sendo administrados oralmente e por aplicação tópica do óleo in natura ou em pomadas. Nos estados do norte é comum a prática da embrocção do óleo de copaíba para tratar infecções na garganta (Veiga Junior & Pinto 2002).

2.3.3 Extração do óleo de copaíba

De acordo com Cascon (2004), o óleo de Copaíba provém de canais esquizolizígeos que são secretores, localizados em todas as partes da árvore. São canais formados pela dilatação de espaços intercelulares (meatos). O caráter mais saliente desse aparelho está no lenho, onde os canais longitudinais, distribuídos em faixas concêntricas, nas camadas de crescimento demarcadas pelo parênquima terminal, reúnem-se com traçados irregulares em camadas lenhosas muitas vezes sem se comunicarem (Alencar, 1982). Há exudação das árvores de *Copaifera* (Maciel et al., 2002; Lima Neto et al., 2008) em condições patológicas, sendo então o óleo, segundo Alencar (1982), produto da desintoxicação do organismo vegetal, e que funciona como defesa da planta contra animais, fungos e bactérias.

O óleo-resina pode ser obtido, através da perfuração no tronco da copaibeira tendo sido utilizadas, desde os primórdios da exploração do produto, inúmeras formas de extração que provocavam danos sérios às árvores ou até provocavam sua morte. Porém, uma técnica tem sido considerada a única prática não agressiva, e é hoje a mais utilizada, consistindo na perfuração do tronco com um trado de aproximadamente 2 metros de diâmetro em dois furos. O primeiro deve ser feito 1 metro acima da base da planta e o segundo de 1 a 1,5 metros acima do primeiro (Alencar, 1982; Veiga Junior & Pinto, 2002; Oliveira et al., 2006; Ramos, 2006). Insere-se então um cano de PVC de $\frac{3}{4}$ de polegada nos orifícios (Figura 6) por onde o óleo escoar, e reserva-se o óleo. Após a finalização da extração, veda-se o orifício para proteção contra fungos e cupins (Oliveira et al., 2006; Ramos, 2006) com o uso de argila (Ramos, 2006) ou tampa vedante de plástico (Oliveira

et al., 2006) sendo ambas de fácil retirada para posteriores colheitas de óleo com maior facilidade de manipulação (Oliveira et al., 2006; Ramos, 2006).

Figura 6: Extração do óleo de copaíba



FONTE: Pieri (2009).

A produção anual por árvore pode chegar, segundo alguns autores, a 50 litros/árvore (Grieve, 1995). A média de retirada de óleo, por vez para cada árvore, varia de 0,3 a 3 litros, dependendo da espécie e condições às quais está submetida, e algumas árvores podem chegar a fornecer até 30 litros em uma só retirada. Sabe-se também que não se extrai óleo de todas as árvores de copaíba, mas não existem estudos precisos da média de árvores efetivamente fornecedoras de óleo, o que pode variar de acordo com as características do solo, clima, espécie da *Copaifera* e época seca ou chuvosa (Rigamonte Azevedo et al., 2004). O produto é vendido por valores que circulam entre R\$ 45,00 e R\$ 110,00 o quilo (Imazon, 2017).

2.3.4 Composição Química

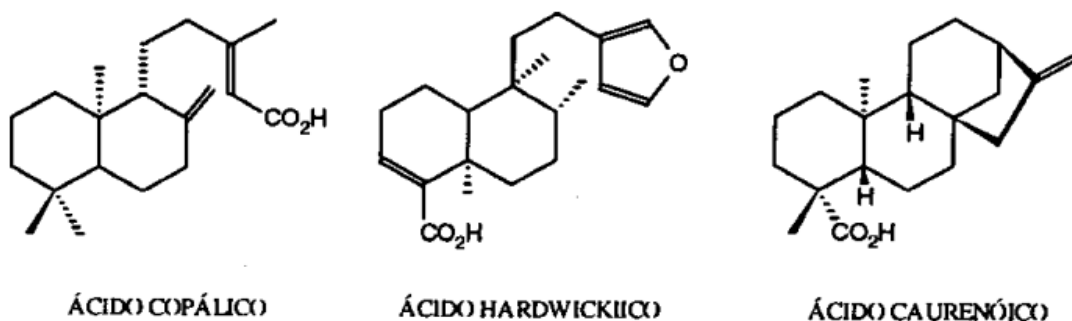
A primeira pessoa a descrever uma fração do óleo de copaíba foi Schweitzer em 1829. Ele observou a cristalização de substância, a qual chamou de ácido copaívico, quando o óleo-resina permaneceu muito tempo em repouso (Veiga Junior & Pinto, 2002).

O óleo extraído pode variar em relação à concentração e natureza dos diterpenos e sesquiterpenos presentes de acordo com variações de espécies, fatores biológicos como insetos e fungos, ou fatores abióticos (Oliveira et al., 2006; Ramos, 2006), embora alguns

estudos com o uso da *Copaifera duckei* não tenham apresentado diferença significativa na composição de óleos extraídos das mesmas árvores, em épocas sazonais diferentes (Cascon & Gilbert, 2000).

Em conformidade com Pieri, Mussi e Moreira (2009), os sesquiterpenos mais relevantes são o beta-cariofileno que possui efeito anti-inflamatório, antibacteriano, antifúngico e antiedêmico, e o beta-bisaboleno, analgésico e anti-inflamatório. Os diterpenos mais comuns são o ácido hardwickico, ácido copálico ácido caurenóico, colavenol, ácido copaíferico, entre outros, como exposto na Figura 7.

Figura 7: Principais dipertenos detectados no óleo de copaíba



FONTE: JUNIOR et al., (1997).

2.3.5 Aplicações do óleo de copaíba

O óleo de copaíba tem sido utilizado extensivamente, com diversas funções. Em alguns lugares do norte do Brasil, caboclos fazem uso do mesmo, como combustível na iluminação pública (Veiga Junior & Pinto, 2002). 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 (Calvin, 1983).

Ainda de acordo com Veiga & Pinto (2002), na indústria de perfumes, o óleo essencial de copaíba é muito utilizado como um excelente fixador de odores, combinando perfeitamente suas notas frescas e acres com essências portadoras de notas florais. E além destes, ele é muito utilizado como secativo, na indústria de vernizes, solventes em pinturas de porcelanas, aditivos na confecção de borracha sintética, aditivos de alimentos, na indústria de cosméticos pelas suas propriedades emolientes, bactericidas e anti-

inflamatórias, na fabricação de cremes, sabonetes, xampus e amaciantes de cabelo (Veiga Junior & Pinto, 2002; Cascon, 2004).

Além dos usos anteriormente citados, existem também tipos de aplicações medicinais a partir deste produto para inúmeras finalidades, de onde podemos ver que, de acordo com Veigas Junior et. al (2005), as principais propriedades terapêuticas são: a atividade anti-inflamatória, que tem como principais componentes responsáveis os hidrocarbonetos, sesquiterpênicos, especialmente o β -bisaboleno e β -cariophileno. Tem também ação cicatrizante, potencial anti-séptico, antitumoral, antibacteriano, germicida, expectorante, diurético, e analgésico (Maciel et al., 2002; Freire et al., 2006; Silva et al., 2006), dentre algumas outras utilidades já descobertas.

Além disso, pesquisas realizadas nas últimas décadas apontam o uso do óleo de copaíba para o campo da odontologia, como substituto do eugenol em três formulações: na mistura com o óxido de zinco, na formulação do cimento endodôntico, para obturações de canais radiculares, com vantagens sobre a formulação usual, por produzir menor irritação (Ribeiro, 1989). Em composição obturadora provisória medicamentosa, em combinação com o hidróxido de cálcio, apresenta melhor capacidade antimicrobiana, em relação à formulação com o eugenol (Veiga Junior & Pinto, 2002; Ramos, 2006). A pasta feita com o óleo de copaíba apresentou pequeno potencial irritativo, sendo preferível ao médio potencial do eugenol, além de potencializar as propriedades do CaOH, na compatibilidade tecidual, na indução da formação de tecido mineralizado; em cimento formado com a união de óleo de copaíba, CaOH e óxido de zinco mostra maior eficiência nas infiltrações apicais em obturações de canais radiculares (Ramos, 2006).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

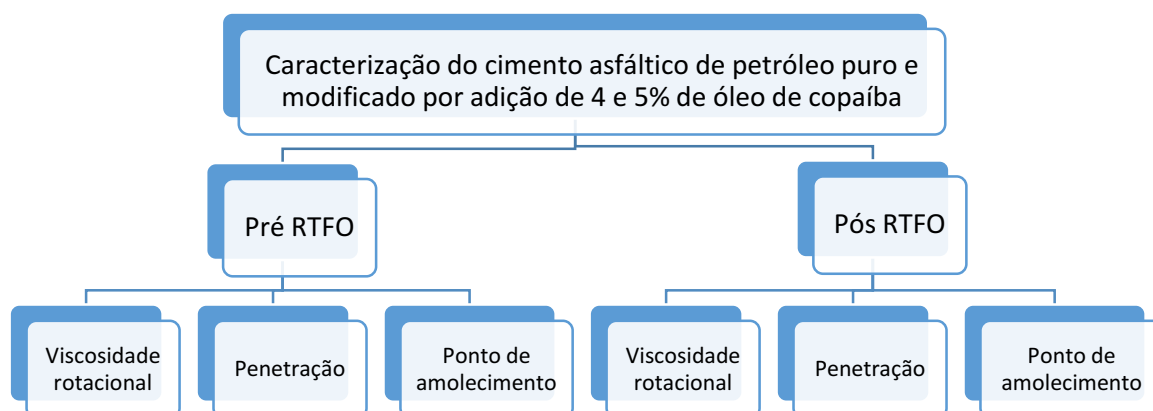
Para realização desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais:

- ✓ CAP 50/70, obtido pelo processo de destilação do petróleo pela refinaria Duque de Caxias (REDUC), pertencente à Petrobras S/A, e distribuído, pela empresa Brasquímica Produtos Asfálticos Ltda, localizada no município de Candeias-BA.
- ✓ Óleo de copaíba: O óleo de copaíba foi adquirido no comércio local.

