



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

**AVALIAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO, ÂNGULO DE FASE E
VISCOSIDADE POR MEIO DAS CURVAS-MESTRE DO LIGANTE
ASFÁLTICO CAP 50/70 MODIFICADO POR ÓLEO DE LINHAÇA**

DJALMA QUEIROGA DE ASSIS NETO

Orientadores: Carina Silvani
Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça.

Campina Grande-PB, 14/12/2018.

**AVALIAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO, ÂNGULO DE FASE
E VISCOSIDADE POR MEIO DAS CURVAS-MESTRE DO
LIGANTE ASFÁLTICO CAP 50/70 MODIFICADO POR ÓLEO
DE LINHAÇA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Campina Grande-PB, 14/12/2018

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

DJALMA QUEIROGA DE ASSIS NETO

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: Geotecnia.

Sub-área: Pavimentação.

Orientadores: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

Dr^a Carina Silvani

CAMPINA GRANDE – PB

Dezembro de 2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

DJALMA QUEIROGA DE ASSIS NETO

**AVALIAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO, ÂNGULO DE FASE E
VISCOSIDADE POR MEIO DAS CURVAS-MESTRE DO LIGANTE
ASFÁLTICO CAP 50/70 MODIFICADO POR ÓLEO DE LINHAÇA**

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

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

Aprovado

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

Aline F. N. de Azeredo
Prof.^a. Dr.^a Aline F. Nóbrega de Azeredo
Membro Interno
Dr.^a em Engenharia Civil - UFPE
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Aprovado

Tássila Ramos Porto
Tássila Ramos Porto
Membro Externo
Mestranda em Eng. Civil e Ambiental - UFCG
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Aprovado

Aline Dayana A. de L. Marcelino
Aline Dayana Alves de Lima Marcelino
Examinador Externo
Doutoranda em Agronomia - UFPB
Departamento de Agronomia
Universidade Federal da Paraíba

Aprovado

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Djalma Queiroga e Fábria Queiroga, que construíram o caminho para eu chegar onde estou, me dando as ferramentas para eu descobrir minha vocação como engenheiro civil.

À minha orientadora, Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça, por ter sido sempre paciente e disposta a me ajudar nessa jornada.

À minha tia Francisca Reijane Queiroga, por toda a ajuda que me proporcionou e continua proporcionando na minha jornada acadêmica.

À Renan Fernandes, que sempre me ajudou nas horas difíceis dessa jornada acadêmica.

Aos meus amigos Caio Baima e Willian Eduardo, que fizeram esse tempo de estudo e dedicação ser mais prazeroso.

Aos professores que construíram minha formação nessa jornada.

À todos os amigos que conquistei ao longo desses anos de graduação.

EPIGRAFE

“My name is Ozymandias, king of kings:
Look on my works, ye mighty, and despair!”

Nothing beside remains: round the decay
Of that colossal wreck, boundless and bare,
The lone and level sands stretch far away. ”

Ozymandias, Percy Bysshe Shelley, 1818

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Djalma e Fábria, por fazer o possível e o impossível para que eu tivesse a oportunidade de seguir meu sonho.

Obrigado pela dedicação e amor que sempre me deram.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma simplificado do processo de obtenção do asfalto.....	19
Figura 2: Ligante Asfáltico CAP 50/70.....	21
Figura 3: Esquema das principais etapas do fracionamento do ligante asfáltico.....	24
Figura 4: Representação da composição química das frações do asfalto.....	25
Figura 5: Frações de um ligante antes e após o envelhecimento.....	26
Figura 6: Curva mestre na temperatura de 25°C, para o CAP 50/70.....	29
Figura 7: Variações de flores de Linho.....	32
Figura 8: Variedades da linhaça: Marrom e dourada.....	32
Figura 9: Posições nas cadeias graxas mais propensas à oxidação.....	35
Figura 10: Diferença de interação: Ácido esteárico C18:0, Ácido oleico C18:1, Ácido oleico C18:2.....	35
Figura 11: CAP 50/70.....	36
Figura 12: Óleo de Linhaça.....	36
Figura 13: Misturador Mecânico – LEP/DEC/UFCG.....	38
Figura 14: Reômetro de Cisalhamento Dinâmico.....	39
Figura 15: Curva Mestre da Viscosidade Complexa.....	41
Figura 16: Curva Mestre do Módulo Complexo.....	43
Figura 17: Curva Mestre do Ângulo de Fase.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo.....	22
Tabela 2: Materiais mais usados como modificadores de asfalto nos Estados Unidos.....	30
Tabela 3: Composição típica de ácidos graxos no óleo de linhaça natural.....	33
Tabela 4: Índice de oxidação para os óleos vegetais.....	34
Tabela 5: Características do óleo de Linhaça.....	37
Tabela 6: Viscosidade complexa versus frequência.....	42
Tabela 7: Módulo complexo versus frequência.....	43
Tabela 8: Ângulo de fase versus frequência.....	45

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

δ – Ângulo de fase

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials

ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia

CA - Concreto Asfáltico

CAP – Cimento asfáltico de petróleo

CBUQ - Concreto Betuminoso Usinado a Quente

CENPES - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Américo Leopoldo Miguez de Mello

