



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

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DO CAP 50/70
MODIFICADO POR ADIÇÃO DE ÓLEO DE LINHAÇA**

LUCAS DE ASSIS WANDERLEY ARAÚJO

Orientadora: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça.

Campina Grande-PB, 19 de julho de 2018.

**CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DO CAP 50/70
MODIFICADO POR ADIÇÃO DE ÓLEO DE LINHAÇA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB

Julho/2018

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

LUCAS DE ASSIS WANDERLEY ARAÚJO

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.

Orientador: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

CAMPINA GRANDE – PB

Julho/2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

LUCAS DE ASSIS WANDERLEY ARAUJO

CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DO CAP 50/70 MODIFICADO POR ADIÇÃO DE ÓLEO DE LINHAÇA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 19/07/2018
perante a seguinte Comissão Julgadora:

Prof. Dr^a Ana Maria Gonçalves Duarte
Orientadora
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Msc. Daniel Beserra Costa
Co-orientador
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr^a. Carina Silvani
Membro Interno
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Msc. Joab Jorge Leite de Matos Júnior
Examinador Externo
Departamento de Engenharia Agrícola
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por toda barreira que enfrentei durante esse ciclo que se encerra e que Ele permita o início de outro, por todo aprendizado nos dias agradáveis e nos dias difíceis.

A minha mãe e irmãos, por todo o esforço dedicado para a minha formação, toda paciência, toda batalha travada quando muitas das vezes as lutas não eram suas, por todo amor e apoio, nunca desconfiando da minha capacidade.

Ao meu primo Gilvan que além de ser um apoio familiar durante esses cinco anos, também foi um apoio na residência que dividiu comigo. Ao meu tio Dezaix por sempre ajudar a me manter hoje onde estou. E a todos os familiares por todo o apoio.

A Prof^a. PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça, minha orientadora, que apesar de todos os trabalhos em que se dedica, me aceitou como orientando e realizou um trabalho de orientação impecável, sempre com disposição para que a pesquisa fosse realizada, tirando dúvidas e sempre direcionando o trabalho para chegar até aqui.

Aos meus amigos que ficaram na cidade de onde venho, porém, apesar da distância sempre me apoiaram durante a caminhada da vida que engloba essa pequena parte acadêmica.

A todos os meus amigos que adquiri na Engenharia Civil e na Universidade, sem os quais tudo isso seria impossível, agradecimento especial aos amigos: Adriana, Anne, Ayllanderson, Caison, João Vítor, Mateus Rodrigues, Matheus Leal, Moema, Osires, Sonaly e muitos outros que participaram direta e indiretamente desta construção, vocês foram essenciais.

Ao amigo Conrado César que além de participar desta construção como amigo, esteve ao meu lado durante toda a pesquisa, ajudando e acompanhando de perto a construção, passando seu conhecimento e sempre solícito quando preciso.

Ao Christian (Alemão), Daniel e Paulo, por toda a ajuda com os ensaios da pesquisa e aprendizados transferidos durante a construção da mesma. A todos os funcionários do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da UFCG.

DEDICATÓRIA

*Como Cristão, dedico um dos trabalhos
mais importantes da minha vida a Deus,
essencial em todos os dias, meu Guia.
Dedico a minha mãe, Fabiana, minha irmã
Renata e meu irmão lury por todo apoio e
paciência.*

*"I got broken wings, but I'm still flyin'
With a loss of faith, and I'm still tryin'"*

(Sik World)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cargas no pavimento flexível e sua distribuição	19
Figura 2: Cargas no pavimento rígido e sua distribuição.....	20
Figura 3: Camadas do pavimento flexível	21
Figura 4: Processo de destilação fracionada do petróleo para obtenção de seus derivados, dentre eles o asfalto	23
Figura 5: Cimento asfáltico de petróleo (CAP)	24
Figura 6: Estrutura de uma molécula de asfalto.....	27
Figura 7: Comportamento dos materiais a partir da aplicação de uma tensão ao longo do tempo	29
Figura 8: Envelhecimento de ligantes asfálticos desde sua etapa de concepção até aplicação e vida útil.....	31
Figura 9: Representação do óleo de linhaça em sua forma característica	32
Figura 10: Interferômetro de Michelson	36
Figura 11: Cronograma da pesquisa.....	38
Figura 12: Composição do óleo de linhaça	40
Figura 13: Misturador mecânico.....	41
Figura 14: Estufa para procedimento RTFO	42
Figura 15: Penetrômetro para ensaio de penetração	43
Figura 16: Aparatos utilizados para ensaio de ponto de amolecimento	44
Figura 17: Viscosímetro de Brookfield	46
Figura 18: Gráfico dos resultados das perdas de massa	48
Figura 19: Gráfico dos resultados do ensaio de penetração.....	49
Figura 20: Gráfico das penetrações retidas	51
Figura 21: Gráfico dos resultados do ensaio de ponto de amolecimento	52
Figura 22: Gráfico da variação de ponto de amolecimento.....	53
Figura 23: Gráfico dos resultados do ensaio de Viscosidade Brookfield antes do RTFO	54
Figura 24: Gráfico das curvas de viscosidade antes do RTFO	55
Figura 25: Gráfico dos resultados do ensaio de Viscosidade Brookfield após RTFO..	56
Figura 26: Gráfico das curvas de viscosidades	57
Figura 27: Gráfico das temperaturas de compactação dos ligantes.....	59
Figura 28: Gráfico das temperaturas de usinagem dos ligantes	60
Figura 29: Fluorescência por Transformada de Fourier-FTIR do CAP 50/70 puro antes do RTFO	61
Figura 30: Fluorescência por Transformada de Fourier-FTIR do CAP 50/70 puro após RTFO.....	61
Figura 31: Fluorescência por Transformada de Fourier-FTIR do CAP 50/70 com adição de 4% de óleo de linhaça antes do RTFO.....	62
Figura 32: Fluorescência por Transformada de Fourier-FTIR do CAP 50/70 com adição de 4% de óleo de linhaça após RTFO	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades do CAP.....	25
Tabela 2: Especificações brasileiras para os CAPs.....	26
Tabela 3: Composição química do óleo de linhaça em porcentagem de ácidos graxos.	33
Tabela 4: Regiões espectrais no infravermelho.....	34
Tabela 5: Normas dos ensaios utilizados na pesquisa.....	39
Tabela 6: Resultados das perdas de massa após o procedimento RTFO.....	48
Tabela 7: Resultados do ensaio de penetração.	49
Tabela 8: Resultados do ensaio de ponto de amolecimento.....	52
Tabela 9: Resultados do ensaio de Viscosidade Brookfield antes do RTFO.....	53
Tabela 10: Resultados do ensaio de Viscosidade Brookfield após RTFO.....	55
Tabela 11: Resultados do Índice de Envelhecimento dos ligantes.	57
Tabela 12: Temperaturas de usinagem e compactação dos ligantes.....	59

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional de Petróleo
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FTIR	Fluorescência por Transformada de Fourier
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
NBR	Normalização Brasileira
RTFO	Rolling Thin Film Oven
TCU	Temperatura de Compactação e Usinagem

RESUMO

Os processos que envolvem a produção de misturas asfálticas estão ligados a procedimentos que contam com altas temperaturas na sua concepção. A tentativa de redução dessas temperaturas proporciona ganhos em questões sustentáveis a curto, médio e longo prazo. Utilizar de aditivos não convencionais não se mostra novidade atualmente, porém, os materiais naturais de origem em oleaginosas (soja, girassol, linhaça, mamona e a palma) estão se mostrando de grande potencial como materiais modificadores para redução das temperaturas de compactação e usinagem (TCU) quando incorporados ao Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) que integra as misturas asfálticas. A Linhaça é um material derivado do linho, onde se utiliza da sua semente para produção do óleo, é um componente que já demonstrou boas qualidades em outras pesquisas, principalmente por apresentar propriedades antioxidantes. Este trabalho teve como objetivo o estudo dos efeitos da adição do óleo de linhaça sobre as propriedades químicas e físicas do Cimento Asfáltico de Petróleo convencional (CAP 50/70), considerando os percentuais de adição do óleo nos teores de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6%. A pesquisa também propôs a avaliação dos ligantes modificados quando estes foram submetidos ao envelhecimento a curto prazo (RTFO). Os resultados demonstraram que o óleo de linhaça tende a agir como um material que ajuda no retardo à oxidação do pavimento e auxilia nas reduções das temperaturas de compactação e usinagem, tornando-se assim benéficos em questão de trabalhabilidade e sustentabilidade. No entanto, outras propriedades físicas não corresponderam quanto aos requisitos preconizados em norma, mostrando assim que a adição do óleo de linhaça ao CAP se mostra viável até certo teor.

PALAVRAS-CHAVE: ligante asfáltico; linhaça; propriedades físicas e químicas.

ABSTRACT

The processes that involves the manufacture of asphalt mixtures are connected to procedures which uses high temperatures in its conception, the effort to decrease those temperatures affords gains in sustainable issues in a short, medium and long term. The use of non-conventional additives is not seen as innovation nowadays, however, the natural material of oilseed origin (soy, sunflower seeds, linseed, castor bean and palm) are showing elevate potential as modifiers material to reduce the compacting and mixing temperature (TCU) when merged with the petroleum asphalt cement (PAC) which compose the asphalt mixtures. The linseed is a linen derived material which the seed is used as linseed's oil raw material, has already shown good qualities in other researches, mainly for presenting antioxidant properties. This dissertation had as its objective evaluation of the linseed's oil add effect on the conventional petroleum asphalt cement's (PAC 50/70) chemical and physical properties, considering the oil addition percentile of 1%, 2%, 3%, 4%, 5% and 6%. The research also proposed the review of the modified binders when submitted to short term ageing (RTFO). The results showed that the oil tends to behave as a helpful material against the asphalt's oxidation, assists the compacting ang machining temperature diminish and therefore becomes a practical and sustainable subject. However, other physical properties have not attended the expectancies related to the requirements preconized, showing that the linseed's oil addition to the PAC only have limited functionality.

KEYWORDS: asphalt binder; linseed; chemical and physical properties.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	15
1.2 HIPÓTESE DA PESQUISA	16
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 Objetivo Geral	16
1.3.2 Objetivos Específicos.....	16
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 Pavimentação Rodoviária.....	18
2.1.1 Funções do Pavimento	18
2.1.2 Camadas do Pavimento Rígido.....	20
2.1.3 Camadas do Pavimento Flexível.....	21
2.2 Asfalto	22
2.2.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	24
2.2.2 Composição Química do CAP	26
2.3 Reologia do CAP	28
2.3.1 Envelhecimento.....	30
2.5 Óleo de Linhaça e suas características	31
2.6 Espectroscopia de Absorção no Infravermelho	33
2.7 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier.....	35
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1 Materiais	38
3.2 Metodologia	40
3.2.1 Produção da Mistura.....	40
3.2.2 Envelhecimento a Curto Prazo – RTFO.....	41
3.2.3 Caracterização Física	42
3.2.3.1 Ensaio de Penetração.....	42
3.2.3.2 Ensaio de Ponto de Amolecimento	44
3.2.3.3 Viscosidade Rotacional.....	45
3.2.4 Caracterização Química.....	46
3.2.4.1 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier – FTIR.....	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47

4.1 Caracterização Física	47
4.1.1 Perda de Massa	47
4.1.2 Ensaio de Penetração	48
4.1.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento	51
4.1.4 Ensaio de Viscosidade	53
4.1.4.1 Antes do RTFO	53
4.1.4.2 Após RTFO	55
4.1.4.3 Índice de Envelhecimento	57
4.1.5 Temperaturas de Compactação e Usinagem (TCU)	58
4.2 Caracterização química por FTIR	60
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	65
6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	66
REFERÊNCIAS	67

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos têm-se intensificado os esforços no sentido de criar critérios e princípios comuns que propiciem aos povos do mundo inspiração e dê um norte para a preservação do meio ambiente. Diversas pesquisas vêm sendo realizadas, motivadas por esta temática, com desígnio no desenvolvimento de novas tecnologias que minimizem os impactos ambientais originários da ação nefasta do homem.

Sendo assim, a problemática do aquecimento global tem suscitado o desenvolvimento de processos construtivos mais adequados em consonância com o desenvolvimento sustentável. Algumas técnicas inovadoras estão sendo desenvolvidas para reduzir as 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, sobremaneira na produção das misturas asfálticas nas usinas com menor energia e propiciando a liberação ao tráfego mais rapidamente. Os diferentes tipos de misturas asfálticas vêm sendo classificados de acordo com a temperatura empregada em sua aplicação/produção, sendo variável a temperatura consumida no processo.

Neste contexto, os aditivos naturais, notadamente, os oleaginosos tais como: a palma e o babaçu no norte, a soja, o girassol e o amendoim nas regiões do sul, sudeste e centro-oeste, e a mamona, que além de ser a melhor opção do semiárido nordestino, apresenta-se também como alternativa às demais regiões do país, se constituem, potencialmente, como agentes viáveis para reduzir a temperatura de compactação e usinagem (TCU) ao serem incorporados ao ligante asfáltico que comporão as misturas asfálticas. Estes processos são designados pelo termo geral Warm Mix Asphalt – WMA, traduzidos como Misturas Asfálticas Mornas.

Segundo Reda & Carneiro (2007, apud CAVALCANTE, 2016), o óleo de linhaça é um óleo secante pertencente à família das Lináceas – *Linum Usitatissimum* derivado da semente do linho.

Segundo Galvão (2009), no Brasil o cultivo do linho é datado desde 1550 trazido por colonos europeus que se instalaram na região sul do país que proporcionava condições para plantio. Na América do Sul a Argentina desponta como maior produtora de linhaça com 80 toneladas/ano, enquanto isso o Brasil produz cerca de 21 toneladas/ano.

As aplicações da linhaça são diversas, na indústria a planta representa um papel muito importante. As fibras retiradas do caule são utilizadas na produção de um tecido muito valorizado no mercado, o linho. As sementes podem ser utilizadas para produção de óleo e farelo (RENNEBAUM et. al. 2002, apud CAVALCANTE, 2016).

1.1 JUSTIFICATIVA

A utilização de polímeros em misturas asfálticas no Brasil já está bastante sedimentada, várias pesquisas foram desenvolvidas nas últimas décadas que possibilitaram a caracterização destes aditivos e seus efeitos em termos reológicos dos ligantes e mecânicos das misturas asfálticas. A adição de polímero ao asfalto altera substancialmente o seu comportamento reológico e melhora as características mecânicas das misturas asfálticas em ampla faixa de temperatura. Os polímeros podem ser obtidos através da fabricação corrente em indústrias petroquímicas ou através da reciclagem de produtos diversos.

Destacam-se como principais vantagens técnicas dos asfaltos modificados com polímeros as descritas a seguir:

- ✓ Diminuição da susceptibilidade térmica;
- ✓ Melhores características de adesividade e coesão;
- ✓ Maior resistência ao envelhecimento;
- ✓ Elevação do ponto de amolecimento do CAP;
- ✓ Diminuição do ponto de ruptura Fraass;
- ✓ Maior resistência à deformação permanente;
- ✓ Maior resistência a fadiga.

Por este motivo, estudou-se os efeitos que o óleo de linhaça promoveu as misturas asfálticas possibilitando assim agregar a técnica benefícios em termo de diminuição da TCU e verificação de melhorias nas características supracitadas, podendo auxiliar na compreensão de sua mecânica e desempenho e justificar a sua utilização.

1.2 HIPÓTESE DA PESQUISA

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

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho teve por desígnio principal, realizar a caracterização química através da técnica de Fluorescência por Transformada de Fourier – FTIR, física e mecânica do ligante asfáltico modificado por adição de óleo de linhaça.

1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Estudar as propriedades químicas através da técnica de FTIR do ligante convencional (CAP 50/70) e modificado pela adição de óleo de linhaça;
- ✓ Estudar as propriedades físicas do ligante convencional (CAP 50/70) e modificado pela adição de óleo de linhaça;
- ✓ Verificar os níveis de diminuição das temperaturas de compactação e usinagem do ligante convencional (CAP 50/70) em relação ao ligante modificado pela adição de óleo de linhaça.

1.4 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, Hipótese da pesquisa, Objetivos da Pesquisa e Organização do Projeto de Pesquisa Aplicada.

Fundamentação Teórica – São abordados assuntos relacionados a modificação do ligante convencional por óleo de linhaça e as avaliações através do método FTIR.

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 tratados os resultados encontrados ao longo da pesquisa e discutido de acordo com literaturas existentes e as respectivas normas de regulamentação.

Considerações Finais – São mostradas as considerações da pesquisa com relação aos objetivos que esta tinha em pauta.

Por fim, estão as Sugestões para Pesquisas Futuras, Referências, onde serão listadas as pesquisas citadas no trabalho, e os Anexos contendo as tabelas e gráficos detalhados dos resultados da pesquisa.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Pavimentação Rodoviária

O meio de transporte rodoviário constitui, essencialmente no Brasil, um sistema convencional muito importante no deslocamento de pessoas e bens. O Brasil possui uma extensão de malha rodoviária de aproximadamente 1.600.000 quilômetros, sendo 212.000 quilômetros de vias pavimentadas com predominância da pavimentação asfáltica (ARAÚJO, 2016).

A pavimentação rodoviária brasileira passa por uma classificação com duas separações: os pavimentos rígidos e os pavimentos flexíveis. Segundo Bernucci (2008), os revestimentos rígidos são aqueles dotados de uma placa de concreto de Cimento Portland, enquanto os flexíveis têm em sua composição a mistura dos agregados com ligantes asfálticos.

Segundo Rodrigues (2011), o pavimento rígido é constituído por uma única camada superior de concreto funcionando como camada de desgaste e base, com elevada resistência a flexão, sob esta primeira camada, tem-se a camada de sub-base constituída por material granular de regularização e, por fim, uma fundação constituída por material homogêneo.

Nos pavimentos flexíveis as funções de cada material irão estar ligadas as propriedades que os mesmos detêm. O granular compõe a estrutura que certifica a firmeza da composição, já o ligante asfáltico é responsável pela coesão (DE OLIVEIRA, 2014).

2.1.1 Funções do Pavimento

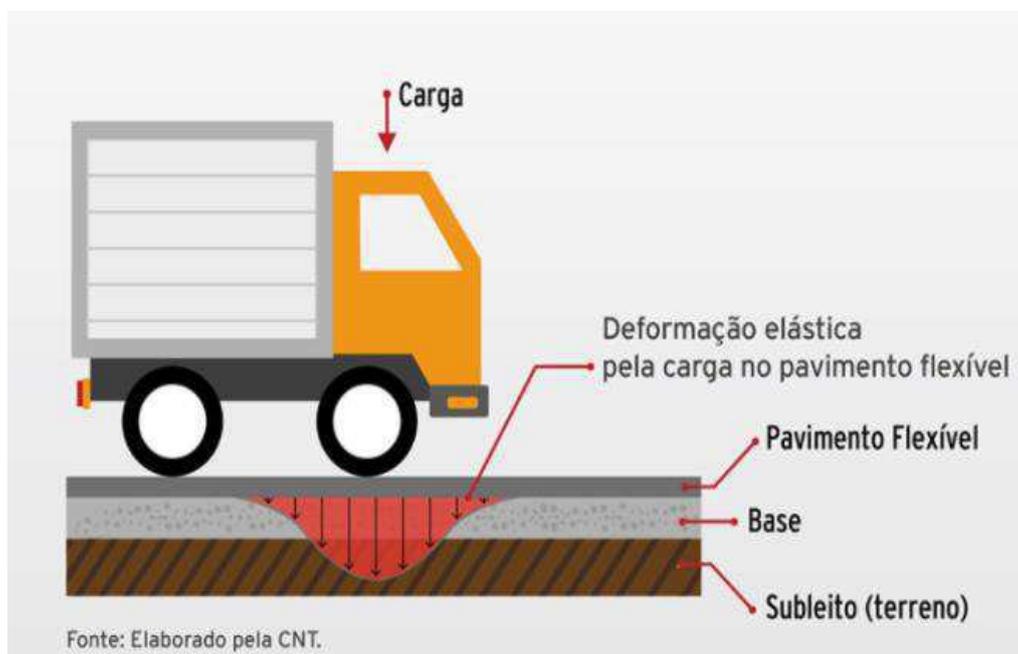
De acordo com Balbo (2007), em se tratando de pavimentos rodoviários, flexíveis ou rígidos, as suas atribuições são de apresentar uma superfície que proporcione o conforto necessário para que o usuário trafegue de forma segura e que estes ainda apresentem o menor desgaste ambiental possível.

De forma pertinente, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) na sua NBR 7207:1982, atesta as funções do pavimento após sua construção, as quais são:

- ✓ Distribuição ao subleito os esforços produzidos pelo tráfego desenvolvido;
- ✓ Melhorar a situação de rolamento em se tratando de conforto e segurança;
- ✓ Resistir aos esforços horizontais atuantes, sendo assim mais durável sua superfície.

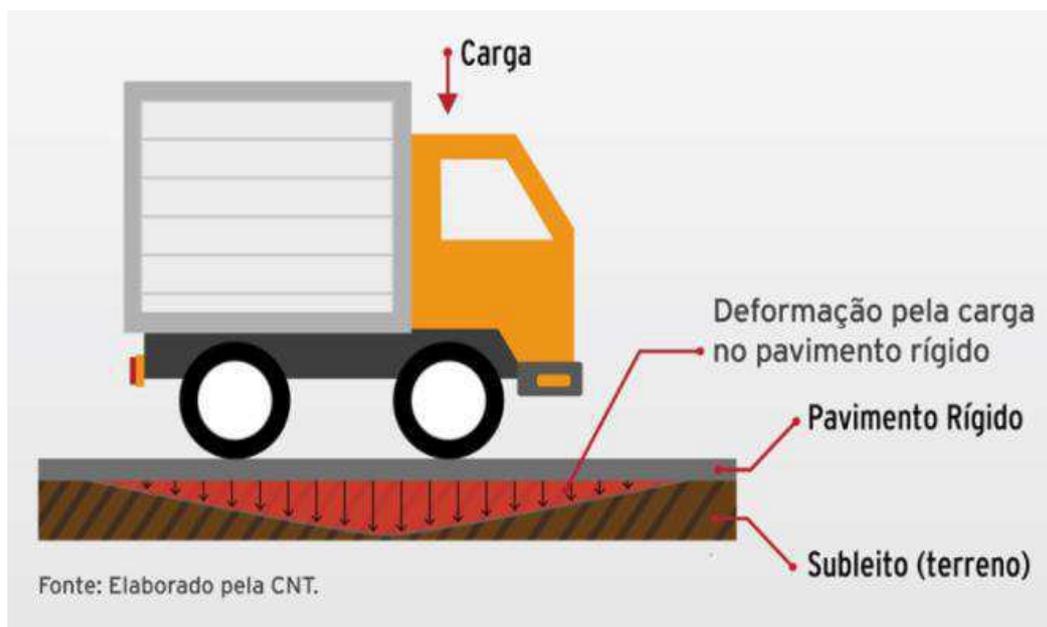
Então, segundo o que estabelece as normas, basicamente a utilização dos pavimentos são voltadas para o suporte das cargas que o tráfego demanda do mesmo, distribuindo assim as tensões recebidas ao longo das camadas constituintes, como se observa na Figura 1 e 2 as configurações das cargas e suas respectivas distribuições ao longo das camadas dos pavimentos flexíveis e rígidos, respectivamente.