3.2 Métodos

Nesta etapa serão descritos os procedimentos utilizados durante a fase experimental de pesquisa. A metodologia adotada desde a caracterização do ligante está detalhada na Figura 9:

Figura 8: Fluxograma das atividades executadas



3.2.1 Procedimento de mistura

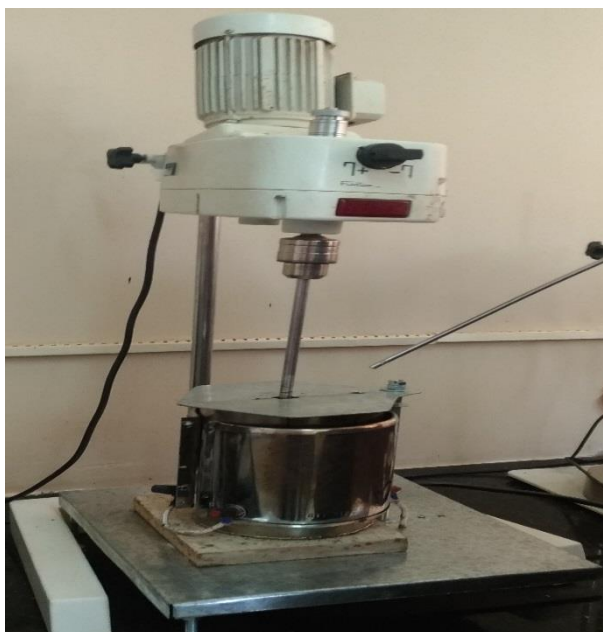
O fluxograma anterior demonstra a sequência de ensaios realizados a partir da caracterização do material de acordo com a adição do óleo de copaíba. A produção do

CAP modificado ocorreu a partir da adição de teores do óleo modificador variando de 4 e 5%, em um misturador mecânico (FISATOM, Modelo 722).

Para que houvesse a mistura do material, primeiramente as amostras de CAP puro foram aquecidas em estufa a uma temperatura de aproximadamente 120 °C. Em seguida, este ligante foi colocado em um misturador mecânica com rotações de 300 rpm. Ao ser atingida uma temperatura de 160 °C, foram adicionadas as percentagens de óleo de copaíba anteriormente citadas 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.

Vale ressaltar que para a colocação do óleo ao misturador, manteve-se a tampa do mesmo entreaberto de forma a evitar acidentes com o material que se encontrava a altas temperaturas e bastante líquido. A Figura 9 ilustra o misturador utilizado para o procedimento.

Figura 9: Misturador mecânico



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

Finalizada a mistura dos CAPs modificados com os teores, foram então realizados os ensaios de ponto de amolecimento, penetração e viscosidade rotacional (Brookfield),

e então fez-se um envelhecimento à curto prazo utilizando uma estufa RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*), e após o mesmo foram novamente realizados os experimentos anteriormente citados. As normas de cada um dos ensaios estão na Tabela 2:

Tabela 2: Normas dos ensaios

Ensaio	Penetração	Ponto de amolecimento	RTFOT	Viscosidade Brookfield
Normas	DNIT-ME 155/2010	DNIT-ME 131/2010	ASTM D 2872-97	ABNT NBR 15184

3.2.2 Envelhecimento a curto prazo -RTFO (Estufa de Filme Fino Rotativo)

De acordo com os estudos realizados por Araújo (2007), cerca de 60% do envelhecimento total suportado pelo ligante decorre ao longo do processo de usinagem, 20% sofrido durante as fases de estocagem, transporte, espalhamento e compactação e os 20% restantes associados ao desgaste que irá suceder durante a vida útil do revestimento asfáltico. Deste modo, faz-se necessário se prevenir a respeito do efeito de envelhecimento pela usinagem com o objetivo de aumentar a vida útil do mesmo.

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

A perda de massa das amostras de ligante significa quanto o material sofreu o efeito da ação do calor e do ar aplicados no processo, ao ponto de causar a degradação e redução de parte da matéria presente, o que implica em alterações na composição e nas propriedades reológicas do material, como o aumento de sua viscosidade e rigidez (CRAVO, 2016).

O procedimento RTFO que segue a norma ASTM D 2872-97 avalia o envelhecimento do ligante asfáltico por oxidação e evaporação pelo efeito do 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.

A Figura 10 ilustra o aparelho utilizado na realização do RTFO.

Figura 10: Estufa do RTFO



FONTE: Triad Scientific (2018).

3.2.3 Ensaio de caracterização física

- **Penetração**

O ensaio de penetração determina a consistência, a dureza 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. A consistência do material é maior conforme menor seja a penetração da agulha. O procedimento é regido pela norma DNIT-ME 155/2010. A Figura 11 ilustra o penetrômetro utilizado na realização deste experimento.

Figura 11: Penetrômetro



FONTE: Rac Peru (2018).

- **Ponto de Amolecimento**

O ponto de amolecimento é a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido e atinge a placa inferior da aparelhagem. Sendo assim, mais um indicador empírico da consistência do ligante e procura determinar em qual temperatura o ligante alcança determinada condição de escoamento.

Este ensaio que aqui no Brasil é mais conhecido por Anel e Bola, é regido pela norma DNIT-ME 131/2010, e tem como objetivo a medição da consistência do CAP com a variação de temperatura, indicando a que nível de dureza o asfalto tem determinada consistência.

Na Figura 12, está a aparelhagem necessária para a realização deste experimento, onde deve-se saber que sua realização consiste na colocação de duas esferas imersas em água e com a variação da temperatura estas vão juntamente com a mistura alcançar o fundo do material montado, sendo medida então a temperatura no momento que isto se realiza.

Figura 12: Execução do ponto de amolecimento



- **Viscosidade Rotacional**

Sabendo que a viscosidade de um ligante influi na sua eficiência em aglutinar-se com os agregados e na sua trabalhabilidade em campo. Assim como também, a partir dela é possível estabelecer as temperaturas que se mostram indispensáveis na usinagem e na compactação.

O ensaio de viscosidade rotacional é utilizado para medir a viscosidade do asfalto a altas temperaturas, 135 °C, 150 °C e 177 °C, conforme a ABNT NBR 15184/2004 a ASTM D4402-15, e o conhecimento dessas medidas se mostra importante em razão do fato de que uma alta viscosidade acarreta na utilização de altas temperaturas nas etapas de pavimentação, podendo chegar até a inviabilizar a utilização do material. O viscosímetro rotacional utilizado foi o Brookfield, modelo DV-III ULTRA, acoplado a um controlador de temperatura THERMOSEL e a unidade de medida da viscosidade dinâmica foi a de centipoise (cP).

A Figura 13, ilustra o viscosímetro utilizado na realização do experimento.

Figura 13: Viscosímetro Brookfield



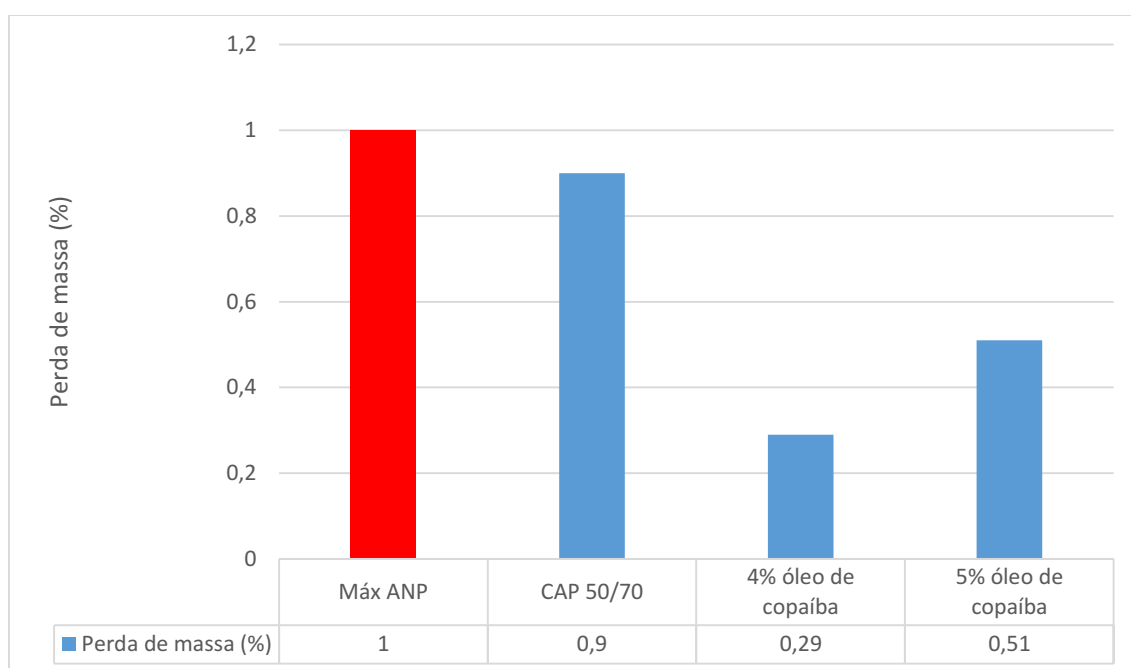
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta etapa serão apresentados e discutidos os resultados dos procedimentos de envelhecimento a curto prazo dos ligantes asfálticos puro (CAP 50/70) e com adição do óleo de copaíba nos teores de 4% e 5%. E a partir destes, serão apresentadas as caracterizações dos referidos ligantes com base nos ensaios convencionais de caráter físicos. E, por fim, uma análise geral do efeito do óleo de copaíba como agente modificante dos ligantes asfálticos.

4.1 Envelhecimento a curto prazo

Na Figura 14, observam-se os resultados das perdas de massa, dadas em porcentagem, dos ligantes puros e modificados após o envelhecimento.

Figura 14: Resultados de perda de massa



Com base nas especificações Superpave, a perda de massa não pode ultrapassar 1%. Sendo assim, é possível perceber através dos resultados presentes na Figura 15, que todos os ligantes em questão se enquadraram no critério estabelecido pela norma.

Nota-se que a amostra de ligante puro foi a que exibiu maior perda de massa. Os outros ligantes modificados por óleo de copaíba obtiveram uma menor perda de massa,

que cresceu de acordo com o aumento do teor do aditivo. A razão pela qual ocorreu esta maior perda de massa no ligante puro se deve ao fato de uma maior volatilização sofrida pelo mesmo ocasionada pela perda de elementos voláteis em sua constituição. Sendo assim, podemos perceber que o ligante modificado com óleo de copaíba nos dois teores se mostrou benéfica pelo fato de haver uma menor perda de massa em comparação com o ligante puro.