DEC – Departamento de Engenharia Civil

G* - Módulo Complexo de cisalhamento

IO - Índice de Oxidação

IST - Índice de Suscetibilidade Térmica

LEP – Laboratório de Engenharia de Pavimentos

SARA - Saturados, Aromáticos, Resinas, Asfaltenos

SDG - Diglicosídeo Secoisolariciresinol

SUPERPAVE - Superior Performing Asphalt Pavements

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande

RESUMO

As rodovias constituem um dos principais sistemas de transporte utilizados para o deslocamento de pessoas e bens. Entretanto, nas últimas décadas, o aumento do volume de tráfego, das cargas transportadas por eixo e da pressão dos pneus, tem ocasionado a degradação prematura dos revestimentos asfálticos. As patologias existentes são originárias do mau uso da via devido a grandes solicitações para as quais o pavimento não foi projetado, de deficiências na execução do processo construtivo, do emprego de materiais com propriedades insuficientes para atender à necessidade, e ainda das condições climáticas atuantes. Assim, a utilização de ligantes asfálticos modificados objetiva melhorar as propriedades físicas e reológicas do pavimento. Este estudo objetiva avaliar o efeito da adição de óleo de linhaça ao CAP 50/70 no teor de 3%. Foi avaliado o comportamento do ligante modificado por adição de óleo de linhaça através do ensaio reológico de curva mestre para aferir os parâmetros de módulo complexo, ângulo de fase e viscosidade. A partir dos resultados, foi observado que o CAP modificado apresentou uma diminuição no módulo complexo, tornando o ligante mais fluido, porém menos resistente. Em relação ao ângulo de fase, a modificação fez com que o mesmo diminuísse a baixas frequências, porém convergindo com o CAP virgem em frequências maiores. E na análise da viscosidade a modificação o tornou menos viscoso, o que acaba por diminuir sua temperatura de usinagem. Assim, o óleo de linhaça se mostrou uma alternativa viável e sustentável para melhoria das propriedades reológicas de ligantes asfálticos.

PALAVRAS-CHAVE: Pavimento, modificador, propriedades.

ABSTRACT

Roads are one of the main transportation systems used for the movement of people and goods. However, in recent decades, the increase in traffic volume, axle loads and tire pressure has led to the premature degradation of asphalt coatings. The existing pathologies originates from the bad use of the road due to large requests for which the pavement was not designed, deficiencies in the execution of the construction process, the use of materials with insufficient properties to meet the need, as well as the current climatic conditions. Thus, the use of modified asphaltic binders aims to improve the physical and rheological properties of the pavement. This study aims to evaluate the effect of the addition of linseed oil to the CAP 50/70 in the 3% content. The behavior of the modified binder by the addition of linseed oil was evaluated, and the rheological test of the master curve was performed to measure the parameters of complex modulus, phase angle and viscosity. From the results, it was observed that the modified CAP showed a decrease in the complex modulus, making the binder more fluid, but less resistant. In relation to the phase angle, the modification caused it to decrease at low frequencies, but converging with the virgin CAP at higher frequencies. In addition, the viscosity analysis the modification made it less viscous, which ultimately reduces its machining temperature. Thus, linseed oil showed to be a viable and sustainable alternative for improving the rheological properties of asphalt binders.

Key words: Pavement, modifier, properties.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 JUSTIFICATIVA.....	16
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Objetivo Geral.....	16
1.2.2 Objetivos Específicos.....	16
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC.....	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 LIGANTE ASFÁLTICO.....	18
2.1.1 Cimento Asfáltico de petróleo.....	20
2.1.2. Principais usos na pavimentação.....	22
2.2 QUÍMICA DO LIGANTE ASFÁLTICO.....	23
2.3 PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS LIGANTES ASFÁLTICOS.....	26
2.3.1 Curvas Mestre.....	28
2.4 MODIFICADORES DE LIGANTES ASFÁLTICOS.....	29
2.5 LINHAÇA (<i>Linum usitatissimum L.</i>).....	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1 MATERIAIS.....	36
3.2 MÉTODOS.....	37
3.2.1 Primeira Etapa – Incorporação do Óleo de Linhaça ao Ligante Asfáltico.....	38
3.2.2 Segunda Etapa - Caracterização por meio das Curvas Mestre.....	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1 VISCOSIDADE COMPLEXA.....	41
4.2 MÓDULO COMPLEXO.....	42
4.3 ÂNGULO DE FASE.....	44
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	46
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	47
REFERÊNCIAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

Na construção civil a área de pavimentação é uma das que mais cresce no mundo, cada vez mais as pessoas necessitam deslocar-se grandes distâncias da forma mais eficiente possível e o transporte rodoviário é ainda a maneira mais usada. No Brasil, em torno de 60% da malha de transporte é rodoviária, porém somente 13% das rodovias brasileiras são pavimentadas (HIJJAR, 2011).