Figura 1: Cargas no pavimento flexível e sua distribuição.



FONTE: Confederação Nacional do Transporte (2017).

Figura 2: Cargas no pavimento rígido e sua distribuição.



FONTE: Confederação Nacional do Transporte (2017).

2.1.2 Camadas do Pavimento Rígido

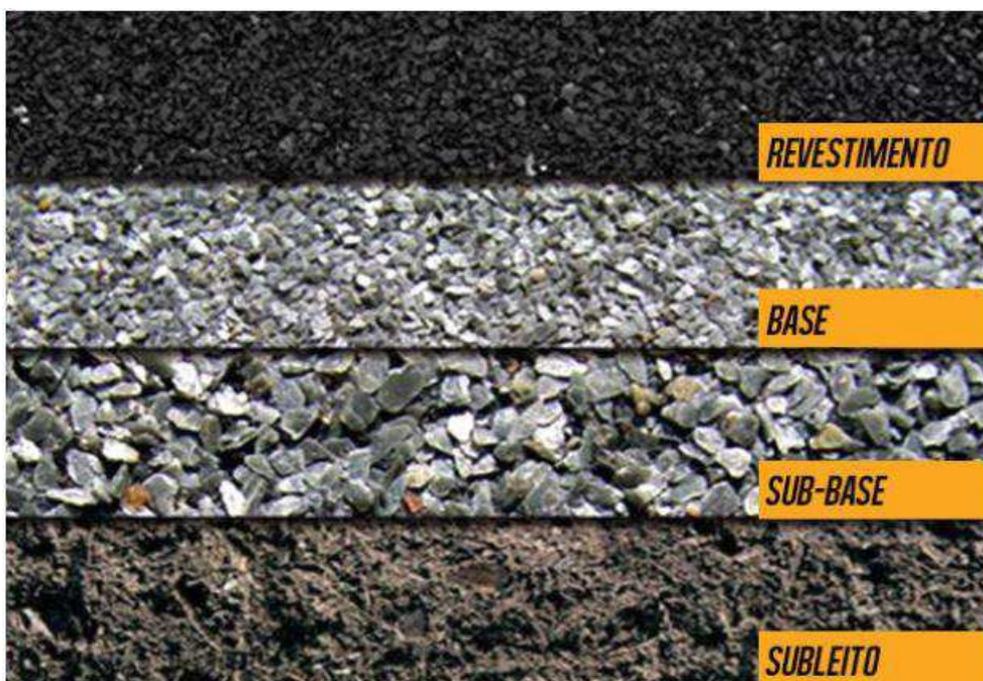
Segundo Mesquita (2001), a definição clássica de um pavimento rígido é baseada em um pavimento que tem como sua constituição uma placa de concreto obtida a base de Cimento Portland, que tem, ao mesmo tempo, uma função de camada estrutural e superfície de rodagem, como também uma considerável rigidez à flexão, rigidez esta que é um fator importante no dimensionamento da placa.

Rodrigues (2011) comenta que diferentemente do pavimento flexível, a fundação adotada para o pavimento rígido não desempenha um papel tão importante na capacidade de resistência do pavimento, tendo em vista que a placa de concreto irá absorver as cargas impostas e distribuirá em uma grande área, transmitindo assim uma pequena fração da pressão pneu-pavimento para as fundações.

2.1.3 Camadas do Pavimento Flexível

Os pavimentos flexíveis, segundo Balbo (2007), são intercalações de camadas sobrepostas com materiais dimensionados e devidamente compactados, objetivando assim atender a questões estruturais e operacionais de tráfego rodoviário, contemplando também durabilidade e um custo mínimo. Tem-se que cada uma destas camadas presentes no pavimento desempenharão uma função, são elas: o revestimento asfáltico propriamente dito, em seguida uma camada de base, continuado pela camada de sub-base e finalmente a camada de subleito, com visualização pertinente a Figura 2.

Figura 3: Camadas do pavimento flexível.



FONTE: Contesini (2017).

Araújo (2016) destaca cada uma dessas camadas e discorre sobre:

- **Subleito:** Última camada constituinte onde apoia todo o pavimento, considerando assim a profundidade de atuação das cargas impostas pelo tráfego para o seu dimensionamento;
- **Regularização do subleito:** Destinado a conformar a camada do subleito e manter assim o nivelamento transversal e longitudinal, sendo dispensável a depender da condição do subleito;

- **Reforço do subleito:** Serve para melhorar o subleito regularizado para receber a sub-base, dimensionando sua espessura a depender das circunstâncias do tráfego;
- **Sub-base:** Camada de complementação da base quando esta não é possível ser executada sobre o subleito regularizado ou o seu reforço. Também é utilizado como regularização da base;
- **Base:** Parte de resistência e distribuição dos esforços ao subleito e sobre a qual se posicionará o revestimento;
- **Revestimento:** É a camada que receberá diretamente as ações do tráfego dos veículos. Devendo assim ser dimensionada de forma que melhore as condições de conforto e segurança, atendendo também padrões de durabilidade.

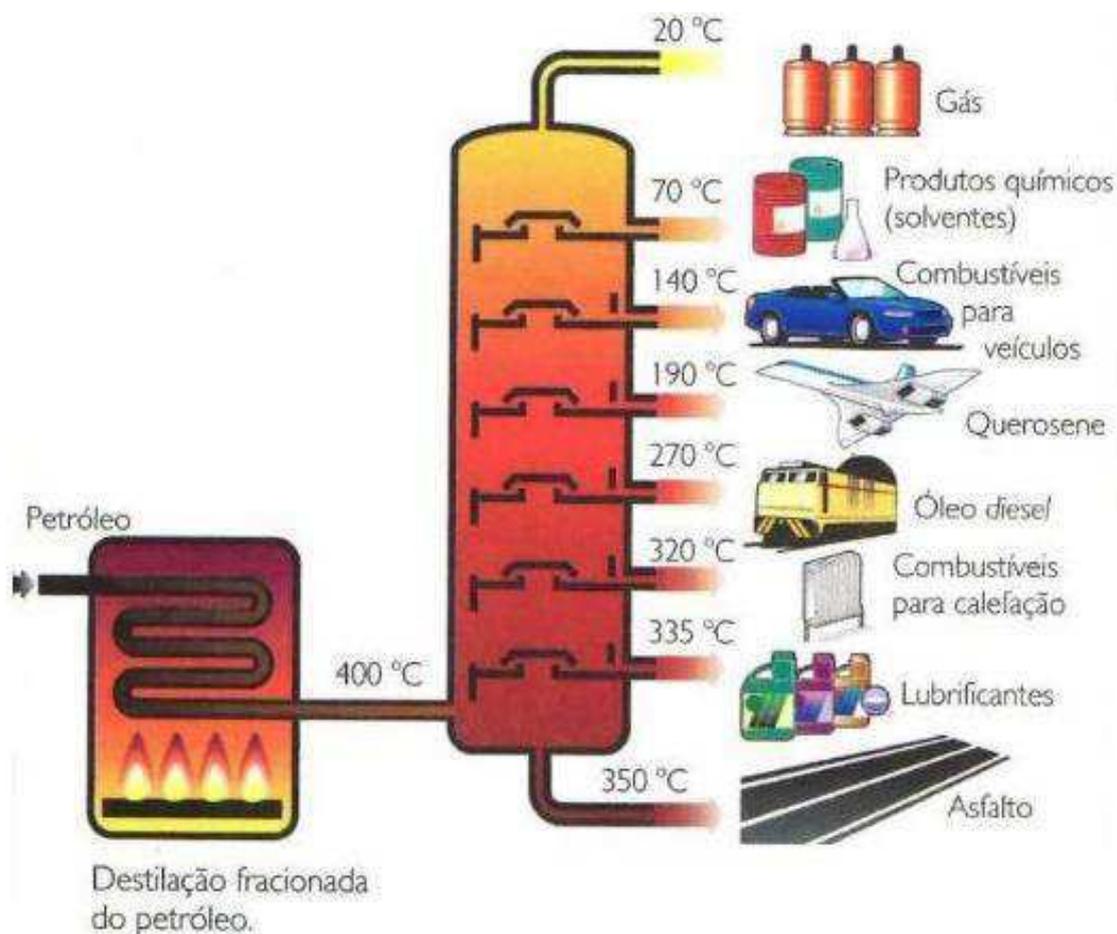
2.2 Asfalto

O registro mais antigo do uso do asfalto pelo homem é de 180.000 anos atrás em El KowmBasinna Síria, no qual asfalto natural era utilizado para grudar/unir utensílios a pedras e ferramentas para gerar faísca e, conseqüentemente, para controlar o fogo (LESUEUR, 2009).

Segundo Araújo (2016), o asfalto é um material de consistência variante entre sólido e semi-sólido, cor escura e no qual o principal elemento da sua composição é o betume, ocorrendo na natureza ou obtido por processos de refinação do petróleo. Segundo a Agência Nacional do Petróleo (ANP), o betume é um material composto por hidrocarbonetos pesados, alcançado em estado natural ou por processos físicos ou químicos, com alto poder aglutinante e impermeabilizante.

Ainda segundo a ANP, as referências aos asfaltos incluem diversos derivados do petróleo, como cimentos asfálticos, asfaltos diluídos, emulsões asfálticas e asfaltos modificados. Segundo Negrão (2006), a obtenção dessa matéria, de forma não natural, é feita a partir da destilação fracionada do petróleo, assim as frações mais leves são removidas (gasolina, querosene e diesel) e os produtos asfálticos são obtidos no fundo da torre, obtenção esta que pode ser esquematizada na Figura 4.

Figura 4: Processo de destilação fracionada do petróleo para obtenção de seus derivados, dentre eles o asfalto.



FONTE: <https://www.coladaweb.com/quimica/combustiveis/o-petroleo>, acessado: 02/05/2018

Ainda, segundo Bernucci et. al. (2008), o material denominado asfalto pode receber diversas denominações, são elas:

- Betume: 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;
- Alcatrão: designação genérica de um tipo de produto que contém hidrocarbonetos em sua composição, obtido através da queima ou destilação destrutiva do carvão.

Portanto, o asfalto e o alcatrão são materiais betuminosos porque contêm betume, mas não podem ser confundidos porque suas propriedades são bastante diferentes (BERNUCCI et. al., 2008).

2.2.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

Segundo Leite (2003), o CAP convencional é um material com características de aderência, plasticidade intensificada com o aumento de temperatura, impermeável, viscoelástico e de pouca reatividade, sendo observado em representatividade na Figura 3.

Figura 5: Cimento asfáltico de petróleo (CAP).



FONTE: Da Silva (2010).

Ainda, segundo Leite (2003), na Tabela 1 são apresentadas as propriedades do CAP.

Tabela 1: Propriedades do CAP.

CARACTERÍSTICAS DO CAP	
Termoplasticidade	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Manipulação a quente; ✓ Viscoelástico em sua forma resfriada;
Impermeabilização	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Evita a percolação de água nas camadas subjacentes do pavimento;
Viscoelasticidade	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Comportamento elástico quando aplicado cargas sob o pavimento;
Baixa reatividade	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Quimicamente inerte, interagindo apenas com o ar que propicia a oxidação da camada.

FONTE: Leite (2003).

As avaliações das propriedades dos cimentos asfálticos de petróleo podem ser realizadas a partir de diversos ensaios pré-estabelecidos, sejam estes com objetivo de caracterizar o CAP na sua forma química e/ou física. Como mostra a Tabela 2 diversos valores das particularidades dos Cimentos Asfálticos de Petróleo de acordo com as especificações brasileiras vigentes dispostas de acordo com a Agência Nacional do Petróleo (ANP) em 2005.

Tabela 2: Especificações brasileiras para os CAPs.

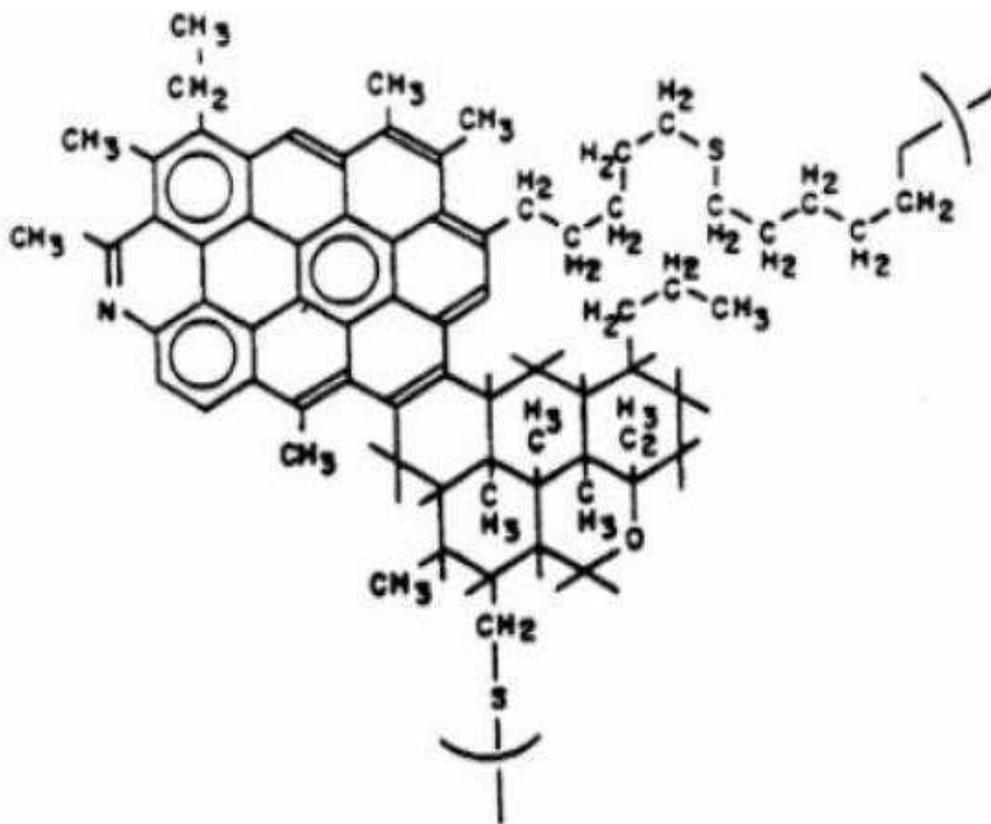
Características	Un.	Tipos de Cimentos Asfálticos de Petróleo				Método ABNT
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1mm	30 a 45	50 a 70	85 a 100	150 a 200	NBR 6576
Ponto de Amolecimento	°C	52	46	43	37	NBR 6560
Viscosidade Saybolt-Furol	s					NBR 14950
a 135°C		192	141	110	80	
a 150°C		90	50	43	36	
a 177°C		40 a 150	30 a 150	15 a 60	15 a 60	
Viscosidade Brookfield	cP					NBR 15184
a 135°C, SP 21, 20rpm min		374	274	214	155	
a 150°C, SP 21, 20rpm min		203	112	97	81	
a 177°C, SP 21, 20rpm min		76 a 285	57 a 285	28 a 114	28 a 114	
Índice de Susceptibilidade 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
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855
Ductibilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100	NBR 6293

FONTE: ANP (2005).

2.2.2 Composição Química do CAP

Segundo Leite (2003), o cimento asfáltico de petróleo contém em sua composição um número de átomos de carbono variando entre 24 a 150, mantendo assim teores expressivos de heteroátomos (nitrogênio, oxigênio, enxofre e outros). Seus compostos são polares e não polares. A Figura 2 apresenta a elaboração estrutural de uma molécula de asfalto.

Figura 6: Estrutura de uma molécula de asfalto.



FONTE: Leite (2003).

O DNIT (1998) preconiza que a definição química do cimento asfáltico de petróleo é determinada como um sistema coloidal formado por micelas de asfaltenos dispersas em um meio oleoso, ainda com a presença de resinas e óleos aromáticos e saturados (maltenos).

Os asfaltenos são materiais complexos de elevado peso molecular e constituem de 5 a 25% do teor do CAP. O teor de asfaltenos influencia diretamente nas propriedades reológicas do CAP, assim sendo, quanto maior o percentual de asfaltenos maior a viscosidade, e conseqüentemente, valores de penetração mais baixos e ponto de amolecimento maior. Para a fase de maltenos, os saturados tomam de 5% a 20% da constituição do CAP e possuem influência negativa na susceptibilidade térmica; as resinas são compostas de hidrogênio, enxofre e nitrogênio e contribuem nas propriedades de ductibilidade e dispersão dos asfaltenos. Os aromáticos apresentam o maior percentual na composição do CAP, cerca de 40% a 65%, sendo o meio de dispersão e peptização dos asfaltenos (ROSA JÚNIOR, 2015).

Segundo Pinto (2014), a composição química do cimento asfáltico de petróleo não influencia apenas nas propriedades físicas e mecânicas das misturas asfálticas, mas também nos processos de incorporação de agentes modificadores.

2.3 Reologia do CAP

Rosa Júnior (2015) destaca que a Sociedade Americana de Reologia teve a sua fundação no ano de 1929 e teve como objetivo a priori proporcionar a discussão sobre as propriedades e comportamentos de materiais como lubrificantes, tintas, plásticos, borrachas e asfaltos.

Para importância dos estudos reológicos dos ligantes asfálticos, Sobreiro (2014) relata que a importância do estudo se baseia em entender a relação entre as deformações dadas as condições de carregamento, ou seja, as aplicações de tensões e as frequências de aplicação dessas cargas, e ainda, combinar estes estudos com a variação de temperatura e processo de envelhecimento a qual é submetido o ligante.

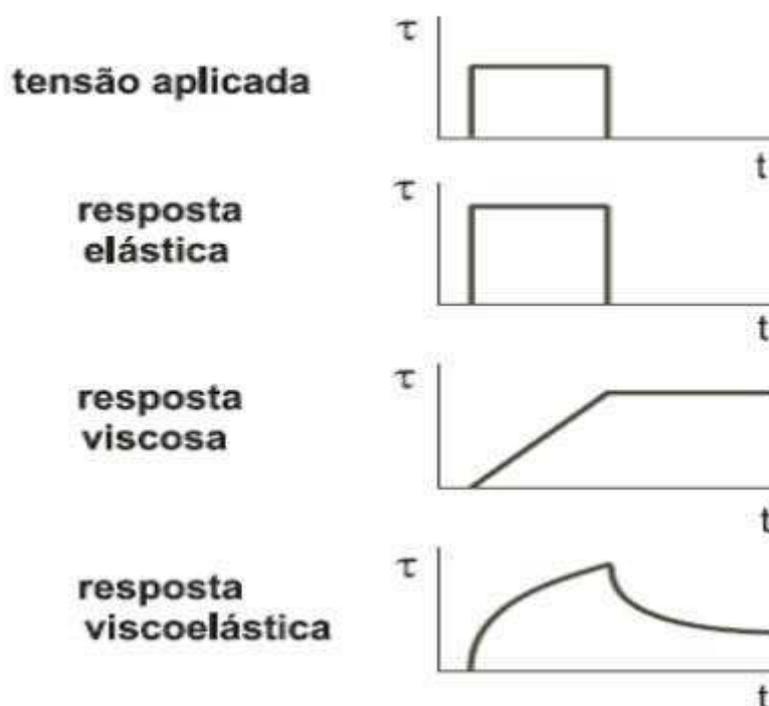
Segundo Mothé (2009), o entendimento da reologia dos CAPs é importante para relacionar as propriedades com as possíveis falhas que surgem na superfície do pavimento, e, através dessas características reológicas é possível diferenciar os asfaltos provindos de diferentes tipos de processos, permitindo que nestes processos a seleção de temperatura para operações de usinagem estejam em um ponto ótimo.

Entretanto, o comportamento reológico do CAP torna-se bastante complexo, tendo em vista que este material será submetido a uma ampla variação de temperatura, carregamento dinâmico do tráfego e exposição a diferentes frequências de carregamento. Ou seja, por ser um material visco-elástico, a temperaturas baixas associadas a altas taxas de carregamento reage como sólido elástico, do contrário, quando a temperatura aumenta com uma taxa de carregamento reduzida, as propriedades relacionadas a viscosidade (ROSA JÚNIOR, 2015).

Ainda acerca do comportamento do ligante asfáltico, Faxina (2006) comenta que esses ligantes se comportam como um material elástico e viscoso

de acordo com a condição que está submetida (temperatura, nível de tensão e frequência de carregamento), sendo, portanto, denominados materiais viscoelásticos em temperatura ambiente. Com a diminuição da temperatura ou aumento de frequência de tensões o ligante passa a ter um comportamento de sólido elástico e em condição exatamente oposta, de altas temperatura e baixa frequência, o comportamento se mostra como um líquido viscoso.

Figura 7: Comportamento dos materiais a partir da aplicação de uma tensão ao longo do tempo.



FONTE: Faxina (2006).

De acordo com Faxina (2006), a Figura 7 ilustra um ensaio de fluência de materiais com comportamentos característicos a partir da aplicação de uma tensão ao longo do tempo. Para o material elástico, este se deformará ao longo da aplicação da tensão, mas ao ser retirada a tensão, o material voltará à sua condição inicial. Diferente do comportamento observado nos materiais viscosos e viscoelástico, onde estes irão acumular uma deformação residual quando retirada a tensão que estava sendo aplicada, deformação esta que dependerá do tempo e intensidade da tensão que exerceu o material.