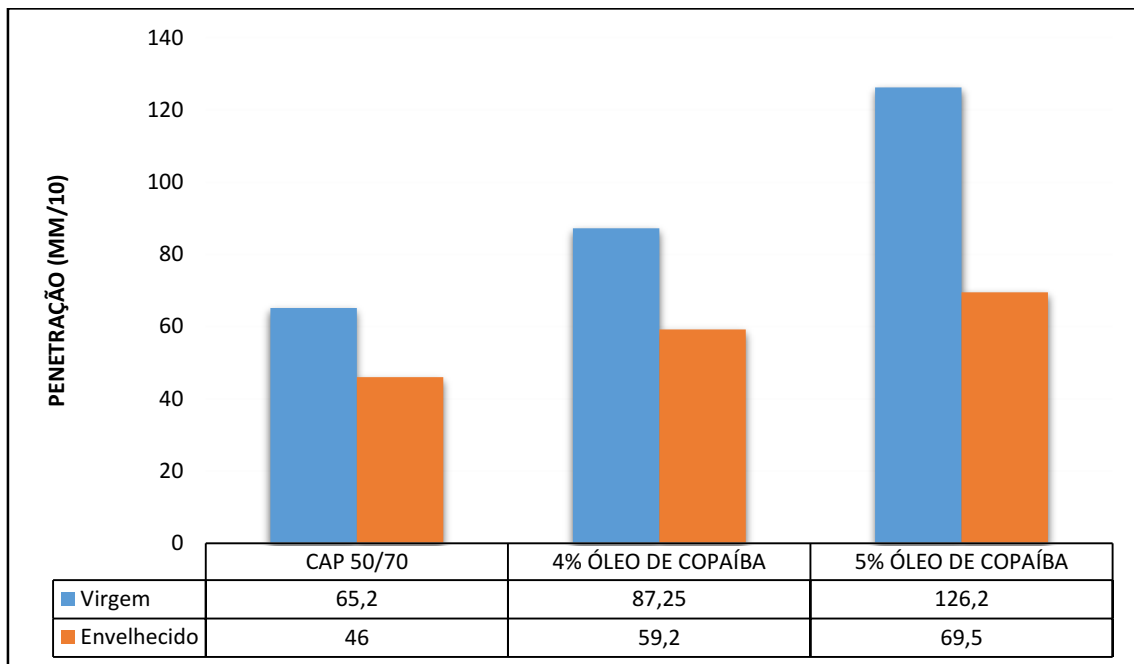
No entanto, de acordo com Cravo (2016), o envelhecimento pode ser prejudicial como também benéfico desde que o enrijecimento, advindo do processo de oxidação, tenha um certo limite, que se excessivo, pode levar a ocorrência de trincas térmicas e fadiga, quando atuante de maneira razoável, pode ser até útil na resistência à deformação permanente. Este enrijecimento pode ser constatado a partir dos resultados dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento que foram realizados ao longo desta pesquisa e serão discutidos nos tópicos posteriores.

Os ensaios de envelhecimento como RTFO e o PAV não podem ser apropriados para a aplicação em ligantes modificados com óleos, de acordo com Tayth et al. (2014). Ainda de acordo com este estudo, quanto maior o teor do óleo, mais sujeito ao envelhecimento estará o ligante por ele modificado em razão da solubilização de parte da fração asfáltica. Pode-se então verificar esta como uma possível razão do acréscimo da perda de massa com o aumento do teor de óleo de copaíba e que, neste caso, o melhor desempenho foi obtido para a amostra modificada com menor teor de óleo, 4%. Portanto, os tempos e temperaturas de usinagem e compactação, devem ser inferiores aos tradicionalmente utilizados de forma a evitar com que ocorra um envelhecimento prematuro.

4.2 Ensaio de penetração

A Figura 15 ilustra os resultados do ensaio de penetração obtidos para as amostras antes e após o envelhecimento a curto prazo.

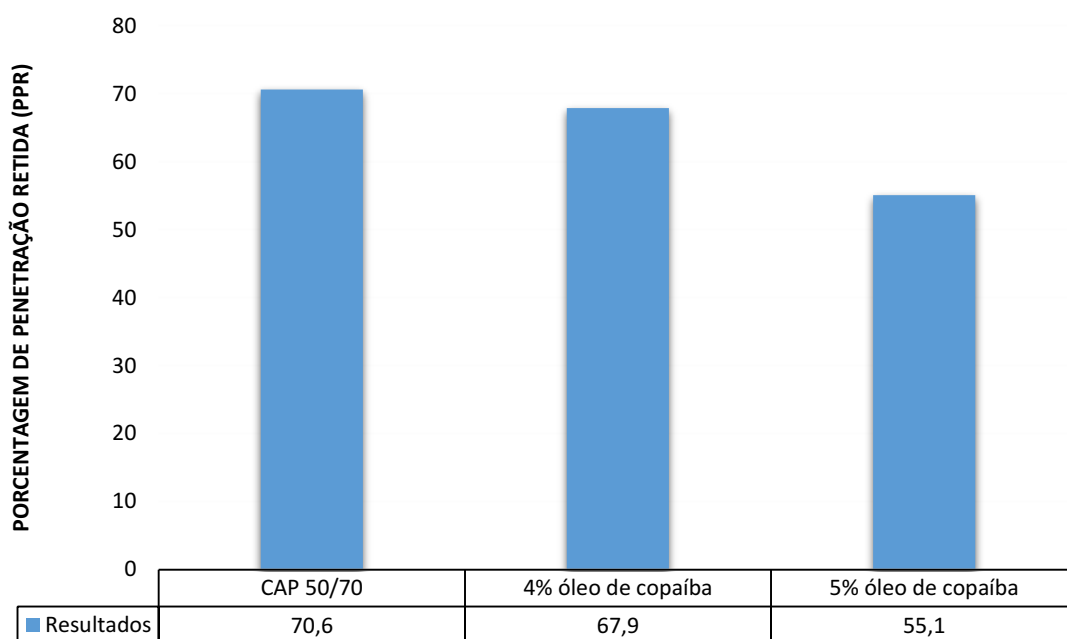
Figura 15: Resultados do ensaio de penetração



Os resultados mostrados expõem que a adição de óleo de copaíba promoveu um aumento crescente na penetração do ligante, o que já era esperado de acordo com Cavalcante (2016), Costa (2015), Portugal (2016) e Souza (2012) que estudaram a adição de modificadores oleicos a ligantes asfálticos, e comprovaram a redução da rigidez do ligante com o aumento crescente da adição do agente modificador.

Fazendo uma análise dos resultados antes e após o envelhecimento, obteve-se a penetração retida, que exprime a sensibilidade do ligante asfáltico ao envelhecimento. Valor muito importante para analisar a sensibilidade do ligante ao envelhecimento e para isto a Resolução ANP nº 19/2005 estabelece como mínimo 55% para essa variável. Sendo assim, quanto maior o valor deste parâmetro, menor a sensibilidade do ligante asfáltico ao envelhecimento e, portanto, maior a resistência do ligante a oxidação. Os resultados da PPR estão ilustrados na Figura 16.

Figura 16: Penetração retida

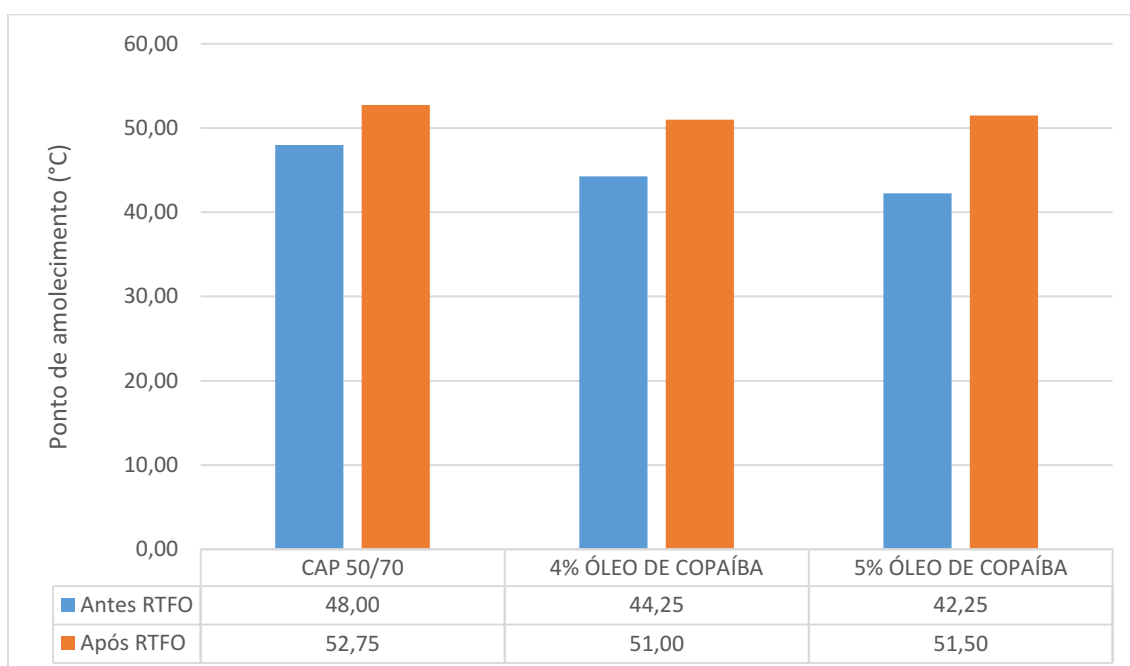


De acordo com a Figura 16, verifica-se que os resultados dos ligantes modificados com óleo de copaíba foram inferiores ao do CAP 50/70 puro. Consequentemente, a sensibilidade do ligante aumentou com a adição de óleo de copaíba, desta forma, infere-se que os mesmos tornam o ligante mais susceptível ao envelhecimento.

4.3 Ponto de amolecimento

Os resultados do ensaio de ponto de amolecimento referentes ao CAP puro e modificado por óleo de copaíba, antes e após o envelhecimento estão ilustrados na Figura 17.

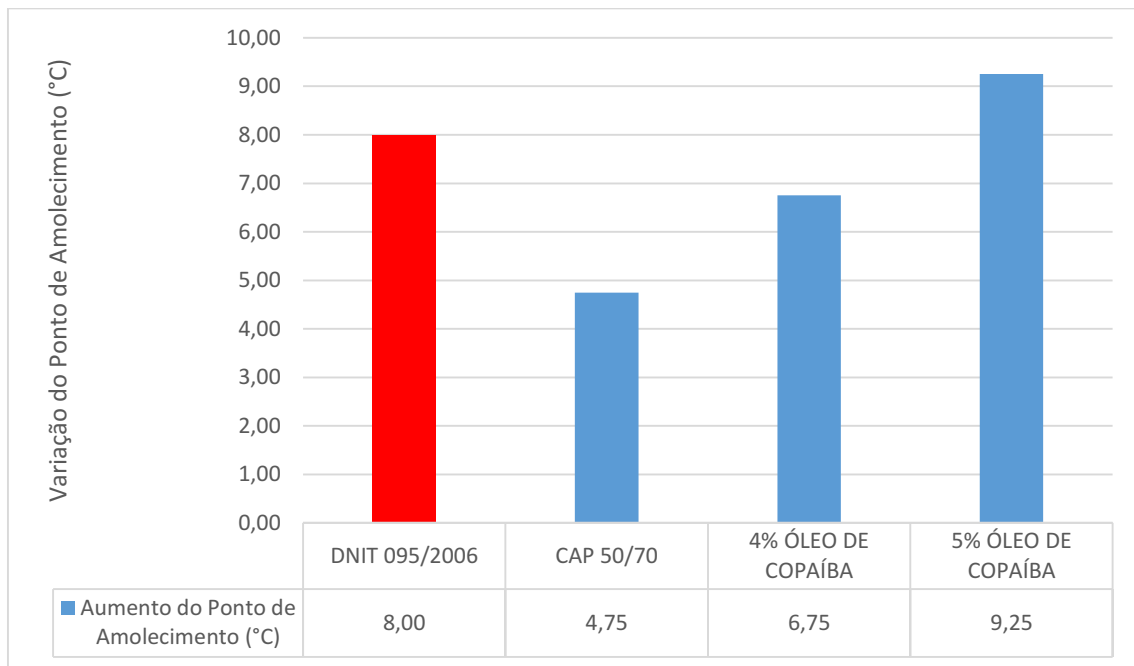
Figura 17: Resultados do ensaio de ponto de amolecimento



Os valores obtidos indicam uma tendência de diminuição do ponto de amolecimento para o CAP 50/70 quando este é modificado com óleo de copaíba, tanto nos resultados antes quanto após o RTFO. Fato este que reitera a diminuição da rigidez ocasionada com o ligante modificado com óleo verificada mediante a realização do ensaio de penetração. O teor de 5% antes do envelhecimento foi o que obteve menor temperatura do ponto de amolecimento, enquanto que nos valores após o RTFO o ligante modificado se mostrou semelhante ao puro.