No Brasil, o cimento asfáltico de petróleo (CAP) é o mais utilizado, sendo responsável pela pavimentação de cerca de 95% das estradas, como também em grande parte do território urbano. Sua popularidade se deve principalmente ao seu custo inferior quando comparado a outras opções, por ser impermeável, apresentar flexibilidade bastante controlável e, por ter grande durabilidade e ter uma boa resistência aos agentes do ambiente (CNT, 2018).

Ao reconhecer a pavimentação como um setor em crescimento, é preciso procurar novos materiais sustentáveis, para serem incorporados na produção nacional do CAP. Podemos assumir duas ferramentas como indicadores de sustentabilidade ambiental: a pegada de carbono, a qual mede quanto de gás carbônico é liberado na atmosfera e sendo este um gás do efeito estufa, este é um dos responsáveis pelo aquecimento global. Outro indicador é a análise do Ciclo de Vida, que permite quantificar as emissões de um produto, sistema ou processo, analisando o tempo de vida de um determinado produto (LEITE, 2013).

Misturas asfálticas mornas são feitas em temperaturas mais baixas que as convencionais. Isso reduz o gasto com combustível e diminui as emissões de gases (LUCENA *et al*, 2008). Quando se diminui a temperatura para fabricação de uma mistura, menos energia é gasta na mesma, isso também ocasiona uma redução de custos. Foi constatado que diminuir a temperatura de usinagem leva a uma redução de até 30% no consumo de energia combustível (OTTO, 2009).

A diminuição de temperatura na fabricação pode ser feita por meio de aditivos orgânicos/químico, emulsões e ligantes sintéticos, podendo-se obter reduções de até 37°C (LEE *et al*, 2012). Além disso, ao incorporar novos componentes, novas características podem ser encontradas, como melhorias na fadiga e no envelhecimento, por exemplo.

Neste contexto, dentre os aditivos vem sendo utilizado a adição de óleos vegetais. O óleo de linhaça é natural, constituído basicamente de triacilglicerol contendo alta porcentagem de ácidos graxos poli-insaturados (FONSECA *et al.*, 2009). O mesmo apresenta características promissoras, por ser oriundo de fontes renováveis e biodegradáveis, apresenta propriedades

tensoativas, é um composto antioxidante, de fácil mistura e economicamente viável para uso na construção civil (COSTA et al., 2015).

Portanto, este projeto tem como desígnio avaliar o efeito da adição do óleo de linhaça ao ligante asfáltico por meio do método das curvas-mestre, analisando assim os parâmetros de módulo complexo, ângulo de fase e viscosidade.

1.1 JUSTIFICATIVA

A justificativa deste trabalho se encontra na importância de se procurar novas alternativas sustentáveis para melhorar as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos e, conseqüentemente, a qualidade dos pavimentos em termos de resistência ao cisalhamento, viscosidade e resposta à esforços.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar os parâmetros de módulo complexo, ângulo de fase e viscosidade do ligante asfáltico CAP 50/70 modificado por adição de óleo de linhaça por meio das curvas-mestre.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar o comportamento do ligante puro e do modificado no parâmetro de módulo complexo;
- Mensurar a viscosidade complexa do ligante puro e do modificado, comparando-as;
- Analisar do parâmetro ângulo de fase efetuando a comparação do ligante puro e modificado.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

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

Introdução – Introdução, Justificativa, Objetivos e Organização do Trabalho.

Fundamentação Teórica – São abordados assuntos relacionados ao tema da pesquisa. Tais como ‘Ligante Asfáltico’, ‘Curvas Mestre’, ‘Modificadores de Ligante Asfáltico’ e ‘Linhaça’.

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

Resultados – São apresentados os resultados obtidos a partir da utilização do óleo de linhaça como modificador do ligante asfáltico de petróleo.

Considerações Finais e sugestões para pesquisas futuras – São apresentadas as considerações obtidas acerca da pesquisa e as sugestões para estudos futuros sobre o tema;

Por fim, estão as Referências, onde são listadas as pesquisas citadas neste estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 LIGANTE ASFÁLTICO

Podemos caracterizar os pavimentos em três diferentes tipos, de acordo com sua constituição e comportamento: rígidos, semi-rígidos e flexíveis. A camada superior nos pavimentos rígidos, também conhecida como camada de revestimento, é basicamente uma laje de concreto de cimento Portland, a qual pode ser armada ou não, encontrando-se apoiada sobre a sub-base de material granular ou, em casos de tráfego mais intenso, sobre um solo estabilizado com ligante hidráulico (solo-cimento), assim fazendo o papel de revestimento e base, com espessura de acordo para resistir a climas severos e condições de tráfego intenso e lento (DIAS *et al*, 2016).

Tais pavimentos são substancialmente “mais rígidos” do que os pavimentos flexíveis. Barras de aço ou telas podem ser usados como reforço nestes pavimentos, eventualmente, esta adição tem por função aumentar o espaçamento entre as juntas utilizadas ou providenciar um reforço estrutural. A camada inferior desse pavimento é comumente nomeada de sub-base, da forma que a qualidade dos componentes dessa camada é semelhante à sub-base de pavimentos asfálticos (TAVARES, 2012).