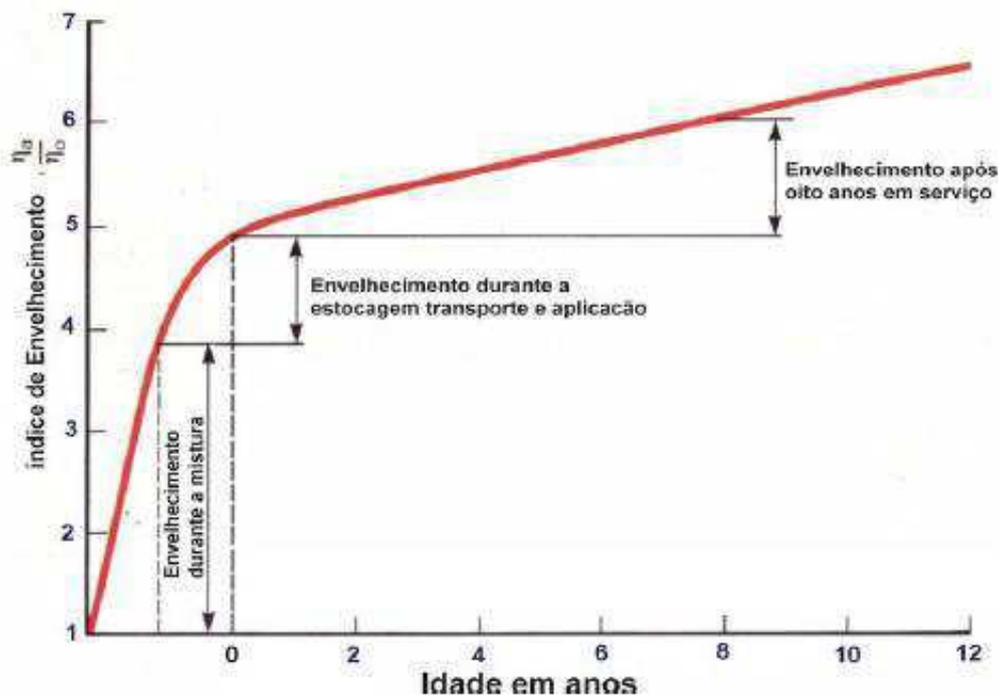
2.3.1 Envelhecimento

Segundo Zegarra (2007), o envelhecimento é um fenômeno que ocorre com o ligante asfáltico que estará influenciando diretamente as propriedades químicas, físicas e reológicas do mesmo. Este processo de envelhecimento ocorre durante todo o ciclo de vida do ligante, passando pelas etapas de estocagem, usinagem, manuseio, aplicação e serviço do ligante, sendo assim, este vai se tornando mais quebradiço e frágil, favorecendo assim o aumento da viscosidade.

O endurecimento por oxidação é considerado como a principal causa do envelhecimento dos asfaltos, embora o envelhecimento devido à evaporação dos componentes mais voláteis dos betumes possa ser também bastante significativo (CAVALCANTE, 2016). E ainda, de acordo com Sobreiro (2014), baseado nestes dois mecanismos de envelhecimento, o material avaliado pode demonstrar aumento ou perda de massa, onde materiais com menores teores de componentes leves apresentam ganho de massa, enquanto que materiais com altos índices de compostos voláteis apresentam perda de massa. Estes fatos ocorrem dado que os componentes leves acabam por perder massa no processo de evaporação, enquanto que a reação de oxidação entre interação do oxigênio e material causa o ganho de massa.

Segundo Whiteoak (1990), o CAP no seu ciclo de envelhecimento estará dividido em três etapas, onde têm-se: a primeira representa cerca de 60% do envelhecimento total abrangendo processos de usinagem do material; a segunda etapa representando 20% do envelhecimento pautado nos processos de estocagem e aplicação do ligante; por fim, a terceira etapa com os 20% finais do envelhecimento representando o processo de vida útil do revestimento aplicado. Apresentando assim a Figura 9 que ilustra o envelhecimento do CAP de acordo com as três etapas citadas.

Figura 8: Envelhecimento de ligantes asfálticos desde sua etapa de concepção até aplicação e vida útil.



FONTE: Whiteoak (1990).

2.5 Óleo de Linhaça e suas características

Originalmente asiático, a semente de linhaça é extraída a partir do linho, uma das plantas mais antigas da história. Apesar do consumo da linhaça ser relativamente novo na atualidade, constata-se como sendo uma das sementes oleaginosas mais tradicionais de todos os tempos, cultivadas na Babilônia, Mesopotâmia e Egito há cerca de 7.000 anos (MARTINI, 2010).

Martini (2010), também relata que o linho é uma planta que possui sua colheita anual (com plantio ocorrendo nos meses de outono e colheita nos meses de primavera e verão) e pertence à família das lináceas, com altura variante entre 30 e 130 centímetros, com ainda seu talo ereto e folhas estreitas, com flores de cores variadas, porém, com predominância do azul.

Segundo Turatti (2000), a produção mundial de linhaça gira em torno das 2.500.000 toneladas/ano, apresentando o Canadá como seu produtor majoritário. A cultura de produção de linho foi trazida para o Brasil em 1550 pelos colonos russos, alemães, poloneses, italianos e ucranianos que se

instalaram no sul do país (GALVÃO, 2009 apud CAVALCANTE, 2016). Neste cenário, o Brasil apresenta uma produção com cerca de 21 toneladas/ano, não figurando como um grande produtor mundial. Nogueira et. al. (2010), comenta que no Brasil a linhaça ainda tem seu cultivo desenvolvido no Rio Grande do Sul, apresentando-se assim como maior produtor do país.

Costa et al. (2015), comentaram que o óleo de linhaça apresenta cor alaranjada (Figura 3) e com altos teores de ácidos graxos e proteína. Ainda, tem-se que o óleo apresenta bastante utilização em áreas diversas (construção civil, medicina, materiais de revestimento) e uma acessível aquisição comercialmente, sendo um composto oleico de matriz renovável e biodegradável.

Figura 9: Representação do óleo de linhaça em sua forma característica.



FONTE: Costa et al. (2015).

O óleo de linhaça apresenta em função dos seus ácidos graxos uma composição como Guner (2006) relata na Tabela 3:

Tabela 3: Composição química do óleo de linhaça em porcentagem de ácidos graxos.

Ácido graxo	(NC:ND) *	Linhaça (%)
Palmítico	C16:0	5
Esteárico	C18:0	4
Oleico	C18:1	22
Linoleico	C18:2	17
Linolênico	C18:3	52

*NC = número de carbonos ND = número de ligações duplas

FONTE: Guner (2006).

Como observado na Tabela 3, e ainda, segundo Martini (2010), o óleo de linhaça é um dos óleos mais promissores dada a sua composição recheada de ácidos graxos insaturados, compostos por sua maioria por ácidos insaturados com 18 carbonos, como observados nos compostos oleico, linoleico e linolênico.

De acordo com Costa et al. (2015), a utilização do óleo de linhaça possui propriedades tensoativas, antioxidantes e é um óleo inerte com fácil mistura, apresentando assim próspero na redução da elevada viscosidade dos ligantes asfálticos puros e os ligantes modificados por polímeros, e também, reduzindo gastos na usina, aumentando a estabilidade à estocagem e a adesividade nas misturas com os agregados.

2.6 Espectroscopia de Absorção no Infravermelho

Segundo Sala (1996), a história da radiação infravermelha começou com Herschel que a descobriu em 1800, já por volta de 1900, Coblentz reuniu espectros de absorção no infravermelho de vários compostos orgânicos em estado sólido, líquido e vapor.

No processo de absorção de energia, duas grandezas são importantes: a frequência de radiação infravermelha e o momento dipolo molecular. Descrevem a relação entre a radiação e molécula em termo de um estado de ressonância, onde a frequência de oscilação da onda eletromagnética

corresponde à frequência natural de um dos modos normais de vibração da molécula (PEREIRA, 2015). Então, a interação causará uma vibração que altera o momento dipolo da molécula que gera uma absorção de radiação, sendo assim, este efeito medido por um espectrômetro infravermelho. A Tabela 3 mostra os níveis de radiação eletromagnética na região do infravermelho.

Tabela 4: Regiões espectrais no infravermelho.

Faixas	λ (μm)	Número de Onda (cm^{-1})	Frequência (THz)	Energia (eV)
Próxima (NIR)	0,78	12.800	380	1,6
	2,5	4000	120	0,5
Média (MIR)	2,5	4000	120	0,5
	50	200	6,0	0,02
Distante (FIR)	50	200	6,0	0,02
	1000	10	0,3	0,002

FONTE: Pereira (2015).

Segundo Pereira (2015), a técnica de espectroscopia no infravermelho é aplicada para análise quantitativa e identificação de compostos orgânicos, comparando com espectros de amostras conhecidas. E ainda, é uma técnica que não se mostra destrutiva, tendo em vista que as energias associadas a este método são capazes apenas de fazer com que as moléculas interajam por movimentos vibracionais, realizando assim o estudo sem que haja quebra de alguma ligação química.

2.7 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

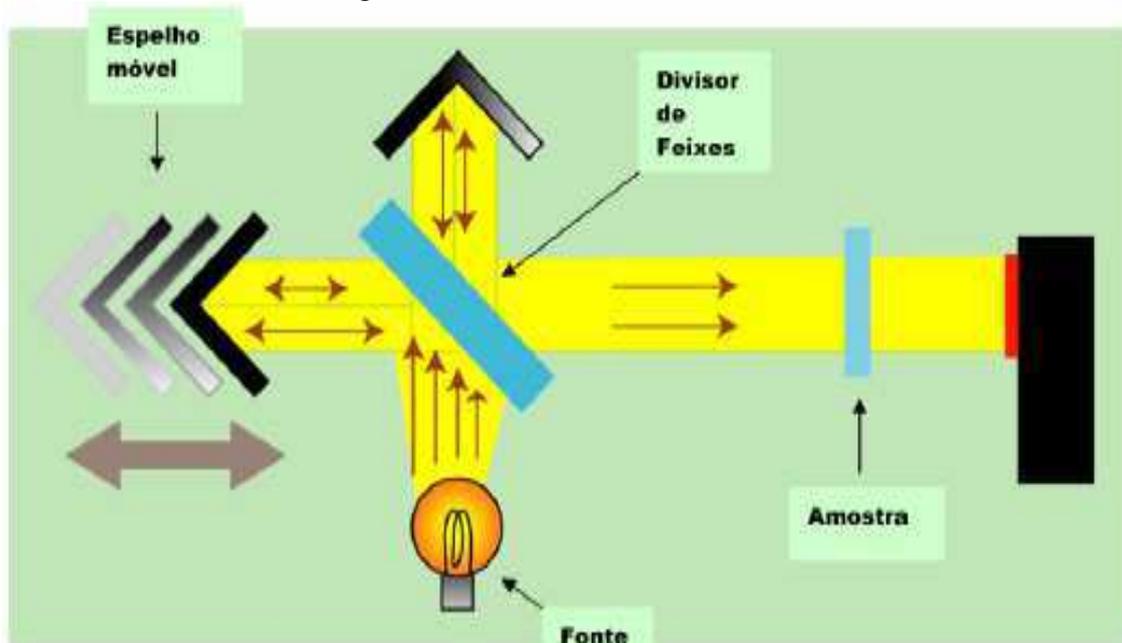
Segundo Medeiros (2009), até meados de 1970 os instrumentos utilizados para realizar espectroscopias de absorção no infravermelho eram do tipo dispersivo. No entanto, atualmente, o lugar foi tomado pelos espectrômetros com transformada de Fourier (FTIR) graças à sua velocidade e resultados confiáveis.

A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica de análise química, molecular e vibracional que permite registrar sob a forma de um espectro os modos de vibração dos grupos funcionais das moléculas quando absorvem radiação infravermelha (STUART, 2007). E ainda, o FTIR é uma poderosa ferramenta para determinação de grupos funcionais e nos estudos de conformação e estrutura de macromoléculas, também permitindo a obtenção de espectro vibracional completo da molécula, ou seja, é uma técnica que estuda a interação da radiação eletromagnética na região do infravermelho com a matéria, estudando a transição das vibrações normais moleculares (FERNANDES, 2007 apud CAVALCANTE, 2016).

De acordo com Pereira (2015), um espectrômetro comum é composto por: uma fonte de radiação infravermelha; um aparelho ótico que analisa o feixe de radiação e um detector. E ainda, Pereira (2015) complementa relatando que em um espectrômetro infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), a radiação contendo os comprimentos de onda que interessam ao ensaio é emitida de uma fonte cerâmica de alta intensidade ou por lâmpada halógena, o feixe é colimado e passa por um interferômetro do tipo Michelson (composto por um divisor de feixes e dois espelhos, sendo um fixo e o outro móvel). A luz vinda da fonte, incidindo no divisor será separada em dois feixes, onde estes se dirigirão para cada espelho. Ambos os feixes serão refletidos e voltarão ao divisor, em seguida são focalizados para o centro da câmara em direção da amostra, posteriormente serão dirigidos ao detector. O padrão de interferência resultante é estabelecido e suas informações formam a composição de espectro da intensidade da luz em função dos diferentes caminhos óticos causados pela a divisão dos feixes e incidência nos espelhos.

A Figura 4 mostra o interferômetro de Michelson, princípio utilizado no espectrômetro infravermelho por transformada de Fourier.

Figura 10: Interferômetro de Michelson.



FONTE: Medeiros (2009).

A espectroscopia infravermelha moderna é uma versátil ferramenta para ser aplicada na determinação qualitativa e quantitativa de espécies moleculares de todos os tipos (MEDEIROS, 2009).

E ainda, Medeiros (2009) comenta que os espectros gerados pelo método de espectroscopia de infravermelho têm apresentação em três ramos distintos, são eles: transmissão/absorção, reflexão e emissão. No primeiro (transmissão/absorção), a radiação penetra a amostra sendo uma parte absorvida e a outra transmitida. No modo de reflexão, o feixe que incide penetra a amostra interagindo com a matriz e retorna à superfície da amostra após absorção de uma parte da radiação. Por fim, o modo mais raro, o de emissão, constitui-se no aquecimento da amostra para que as moléculas que a compõe possam emitir comprimentos de onda interessantes para o ensaio.

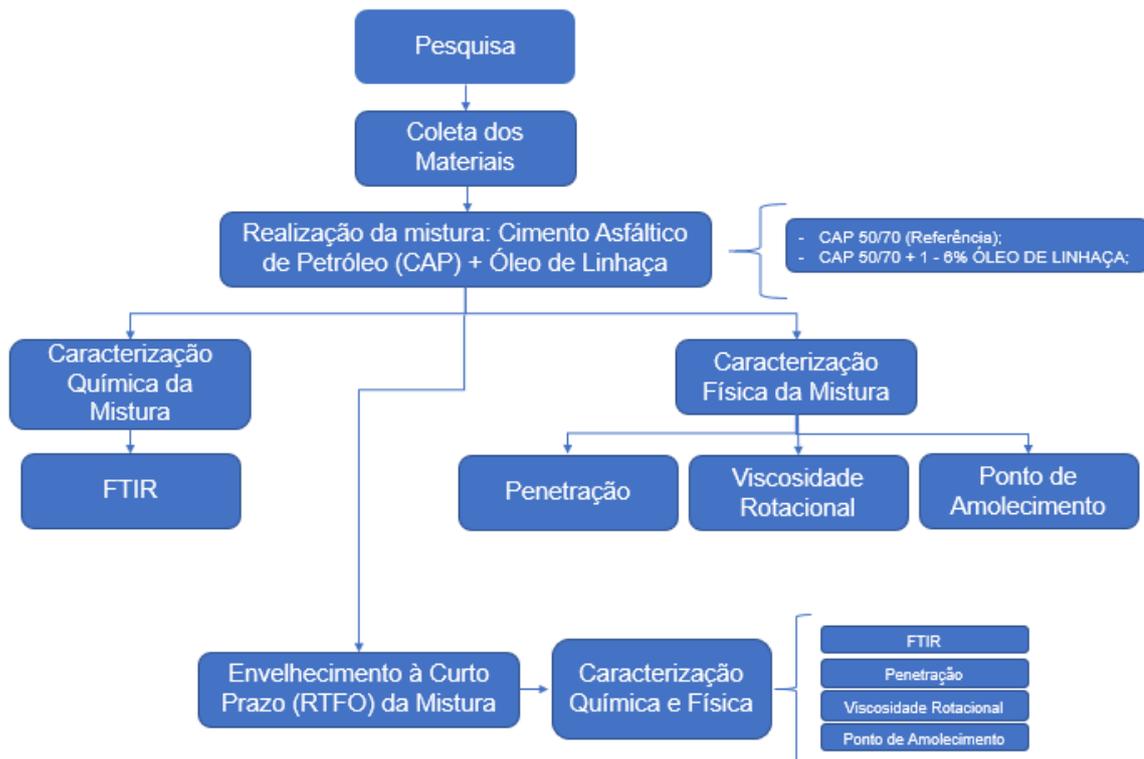
Nas particularidades dos ligantes asfálticos, Fernandes (2007), comenta que a técnica de infravermelho foi utilizada para mostrar que os compostos carboxílicos são produtos provenientes do fenômeno da oxidação de ligantes asfálticos, embora existam dúvidas acerca dos grupos funcionais que predominam nos compostos. Os ligantes asfálticos apresentaram mudanças

nas suas características físicas e químicas quando submetidos a processos termo-oxidativos causados pela perda de voláteis ou espécies de baixo peso molecular, além da formação de ligações de hidrogênio decorrentes do processo degradativo (CAVALCANTE, 2016).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo se desenvolve os materiais e métodos empregados na pesquisa, bem como os procedimentos utilizado para a coleta e caracterização dos materiais a partir dos ensaios. A Figura 11 ilustra o fluxograma das etapas da pesquisa.

Figura 11: Fluxograma da pesquisa.



FONTE: Própria (2018).

3.1 Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa foram escolhidos a partir de determinações estabelecidas pelas normas técnicas vigentes para cada material, seja esta normatização associada ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) ou a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Os materiais utilizados na pesquisa foram: Ligante convencional, CAP 50/70 e o Óleo de Linhaça.

O ligante CAP 50/70 foi obtido a partir da distribuidora Stratura Asfaltos S/A (antiga Ipiranga Asfaltos S/A), e na Tabela 5 tem-se as normas utilizadas nos ensaios para caracterização.

Tabela 5: Ensaios utilizados na pesquisa.

Ensaios	Normas
RTFO	NBR 15235/09
Penetração	DNIT-ME 155/2010
Viscosidade Rotacional (Brookfield)	NBR 15184/07
Ponto de Amolecimento	DNIT-ME 131/2010

O óleo de linhaça foi obtido junto a distribuidora Mundo dos Óleos e suas propriedades de caracterização estão contidas na nota da empresa que forneceu o produto, como ilustra a Figura 12.

Figura 12: Composição do óleo de linhaça.



ÓLEO DE LINHAÇA

Nome científico	<i>Linum usitatissimum</i> – <i>Linaceae</i> (<i>Linum Oil</i>)		
Procedência	Produto de fabricação nacional (<i>Made in Brazil</i>)		
Forma de obtenção	Prensagem a frio e filtração (<i>Cold press and filtration</i>)		
CAS / EINECS	8001-26-1 / 232-276-5		
Parte utilizada	Semente		

CARACTERÍSTICAS FÍSICO QUÍMICAS

Característica	Especificação	Resultado	Metodologia
Cor (25°C)	Amarelo	De acordo	Propriedades Organolépticas
Densidade (25°C g/ml)	0,910 – 0,920	0,917	*IAL 337/IV
Estado Físico (25°C)	Líquido viscoso	De acordo	Propriedades Organolépticas
Índice de Acidez (mg KOH/g)	< 2,0	0,89	*IAL 325/IV
Índice de Iodo (Wijs)	100 – 140	139,59	*IAL 329/IV
Índice de Peróxido (meq/kg)	< 10	0,80	*IAL 326/IV
Índice de Retração (n, 40°C)	1,4650 – 1,4850	1,4708	*IAL 327/IV
Índice de Saponificação (mg KOH/kg)	158 – 198	175,51	*IAL 328/IV
Odor (25°C)	Característico	De acordo	Propriedades Organolépticas

CONTAGEM MICROBIANA

Característica	Especificação	Resultado
Bactérias totais – 1000 UFC/g	< 10 ³ UFC/g	De acordo
Fungos e leveduras – 100 UFC/g	< 10 ² UFC/g	De acordo
Coliformes totais	Ausente	De acordo
E. Coli	Ausente	De acordo
Staphylococcus Aureus	Ausente	De acordo
Pseudomonas SP	Ausente	De acordo

FONTE: Mundo dos Óleos apud Cavalcante (2016).

3.2 Metodologia

3.2.1 Produção da Mistura

Para produção da mistura entre o ligante asfáltico e o óleo de linhaça, seguiu-se os parâmetros como determinava Cavalcante (2016). Utilizou-se o misturador da marca Fisaton Modelo 722D de Cisalhamento, onde este indica velocidade de rotação e temperatura em dispositivo digital. A Figura 13 ilustra o equipamento utilizado para realização da mistura.

Figura 13: Misturador mecânico.**FONTE:** LEP (2018).

De acordo com Cavalcante (2016), a sequência do procedimento se deu a partir do aquecimento do CAP em estufa em temperatura em torno de 120°C durando cerca de uma hora e meia, garantindo que o material esteja fluído para a mistura, em seguida colocou-se o CAP no b quer e o inseriu no misturador. No misturador a temperatura escolhida foi de 135°C e uma rota o de 406 rpm, assim garantindo a homogeneidade do CAP na mesma temperatura e ao atingir a temperatura estabelecida, adicionou-se o  leo de linha a previamente aquecido e aguardou a estabiliza o da rota o e temperatura, contabilizando 20 minutos para homogeneiza o da mistura. Por fim, esta foi armazenada e estocada. Repetindo-se o processo para os percentuais de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6% de  leo de linha a em rela o a massa total da amostra.

3.2.2 Envelhecimento a Curto Prazo – RTFO

O procedimento visa representar o processo de envelhecimento sofrido pelo ligante durante seu ciclo de vida (estocagem, usinagem, aplica o e utiliza o), onde este sofrer  influ ncia da sua exposi o a temperatura e oxig nio. O procedimento Rolling Thin Film Oven – RTFO   normatizado pela American Society for Testing and Materials (ASTM) – D2872.

O procedimento foi feito colocando uma amostra do CAP de 35g em um recipiente que gira dentro de uma estufa na temperatura de 163°C, sendo assim, representando a influência da temperatura na amostra, e ainda, uma abertura no recipiente permite a entrada de ar para considerar a influência do oxigênio na amostra. Este procedimento tem duração de 85 minutos e as amostras são verificadas quanto a sua perda de massa e posterior caracterização quanto ao ponto de amolecimento, penetração e viscosidade. A Figura 14 ilustra a estufa RTFO utilizada para realização do procedimento.

Figura 14: Estufa para procedimento RTFO.



FONTE: LEP (2018).

3.2.3 Caracterização Física

3.2.3.1 Ensaio de Penetração

O procedimento para o ensaio de penetração é realizado conforme a norma DNIT-ME 155/2010, onde o órgão utiliza o parâmetro obtido no ensaio para classificar o cimento asfáltico na pavimentação. A norma reguladora define que a penetração é o quanto uma agulha padrão penetra verticalmente, em décimos de milímetro, uma amostra de CAP, a partir de uma condição de carga, temperatura e tempo pré-estabelecidos.