A Figura 18 ilustra a variação do ponto de amolecimento entre antes e após o RTFO.

Figura 18: Variação do ponto de amolecimento



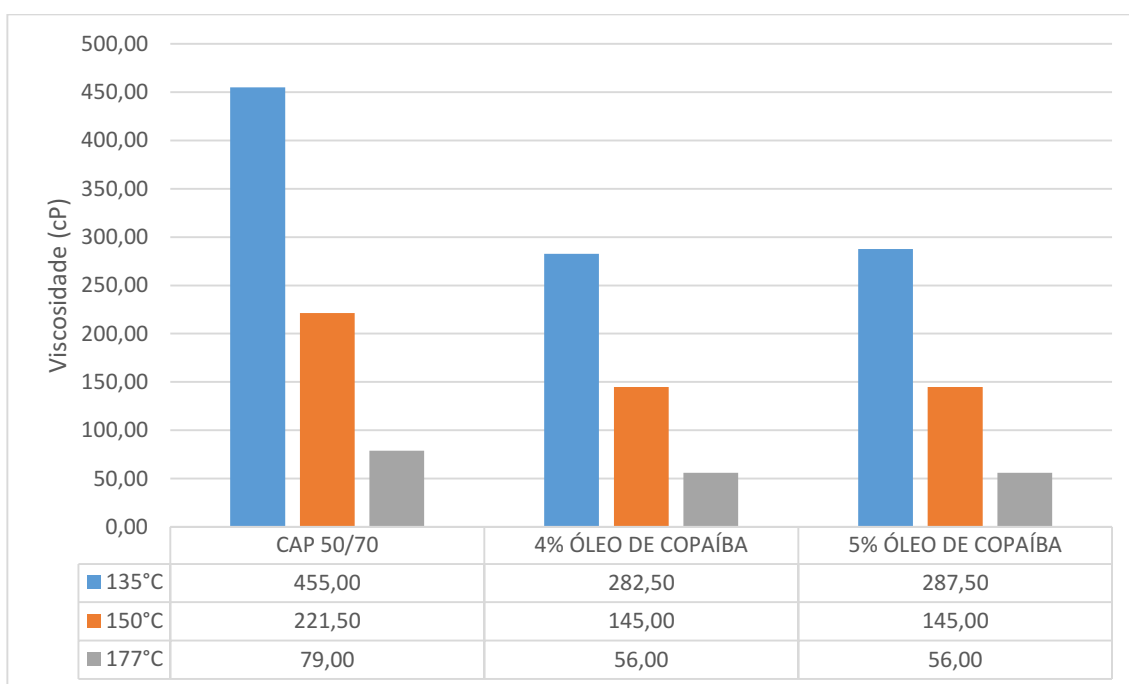
Considerando o aumento da temperatura do ponto de amolecimento decorrido após o envelhecimento a curto prazo RTFO, a norma DNIT 095/2006-ME descreve um aumento máximo de 8°C para o CAP 50/70. Sendo assim, o ligante com adição de 5% de óleo de copaíba não atende a este requisito, pois o mesmo apresentou um aumento de 9,25°C. Vale ressaltar também que este aumento de temperatura indica um aumento da sensibilidade do ligante ao envelhecimento o deixando com uma rigidez excessiva.

4.4 Ensaio de viscosidade rotacional

4.4.1 Antes do envelhecimento

A Figura 19 ilustra os resultados obtidos para o ensaio realizado antes do procedimento de envelhecimento.

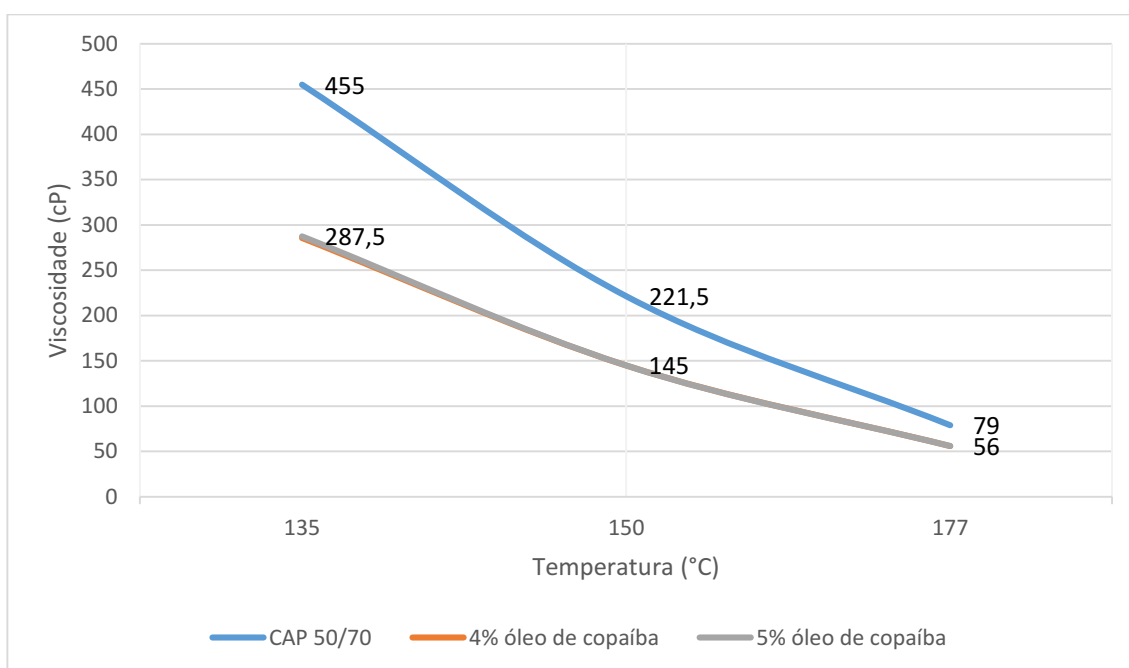
Figura 19: Resultados do ensaio de viscosidade rotacional.



A adição do óleo de copaíba nos teores estudados ocasionou uma diminuição das viscosidades com relação ao CAP puro, o que por consequência refletiu nas Temperaturas de Compactação e Usinagem (TCU), que por sua vez está relacionada com a trabalhabilidade do ligante. É importante destacar que com relação aos dois teores estudados não há grande variação da viscosidade, e, a 150°C e 177°C os resultados obtidos para os teores de adição em estudo foram os mesmos.

A Figura 20 ilustra as curvas de viscosidade do CAP puro e modificado com a adição dos teores estudados de óleo de copaíba, vale ressaltar que pouco se vê da curva do teor de 4% por consequência dos seus valores serem aproximados do teor de 5%, o que pode indicar que o ligante modificado tenha alcançado seu ponto de saturação.

Figura 20: Curvas da viscosidade rotacional antes do RTFO

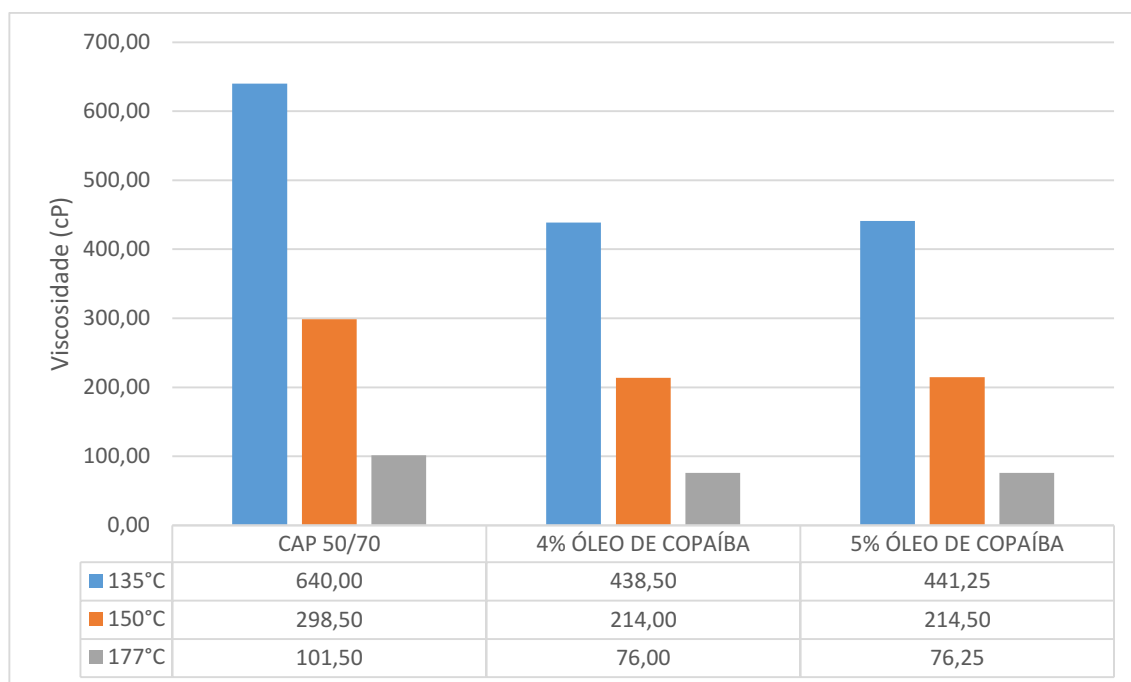


Pode-se perceber que o comportamento do ligante modificado em todas as temperaturas apresentou uma menor viscosidade, onde a diferença entre eles na temperatura de 135°C chegou a ser de 170 cP ou 37% aproximadamente, e terminou na temperatura de 177°C em 23 cP ou 29%.

4.4.2 Após o envelhecimento

Após o processo de envelhecimento das amostras do ligante, pode-se notar o mesmo padrão de semelhança entre os dois teores de óleo de copaíba mesmo com o acréscimo de viscosidade advindo do processo de envelhecimento nos ligantes. A Figura 21 ilustra os resultados obtidos tanto para o CAP puro, como para adicionado aos dois teores de óleo, em relação às três temperaturas em que o ensaio foi realizado.