Tratando-se dos pavimentos semi-rígidos, a camada de revestimento possui as mesmas características dos pavimentos flexíveis, constituição por materiais betuminosos que possuem capacidade elástica e pequena espessura, diferenciando-se dos demais tipos de pavimentos por possuir base e sub-base com maior poder resistivo. Os pavimentos flexíveis, tal qual os rígidos, são constituídos por camadas sobrepostas, mas podem ser diferenciados pelo fato de exigirem que todas as camadas possuam uma função estrutural, sendo sempre a camada superior dimensionada em função da resistência que a camada anterior possui. A camada de revestimento é constituída de material betuminoso, dimensionada para suportar deformação em sua estrutura proveniente da carga empregada pelo tráfego (DIAS *et al*,2016).

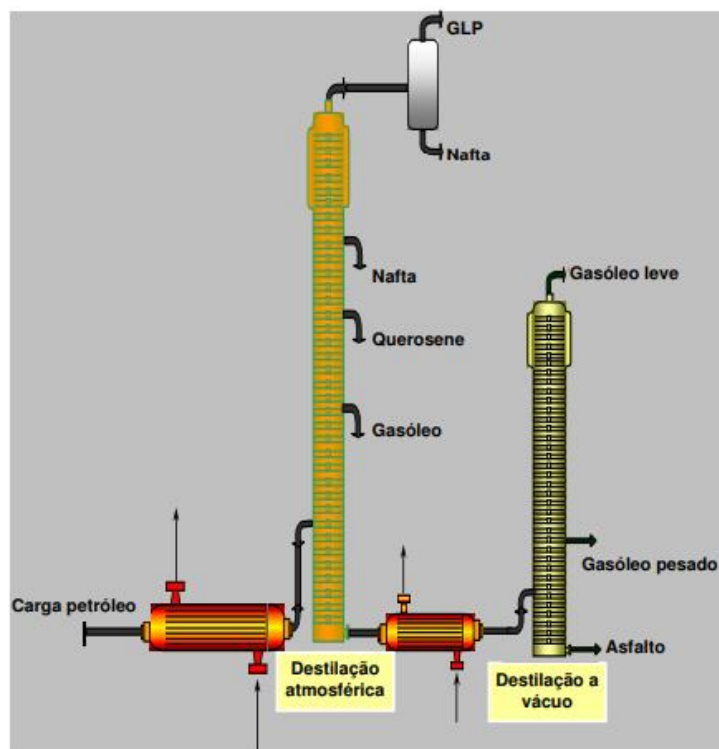
A pavimentação asfáltica é a técnica mais empregada mundialmente, e cerca de 95% das estradas brasileiras são constituídas por revestimentos asfálticos. São diversos os motivos que fazem o uso deste material ser tão intenso, dentre eles: ocorrência de uma forte união entre os agregados, agindo como um ligante que permite flexibilidade controlável; é impermeabilizante, é durável e resistente à ação da maioria dos ácidos, dos álcalis e dos sais,

podendo ser utilizado aquecido ou emulsionado, em amplas combinações de esqueleto mineral, com ou sem aditivos (FARIAS, 2010).

A produção de asfalto no Brasil, que em 2008 foi de 2.125.959 m³ e até abril em 2009 foi de 500.200 m³, corresponde, segundo dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), de 1 a 2% do total de derivados de petróleo produzidos nacionalmente. Isto corresponde a um acréscimo, em média aritmética, de 38% para o ano de 2008 em relação aos anos entre 2000 e 2007 (FARIAS, 2010).

O asfalto é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, o qual é impermeável à água e pouco reativo. A baixa reatividade química a muitos agentes não evita que esse material possa sofrer, no entanto, um processo de envelhecimento por oxidação lenta pelo contato com o ar e a água. No Brasil utiliza-se a denominação CAP para designar esse produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas, e que se enquadra em limites de consistência para determinadas temperaturas estabelecidas em especificações que serão mostradas mais adiante (BERNUCCI *et al*, 2010). A Figura 1 apresenta um fluxograma simplificado do processamento de petróleo e obtenção da fração asfáltica, mais pesada e rica em asfaltenos e maltenos.

Figura 1: Fluxograma simplificado do processo de obtenção do asfalto



FONTE: Fernandes (2009)

De acordo com a temperatura, os diferentes tipos de misturas asfálticas podem ser divididos basicamente em quatro grupos: a quente, mornas, semimornas e a frio (MOTTA, 2011).

2.1.1 Cimento Asfáltico de petróleo (CAP)

O cimento asfáltico de petróleo, CAP, é um composto de petróleo feito industrialmente, obtido especialmente para apresentar características adequadas para o uso na construção de pavimentos, sendo sua obtenção feita principalmente pela destilação de petróleo em refinarias. É obtido no fundo da torre de destilação a vácuo, de acordo com as especificações brasileiras. Eles são flexíveis, impermeáveis, aglutináveis e resistentes a ação da maioria de ácidos, sais e álcalis (MOTHÉ, 2009).