O ensaio foi realizado determinando quanto que a agulha com massa de 100g penetrou verticalmente na amostra em um tempo de 5 segundos e temperatura ambiente de 25°C. Em cada ensaio, para a amostra de referência

e com adição dos teores, realizou-se três medidas previstas em norma e adotou a média entre as mesmas. A Figura 15 mostra o Penetrômetro utilizado no ensaio.

Figura 15: Penetrômetro para ensaio de penetração.



FONTE: LEP (2018).

Além do ensaio em si de penetração, também foi avaliado os parâmetros de penetração retida (PR) dos ligantes, fazendo uma relação entre o valor obtido para o ligante na condição sã e em sua condição envelhecida a curto prazo obtida no procedimento RTFO. A Equação 1 demonstra a relação para obtenção da PR.

$$PR = \frac{\text{Penetração}_{RTFO}}{\text{Penetração}_{Puro}} \times 100 \quad (1)$$

Os baixos valores de penetração retida são um indicativo de uma maior sensibilidade ao envelhecimento (CAVALCANTE, 2016). Para o DNIT 095/2006, os percentuais mínimos da penetração retida para o ligante convencional têm de ser da ordem de 55%.

3.2.3.2 Ensaio de Ponto de Amolecimento

Para a realização do ensaio, utilizou-se o preconizado na norma DNIT-ME 131/2010 que determina o ponto de amolecimento do cimento asfáltico a partir do método do anel e bola.

No ensaio em questão, a amostra foi aquecida e colocada em um anel para suporte, este conjunto foi levado a um béquer para ser mantido em banho de água destilada, colocou-se sobre a amostra uma esfera padronizada de aço e em seguida aqueceu o conjunto a uma velocidade constante de modo a tornar a amostra fluida e que possa ser deslocada pelo peso da esfera metálica.

O ponto de amolecimento foi a temperatura lida quando a amostra foi deslocada pela esfera e tocou a placa de referência que distância do conjunto do anel em 25,4mm.

O resultado obtido no ensaio foi a média das duas leituras de temperatura de cada conjunto de anel, sendo realizada para o cimento asfáltico de referência e o mesmo com adição de cada teor de óleo de linhaça. A Figura 16 ilustra a realização do ensaio.

Figura 16: Aparatos utilizados para ensaio de ponto de amolecimento.



FONTE: LEP (2018).

Da mesma forma que a penetração, o Aumento do Ponto de Amolecimento (APA) também foi avaliado para constatar, segundo Cavalcante (2016), que os altos valores apresentados indicam maior fragilidade do ligante ao envelhecimento. A forma de cálculo do APA é dada pela diferença entre o ponto de amolecimento dos ligantes em sua condição envelhecida e o ponto de amolecimento em condição pura. Como mostrado na Equação 2.

$$APA = PA_{RTFO} - PA_{Puro} \quad (2)$$

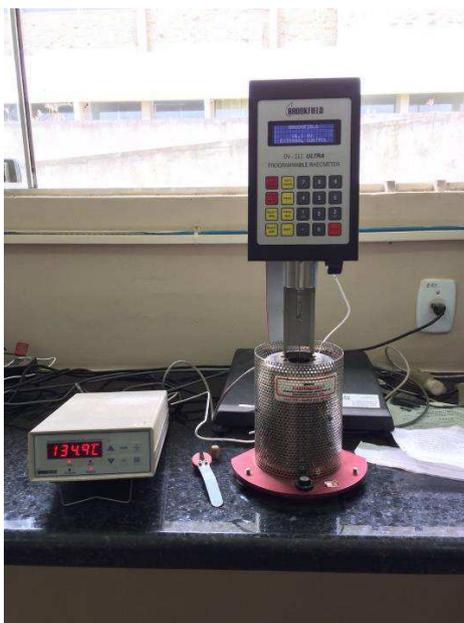
O DNIT 095/2006 regulamenta um aumento máximo de 8°C no ponto de amolecimento para o CAP 50/70.

3.2.3.3 Viscosidade Rotacional

O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR 15184/04, que prevê a determinação da viscosidade do ligante asfáltico através de um viscosímetro rotacional, permitindo a obtenção de diferentes viscosidades a partir das mudanças de temperatura, possibilitando a obtenção das curvas da viscosidade em relação a temperatura, determinando assim as temperaturas de compactação e usinagem.

O procedimento foi realizado por equipamento do Viscosímetro Brookfield Modelo DV-III ULTRA que está acoplado a um controlador de temperatura Thermosel, este ensaio foi preparado para fornecer informações da viscosidade nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C para o CAP puro e suas amostras modificadas. A Figura 17 mostra o equipamento utilizado para ensaio.

Figura 17: Viscosímetro de Brookfield.



FONTE: LEP (2018).

Para avaliação da sensibilidade ao envelhecimento, foi determinado o Índice de Envelhecimento (IE) que é uma razão entre a viscosidade na condição do ligante envelhecido e a viscosidade do ligante puro. Segundo Cavalcante (2016), quanto maior o valor do IE, maior a sensibilidade ao envelhecimento. A Equação 3 mostra a fórmula para o cálculo do Índice de Envelhecimento.

$$IE = \frac{V_{RTFO}}{V_{Puro}} \quad (3)$$

3.2.4 Caracterização Química

3.2.4.1 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier – FTIR

Para análise química do material pesquisado, foi realizado ensaio para o CAP convencional e o CAP modificado com propriedades intermediárias de acordo com a adição, então escolheu-se a análise do percentual de 4% de adição de óleo de linhaça.

Os espectros das amostras (convencional e adicionada de óleo de linhaça) foram obtidas em um espectrômetro da Nicolet de modelo iS10, na faixa de 500 a 4000 cm⁻¹ no módulo de refletância total atenuada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados referentes a este capítulo irão discutir o que foi obtido nos ensaios realizados para caracterização física e química do ligante puro e modificado com óleo de linhaça, nas condições antes e após o procedimento de envelhecimento a curto prazo (RTFO).

4.1 Caracterização Física

4.1.1 Perda de Massa

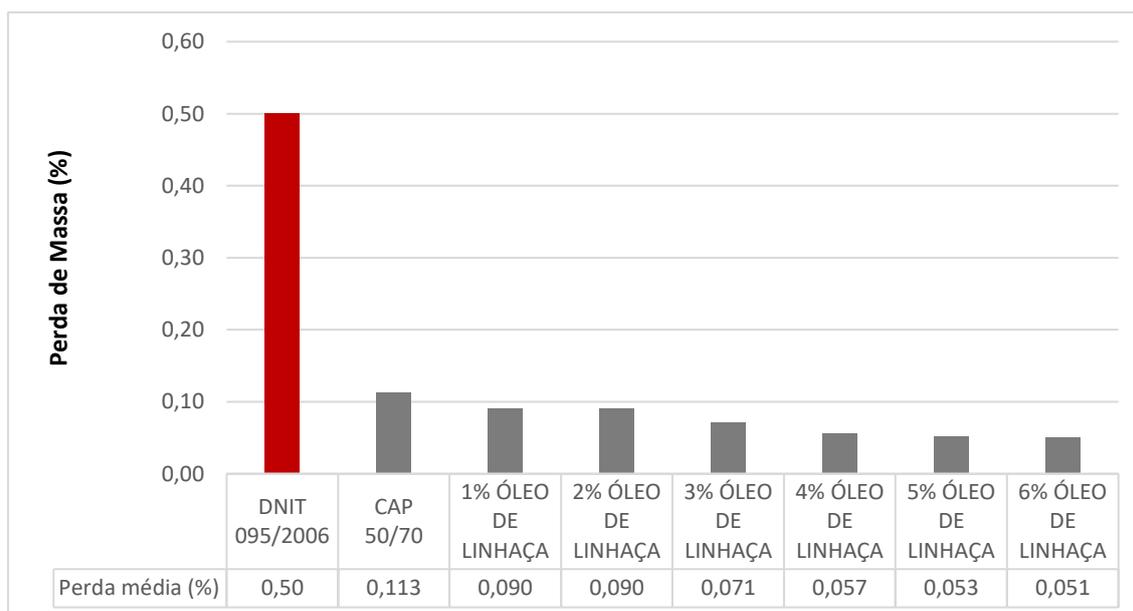
Em relação a perda de massa após o ensaio RTFO, a Tabela 6 e a Figura 18 apresentam os resultados para todos os seis teores submetidos ao envelhecimento, como também os resultados do ligante puro. É possível observar que a adição de um agente modificador do ligante proporcionou uma variação de massa inferior ao observado no CAP puro, e ainda, que em relação às amostras modificadas, estas se mostraram menos propensas a perda de massa dado o aumento do teor do óleo de linhaça na composição. Apresentando uma taxa de variação de 0,052% a 0,103% e uma menor perda para os CAP 50/70 com 5% e 6% de óleo de linhaça. Isso pode concluir uma menor oxidação do ligante dado o acréscimo do óleo de linhaça e este possuir propriedades antioxidantes na sua composição.

Então, todos os ligantes modificados se mostraram coerentes com o que está prescrito na norma DNIT 095/2006, onde para o CAP 50/70, a variação de perda de massa não deve ser superior a 0,5%. Sendo melhor ilustrado na Figura 18.

Tabela 6: Perdas de massa após o procedimento RTFO.

ENVELHECIMENTO A CURTO PRAZO - RTFO (PERDA DE MASSA)				
TEOR	ANTES	APÓS	VARIAÇÃO DE MASSA (%)	
CAP 50/70	221,68	221,43	0,113	
CAP 50/70 + 1% ÓLEO DE LINHAÇA	221,33	221,10	0,103	
CAP 50/70 + 2% ÓLEO DE LINHAÇA	221,66	221,46	0,090	
CAP 50/70 + 3% ÓLEO DE LINHAÇA	221,77	221,61	0,071	
CAP 50/70 + 4% ÓLEO DE LINHAÇA	221,57	221,44	0,058	
CAP 50/70 + 5% ÓLEO DE LINHAÇA	221,63	221,51	0,052	
CAP 50/70 + 6% ÓLEO DE LINHAÇA	221,71	221,60	0,052	

FONTE: Dados da pesquisa (2018)

Figura 18: Perdas de massa.

FONTE: Dados da pesquisa (2018)

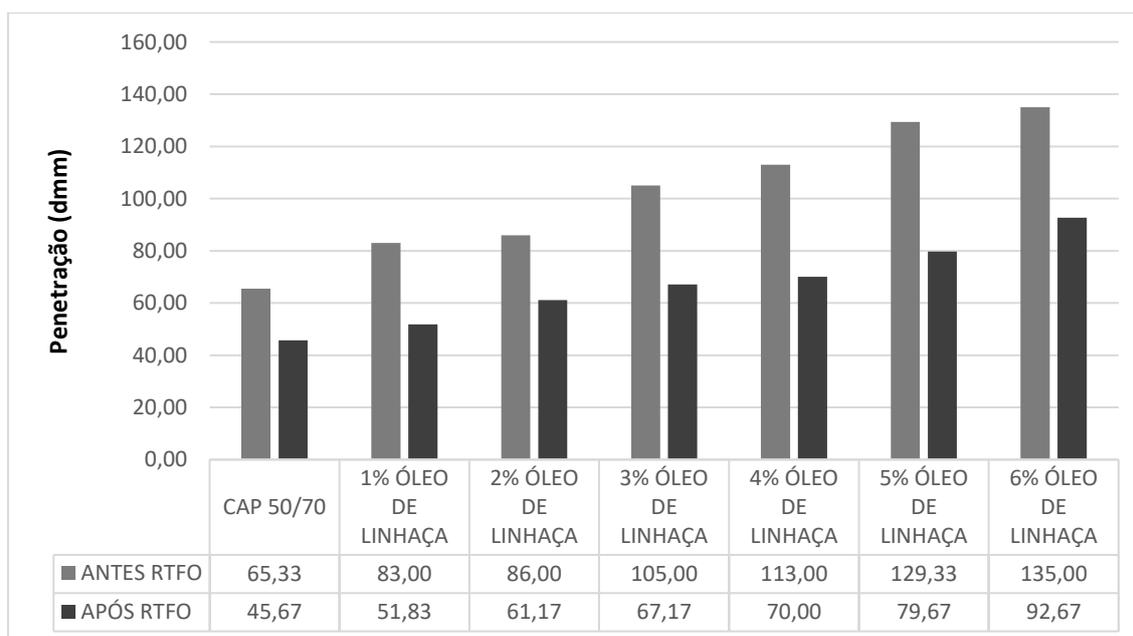
4.1.2 Ensaio de Penetração

Os resultados dos ensaios ilustrados na Tabela 7 e Figura 19 mostram as médias dos valores de penetração obtidas, para o CAP puro e modificado em condições antes e após o envelhecimento. Ainda também se verifica os valores de penetração retida para cada um.

Tabela 7: Ensaio de penetração.

ENSAIO DE PENETRAÇÃO			
TEORES	ANTES RTFO (dmm)	APÓS RTFO (dmm)	PENETRAÇÃO RETIDA
CAP 50/70	65,33	45,67	69,9%
CAP 50/70 + 1% ÓLEO DE LINHAÇA	83,00	51,83	62,4%
CAP 50/70 + 2% ÓLEO DE LINHAÇA	86,00	61,17	71,1%
CAP 50/70 + 3% ÓLEO DE LINHAÇA	105,00	67,17	64,0%
CAP 50/70 + 4% ÓLEO DE LINHAÇA	113,00	70,00	61,9%
CAP 50/70 + 5% ÓLEO DE LINHAÇA	129,33	79,67	61,6%
CAP 50/70 + 6% ÓLEO DE LINHAÇA	135,00	92,67	68,6%

FONTE: Dados da pesquisa (2018)

Figura 19: Ensaio de penetração.

FONTE: Dados da pesquisa (2018)

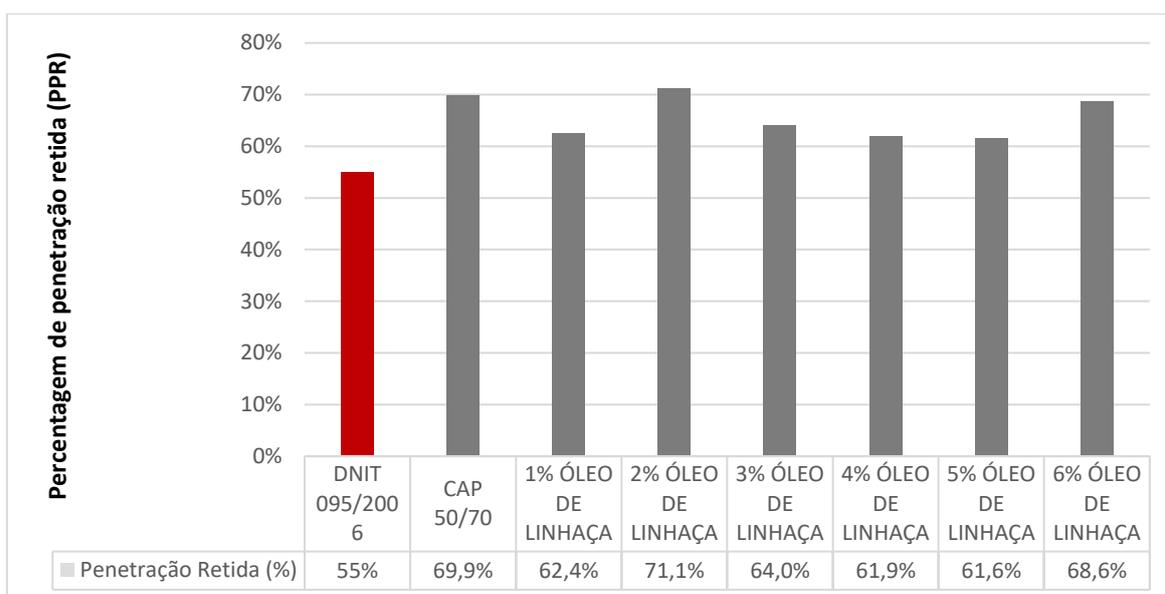
Foi observado que o ligante modificado apresentou um aumento na penetração em comparação com o CAP 50/70 na temperatura de 25°C, este fator mostra que o óleo de linhaça proporciona uma menor rigidez ao ligante na mistura. Este resultado é reforçado dado que a penetração aumenta em consequência ao aumento do teor do óleo no ligante.

A maior penetração constatada foi observada no CAP 50/70 + 6% de Óleo de Linhaça, em um valor médio de 135,0 dmm que é bastante superior a faixa estabelecida na norma DNIT 095/2006-EM que apresenta valores de 50 a 70 decímetros de milímetros a 25°C.

Com relação as amostras ensaiadas após o envelhecimento a curto prazo com auxílio do RTFO, as penetrações do CAP puro e modificado apresentaram tendência semelhante de aumento de valor da penetração, porém, com o envelhecimento sabe-se que o ligante se mostra mais rígido, ocasionando assim uma diminuição dos valores de penetração.

Então, em posse dos valores de penetração antes e após o envelhecimento dos ligantes puro e modificados, os resultados da penetração retida se mostraram de no mínimo 61,6% para o CAP 50/70 + 5% de Óleo de Linhaça e no máximo 71,1% para o CAP 50/70 + 2% de Óleo de Linhaça, ficando de acordo com o previsto para a penetração retida de no mínimo 55% (DNIT 095/2006-EM).

Sabe-se que a penetração retida se mostra como um indicador dos ligantes asfálticos ao RTFO, indicando assim que os teores de 1%, 4% e 5% são mais sensíveis ao envelhecimento por apresentarem menores valores de penetração retida. Cavalcante (2016), em pesquisa realizada com óleo de linhaça encontrou resultados de 63,3% 62,2% e 66,9% para as adições de 4%, 5% e 6%, respectivamente, denotando assim a característica observada no ensaio realizado. A Figura 20 ilustra as penetrações retidas em comparação com o preconizado em norma.

Figura 20: Penetrações retidas.

FONTE: Dados da pesquisa (2018)

Por fim, os resultados apontam que com relação à penetração, a adição do óleo de linhaça em teores crescentes proporciona maiores valores de penetração, mostrando certo potencial, no entanto, deixando que o ligante fique mais sensível ao envelhecimento, expresso em menores valores de penetração retida.

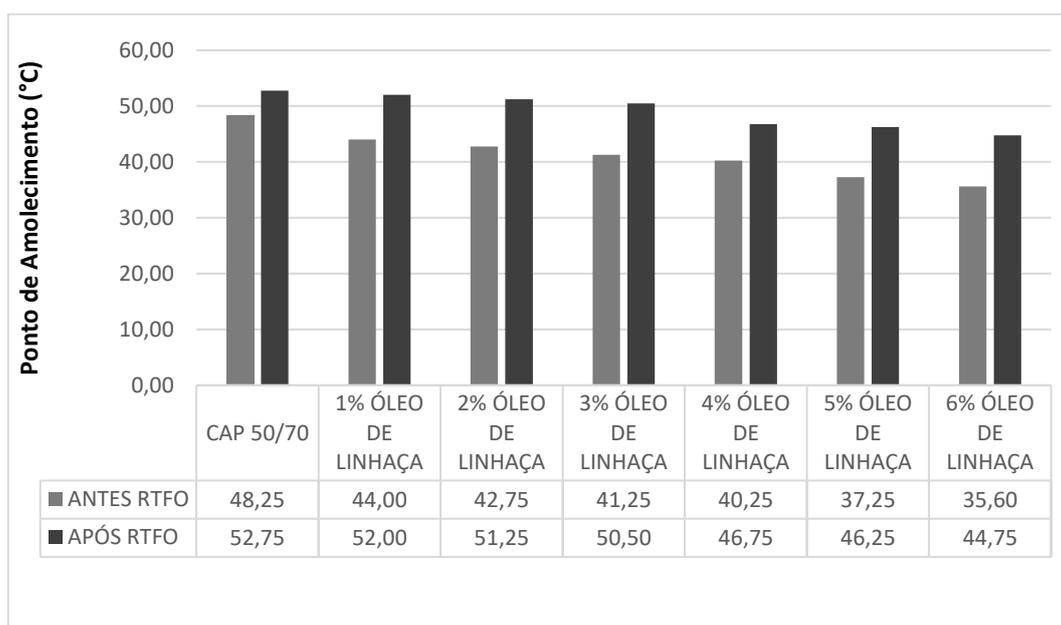
4.1.3 Ensaio de Ponto de Amolecimento

Os resultados médios do ensaio de ponto de amolecimento referentes ao CAP puro e modificado com óleo de linhaça, e ainda, nas condições antes e após o envelhecimento são ilustrados na Tabela 8 e Figura 21. Os valores obtidos indicam uma tendência de diminuição do parâmetro para o CAP 50/70 quando este é modificado com a adição do óleo, resultados observados em ambas condições, antes e após RTFO. Este fato demonstra uma observação notada no ensaio de penetração, a adição do óleo de linhaça na composição do ligante o torna menos rígido. O teor que mostrou a maior redução do ponto de amolecimento foi o CAP 50/70 + 6% de Óleo de Linhaça na condição antes e após o envelhecimento, como era o esperado.

Tabela 8: Ensaio de ponto de amolecimento.