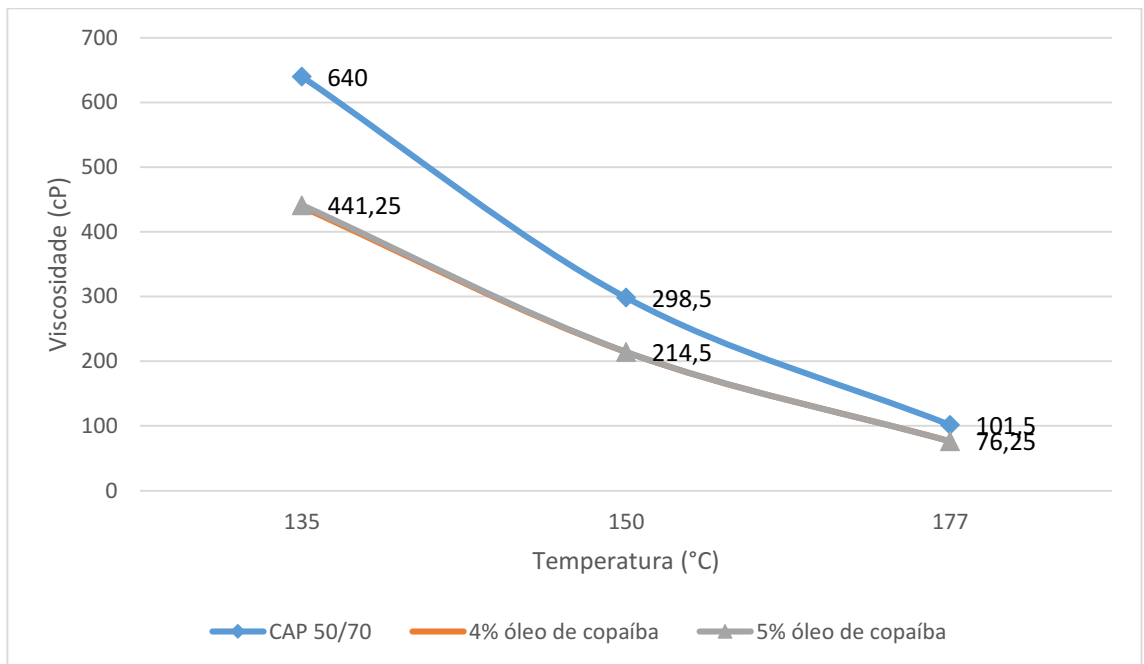
Figura 21: Resultado da viscosidade rotacional após o envelhecimento



Com relação ao ligante após o processo de envelhecimento, observou-se um aumento médio da viscosidade em torno de 50%. Que pode ser atribuído ao fato das misturas asfálticas serem produzidas em temperaturas demasiadamente elevadas podendo levar a oxidação do ligante devido ao envelhecimento ocasionado neste processo.

A Figura 22 ilustra as curvas de viscosidade do CAP puro e incorporado aos teores de óleo de copaíba. Vale ressaltar que os valores modificados com o óleo de copaíba tiveram resultados bem próximos, o que pode indicar que estes teores já chegaram ao ponto de saturação da mistura, de maneira uma curva se sobrepôs à outra.

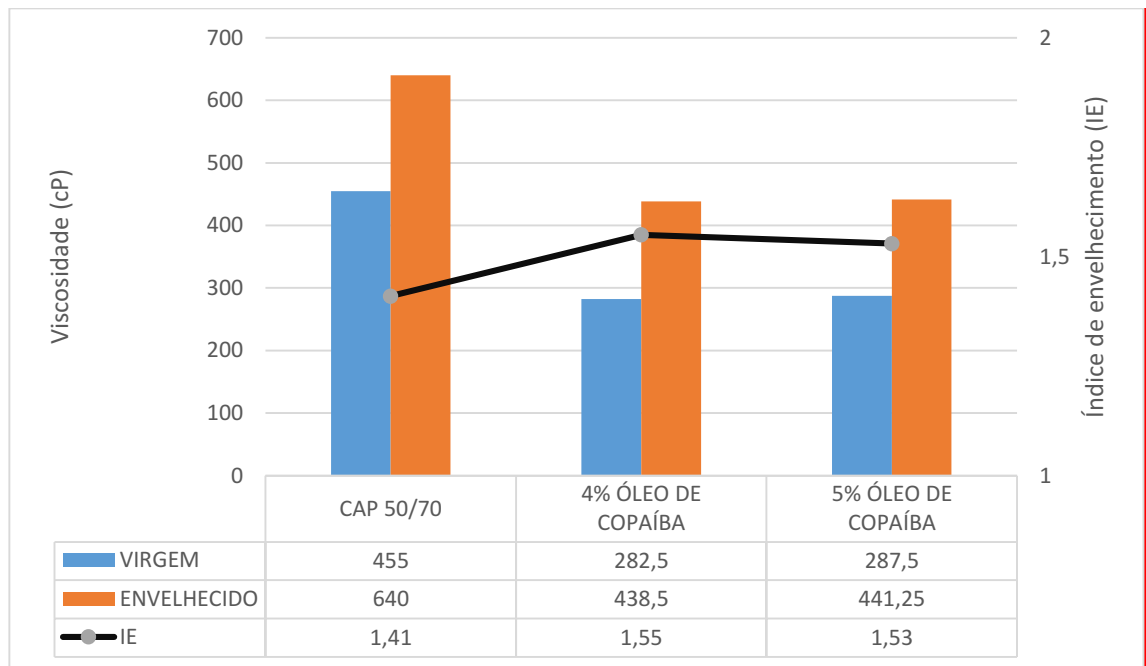
Figura 22: Curvas da viscosidade rotacional após o RTFO



A partir das curvas pôde-se perceber que o ligante modificado em todas as situações apresentou valores de viscosidade abaixo do CAP puro e conforme houve aumento da temperatura esta diferença entre eles se reduziu, de forma que em 135°C havia aproximadamente 200 cP ou 31% de diferença, enquanto que em 177°C a diferença foi de 25,5 cP ou 25%.

Com base nos resultados das viscosidades antes e após o RTFO, determinou-se o índice de envelhecimento (IE) obtido entre a relação das viscosidades. Os resultados estão apresentados na Figura 23 com relação à temperatura de 135°C.

Figura 23: Índice de envelhecimento



Os resultados mostram que os dois teores de óleo tiveram índices de envelhecimento maiores que o do CAP puro, o que significa dizer que há uma maior susceptibilidade ao envelhecimento.

4.4.3 Temperaturas de compactação e usinagem (TCU)

O cálculo das temperaturas de compactação e usinagem são de extrema importância para a realização destes processos, e podem ser obtidas a partir das curvas que relacionam as viscosidades de cada amostra. Quanto menos os valores de TCU, melhor será a trabalhabilidade do material. De acordo com Whiteoak (1990), a oxidação referente ao processo de compactação e usinagem está ligado a temperatura, superfície e tempo de exposição. E a taxa de oxidação tem um aumento considerável, chegando ao dobro para cada °C de aumento na temperatura do ligante quando este está acima dos 100°C.

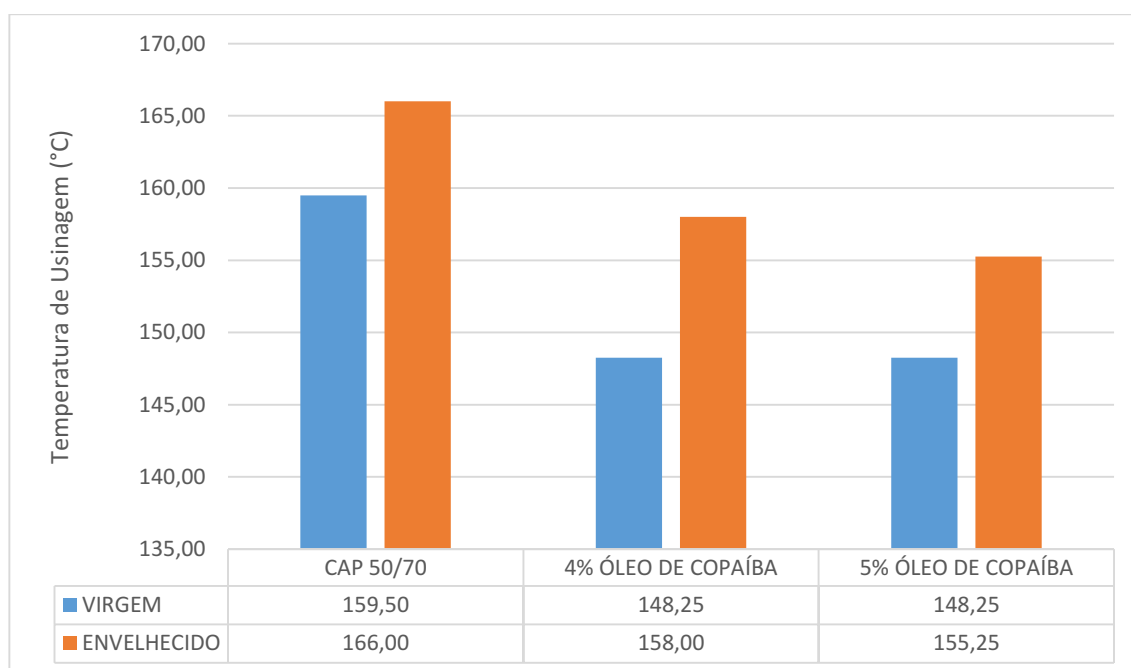
A adição do óleo de copaíba no ligante asfáltico mostrou-se benéfica devido a redução da viscosidade a qual reflete numa diminuição das temperaturas de compactação e usinagem.

O cálculo das temperaturas de usinagem e compactação de cada mistura foram obtidas a partir das suas respectivas curvas viscosidade-temperatura. Em relação à

temperatura de usinagem, a mesma foi determinada a partir do intervalo compreendido entre 170 ± 20 cP. No que diz respeito a temperatura de compactação ela deve ser tal que o ligante apresente um valor em torno de 280 ± 30 cP.