A composição dos cimentos asfálticos de petróleo são: de hidrocarbonetos, que podem variar em quantidades de 90 a 95% do total, e de heteroátomos (nitrogênio, oxigênio, enxofre e metais, como vanádio, níquel, cálcio, ferro e magnésio), os quais são interligados por ligações do tipo covalente. É notável o teor inferior de enxofre e de metais no asfalto brasileiro, entretanto um alto teor de nitrogênio. (BERNUCCI *et al*, 2010).

De acordo com Bernucci *et al*, (2010), “A penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por 5 segundos, à temperatura de 25°C”. O ensaio é repetido 3 vezes e a média dos valores, estando dentro do limite que a norma especifica, será o valor da penetração. Este ensaio segue a norma da ABNT 6576/98 e serve como parâmetro para nomenclatura dos CAPs e faz parte de sua classificação, Por exemplo, um ligante que tiver um resultado de penetração igual a 60 décimos de milímetro, será classificado como CAP 50/70 (BERNUCCI *et al*, 2010).

A Figura 2 mostra um exemplo de CAP.

Figura 2: Ligante Asfáltico CAP 50/70



FONTE: Blasius (2016)

Segundo Marinho (2017):

“O método mais empregado para o fracionamento do ligante asfáltico é o de separação dos seus constituintes em saturados, aromáticos, resinas e asfaltenos. Este processo utiliza cromatografia de camada fina com detecção por ionização de chama e possui a denominação SARA (saturados, aromáticos, resinas, asfaltenos), fazendo referência às letras iniciais de cada constituinte obtido no processo. Na cromatografia, o asfalto é diluído em n-heptano e um filtro capta a parte solúvel, genericamente denominada maltenos que compreendem os saturados, aromáticos e resinas, enquanto que a parte insolúvel precipitada são os asfaltenos.”

As especificações para o CAP no Brasil tiveram sua última atualização no ano de 2005 pela Agência Nacional de Petróleo, Gás e Energia (ANP) (BERNUCCI *et al*, 2010).

A Tabela 1 mostra as especificações para o asfalto brasileiro.

Tabela 1: Especificação brasileira de cimento asfáltico de petróleo

CARACTERÍSTICAS	UND	LIMITES				MÉTODOS	
		CAP 30-45	CAP 50-70	CAP 85-100	CAP 150-200	ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25 °C)	dmm	30-45	50-70	85-100	150-200	NBR 6576	D 5
Ponto de amolecimento, min	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D 36
Viscosidade Saybolt-Furol	s						
a 135 °C, min		192	141	110	80	NBR 14950 E 102	
a 150 °C, min		90	50	43	36		
a 177 °C, min		40-70	15-60	15-60	15-69		
Viscosidade Brookfield	cP						
a 135 °C, SP 21 min 20rpm		374	274	214	155		
a 150 °C, SP 21 min		203	112	97	81		
a 177 °C, SP 21 min		76-133	28-114	28-114	28-114		
IST		(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)		
Ponto de fulgor min	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D 92
	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D 2042
	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D 113
Efeito do calor e do ar (RTFOT) A 163 °C, 85 min							
Varição em massa, max	%	0,5	0,5	0,5	0,5	-	D 2872
Ductilidade a 25 °C, min	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D 113
Aumento do ponto de amolecimento, max	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D 36
Penetração retida, min	%	60	55	55	50	NBR 6576	D 5

FONTE: Santos, 2017

2.1.2. Principais usos na pavimentação

A indústria da pavimentação é a principal consumidora de asfalto no mundo, das 100 milhões de toneladas do mesmo que são produzidas anualmente, cerca de 88% são utilizados em pavimentos. Esse material funciona como um ligante eficiente para agregados minerais, os quais junto com o CAP, formam as misturas asfálticas. (MOTHÉ, 2009).

Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) e Concreto Asfáltico (CA) são os materiais mais usados no Brasil para pavimentação em locais com tráfego pesado. O principal motivo deste favoritismo em relação a outras opções de revestimento, é que esses proporcionam um vasto controle de produção, além de existir uma vasta literatura sobre as características e propriedades do material no Brasil, também existe o fator da tradição, pois é um material que é largamente utilizado há décadas no país (NOGUEIRA, 2008).

O CAP é um material termossensível, cuja consistência varia significativamente com a temperatura. É utilizado principalmente para aplicação em trabalhos de pavimentação, pois além de suas propriedades aglutinantes e impermeabilizantes, possui características de flexibilidade e alta resistência à ação da maioria dos ácidos inorgânicos, sais e álcalis. Como aglutinante proporciona forte união dos agregados, sendo capaz de resistir à ação mecânica das cargas dos veículos. Por ser impermeabilizante fornece vedação eficaz contra a penetração da água de chuva às camadas estruturais do pavimento (BERNUCCI *et al*, 2010).

Por ser um material resistente, durável, com boa aderência e impermeável, o CAP atrai o interesse do setor da engenharia. A forte união entre os agregados que o mesmo confere é devido ao seu caráter termoplástico, também dando ao material uma flexibilidade controlada aos compostos onde o mesmo se encontra (NOGUEIRA, 2008).

2.2 QUÍMICA DO LIGANTE ASFÁLTICO

É vasto o número de tipos de petróleos sendo explorados globalmente, por volta de 1500. Contudo, para confecção de asfalto, apenas uma parcela reduzida é considerada satisfatória. Também é variável os mecanismos de destilação e a composição química do ligante asfáltico, devido variações nos petróleos empregados (MELLO, 2014).