ENSAIO DE PONTO DE AMOLECIMENTO			
TEORES	ANTES RTFO (°C)	APÓS RTFO (°C)	AUMENTO DO PONTO DE AMOLECIMENTO (°C)
CAP 50/70	48,25	52,75	4,50
CAP 50/70 + 1% ÓLEO DE LINHAÇA	44,00	52,00	8,00
CAP 50/70 + 2% ÓLEO DE LINHAÇA	42,75	51,25	8,50
CAP 50/70 + 3% ÓLEO DE LINHAÇA	41,25	50,50	9,25
CAP 50/70 + 4% ÓLEO DE LINHAÇA	40,25	46,75	6,50
CAP 50/70 + 5% ÓLEO DE LINHAÇA	37,25	46,25	9,00
CAP 50/70 + 6% ÓLEO DE LINHAÇA	35,60	44,75	9,15

FONTE: Dados da pesquisa (2018)

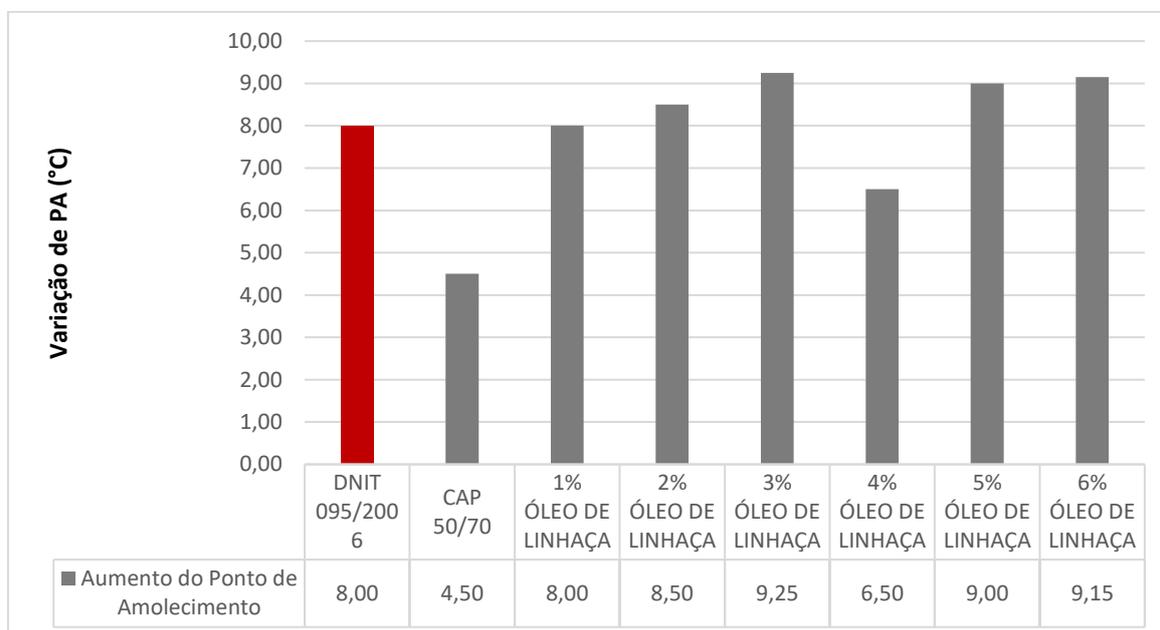
Figura 21: Ensaio de ponto de amolecimento.

FONTE: Dados da pesquisa (2018)

Considerando o aumento do ponto de amolecimento dado o processo de envelhecimento a curto prazo RTFO, a norma DNIT 095/2006-ME prescreve um aumento máximo de 8°C para o CAP 50/70. Sendo assim, os ligantes modificados com 2%, 3%, 5% e 6% não atendem ao que a norma prevê, apresentando um aumento de temperatura de 8,5°C, 9,25°C, 9,0°C e 9,15°C,

respectivamente. A Figura 22 ilustra a comparação dos valores e o previsto em norma.

Figura 22: Variação de ponto de amolecimento.



FONTE: Dados da pesquisa (2018)

4.1.4 Ensaio de Viscosidade

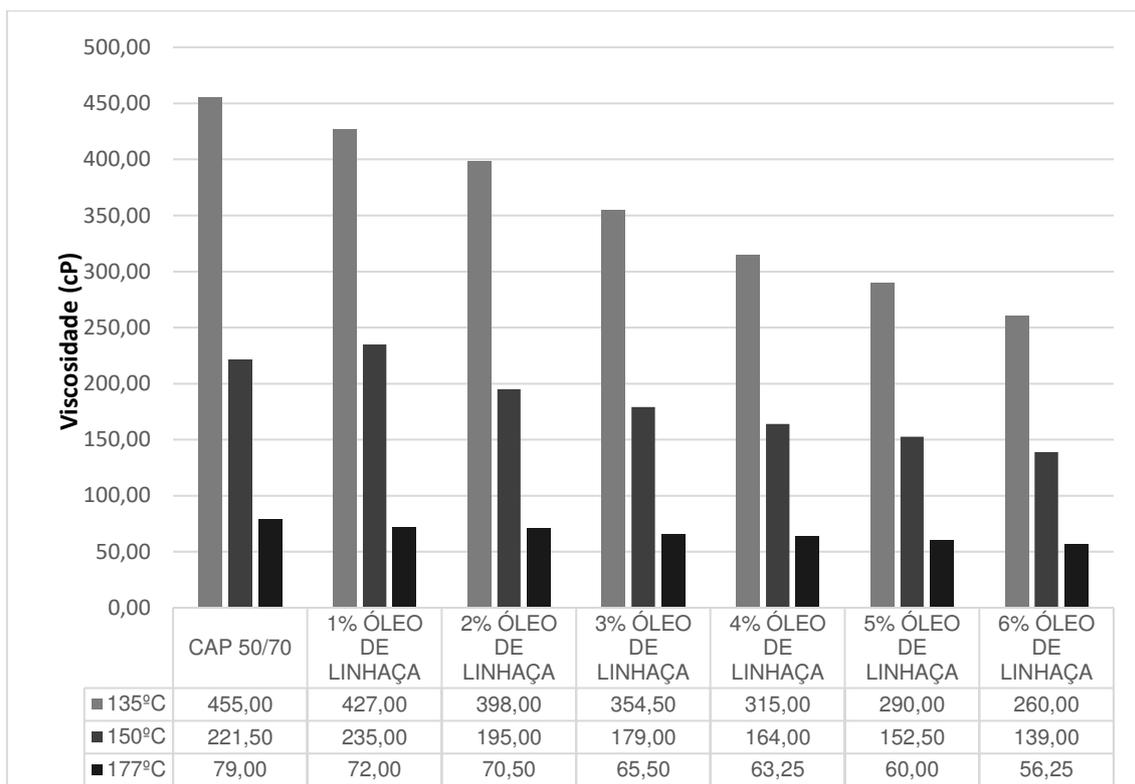
4.1.4.1 Antes do RTFO

Os resultados obtidos através da viscosidade rotacional Brookfield são representados em centiPoise (cP) e foram obtidos a partir da média das amostras prova e contraprova, realizadas para as três temperaturas que a norma preconiza (135°C, 150°C e 177°C). A Tabela 9 e Figura 23 ilustram os resultados obtidos para o ensaio realizado antes do procedimento de envelhecimento.

Tabela 9: Viscosidade Rotacional Brookfield antes do RTFO.

ENSAIO DE PONTO DE VISCOSIDADE ROTACIONAL (BROOKFIELD)							
TEMPERATURAS (°C)	VISCOSIDADE (cP)						
	CAP 50/70	CAP 50/70 + 1% ÓLEO DE LINHAÇA	CAP 50/70 + 2% ÓLEO DE LINHAÇA	CAP 50/70 + 3% ÓLEO DE LINHAÇA	CAP 50/70 + 4% ÓLEO DE LINHAÇA	CAP 50/70 + 5% ÓLEO DE LINHAÇA	CAP 50/70 + 6% ÓLEO DE LINHAÇA
135	455,00	427,00	398,00	354,50	315,00	290,00	260,00
150	221,50	235,00	195,00	179,00	164,00	152,50	139,00
177	79,00	72,00	70,50	65,50	63,25	60,00	56,25

FONTE: Dados da pesquisa (2018)

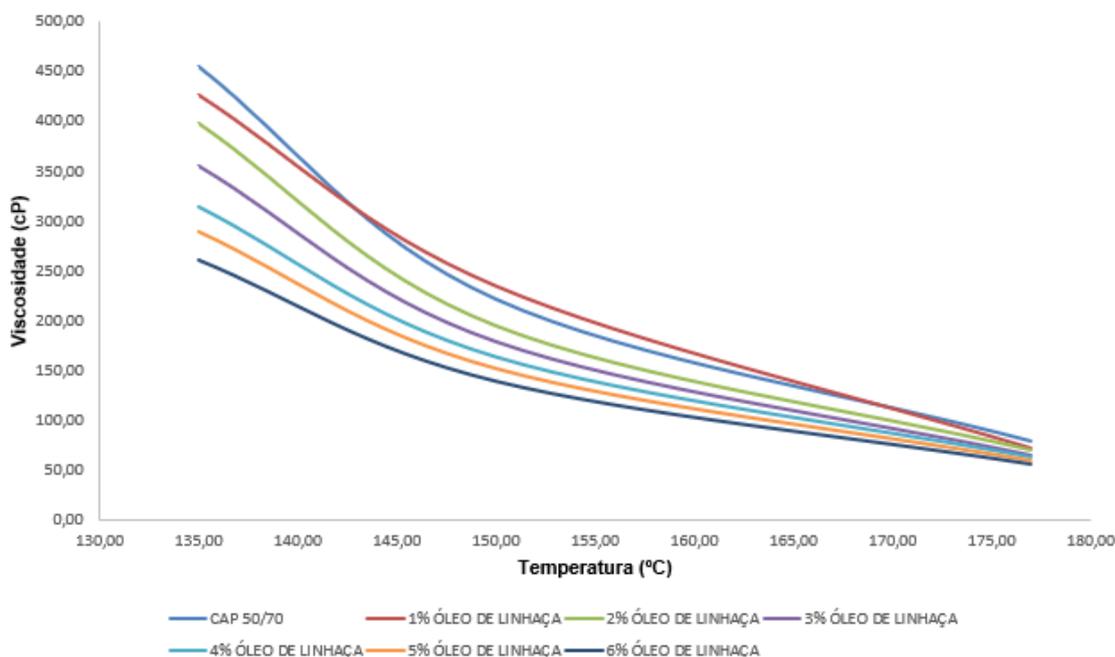
Figura 23: Ensaio de Viscosidade Rotacional Brookfield antes do RTFO.

FONTE: Dados da pesquisa (2018)

A adição do óleo de linhaça em todos os teores proporcionou a diminuição das viscosidades em detrimento ao CAP puro, isto conseqüentemente irá refletir nas Temperaturas de Compactação e Usinagem (TCU), que por sua vez está relacionada com a trabalhabilidade do ligante. Fator importante se dá ao aumento dos teores de óleo de linhaça corresponderem a decréscimos sucessivos dos valores de viscosidade, admitindo assim para o valor de maior redução de viscosidade o teor de 6%, demonstra-se um decréscimo médio de 36% na viscosidade.

Em relação ao que preconiza a norma do DNIT 095/2006 para a Viscosidade Brookfield, apenas o CAP 50/70 + 6% de Óleo de Linhaça teve um valor abaixo do especificado, para as temperaturas de 135°C e 177°C, onde a norma prevê valores de viscosidades mínimos de 274 cP e 57 cP, respectivamente. Sendo assim, todos os outros teores de acordo com os valores mínimos e máximos previstos para as três temperaturas de referência.

A Figura 24 ilustra as curvas de viscosidade do CAP puro e incorporado em todos os teores de óleo de linhaça.

Figura 24: Curvas de viscosidade antes do RTFO.

FONTE: Dados da pesquisa (2018)

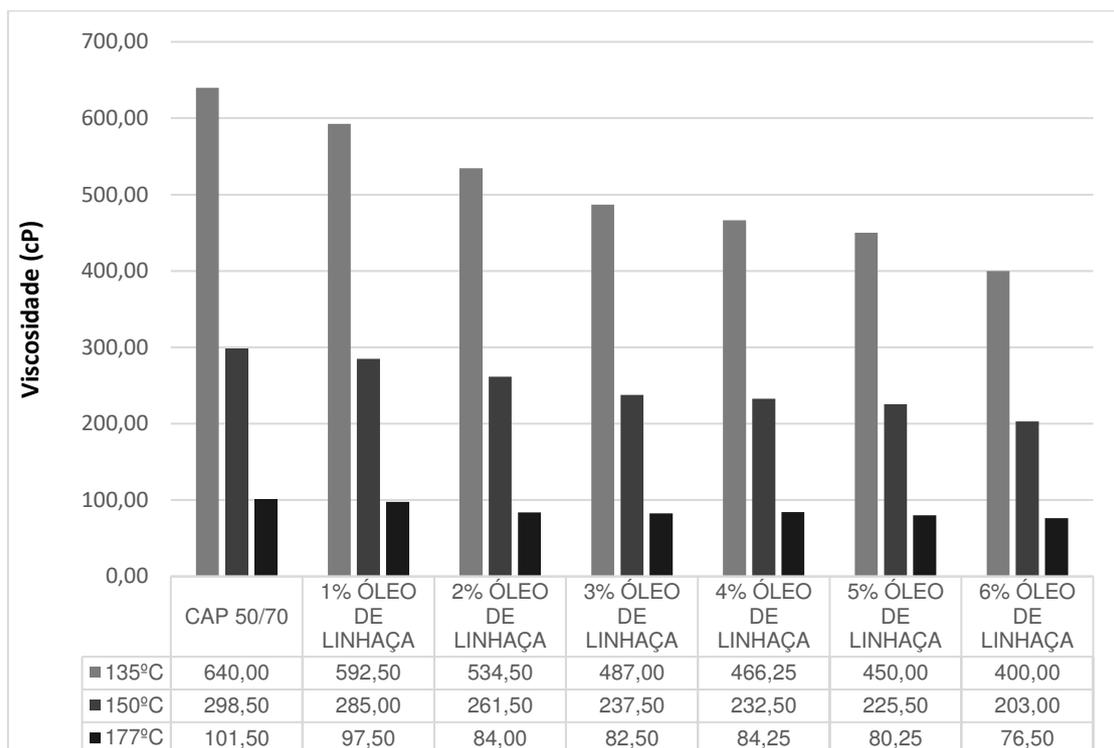
4.1.4.2 Após RTFO

Após o envelhecimento do ligante puro e acrescido de óleo de linhaça, pode-se notar o mesmo padrão de diminuição das viscosidades a medida que os teores de óleo de linhaça eram aumentados, mesmo com os acréscimos de viscosidade que o envelhecimento causa nos ligantes. A Tabela 10 e Figura 25 ilustram os resultados obtidos para o CAP puro e incorporado em relação às três temperaturas em que o ensaio foi realizado.

Tabela 10: Ensaio de Viscosidade Rotacional Brookfield após RTFO.

ENSAIO DE PONTO DE VISCOSIDADE ROTACIONAL (BROOKFIELD)							
TEMPERATURAS (°C)	VISCOSIDADE (cP)						
	CAP 50/70	CAP 50/70 + 1% ÓLEO DE LINHAÇA	CAP 50/70 + 2% ÓLEO DE LINHAÇA	CAP 50/70 + 3% ÓLEO DE LINHAÇA	CAP 50/70 + 4% ÓLEO DE LINHAÇA	CAP 50/70 + 5% ÓLEO DE LINHAÇA	CAP 50/70 + 6% ÓLEO DE LINHAÇA
135	640,00	592,50	534,50	487,00	466,25	450,00	400,00
150	298,50	285,00	261,50	237,50	232,50	225,50	203,00
177	101,50	97,50	84,00	82,50	84,25	80,25	76,50

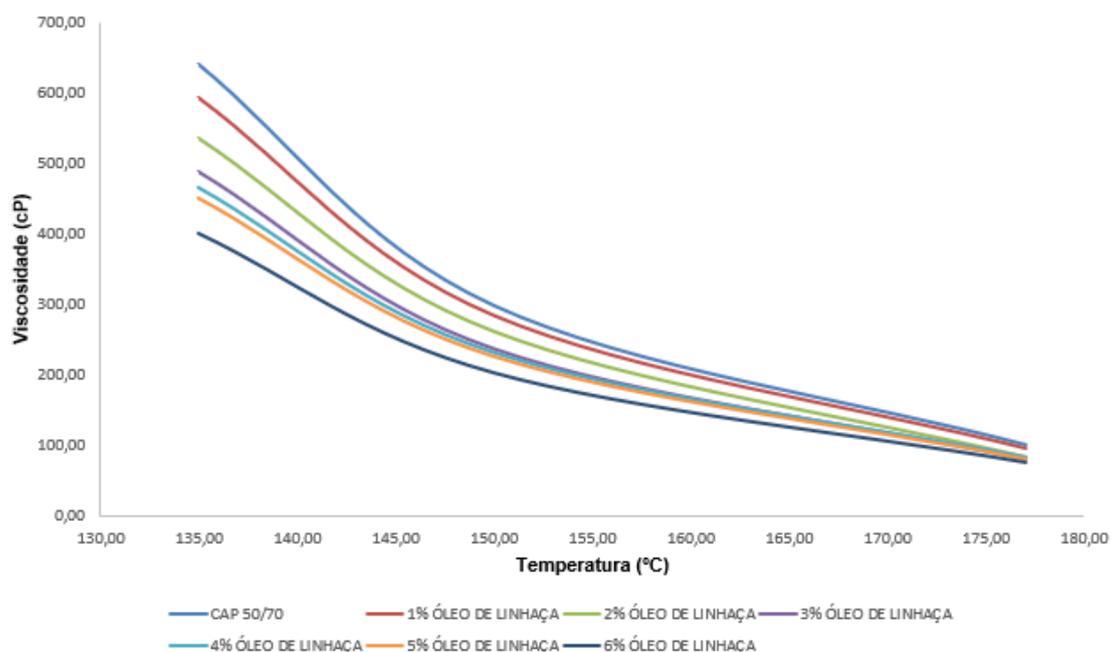
FONTE: Dados da pesquisa (2018)

Figura 25: Ensaio de Viscosidade Rotacional Brookfield após RTFO.

FONTE: Dados da pesquisa (2018)

Com relação ao ligante após o processo de envelhecimento, observou-se uma redução média da viscosidade no seu maior valor (comparação entre o CAP puro e o teor de 6% de óleo de linhaça) de 31%. Além disso, o CAP incorporado com óleo de linhaça se mostrou com potencial devido a redução de viscosidade, pois as misturas asfálticas são produzidas com temperaturas elevadas, processo este que pode ocasionar na oxidação do ligante.

A Figura 26 ilustra as curvas de viscosidade do CAP puro e incorporado em todos os teores de óleo de linhaça.

Figura 26: Curvas de viscosidades.

FONTE: Dados da pesquisa (2018)

4.1.4.3 Índice de Envelhecimento

Em posse dos resultados das viscosidades antes e após o RTFO, determinou-se o Índice de Envelhecimento (IE) obtido entre a relação entre as viscosidades. Os resultados estão representados na Tabela 11 com relação à temperatura de 135°C.

Tabela 11: Índice de Envelhecimento dos ligantes.

ÍNDICE DE ENVELHECIMENTO - TEMPERATURA 135°C			
TEORES	VISCOSIDADE ANTES DO RTFO (cP)	VISCOSIDADE APÓS O RTFO (cP)	IE
CAP 50/70	455,00	640,00	1,41
CAP 50/70 + 1% ÓLEO DE LINHAÇA	427,00	592,50	1,39
CAP 50/70 + 2% ÓLEO DE LINHAÇA	398,00	534,50	1,34
CAP 50/70 + 3% ÓLEO DE LINHAÇA	354,50	487,00	1,37
CAP 50/70 + 4% ÓLEO DE LINHAÇA	315,00	466,25	1,48
CAP 50/70 + 5% ÓLEO DE LINHAÇA	290,00	450,00	1,55
CAP 50/70 + 6% ÓLEO DE LINHAÇA	260,00	400,00	1,54

FONTE: Dados da pesquisa (2018)

Os resultados mostram que os teores de 1% a 3% mostraram índices de envelhecimento menores que o índice do CAP puro, apresentando assim uma menor suscetibilidade ao envelhecimento. No entanto, é justamente o oposto das adições de óleo de linhaça superiores aos teores de 3%, onde as outras três adições se mostraram superiores com relação ao ligante não modificado.

4.1.5 Temperaturas de Compactação e Usinagem (TCU)

As temperaturas de compactação e usinagem são de extrema importância para realização destes dois processos, e são fatores das viscosidades apresentadas pelos ligantes, sendo assim obtidos em função do gráfico das respectivas curvas. É de grande interesse para a trabalhabilidade de misturas asfálticas que os valores das TCU sejam sempre reduzidos. Segundo Whiteoak (1990), a oxidação referente ao processo de compactação e usinagem está ligado a temperatura, superfície e tempo de exposição. O autor ainda apresenta que a taxa de oxidação tem um aumento considerável, chegando ao dobro para cada 10°C de aumento na temperatura do ligante quando este está acima dos 100°C.

Devido ao fator das temperaturas, o ligante incorporado com óleo de linhaça se mostrou com grande valor, pois a consequente diminuição da viscosidade representou a eventual diminuição das temperaturas de compactação e usinagem. A Tabela 12 representa os intervalos das temperaturas, bem como a média desses valores. Importante denotar que para os ligantes ensaiados as faixas de viscosidade para determinação da Temperatura de Usinagem foi de 150 cP a 190 cP e para a Temperatura de Compactação foi de 250 cP a 310 cP (ASTM D2493, 2001 apud Cavalcante, 2016).

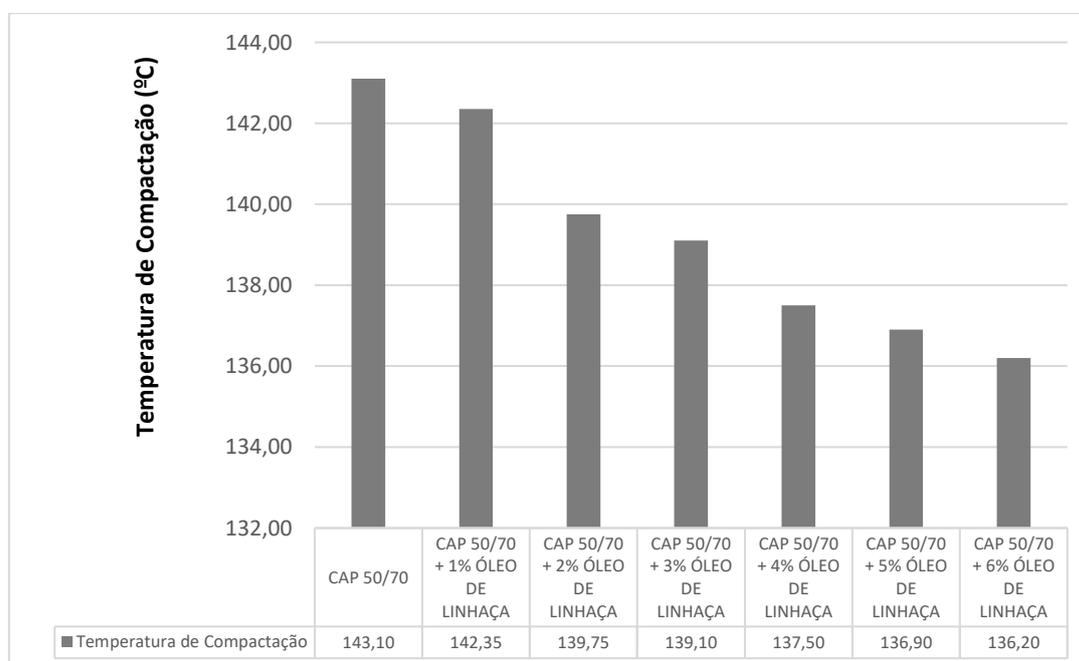
Tabela 12: Temperaturas de usinagem e compactação dos ligantes.