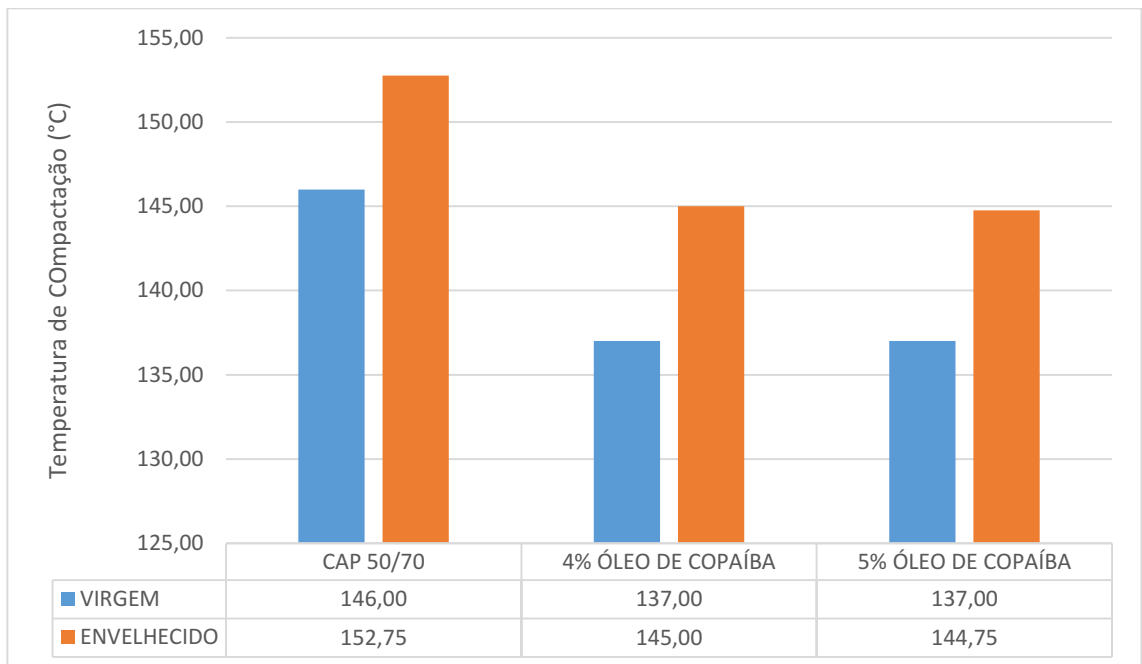
Sendo assim, a partir dos resultados obtidos, verifica-se que a adição de óleo de copaíba ao CAP 50/70 ocasionou a redução nas temperaturas de usinagem e compactação. As Figuras 24 e 25 ilustram as temperaturas de usinagem e compactação dos materiais estudados antes e após o envelhecimento.

Figura 24: Temperatura de usinagem dos ligantes estudados



Pode-se então perceber que os valores da temperatura de Usinagem dos materiais modificados antes do envelhecimento se mostraram semelhantes, enquanto que após o envelhecimento tiveram uma diferença de $2,75^{\circ}\text{C}$ ou aproximadamente 2%. Quando comparados os valores dos ligantes modificados com o puro, percebemos que antes do envelhecimento a diferença foi de $11,25^{\circ}\text{C}$ ou 7%, enquanto que após o envelhecimento a maior diferença vista foi com relação ao de teor 5%, que foi de $10,75^{\circ}\text{C}$ ou 6,5%.

Figura 25: Temperatura de compactação antes do envelhecimento – RTFO



Com relação a temperatura de Compactação, podemos visualizar mais uma vez a igualdade nos valores do ligante modificado nos dois teores estudados antes do envelhecimento, enquanto que após o envelhecimento eles tiveram uma diferença muito pequena de 0,25°C. Quando comparados os valores do ligante puro com o modificado com óleo de copaíba, vemos que antes do envelhecimento houve uma variação de 9°C ou 6%, enquanto que após o envelhecimento apresentaram 8°C ou 5% a menos de temperatura.

Estes valores se mostram bastante importantes, pois demonstram em todos os teores e todas as situações estudadas que a adição do óleo de copaíba ao ligante reduz as temperaturas necessárias para a Compactação e Usinagem.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 Considerações Finais

A finalidade central desta pesquisa foi a de examinar qual efeito teria o óleo de copaíba nas propriedades físicas de misturas asfálticas quando realizada a mistura do mesmo com cimento asfáltico de petróleo 50/70. A partir dos experimentos realizados, chegou-se à conclusão que a presença do óleo de copaíba no ligante contribuiu na diminuição da viscosidade do mesmo e em um aumento da trabalhabilidade.

Com relação aos aspectos físicos, o CAP 50/70 incorporado ao óleo de copaíba se mostrou menos 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. Essas mudanças foram mais perceptíveis a partir de um aumento do ponto de penetração e conseqüente diminuição da consistência, além de uma diminuição do ponto de amolecimento deixando assim o ligante fora dos padrões esperados. A diminuição da resistência ao envelhecimento pôde ser percebida a partir de maiores variações dessas propriedades antes e após o envelhecimento nos ligantes modificados.

Com relação as temperaturas de compactação e usinagem, foi visto que o emprego do óleo de copaíba em ligantes asfálticos nos teores estudados chegou a causar uma redução da temperatura de usinagem de até 11°C, em relação ao ligante puro, como no caso da adição de 5% do óleo após o envelhecimento, o que representa 7% de perda de temperatura. A temperatura de compactação chegou a ter redução da temperatura de até 9°C. Estes resultados promovem uma maior economia de energia durante o aquecimento do ligante asfáltico na usina, o que pode vir a trazer uma grande economia.

Sendo assim, o óleo de copaíba pode ser uma alternativa viável para emprego como aditivo redutor nas temperaturas de produção, como também do consumo de combustível e emissão de poluentes, fatos estes que agradam as esferas econômicas e ambientais. Desta forma, é necessário compensar até que ponto é vantajoso ter menores temperaturas de usinagem e compactação.

Por fim, se faz necessário que os estudos físicos sejam analisados juntamente com as características químicas e mecânicas da adição do óleo de copaíba e o cimento asfáltico de petróleo, para que a partir destas possam ser realizadas as inferências completas acerca

das propriedades deste novo material, e chegar assim a conclusão de um possível uso ou não do mesmo, e se sim, qual seria a maneira mais viável de ser empregado.

5.2 Sugestões para Pesquisas Futuras

- Caracterizar quimicamente o ligante asfáltico CAP 50/70 modificado por adição de óleo de copaíba;
- Caracterizar reologicamente o ligante asfáltico CAP 50/70 modificado por adição de óleo de copaíba;
- Analisar a viabilidade da utilização do ligante modificado por óleo de copaíba em misturas asfálticas

6 REFERÊNCIAS

- Airey, G. (2003). **Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens.** *Fuel*, 82(14), pp 1709-1719.
- Alencar, J. (2009). **Estudos silviculturais de uma população natural de *Copaifera multijuga* Hayne - Leguminosae, na Amazônia central. 2 – Produção de óleo resina.** *Acta Amazônica*, v.12, n.1, p.79-82.
- Araujo, M. F. A. (2007). **Efeito da radiação solar no envelhecimento do concreto betuminoso usinado a quente.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Belo Horizonte/BH.
- Arnold, T. (2008). **Phosphoric Acid as an Asphalt Modifier Guidelines for Use: Acid Type.** FHWA.
- ABNT NBR 15184/04 – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro. **Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional.**
- Balbo, J. T. (2007). **Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração.** São Paulo.
- Baumgardner, G. L., Massom, J. F., & Hardee, J. R. (2005). **Polyphosphoric acid modified asphalt: proposed mechanisms.** *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 283-205.
- Bernucci, L., Mota, L., Ceratti, J. & Soares, J. (2006). **Pavimentação asfáltica: Formação para engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobras.
- Bringel, R. M. (2007). **Estudo químico e reológico de ligantes asfálticos modificados por polímeros e aditivos.** Dissertação de Mestrado, LMP/UFC, Fortaleza, CE.
- Cascon V, Gilbert B. (2000). **Characterization of the chemical composition of oleoresins of *Copaifera guianensis* Desf., *Copaifera duckei* Dwyer and *Copaifera multijuga* Hayne.** *Phytochemistry* 55: 773-778.
- Cascon, V.; Carvalho, J.C.T. (2004). **Copaíba - *Copaifera* spp. In: Fitoterápicos antiinflamatórios: aspectos químicos, farmacológicos e aplicações terapêuticas.** Ribeirão Preto: Tecmedd. 480p.

Cavalcante, F. P. (2016). **Efeito da adição dos óleos de ricinus communis e linus usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado.** Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande/PB.

Costa, D. B.; Cavalcante, F. P.; Rodrigues, J. K. G.; Mendonça, A. M. G. D.; Lira, Y. C. (2015). **Influência da adição do óleo de linhaça nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo.** 44º RAPV e 17º ENACOR. Maceio/AL.

Cravo, M. C. C. (2016). **Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástique e matriz de agregados finos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 280 fls.

DNER. (1997). **Glossário de Termos Técnicos Rodoviários**

DNIT. (2003). DNIT 005/2003 – **TER Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos – Terminologia.** Rio de Janeiro.

Faxina, A. L. (2006). **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC/USP). São Carlos, São Paulo, SP. 286 fls.

Giavarini, C., Mastrofini, D., Scarsella, M., Barre, L., & Espinat, D. (2000). **Macrostructure and rheological properties of chemically modified residues and bitumens.** *Energy and fuels*, pp. 495-502.

Huang, S. et. Al. (2008). **Long term aging characteristics of polyphosphoric acid modified asphalts,** transportation research board.

Júnior, F.A.A. et al. (2005). **Efeito do óleo de copaíba nas aminotransferases de ratos submetidos à isquemia e reperfusão hepática com e sem pré-condicionamento isquêmico.** *Acta Cirúrgica Brasileira*, v.20, n.1, p.93-9.

Joliet, Y., & Mallot, M. (2000). **Precautions when interpreting rutting results from the LCPC traffic simulator.** 2º Eurasphalt & Eurobitume Congress Barcelona.

Kim, S., Sholar, G., Byron, T., & Kim. J. (2009). **Performance of polymer-modified asphalt mixture with reclaimed asphalt pavement.** *Transportation Research Record*, pp. 109-114.

- Kodrat, I., Sohn, D., & Hesp, S. A. (2007). **Asphalt Binders with straight and polimer-modified materials**. Transportation Research Record, 47-55.
- Leite. (1999). **Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros**. Rio de Janeiro, Universidade Federal do Rio: Tese.
- Leite, M. F., Bittencourt, B.C., & Nascimento, H. A. (2004). **Efeito do ácido polifosfórico no desempenho dos ligantes rodoviários**. ANPET.
- Maciel, M.A. et al. (2002) **Plantas medicinais: a necessidade de estudos multidisciplinares**. Química Nova, v.25, n.3, p.429-38.
- Mano, E. B., & Mendes, L. C. (1999). **Introdução a Polímeros**. São Paulo: Blucher.
- Lesueur, D. (2009). **The colloidal structure of bitumen: Consequence on the mechanisms of bitumen modification**. Advances in colloid and interface Science, pp. 42-82.
- Lima, A. P. D.; Rodrigues, F. O.; Amoni, B.; Bringel, R. M.; Soares, J. B.; Soares, S. A.; Ricardo, N. M. P. S. (2009). **Efeito da Adição de Organovermiculita e Líquido da Castanha de Caju (LCC) na Estabilidade a Estocagem de Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado por SBS**. X Congresso Brasileiro de Polímeros (CBPOL), Foz do Iguaçu, PR.
- Lloyd, J.U. *Copaifera officinalis*. (1989). **Chicago: The Western Druggist**. 13p.
- Loeber, L., Muller, J., Morel, J., & Sutton, O. (1998). **Bitumen in colloid science: a chemical, structural and rheological approach**. Fuel, 1443 – 1450.
- Lu, X., & Isacson, U. (maio de 1997). **Influence of styrene-butadiene-styrene polymer modification on bitumen viscosity**. Elsevier, pp 1353-1359.
- Martin, J. V., & Baumgardner, G. (2006). **A new to producer polymer modifier asphalt with crumb rubber and polysphosphoric acid: combining recycling and performance**. Asphalt Rubber, pp. 903-930.
- Morilha, J. (2004). **Estudo sobre ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e da fadiga das misturas asfálticas**. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina: Dissertação (mestrado).
- Motta, R. S. (2012). **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissões de poluentes e de consumo energético**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil.