De forma que o tipo de cimento asfáltico depende de diversos fatores, como origem do petróleo e o processo de refinamento, um conhecimento sobre a química do ligante asfáltico é essencial para entender de que forma cada asfalto vai se comportar em termos de desempenho físico e mecânico nas misturas ao qual se encontra, tendo também influência dos agentes modificadores. Uma compatibilidade efetiva entre o agente modificador e o asfalto acontecerá em escala micro (SOUZA, 2010).

As resinas, os asfaltenos e os hidrocarbonetos saturados e aromáticos fazem parte do principais grupos químicos que consistem no petróleo. As composições estão descritas segundo BERNUCCI *et al*. (2010):

-Hidrocarbonetos Saturados: Compostos constituídos por alcanos com cadeias normais e ramificadas contendo entre 1 e 45 átomos de carbono, encontrados na proporção de 5 a 20% dos asfaltos. É um óleo transparente, viscoso e não-polar, influenciando negativamente na suscetibilidade térmica. Em concentrações acrescidas, deixam o material mais mole.

-Hidrocarbonetos Aromáticos: No mínimo um anel aromático em estrutura com baixa massa molar é uma característica destes compostos, sendo para os asfaltenos um intermediário para dispersão e peptização. As cadeias não-saturadas de carbono constituem de 40 a 60% da totalidade do asfalto, tais componentes formam um líquido amarelo viscoso e polar. Contribuem para a melhoria das propriedades físicas de modo que agem como plastificantes.

-Resinas: Compostos solúveis em n-heptano de estrutura química semelhante a dos asfaltenos, porém, com algumas divergências. Apresentam na sua estrutura carbono e hidrogênio com pequena proporção de oxigênio, enxofre e nitrogênio. São sólidos ou semi-sólidos marrom-escuros, sendo de natureza polar e fortemente adesiva. As proporções dos compostos de resinas e asfaltenos controlam o comportamento Sol e Gel que será explicado a mais adiante. Influencia negativamente na suscetibilidade térmica, mas contribui na melhoria da ductilidade e dispersão dos asfaltenos.

-Asfaltenos: Tem sua constituição de hidrocarbonetos naftênicos condensados e de cadeias saturadas curtas que apresentam aglomerados de compostos polares e polarizáveis formados por associações intermoleculares. E soltos nos óleos maltenos sob a forma de coloide. Tem como característica ser sólido amorfo preto ou marrom. A quantidade de asfaltenos tem grande efeito nas características reológicas do CAP: quanto maior o percentual de asfaltenos, mais duro e mais viscoso será o ligante asfáltico. Considerando ainda a forma do asfaleno, será maior o efeito sobre a reologia quanto mais esférica for a partícula. Em geral os asfaltenos constituem de 5 a 25% do CAP.

A Figura 3 mostra como a separação de componentes é feita no método SARA.

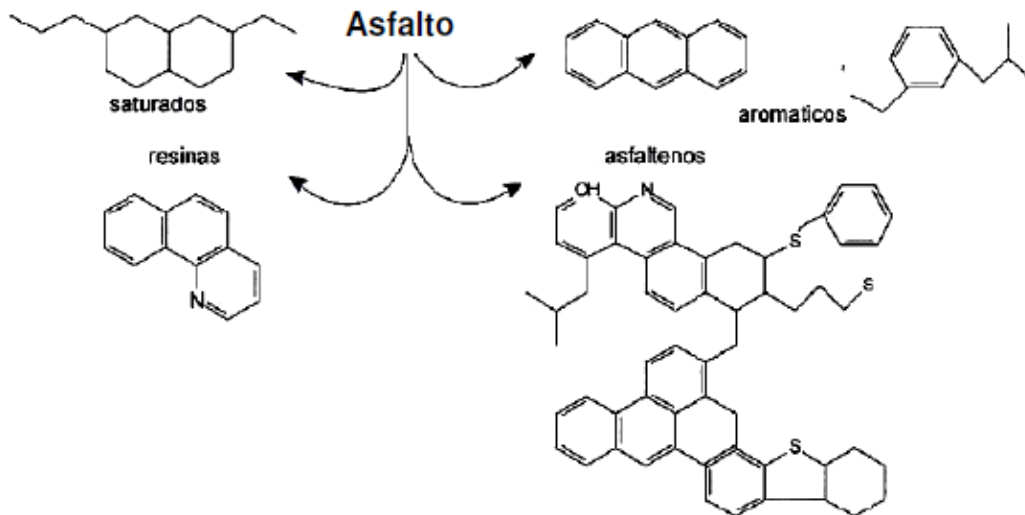
Figura 3: Esquema das principais etapas do fracionamento do ligante asfáltico



FONTE: Souza (2010)

Na Figura 4 está ilustrado o esquema de composição química das frações do asfalto.