TEMPERATURAS DE COMPACTAÇÃO E USINAGEM								
TEMPERATURAS (°C)	INTERVALOS	CAP 50/70	CAP 50/70 +					
			1% ÓLEO DE LINHAÇA	2% ÓLEO DE LINHAÇA	3% ÓLEO DE LINHAÇA	4% ÓLEO DE LINHAÇA	5% ÓLEO DE LINHAÇA	6% ÓLEO DE LINHAÇA
USINAGEM	MÍNIMA	156,00	153,60	150,80	148,10	145,20	142,50	140,10
	MÁXIMA	162,00	160,50	158,20	155,60	153,00	150,50	147,40
	MÉDIA	159,00	157,05	154,50	151,85	149,10	146,50	143,75
COMPACTAÇÃO	MÍNIMA	140,00	139,40	137,10	136,50	135,90	135,30	135,10
	MÁXIMA	146,20	145,30	142,40	141,70	139,10	138,50	137,30
	MÉDIA	143,10	142,35	139,75	139,10	137,50	136,90	136,20

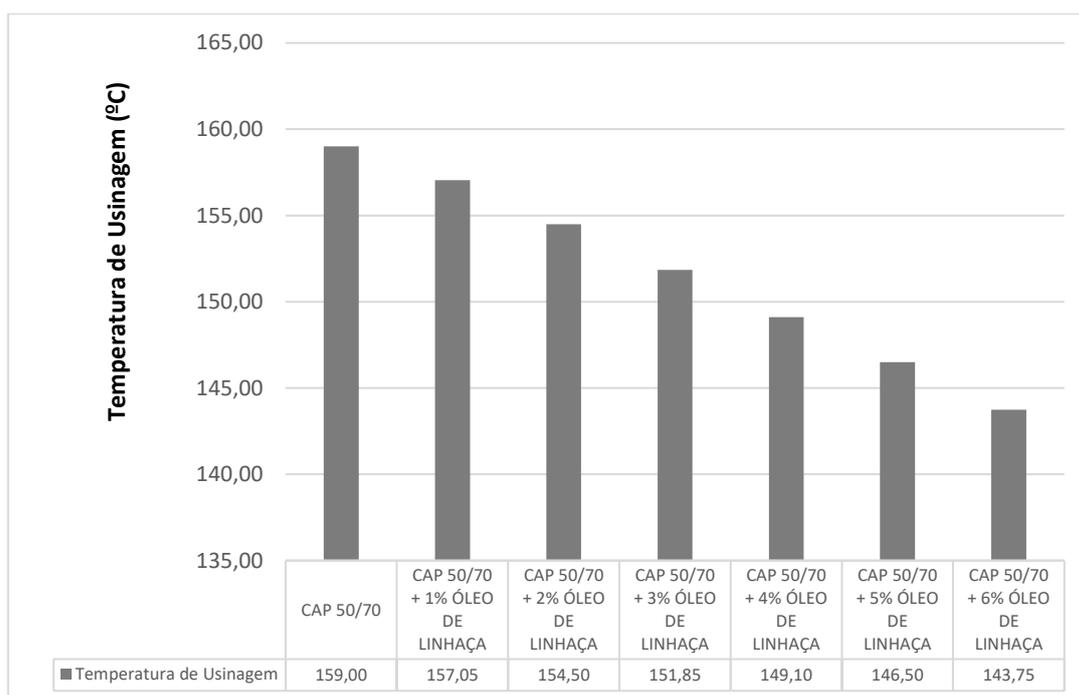
FONTE: Dados da pesquisa (2018)

Então, em referência ao CAP 50/70, as crescentes adições de óleo de linhaça causaram a redução das temperaturas, obtendo assim uma redução, em relação à média, de 15,25°C e 6,9°C para as temperaturas de usinagem e compactação, respectivamente, para o CAP 50/70 + 6% de Óleo de Linhaça.

As Figuras 27 e 28 ilustram as temperaturas de compactação e usinagem para o CAP puro e com as incorporações de óleo de linhaça.

Figura 27: Temperaturas de compactação dos ligantes.

FONTE: Dados da pesquisa (2018)

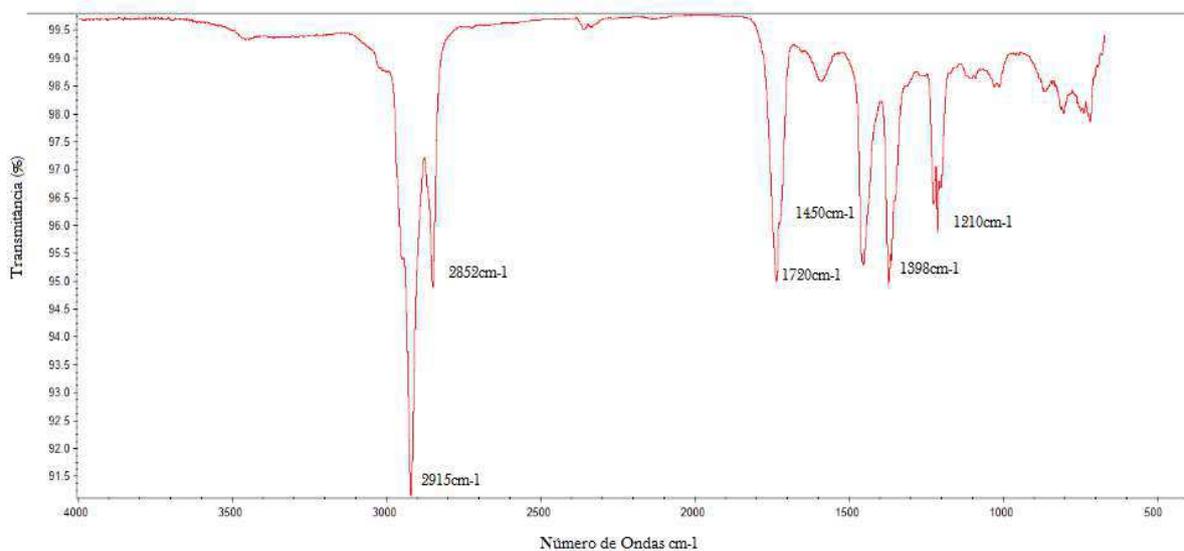
Figura 28: Temperaturas de usinagem dos ligantes.

FONTE: Dados da pesquisa (2018)

4.2 Caracterização química por FTIR

Com base nos resultados obtidos para a caracterização física do ligante asfáltico com adições de óleo de linhaça nos teores de 1%, 2%, 3%, 4%, 5% e 6%, optou-se por realizar a caracterização química por FTIR para o ligante com adição de óleo de linhaça que apresentou os melhores resultados. Utilizou-se para caracterização química por FTIR o ligante com incorporação de 4% de óleo de linhaça. A Figura 29 e 30 ilustra os resultados obtidos para Fluorescência por Transformada de Fourier-FTIR do ligante asfáltico CAP 50/70 puro, antes e após envelhecimento a curto prazo-RTFO.

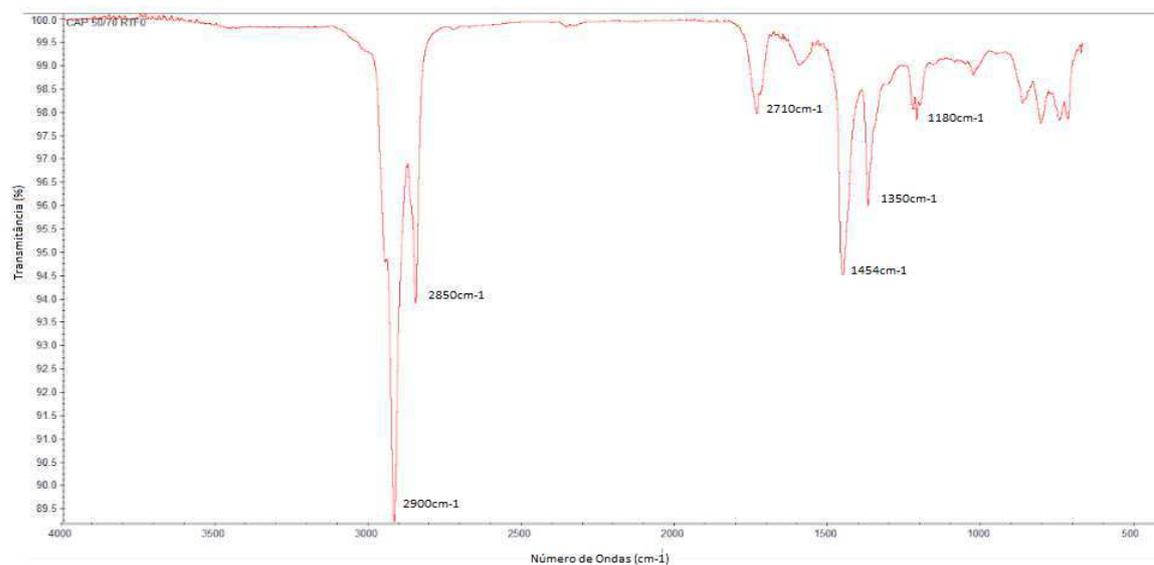
Figura 29: Fluorescência por Transformada de Fourier-FTIR do CAP 50/70 puro antes do RTFO.



FONTE: Dados da pesquisa (2018)

A Figura 30 ilustra os resultados obtidos para o ensaio de Fluorescência por Transformada de Fourier-FTIR do CAP 50/70 após RTFO.

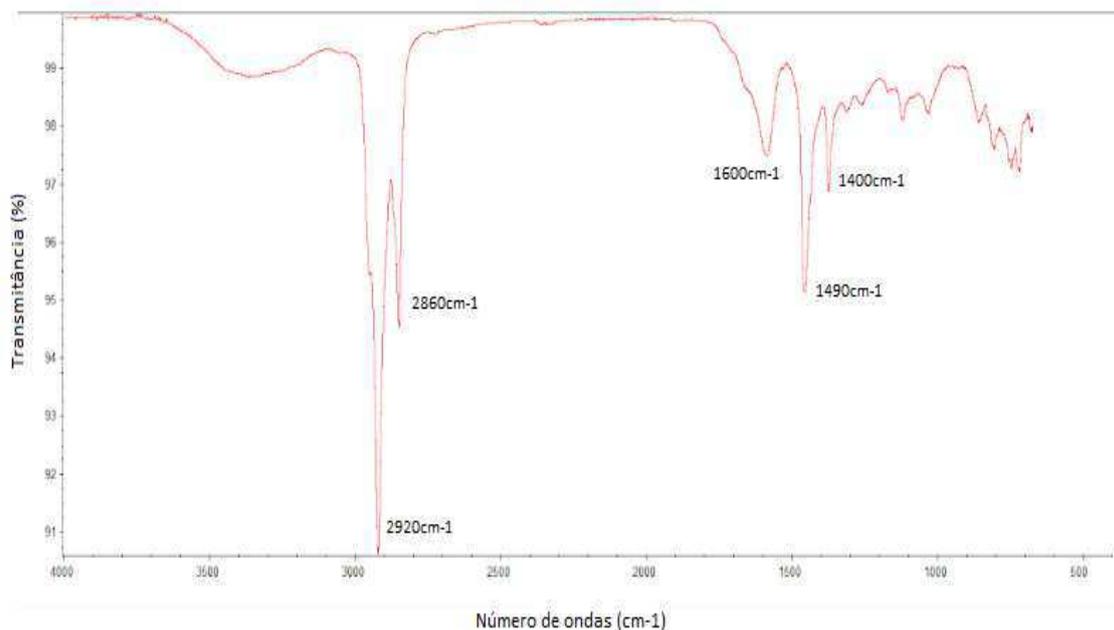
Figura 30: Fluorescência por Transformada de Fourier-FTIR do CAP 50/70 puro após RTFO.



FONTE: Dados da pesquisa (2018)

A Figura 31 e a Figura 32 ilustram os resultados obtidos para FTIR do CAP 50/70 com adição de 4% de óleo de linhaça antes e após envelhecimento a curto prazo- RTFO.

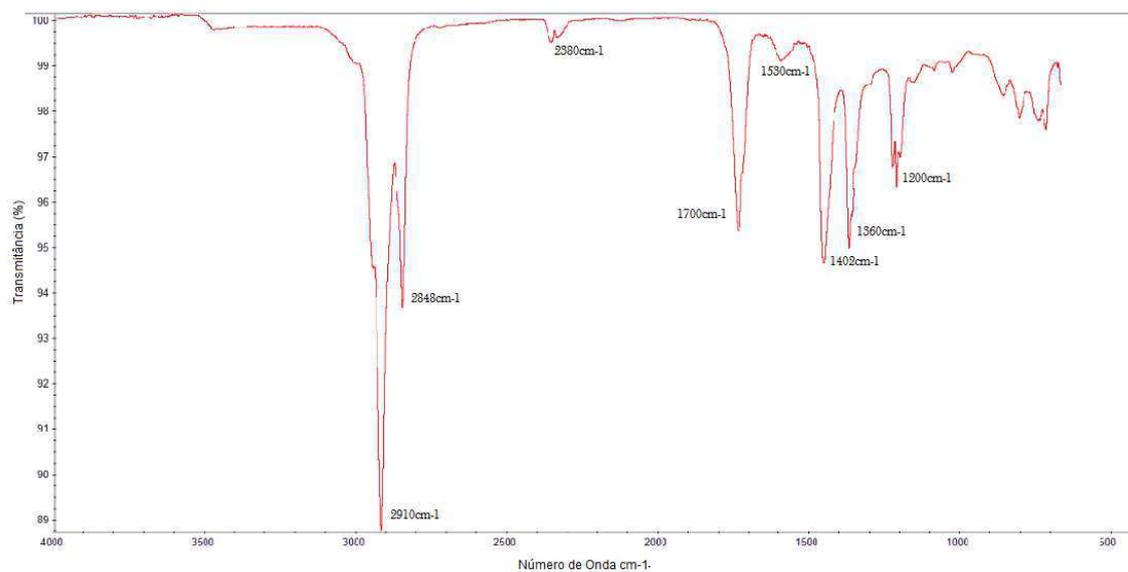
Figura 31: Fluorescência por Transformada de Fourier-FTIR do CAP 50/70 com adição de 4% de óleo de linhaça antes do RTFO.



FONTE: Dados da pesquisa (2018)

A Figura 32 ilustra os resultados obtidos para a CAP 50/70 com adição de 4% de óleo de linhaça após RTFO.

Figura 32: Fluorescência por Transformada de Fourier-FTIR do CAP 50/70 com adição de 4% de óleo de linhaça após RTFO.



FONTE: Dados da pesquisa (2018)

De acordo com os resultados obtidos para a Fluorescência por Transformada de Fourier do CAP 50/70 puro, podem-se destacar as principais bandas características do CAP, já amplamente discutidos na literatura

(ARTHUR, 1999, RAKI et. al., 2000; LAMONTAGNE et. al., 2001, OUYANG et. al., 2006, SILVA, 2005, DURRIEU et. al., 2007, FERNANDES, 2007, LIMA et. al., 2008, PIZZORNO, 2010, ARAÚJO, 2012, MOREIRA, 2013).

Observam-se nas Figuras 29 e 30, um dublete de absorção em 2921 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} indicando vibrações de estiramentos axiais de grupos CH_2 , CH_3 (alifático). Presença de banda em 1700 cm^{-1} a 1720 cm^{-1} , indicando vibrações de estiramento do grupo $\text{C}=\text{O}$, vibrações de $\text{C}-\text{H}$ em torno de 1376 cm^{-1} e 1460 cm^{-1} relacionados, respectivamente, a deformações assimétricas e simétricas de grupos metílicos.

O processo de envelhecimento para o CAP 50/70 puro, assinalado pela oxidação da amostra, ocasiona alterações na matriz do ligante que são verificadas no espectro de absorção no infravermelho (Figura 30), apresentando redução da profundidade do poço, no entanto o alargamento da banda de absorção em 1720 cm^{-1} do grupo carbonila ($\text{C}=\text{O}$), atribuindo-se a presença de compostos oxidados como ácidos carboxílicos, aldeídos e cetonas.

Para a Fluorescência por Transformada de Fourier do CAP 50/70 com adição de 4% de óleo de linhaça (Figuras 31 e 32), observa-se a presença de bandas características entre 2921 – 2853 cm^{-1} referentes a deformação axial de $\text{H}-\text{C}$ (saturado), 1700 cm^{-1} relativas à deformação axial da ligação $\text{C}=\text{O}$, banda em volta de 1600 cm^{-1} associada a $\text{C}=\text{C}$ de grupos aromáticos, em 1400 - 1580 cm^{-1} associada à deformação angular do grupo CH_2 . As vibrações em 1200 cm^{-1} , 1360 cm^{-1} são referentes a ligação éster no triacilglicerol, conforme relatam Fonseca & Yoshida (2009).

Observando a Figura 32, referente ao FTIR do ligante com adição de 4% de óleo de linhaça após RTFO, observa-se que ocorreu o consumo de compostos aromáticos, que se apresenta antes do envelhecimento através do pico em 1600 cm^{-1} , indicando que ocorreu oxidação do ligante.

Segundo Tia et. al. (1994) a razão da absorbância a 1700 cm^{-1} correspondente ao grupo $\text{C}=\text{O}$ e a 1600 cm^{-1} correspondente ao grupamento $\text{C}=\text{C}$ de aromáticos pode ser usada para expressar o nível de oxidação do ligante asfáltico.

A partir de FTIR pode-se também monitorar a evolução de bandas características de oxidação do ligante, como aquela em 1700 cm^{-1} , referente ao grupamento carbonila ou ainda em 1032 cm^{-1} , referente ao grupamento sulfóxido. Outras bandas também são de interesse, por exemplo, aquela em 1600 cm^{-1} , que é referente aos compostos aromáticos e cuja evolução mostra o consumo destes, no caso de uma oxidação (ARAÚJO, 2012).

Segundo Herrington (1995) os compostos sulfóxidos estão presentes no ligante asfáltico desde sua origem, mas também são formados durante o seu envelhecimento. De início a concentração de sulfóxido aumenta durante o processo de envelhecimento e a partir de um determinado período esta concentração pode diminuir, apontando assim que os sulfóxidos foram consumidos. Bandas em volta de 1032 cm^{-1} associadas a S=O de grupos sulfóxidos.

Observa-se que tanto para o CAP 50/70 puro, como para o CAP 50/70 com adição de 4% de óleo de linhaça antes do RTFO, há existência de picos por volta de 1032 cm^{-1} , característicos do grupo sulfóxido, no entanto, para o ligante com adição de 4% do aditivo em estudo, verifica-se que ocorreu o consumo do mesmo no processo de envelhecimento, indicando que o óleo de linhaça atuou como um antioxidante.

Assim, a verificação da formação e intensidade dos principais grupos funcionais relacionados ao envelhecimento, carbonila e sulfóxidos, mostrou que o papel do óleo de linhaça como antioxidante no ligante se fez presente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após os estudos referentes à adição do óleo de linhaça como componente do ligante asfáltico convencional, pôde-se chegar as seguintes considerações:

- O CAP 50/70 incorporado com óleo de linhaça se mostrou proveitoso em diversos aspectos físicos, porém, em quesito dos fatores normativos, propriedades como penetração e ponto de amolecimento ficam fora de padrões como se espera da adição de uma oleaginosa na composição, ou seja, tornando o ligante menos rígido e influenciando negativamente nos valores de ponto de amolecimento;
- O óleo de linhaça é um material natural com propriedades antioxidantes, fator este que adicionado ao ligante asfáltico convencional mostrou-se em concordância, pois a influência do envelhecimento denotou ligantes com baixa perda de massa, e ainda, em relação a viscosidade, o índice de envelhecimento mostrou que teores de modificação em certa faixa (1% a 3%) conseguiu resultados de menores suscetibilidades ao envelhecimento em relação ao CAP 50/70;
- Com relação às temperaturas de compactação e usinagem, foi visto que o emprego do óleo de linhaça em ligantes asfálticos causa a redução destas temperaturas em valores que superaram 15°C, porém, a logística resulta que o emprego do óleo de linhaça em maior quantidade pode refletir em maior redução, mas é sabido que ao aumentar os teores, o ligante passa a perder parte de suas propriedades;
- A diminuição das temperaturas referentes ao processo de produção das misturas asfálticas é importante, pois podem proporcionar diminuição em consumos de combustível e emissão de poluentes, fatores estes que agradam esferas econômicas e ambientais;
- A Fluorescência por transformada de Fourier indicou que a adição do óleo de linhaça ao ligante asfáltico contribuiu para manutenção de suas propriedades frente ao envelhecimento a curto prazo-RTFO, podendo inferir que o mesmo atuou como um antioxidante.

6. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Análises químicas elaboradas do óleo de linhaça e tentativa de descrição detalhada da influência do mesmo quando incorporado ao ligante asfáltico;
- Estudos de análise química e física dos CAPs com maiores rigidezes (CAP 15/25, CAP 30/45) incorporados com óleo de linhaça na tentativa de o material não ser tão suscetível a perda de rigidez;
- Estudos de incorporações em teores diferentes para buscar o teor ótimo de adição, e ainda, estudar a composição de dois ou mais aditivos e realizar a proporção ótimas destes;
- Estudo mecânico do CAP convencional incorporado com óleo de linhaça para corroborar com dados químicos e físicos existentes em pesquisas já realizadas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT **NBR 7207** – Terminologia e classificação de pavimentação, 1982.

ARAUJO, M. F. A. (2012) **Efeito da radiação solar no envelhecimento do concreto betuminoso usinado a quente**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP, Belo Horizonte/BH.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: materiais, projetos e restauração**. Oficina de Texto. São Paulo, 2007.

BERNUCCI, L. B.; DA MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBÁS: ABEDA, 2006. 504f. Edição ano 2008.

CASTRO, H. F. **Papel e Celulose**. 2009. 30 f. Apostila 4 (Disciplina Processos Químicos Industriais II). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena, Lorena, 2009.

CAVALCANTE, F. P. **Efeito da adição de óleo de ricinus communis e linus usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB, 2016.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas, São Paulo. Editora da Unicamp, 2009.

COSTA, D. B.; CAVALCANTE, F. P.; RODRIGUES, J. K. G.; MENDONÇA, A. M. G. D.; CÂNDIDO, T. G. **Influência da adição de óleo de linhaça no cimento asfáltico de petróleo**. I Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2015.

DA SILVA, C. L. A. **Alternativa ao uso do asfalto a quente visando a redução da energia consumida durante sua execução**. Programa de pós-graduação em engenharia de recursos. Manaus, 2010.