Oda, S., Fernandes, J. L. (2001). **Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação**. Paraná, Universidade Estadual de Maringá.

Oliveira, E.C.P. et al. (2006) **Identificação da época de coleta do óleo-resina de copaíba (Copaifera spp.) no município de Moju-PA**. Revista Brasileira de Plantas medicinais, v.8, n.3, p.14-23.

Orange, G., Dupuis, D., Martin, J., V., Farcas, F., Such, C., & Marcant, B. (2004) **Chemical modification of bitumen through polyphosphoric acid: properties – microstructure relationship**. 3^a Eurasphalt & Eurobitumen Congress, (p. 13). Vienna.

Pieri, F. A.; Mussi, M. C.; Moreira, M. A. S. (2009). **Óleo de copaíba (Copaifera sp.): histórico, extração, aplicações industriais e propriedades medicinais**. Rev. Bras Plantas Med., Botucatu, v. 11, n. 4, p. 465-472.

Pinto, S. **Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos**. (1991). Tese (Doutorado) – Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1991.

Portugal, A. C. X. (2016). **Avaliação reológica de cimentos asfálticos de petróleo modificados com óleo de soja e de milho**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande/PB.

Pulzic, O., & Williamson, K., E. (2002) US Patente nº 6414056B1.

Ramos, M.F.S. (2006) **Desenvolvimento de microcápsulas contendo a fração volátil de copaíba por spray-drying: estudo de estabilidade e avaliação farmacológica**. Tese (Doutorado em Ciências Farmacêuticas), Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 132 fls.

Rüth, R. (2014). **Lower temperatures: The best for asphalt, bitumen, environment and health and safety**. In: EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, 4. 2014, Copenhagen. Anais...

Robinson, H. (2004). **Polymers in asphalt**. Rapra Review Reports ISSN 0880-3144, 1-33.

Shell. (2003). **The Shell bitumen handbook**. 5. ed. Cambridge.

Silva, G. G. (2016). **Estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas – Campina Grande.**

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

Souza, L. J. S. (2012). **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cimento asfáltico de petróleo modificado com óleo de mamona.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, Paraíba, PB, 106 fls.

Trakarnpruk, W., & Chanathup, R. (2005). **Physical and rheological properties of asphalt modified with polyethylene-co-methylacrylate and acids.** *Journals of metals, materiais and minerals*, pp. 79-87.

Veiga, V.F.J.; Pinto, A.C. (2002) **O Gênero Copaifera L.** *Química nova*, v.25, n.2, p.273-86.

Vitorino, C.C. (2018). **Avaliação das propriedades reológicas do ligante asfáltico modificado com óleo de linhaça.** Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, PB.

Xena, N.; Berry, P.E. (1998). **Copaifera L.** In: STEYERMARK, J.A. et al. **Flora of the Venezuelan Guyana.** Missouri: Botanical Garden Press. p.45-7.

Wen, G., Zhang, Y., Zhang, Y., Sun, K., & Fan, Y. (2002). **Rheological characterization of storage-stable SBS-modified asphalts.** *Polymer Testing*, pp. 295-302.

Whiteoak, D. (1990). **The shell bitumen handbook.**

**ANEXO I – TABELAS COM OS VALORES DOS
ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA**

ANEXO A: Resultados do ensaio do Ponto de Amolecimento antes do RTFO.

ENSAIO DO PONTO DE AMOLECIMENTO - ANTES RTFO			
LEITURAS	CAP 50/70	4% ÓLEO DE COPAÍBA	5% ÓLEO DE COPAÍBA
L1	48,00	44,00	42,00
L2	48,50	44,50	42,50
MÉDIA	48,25	44,25	42,25

ANEXO B: Resultados do ensaio do Ponto de Amolecimento após o RTFO.

ENSAIO DO PONTO DE AMOLECIMENTO - APÓS RTFO			
LEITURAS	CAP 50/70	4% ÓLEO DE COPAÍBA	5% ÓLEO DE COPAÍBA
L1	52,50	51,00	51,50
L2	53,00	51,00	51,50
MÉDIA	52,75	51,00	51,50

ANEXO C: Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional antes do RTFO.

ENSAIO DE VISCOSIDADE ROTACIONAL (cP) - ANTES DO RTFO			
LEITURAS	CAP 50/70	4% ÓLEO DE COPAÍBA	5% ÓLEO DE COPAÍBA
Amostra 1 (135°C)	455,00	282,50	292,50
Amostra 2 (135°C)	455,00	282,50	282,50
Amostra 1 (150°C)	221,50	145,00	146,00
Amostra 2 (177°C)	221,50	145,00	144,00
Amostra 1 (177°C)	79,00	56,00	56,50
Amostra 2 (177°C)	79,00	56,00	55,50

ANEXO D: Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional após o RTFO.

ENSAIO DE VISCOSIDADE ROTACIONAL (cP) - ANTES DO RTFO			
LEITURAS	CAP 50/70	4% ÓLEO DE COPAÍBA	5% ÓLEO DE COPAÍBA
Amostra 1 (135°C)	640,0	435,0	445,0
Amostra 2 (135°C)	640,0	442,5	437,5
Amostra 1 (150°C)	298,5	213,0	216,0
Amostra 2 (177°C)	298,5	215,0	213,0
Amostra 1 (177°C)	101,5	75,5	76,5
Amostra 2 (177°C)	101,5	76,5	76,0

ANEXO E: Resultado do ensaio de viscosidade antes do envelhecimento

ENSAIO DE PONTO DE VISCOSIDADE ROTACIONAL			
Temperaturas (°C)	Viscosidade (cP)		
	CAP 50/70	CAP 50/70 + 4% DE ÓLEO DE COPAÍBA	CAP 50/70 + 5% DE ÓLEO DE COPAÍBA
135	455,00	282,50	287,50
150	221,50	145,00	145,00
177	79,00	56,00	56,00

ANEXO F: Resultado do ensaio de viscosidade após o envelhecimento

ENSAIO DE PONTO DE VISCOSIDADE ROTACIONAL (BROOKFIELD)			
Temperaturas (°C)	Viscosidade (cP)		
	CAP 50/70	CAP 50/70 + 4% DE ÓLEO DE COPAÍBA	CAP 50/70 + 5% DE ÓLEO DE COPAÍBA
135	640,00	438,50	441,25
150	298,50	214,00	214,50

177	101,50	76,00	76,25
-----	--------	-------	-------

ANEXO G: Índice de envelhecimento dos ligantes

ÍNDICE DE ENVELHECIMENTO - TEMPERATURA 135°C			
TEORES	VISCOSIDADE ANTES DO RTFO (cP)	VISCOSIDAD E APÓS O RTFO (cP)	IE
CAP 50/70	455,00	640,00	1,41
CAP 50/70 + 4% DE ÓLEO DE COPAÍBA	282,50	438,50	1,55
CAP 50/70 + 5% DE ÓLEO DE COPAÍBA	287,50	441,25	1,53

ANEXO H: Temperaturas de usinagem e compactação antes do RTFO

TEMPERATURAS DE COMPACTAÇÃO E USINAGEM (ANTES RTFO)				
TEMPERATURAS (°C)	INTERVALOS	CAP 50/70	CAP 50/70 + 4% DE ÓLEO DE COPAÍBA	CAP 50/70 + 5% DE ÓLEO DE COPAÍBA
USINAGEM	MÍNIMA	155,50	145,00	144,50
	MÁXIMA	163,50	151,50	152,00
	MÉDIA	159,50	148,25	148,25
COMPACTAÇÃO	MÍNIMA	143,00	134,00	134,50
	MÁXIMA	149,00	139,00	139,00
	MÉDIA	146,00	137,00	137,00

ANEXO I: Temperaturas de usinagem e compactação após o RTFO

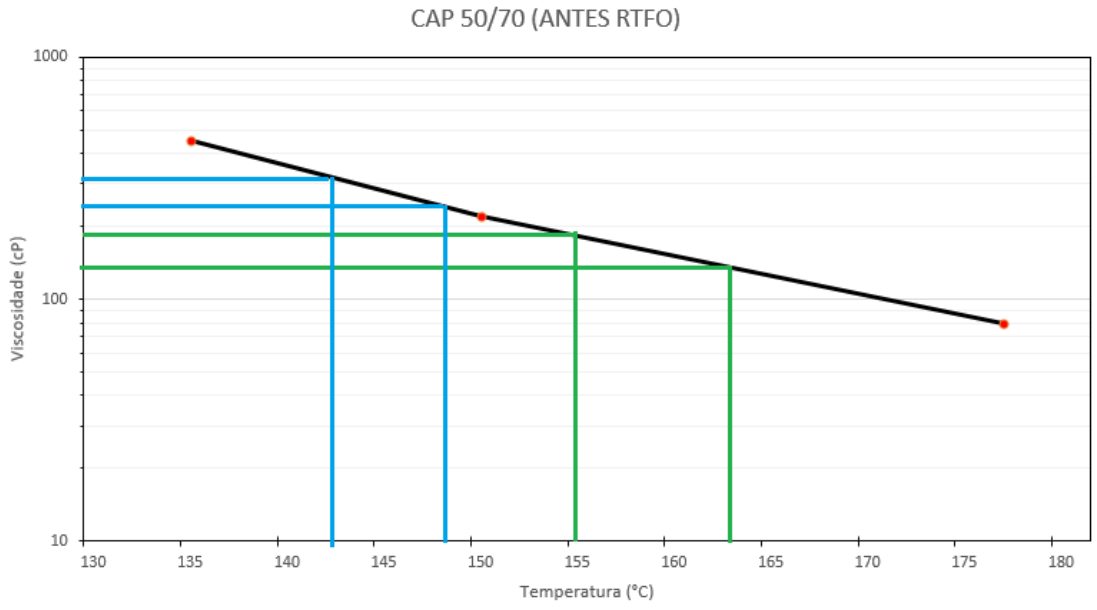
TEMPERATURAS DE COMPACTAÇÃO E USINAGEM (APÓS RTFO)				
TEMPERATURAS (°C)	INTERVALOS	CAP 50/70	CAP 50/70 + 4% DE ÓLEO DE COPAÍBA	CAP 50/70 + 5% DE ÓLEO DE COPAÍBA
USINAGEM	MÍNIMA	161,50	154,00	148,50
	MÁXIMA	170,50	162,00	162,00
	MÉDIA	166,00	158,00	155,25
COMPACTAÇÃO	MÍNIMA	149,00	142,00	142,00
	MÁXIMA	156,50	148,00	147,50
	MÉDIA	152,75	145,00	144,75

ANEXO J: Resultados das perdas de massa após o envelhecimento.