Figura 4: Representação da composição química das frações do asfalto



FONTE: Fernandes (2009)

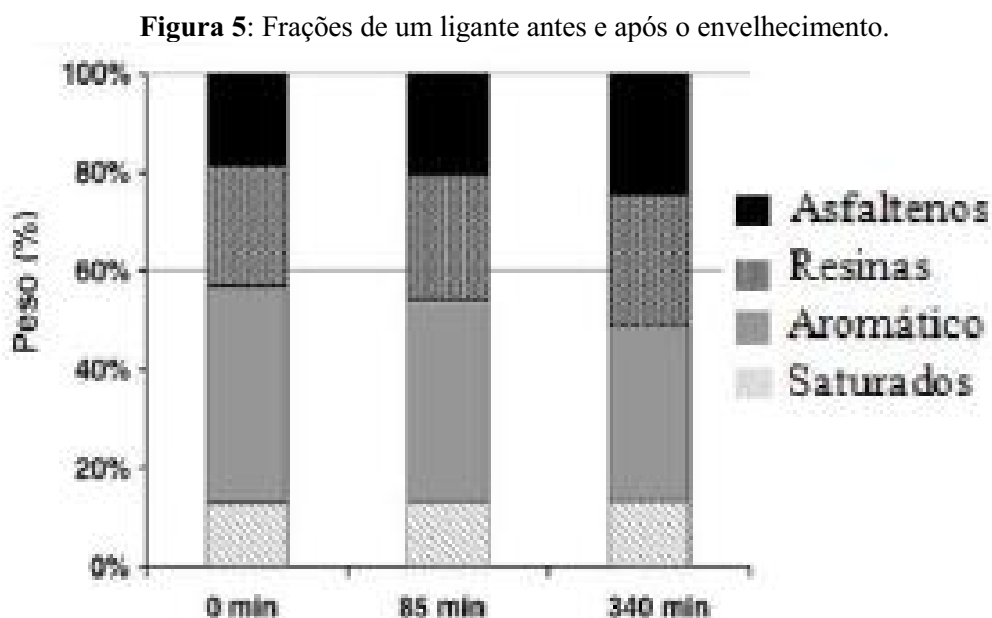
O envelhecimento é uma das principais causas de problemas nos pavimentos, a exemplo de alterações nas características físico-químicas do asfalto, essas alterações causam mudanças proeminentes no comportamento reológico do ligante, a exemplo do acréscimo na viscosidade e redução da penetração. Fontes físicas ou químicas podem incitar este envelhecimento. O envelhecimento químico acontece essencialmente por meio do fenômeno de oxidação, nele o oxigênio (O₂) reage com o carbono (C), enxofre (S) e nitrogênio (N), convertendo a molécula em mais polar. Acontece um aumento na rigidez, isto porque o acréscimo na polaridade das moléculas ocasiona maior associação entre elas. (SINISTERRA, 2014).

Segundo Sinisterra (2014):

“O processo físico de envelhecimento se deve à perda de voláteis, que são as frações mais leves do elemento asfáltico, em especial, durante as fases de usinagem e transporte da mistura asfáltica. Após a abertura do pavimento ao tráfego, o envelhecimento continua de maneira menos intensa durante os dois ou três primeiros anos, quando a mistura atinge a densidade de projeto e um volume de vazios reduzido. Nesta ocasião, o envelhecimento diminui bruscamente. Tal queda não se dá em relação às misturas com elevado volume de vazios (e.g. 20%), já que estas têm maior exposição do masticado ao ar e, conseqüentemente, ao O₂.”

Ao passo que o envelhecimento do ligante acontece, as suas frações mais leves são perdidas na evaporação, daí parte dessas frações são transfiguradas em resinas por oxidação, e por conseguinte, em asfaltenos. Desta forma, uma maior concentração de asfaltenos implica em um ligante mais viscoso e com maior consistência, também apresentará uma penetração reduzida e crescimento no ponto de amolecimento. A exorbitância em asfaltenos, sendo maior que 30%, faz com que aconteça a fragilização do asfalto e perda da elasticidade. Caso sua proporção seja inferior a 20%, acontece uma elevação na susceptibilidade térmica e deformação plástica em demasia (SANTOS, 2017).

A Figura 5 mostra a relação do envelhecimento de um ligante e de sua composição.



FONTE: Santos, 2017

2.3 PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS LIGANTES ASFÁLTICOS

O termo reologia é originário do grego, rhéos, que significa fluxo e logia, que significa estudo; ou seja, a reologia é a ciência que estuda o comportamento do fluxo ou a deformação de um corpo sob a ação de uma força ou tensão (MOTHÉ, 2009).

Os parâmetros para ligantes asfálticos devem ser baseados em ensaios físicos, químicos e mecânicos. Além disso, é de grande importância caracterizar em cada um desses segmentos. Deste modo, a análise reológica dos ligantes asfálticos foi desenvolvida com o

intuito de mensurar os seus parâmetros mecânicos, que até então não eram considerados por produtores de asfalto ou até mesmo engenheiros da área da pavimentação (MARINHO, 2017).

Segundo Marinho (2017), “a reologia pode ser definida como o estudo das deformações e fluxo da matéria, a sua consistência. O estudo da reologia pode ser estendido para o entendimento de propriedades e comportamentos de materiais poliméricos”.