DE ARAÚJO, F. **Aditivo polimérico derivado de fonte renovável para aplicação em cimento asfáltico de petróleo**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2016.

DE MEDEIROS, A. R. B. **Uso de ATR/FTIR e FTNIR associado a técnicas quimiométricas para quantificação de aditivos em gasolina automotiva**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, 2009.

DE OLIVEIRA, M. D. **Utilização de resíduos em pavimentação rodoviária**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

FERNANDES, P. R. N. **Caracterização de ligante asfáltico brasileiro e avaliação da presença de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs).** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2007.

FONSECA, M. M., YOSHIDA, M. I. **Análise térmica do óleo de linhaça natural e oxidado Thermal analysis of raw and aged linseed oil.** Revista Vértices periódica técnico-científica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense (IFF), Campos dos Goytacazes/RJ, 2009.

GALVÃO, E. L.; SILVA, D. C. F.; SILVA, J. O.; MOREIRA, A. V. B.; SOUSA, E. M. B. D. **Avaliação do potencial antioxidante e extração subcrítica do óleo de linhaça.** Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2009.

GUIMARÃES, D. H. **Efeito da adição de lignina nas propriedades físico-químicas e mecânicas de poliésteres a base de glicerol e ácidos ftálico e adípico.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2014.

GUNER, F. S.; YAGCI, Y.; ERCIYES, A. T. **Progress in Polymer Science.** 2006.

HERRINGTON, P.R. e BALL, G.F.A. **Temperature Dependence of Asphalt Oxidation Mechanism.** Fuel. 1996, Vol. 75, pp. 1129-1131. 1996.

LAMONTAGNE, Jérôme , DUNAS, P.; MOIULIET, V.; KISTER, J. **Comparison by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques: Application to road bitumens.** Fuel 80(4):483-488. March 2001.

LEITE, L. F. M. **Curso básico intensivo de pavimentação urbana (Módulo Básico) ligantes asfálticos.** Rio de Janeiro, 2003.

LESUEUR, D. **Evidence of the Colloidal Structure of Bitumen.** International Workshop on Chemo-Mechanics of Bituminous Materials, 2009.

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

LONGUE JÚNIOR, D.; COLODETTE, J. L. **Importância e versatilidade da madeira de eucalipto para a indústria de base florestal.** Universidade Federal de Viçosa, Laboratório de Celulose e Papel, 2013.

MARTINI, D. S.; **Polímeros derivados do biodiesel do óleo de linhaça: obtenção e propriedades físico químicas.** Tese de Doutorado. Pós-Graduação em Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

MEDEIROS, A. R. B. **Uso de ATR/FTIR e FTNIR associado a técnicas quimiométricas para quantificação de aditivos em gasolina automotiva.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, 2009.

MESQUITA, J. C. L. **Pavimento rígido como alternativa econômica para pavimentação rodoviária. Estudo de Caso – Rodovia BR-262, Miranda – Morro do Azeite – MS.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

MOTHÉ, M. G. **Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

NEGRÃO, D. P. **Estudo de asfaltos modificados por polímeros do tipo RET para aplicações em pavimentos.** Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

PEREIRA, J. M. da S. **Análise de meteoritos por espectrometria de massa (252Cf-PDMS) e for espectroscopias de Raios X e de infravermelho (XRD, XRF, PIXE, FTIR, Raman).** Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Física da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Rio de Janeiro, 2015.

PINTO, M. F. **Estudo de ligantes e misturas asfálticas com nanomodificadores, polímeros e resíduos.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

PIZZORNO, B. S. **Efeito do solvente e da temperatura na morfologia superficial do cimento asfáltico de petróleo.** Dissertação de Mestrado. Universidade federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 2010.

RAKI, L.; MASSON, J. F.; COLLINS, P. **Rapid bulk fractionation of maltenes into saturates, aromatics, and resins by flash chromatography.** Energy & Fuels, v.14, p. 160-163, 2000.

RODRIGUES, J. L. A. **Concepção de Pavimentos Rígidos.** Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2011.

ROSA JÚNIOR, J. M. **Estudo das propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70) modificado com polímeros funcionalizados.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2015.

SALA, O. **Fundamentos da espectroscopia Raman e no Infravermelho.** Editora Unesp: São Paulo, 1996.

SILVA, L. S. **Contribuição ao Estudo do Envelhecimento de Ligantes Asfálticos. Influência da Adição de Polímeros e Comportamento Frente a Radiação UV.** Tese Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre/RS, 2005.

SILVA, R. V. et al. **Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos.** Química nova, 2009.

SOBREIRO, F. P. **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, 2014.

STUART, B. H. **Analytical Techniques in Materials Conservation.** John Wiley e Sons. Chichester, 2007.

TIA, M., et al. **Improved Asphalt Cement Specifications to Ensure Better Performance.** [ed.] Dept. of Civil Engineering. Gainesville : University of Florida, 1994.

TURATTI, J. M. **Óleos e Grãos.** 2000.

WHITEOAK, D. **Shell Bitumen Handbook.** Shell, Inglaterra. 1990.

ZEGARRA, J. R. E. **Avaliação de misturas produzidas com ligantes asfálticos peruanos convencionais PEN 60/70 e modificados por polímeros SBS tipo I 60/60 e PG 76-22.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2007.

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

Anexo A: Resultados do ensaio de Penetração antes do RTFO.

ENSAIO DE PENETRAÇÃO - ANTES RTFO							
Leituras	CAP 50/70	1% ÓLEO DE LINHAÇA	2% ÓLEO DE LINHAÇA	3% ÓLEO DE LINHAÇA	4% ÓLEO DE LINHAÇA	5% ÓLEO DE LINHAÇA	6% ÓLEO DE LINHAÇA
L1	65,0	82,0	87,0	103,0	114,0	131,0	139,0
L2	67,0	84,0	84,0	105,0	114,0	125,0	132,0
L3	64,0	83,0	87,0	107,0	111,0	132,0	134,0
MÉDIA	65,33	83,00	86,00	105,00	113,00	129,33	135,00

FONTE: Própria (2018).

Anexo B: Resultados do ensaio de Penetração após o RTFO.

ENSAIO DE PENETRAÇÃO - APÓS RTFO							
Leituras	CAP 50/70	1% ÓLEO DE LINHAÇA	2% ÓLEO DE LINHAÇA	3% ÓLEO DE LINHAÇA	4% ÓLEO DE LINHAÇA	5% ÓLEO DE LINHAÇA	6% ÓLEO DE LINHAÇA
L1	45,00	51,50	60,00	68,00	67,00	79,00	92,00
L2	47,00	50,00	62,00	65,50	70,00	79,00	92,00
L3	45,00	54,00	61,50	68,00	73,00	81,00	94,00
MÉDIA	45,67	51,83	61,17	67,17	70,00	79,67	92,67

FONTE: Própria (2018).

Anexo C: Resultados da Penetração Retida.

RESULTADOS PENETRAÇÃO - DNIT 095/2006			Penetração Retida
RTFO	ANTES	APÓS	55%
CAP 50/70	65,33	45,67	69,9%
1% ÓLEO DE LINHAÇA	83,00	51,83	62,4%
2% ÓLEO DE LINHAÇA	86,00	61,17	71,1%
3% ÓLEO DE LINHAÇA	105,00	67,17	64,0%
4% ÓLEO DE LINHAÇA	113,00	70,00	61,9%
5% ÓLEO DE LINHAÇA	129,33	79,67	61,6%
6% ÓLEO DE LINHAÇA	135,00	92,67	68,6%

FONTE: Própria (2018).

Anexo D: Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento antes do RTFO.

ENSAIO DE PONTO DE AMOLECIMENTO - ANTES RTFO							
Leituras	CAP 50/70	1% ÓLEO DE LINHAÇA	2% ÓLEO DE LINHAÇA	3% ÓLEO DE LINHAÇA	4% ÓLEO DE LINHAÇA	5% ÓLEO DE LINHAÇA	6% ÓLEO DE LINHAÇA
L1	48,0	44,0	42,5	41,0	40,5	37,0	35,5
L2	48,5	44,0	43,0	41,5	40,0	37,5	35,7
MÉDIA	48,25	44,00	42,75	41,25	40,25	37,25	35,60

FONTE: Própria (2018).

Anexo E: Resultados do ensaio de Ponto de Amolecimento após o RTFO.

ENSAIO DE PONTO DE AMOLECIMENTO - APÓS RTFO							
Leituras	CAP 50/70	1% ÓLEO DE LINHAÇA	2% ÓLEO DE LINHAÇA	3% ÓLEO DE LINHAÇA	4% ÓLEO DE LINHAÇA	5% ÓLEO DE LINHAÇA	6% ÓLEO DE LINHAÇA
L1	52,50	52,00	51,00	50,00	46,50	46,00	45,00
L2	53,00	52,00	51,50	51,00	47,00	46,50	44,50
MÉDIA	52,75	52,00	51,25	50,50	46,75	46,25	44,75

FONTE: Própria (2018).

Anexo F: Resultados da Variação do Ponto de Amolecimento.

RESULTADOS AMOLECIMENTO - DNIT 095/2006			Variação Máxima
RTFO	ANTES	APÓS	8,00
CAP 50/70	48,25	52,75	4,50
1% ÓLEO DE LINHAÇA	44,00	52,00	8,00
2% ÓLEO DE LINHAÇA	42,75	51,25	8,50
3% ÓLEO DE LINHAÇA	41,25	50,50	9,25
4% ÓLEO DE LINHAÇA	40,25	46,75	6,50
5% ÓLEO DE LINHAÇA	37,25	46,25	9,00
6% ÓLEO DE LINHAÇA	35,60	44,75	9,15

FONTE: Própria (2018).

Anexo G: Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional antes do RTFO.

ENSAIO DE VISCOSIDADE ROTACIONAL (cP) - ANTES RTFO							
Leituras	CAP 50/70	1% ÓLEO DE LINHAÇA	2% ÓLEO DE LINHAÇA	3% ÓLEO DE LINHAÇA	4% ÓLEO DE LINHAÇA	5% ÓLEO DE LINHAÇA	6% ÓLEO DE LINHAÇA
Amostra 1 (135°C)	450,00	435,00	398,00	350,00	322,00	295,00	270,00
Amostra 2 (135°C)	460,00	419,00	398,00	359,00	307,50	285,00	250,00
Amostra 1 (150°C)	220,00	230,00	196,00	180,00	167,00	150,00	138,50
Amostra 2 (150°C)	223,00	240,00	194,00	178,00	161,00	155,00	139,50
Amostra 1 (177°C)	85,00	74,00	65,00	65,00	65,00	61,00	56,50
Amostra 2 (177°C)	73,00	70,00	76,00	66,00	61,50	59,00	56,00

FONTE: Própria (2018).

Anexo G: Resultados do ensaio de Viscosidade Rotacional após o RTFO.

ENSAIO DE VISCOSIDADE ROTACIONAL (cP) - DEPOIS RTFO							
Leituras	CAP 50/70	1% ÓLEO DE LINHAÇA	2% ÓLEO DE LINHAÇA	3% ÓLEO DE LINHAÇA	4% ÓLEO DE LINHAÇA	5% ÓLEO DE LINHAÇA	6% ÓLEO DE LINHAÇA
Amostra 1 (135°C)	665,00	595,00	550,00	487,00	470,00	475,00	390,00
Amostra 2 (135°C)	615,00	590,00	518,00	487,00	462,50	425,00	410,00
Amostra 1 (150°C)	290,00	280,00	263,00	238,00	235,00	236,00	207,00
Amostra 2 (150°C)	307,00	290,00	260,00	237,00	230,00	215,00	209,00
Amostra 1 (177°C)	100,00	97,50	80,00	80,00	85,00	81,00	79,00
Amostra 2 (177°C)	103,00	97,50	88,00	85,00	83,50	79,50	74,00

FONTE: Própria (2018).

Anexo G: Resultados das perdas de massa após o envelhecimento.

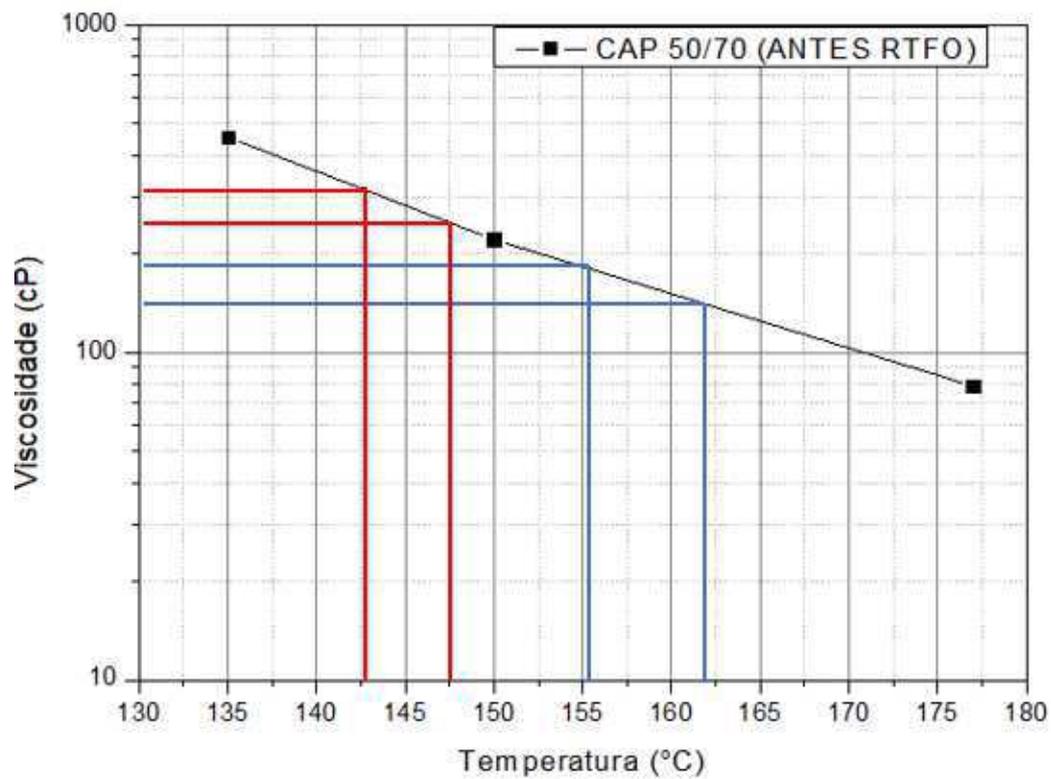
PERDA DE MASSA DEVIDO AO PROCESSO DE ENVELHECIMENTO			
TEORES	ANTES DO RTFO	DEPOIS DO RTFO	Perda Média (%)
CAP 50/70	222,10	221,70	0,11
	223,60	223,20	
	218,50	218,30	
	221,10	220,80	
	221,40	221,20	
	220,50	220,20	
	221,10	221,00	
	225,10	225,00	
CAP 50/70 + 1%	223,40	223,00	0,09

ÓLEO DE LINHAÇA	225,70	225,40	
	218,40	218,20	
	220,80	220,80	
	219,90	219,70	
	221,40	221,00	
	219,70	219,60	
CAP 50/70 + 2% ÓLEO DE LINHAÇA	220,60	220,50	0,09
	224,60	224,30	
	220,70	220,50	
	220,90	220,70	
	221,50	221,30	
CAP 50/70 + 3% ÓLEO DE LINHAÇA	223,90	223,80	0,07
	218,70	218,30	
	226,30	226,20	
	220,40	220,30	
	222,00	221,90	
	219,90	219,70	
	221,20	221,10	
CAP 50/70 + 4% ÓLEO DE LINHAÇA	224,80	224,60	0,06
	226,50	226,20	
	219,70	219,50	
	220,70	220,60	
	220,20	218,20	
	220,80	220,80	
	218,30	220,20	
CAP + 5% ÓLEO DE LINHAÇA	223,90	223,80	0,05
	218,70	218,30	
	226,30	226,60	
	220,40	220,60	
	221,00	220,90	
	219,90	219,30	
	221,20	221,10	
CAP 50/70 + 6% ÓLEO DE LINHAÇA	223,20	223,10	0,05
	226,30	226,00	
	221,40	221,20	
	220,80	220,80	
	217,60	217,60	
	222,70	222,70	
	220,00	219,80	

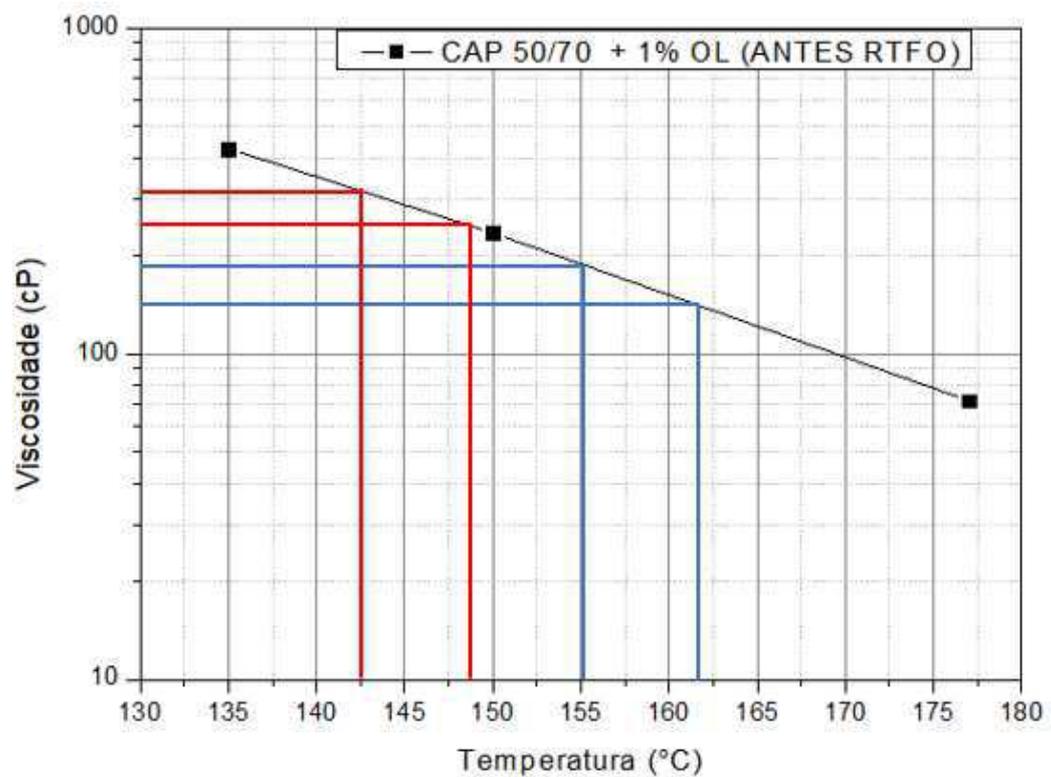
FONTE: Própria (2018).

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

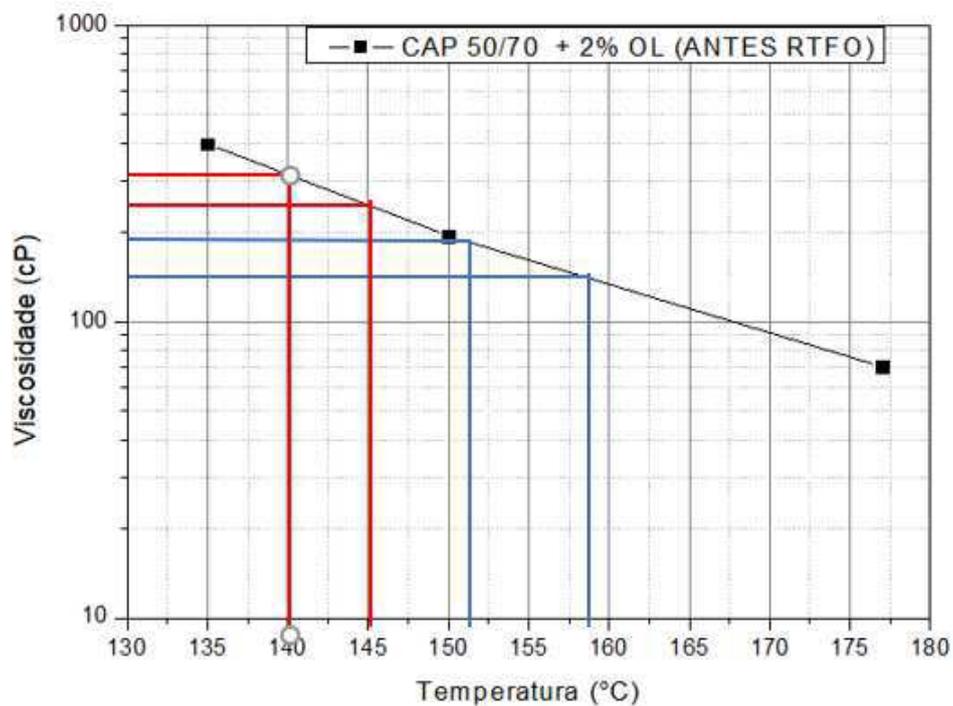
Anexo H: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 não envelhecido.



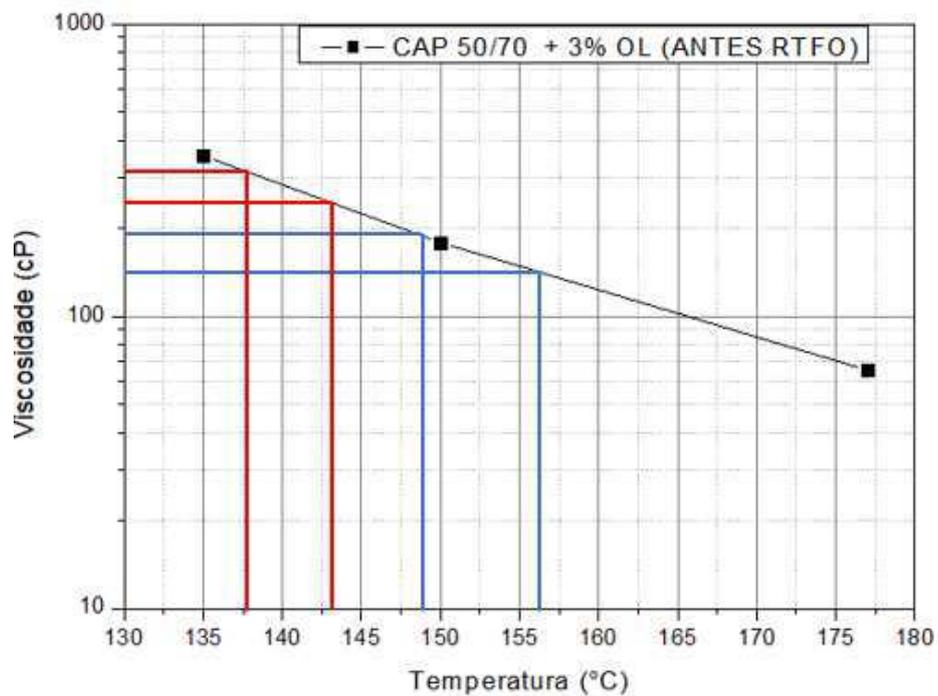
Anexo I: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 + 1% de Óleo de Linha não envelhecido.