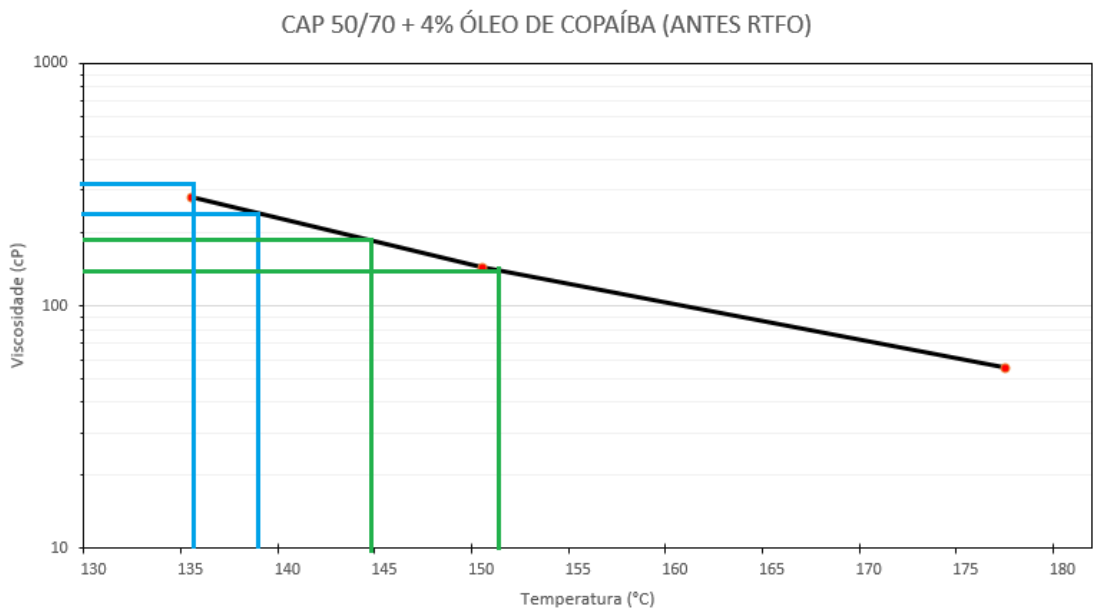
PERDA DE MASSA DEVIDO AO PROCESSO DE ENVELHECIMENTO			
TEORES	ANTES DO RTFO	DEPOIS DO RTFO	PERDA MÉDIA (%)
CAP 50/70	222,10	221,70	0,90
	223,60	223,20	
	218,50	218,30	
	221,10	220,80	
	221,40	221,20	
	220,50	220,20	
	221,10	221,00	
	225,10	225,00	
CAP 50/70 + 4% DE ÓLEO DE COPAÍBA	216,57	215,94	0,29
	211,10	210,45	
	205,45	204,88	
	218,46	217,87	
CAP 50/70 + 5% DE ÓLEO DE COPAÍBA	221,74	220,16	0,49
	224,20	223,31	
	210,31	209,55	

**ANEXO II – GRÁFICOS DAS CURVAS
RELATIVAS AS VISCOSIDADES DE CADA TEOR
DO LIGANTE**

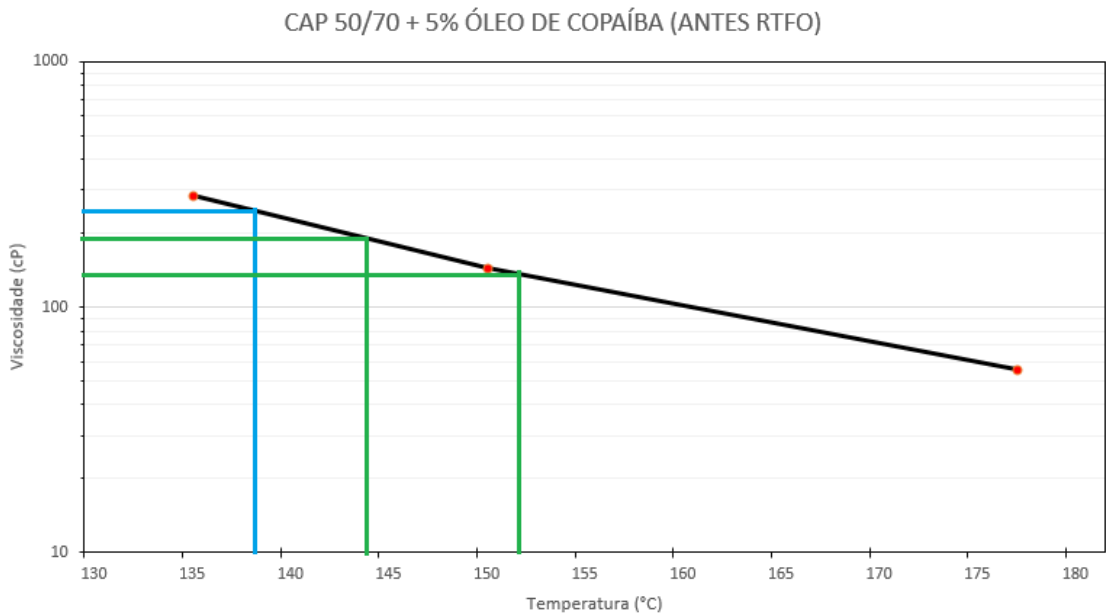
ANEXO K: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 antes do RTFO.



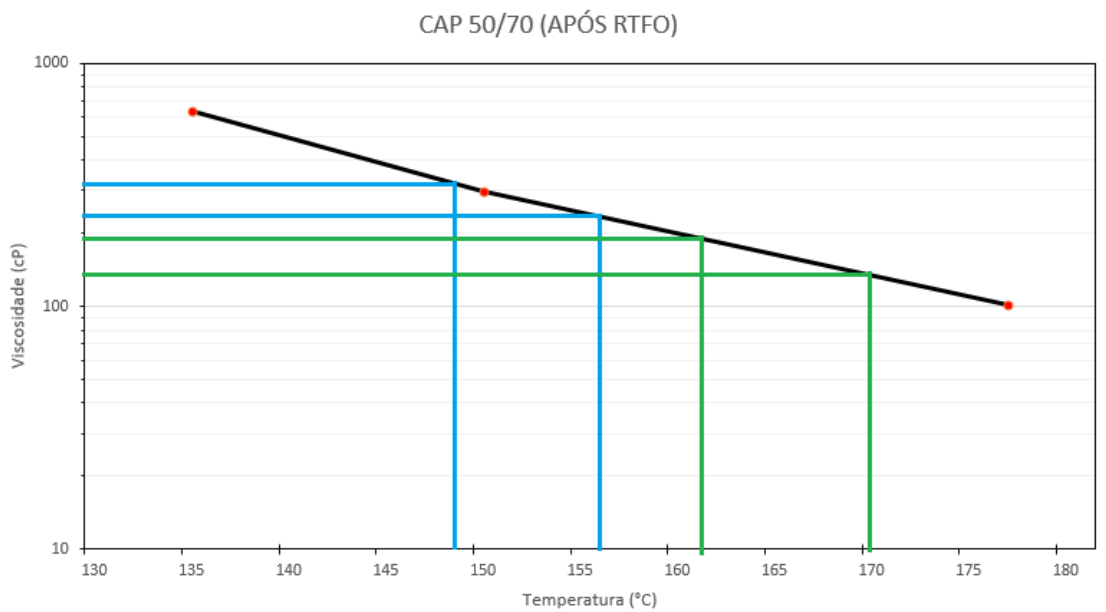
ANEXO L: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 adicionado a 4% de óleo de copaíba antes do RTFO.



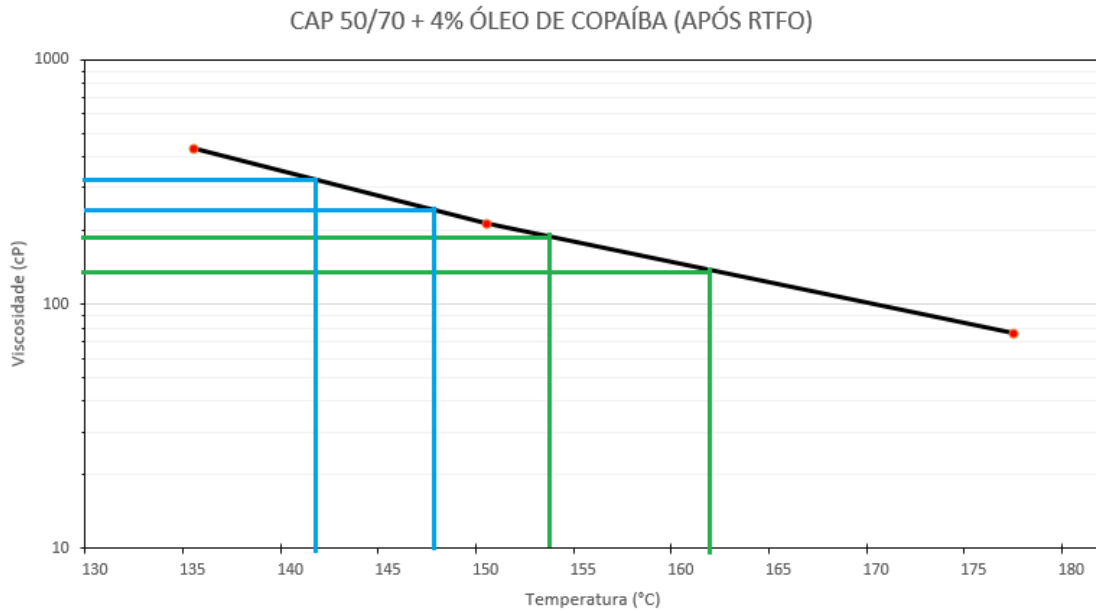
ANEXO M: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 adicionado a 5% de óleo de copaíba antes do RTFO.



ANEXO N: Gráfico dos intervalos de TCU para o CAP 50/70 depois do RTFO.



ANEXO O: Gráfico dos intervalos de TCU para o CAP 50/70 adicionado a 4% de óleo de copaíba depois do RTFO.



ANEXO P: Gráfico dos intervalos de TCU para o CAP 50/70 adicionado a 5% de óleo de copaíba depois do RTFO.