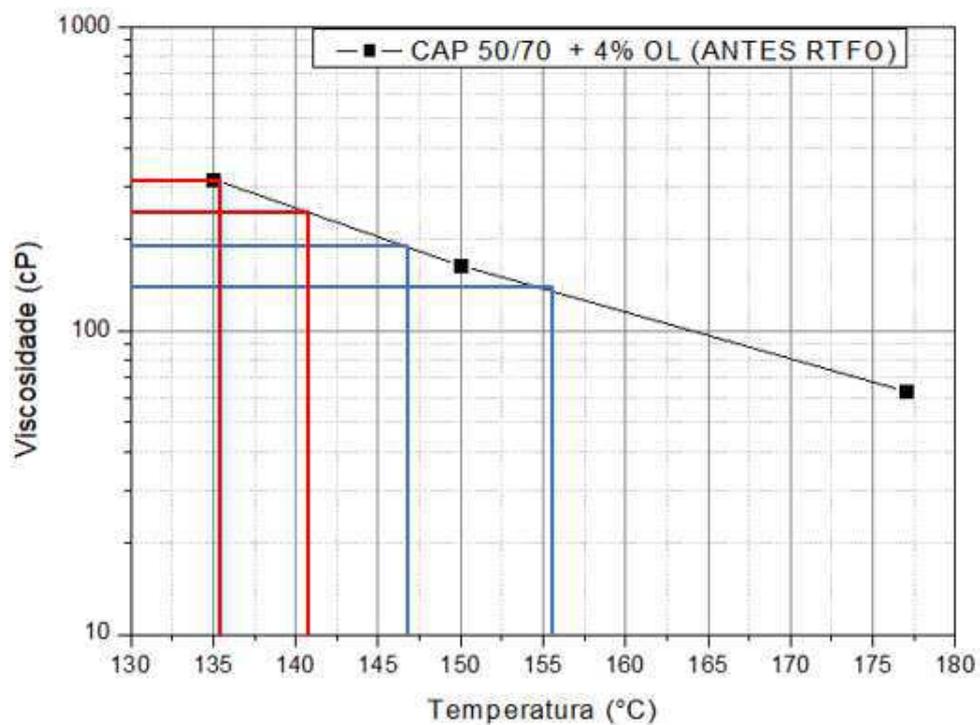
Anexo J: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 + 2% de Óleo de Linhaça não envelhecido.



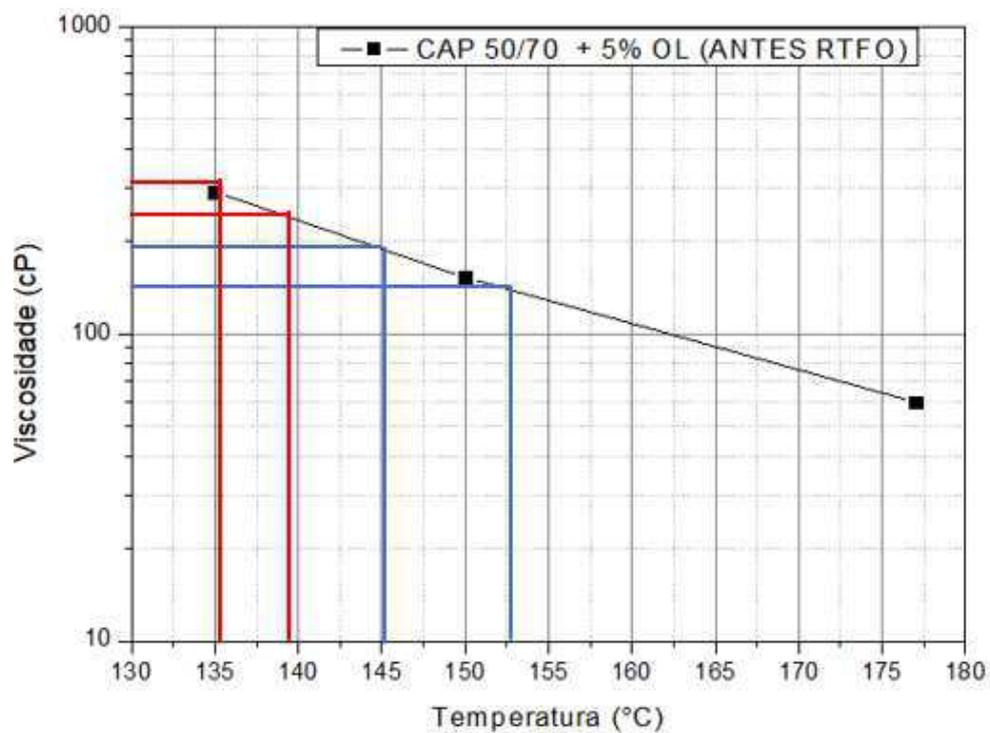
Anexo K: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 + 1% de Óleo de Linhaça não envelhecido.



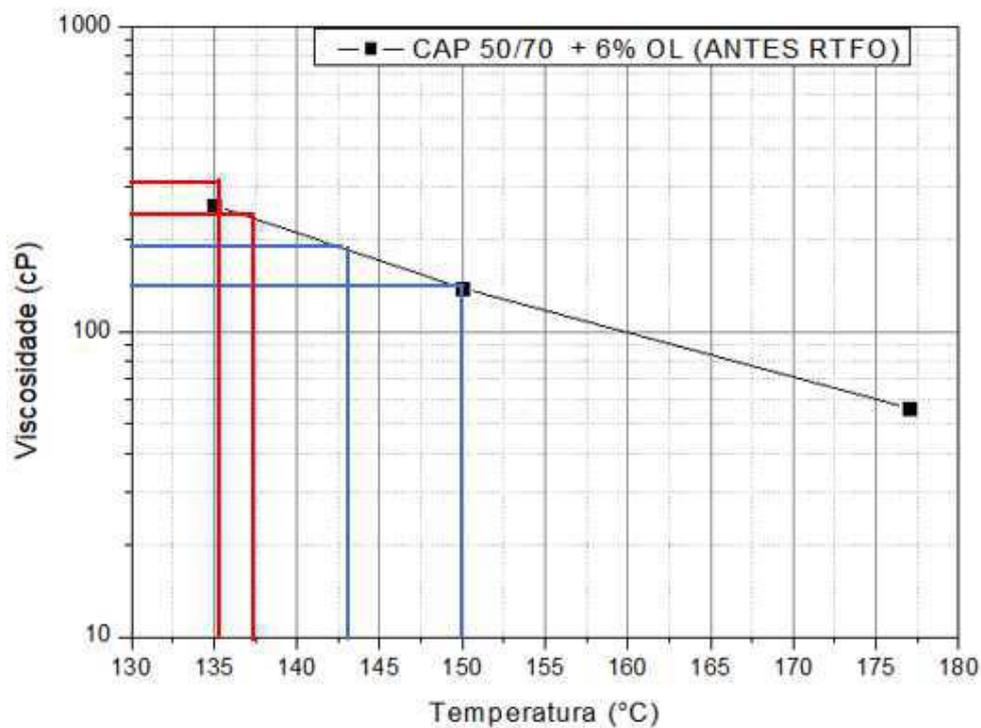
Anexo L: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 + 4% de Óleo de Linhaça não envelhecido.



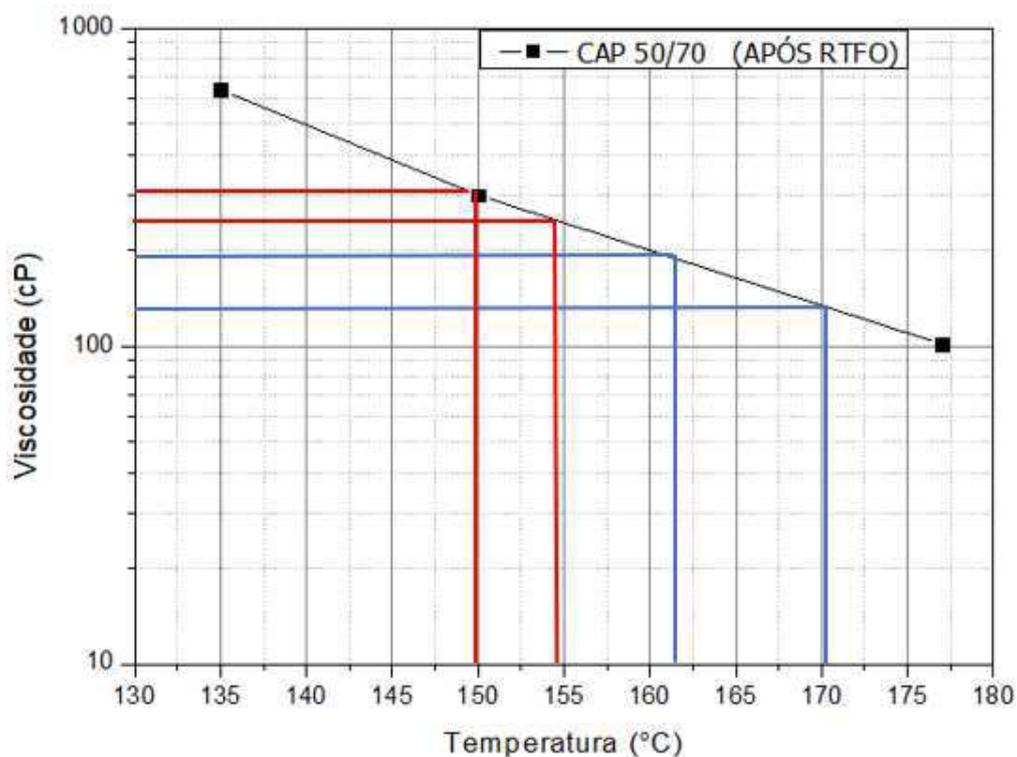
Anexo M: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 + 5% de Óleo de Linhaça não envelhecido.



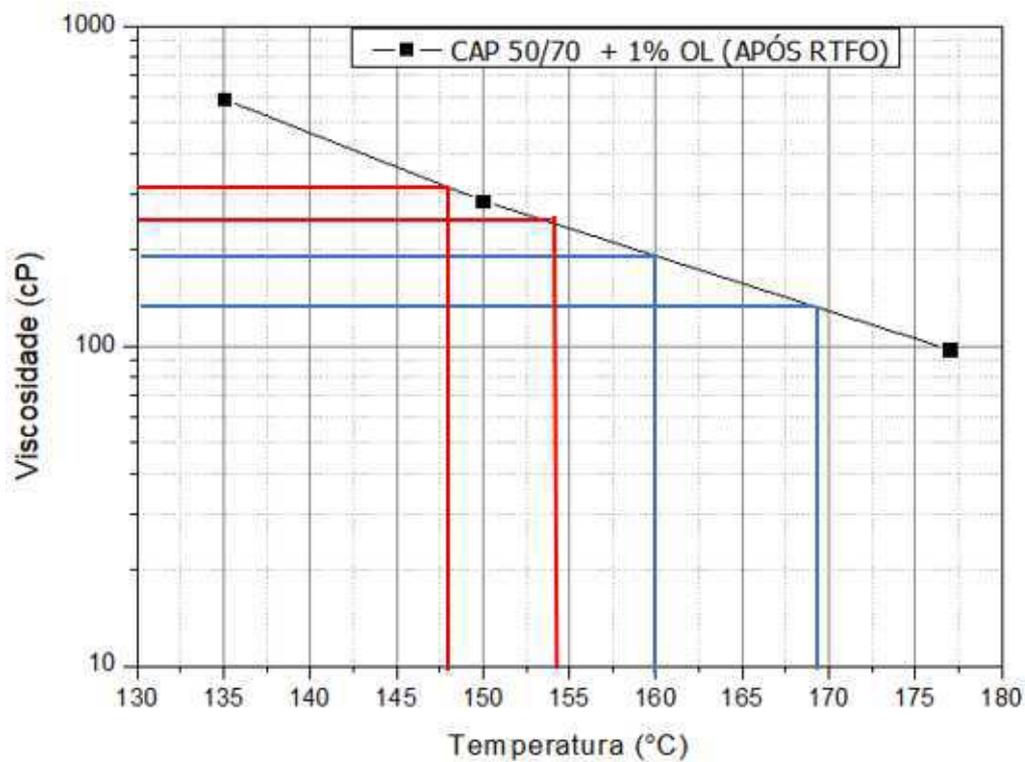
Anexo N: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 + 1% de Óleo de Linhaça não envelhecido.



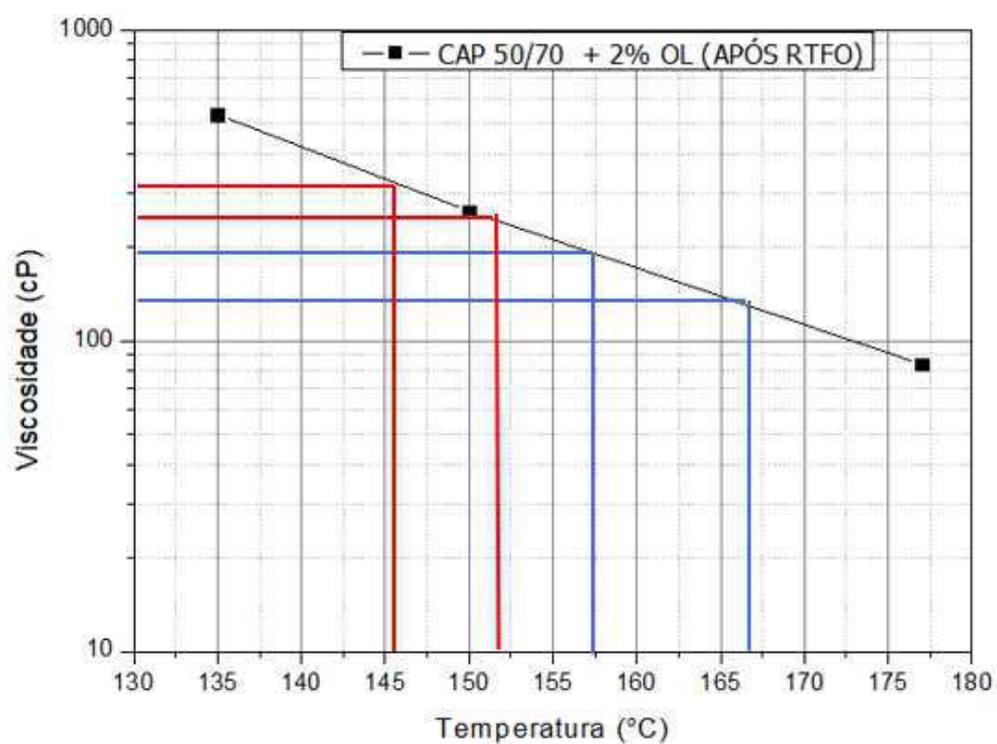
Anexo O: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 + 1% envelhecido.



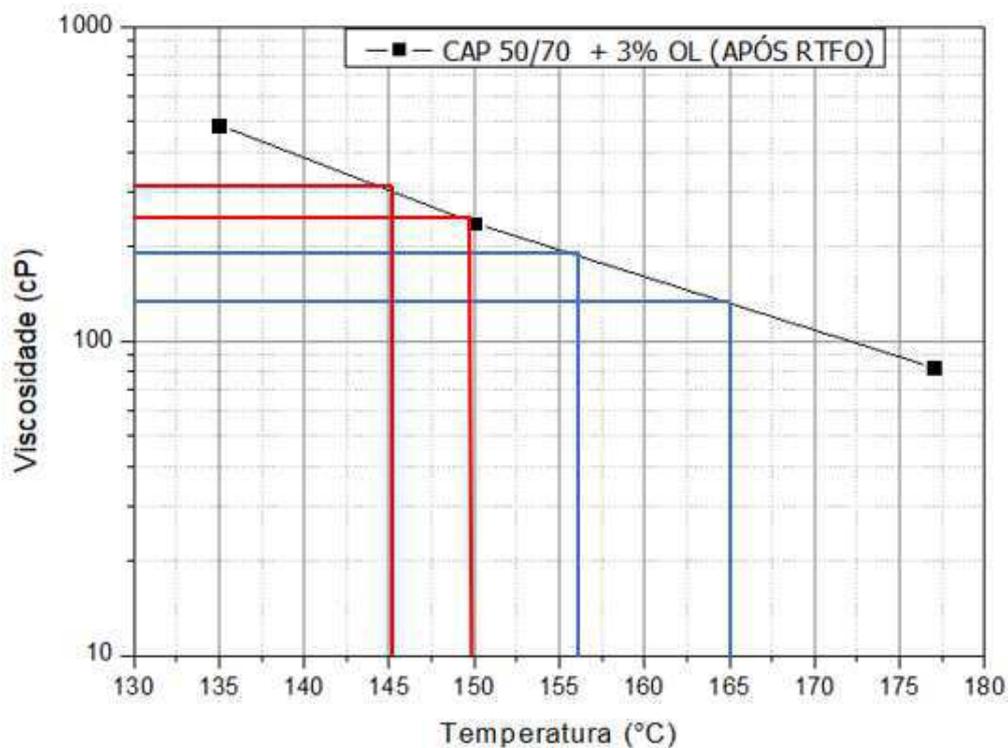
Anexo P: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 + 1% de Óleo de Linhaça envelhecido.



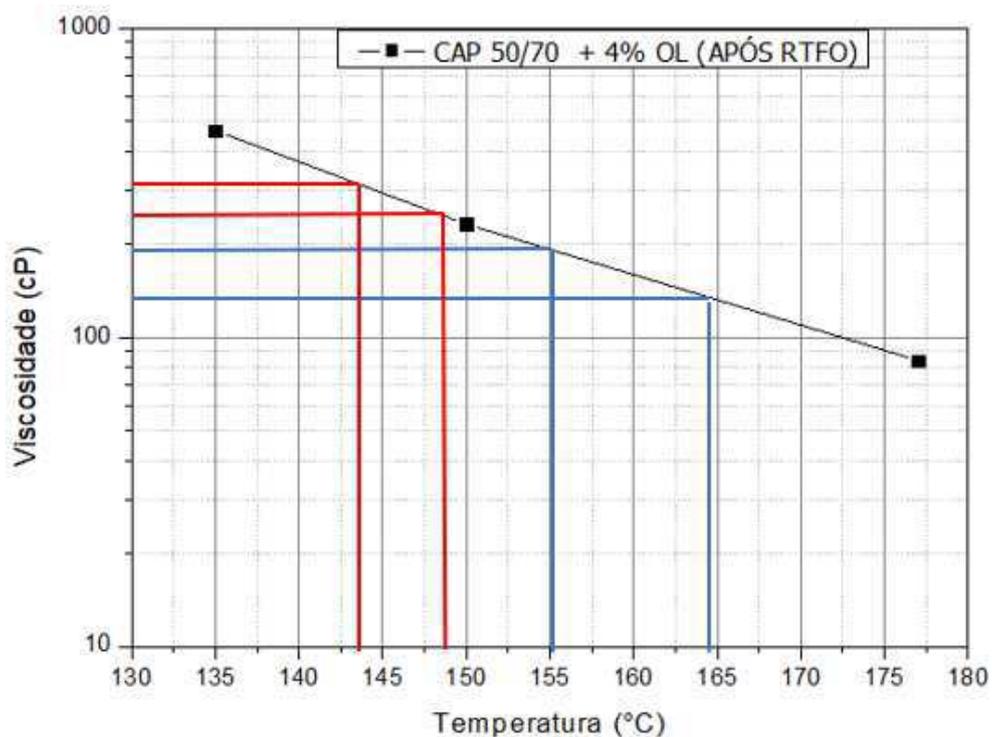
Anexo Q: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 + 2% de Óleo de Linhaça envelhecido.



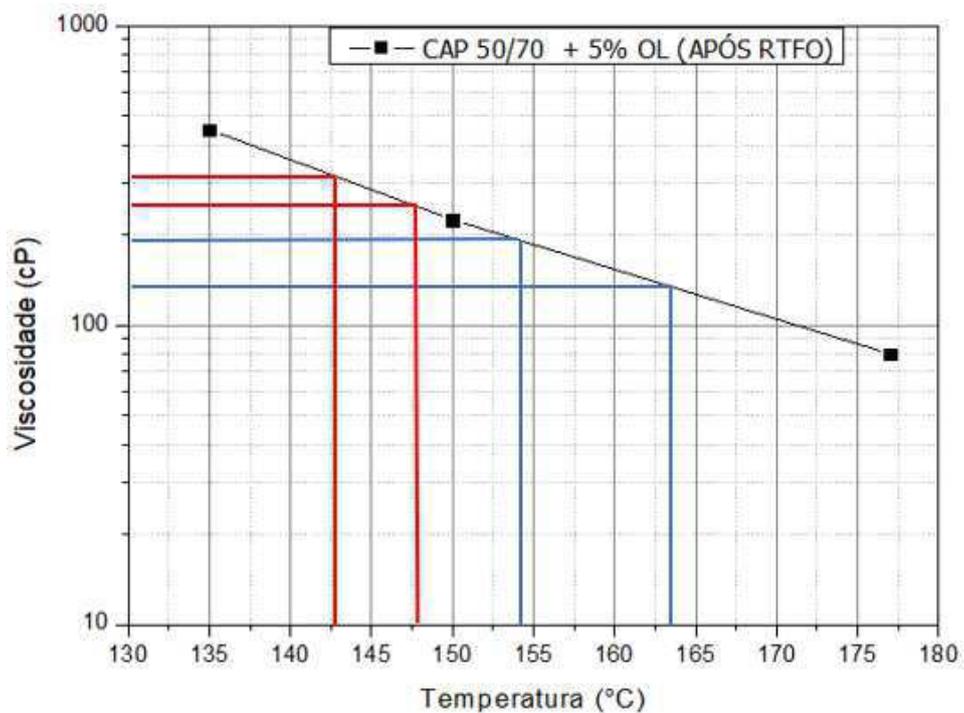
Anexo R: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 + 3% de Óleo de Linhaça envelhecido.



Anexo S: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 + 4% de Óleo de Linhaça envelhecido.



Anexo T: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 + 5% de Óleo de Linhaça envelhecido.



Anexo U: Gráfico dos intervalos das TCU para o CAP 50/70 + 6% de Óleo de Linhaça envelhecido.