A qualidade e performance dos pavimentos está ligada diretamente às suas propriedades reológicas. Tais propriedades podem se alterar no processo de fabricação da mistura asfáltica e esse processo de alteração persiste durante a etapa de aplicação do pavimento (MARINHO, 2017).

Uma das propriedades físicas importantes para o estudo dos pavimentos é a consistência do ligante. Em temperaturas medianas, os ligantes asfálticos demonstram consistência semi-sólida, já em baixas temperaturas apresenta consistência sólida, por fim, em altas temperaturas aparenta uma consistência líquida. Pode-se quantificar essa consistência através das propriedades físicas: penetração, ponto de amolecimento e viscosidade (SANTOS, 2017).

A reologia clássica considera dois materiais como ideais: o sólido elástico e o líquido ou fluido viscoso. Os sólidos ideais deformam-se elasticamente e a energia necessária para a deformação é totalmente recuperada quando a força é removida. Os fluidos ideais, tal como líquidos e gases, tendem a se deformar de forma irreversível, dessa forma a energia requerida para a deformação é dissipada pelo fluido sob forma de calor e não é mais recuperada pela remoção da força exercida. Na reologia dos sólidos, o parâmetro viscosidade deve ser o mais importante e na reologia de líquidos o parâmetro de maior interesse deve ser a elasticidade (MOTHÉ, 2009).

Uma das metodologias mais usadas para caracterização reológica é a SUPERPAVE, a qual se baseia na rigidez do material virgem e envelhecido, medidas numa combinação de propriedades viscoelásticas, influenciadas por temperatura e tempo de carregamento. Assim, estabeleceram-se as classes pelo grau de desempenho dos ligantes ligado à temperatura de campo (MELLO, 2014).

Alguns ensaios são importantes para a caracterização reológica: O ensaio de penetração consiste em verificar a consistência do CAP. O índice de suscetibilidade térmica (IST) expressa a variação da consistência do CAP com a variação da temperatura. O ensaio de viscosidade permite avaliar a capacidade do fluido (CAP) de resistir ao escoamento, devido ao atrito formado entre suas camadas. O ensaio de ponto de amolecimento é uma medida empírica que correlaciona à temperatura na qual o ligante asfáltico amolece quando aquecido

sob certas condições particulares e atinge uma determinada condição escoamento sob peso definido (MELLO, 2014).

2.3.1 Curvas Mestre

A curva mestre demonstra em um gráfico uma propriedade reológica do ligante asfáltico versus frequência ou tempo de aplicação de um carregamento, mostrando assim o como o ligante se comporta em termo dessa propriedade para uma temperatura singular em uma gama elevada de frequências ou tempos de carregamento (SILVA, 2016).

Segundo Mello (2014):

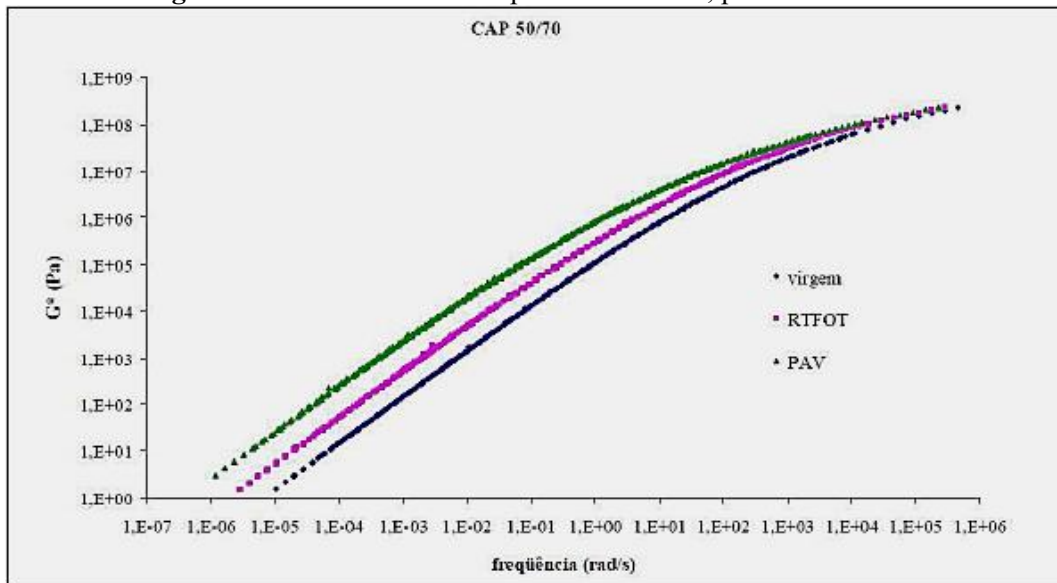
“Com base nos fatores de deslocamento obtidos na geração das curvas mestre, é possível deslocar horizontalmente a curva mestre gerada na temperatura de referência e obter uma nova curva, capaz de descrever o comportamento reológico do material ao longo do mesmo espectro de frequências ou tempos de carregamento, na temperatura desejada. Em função das suas potencialidades, a curva mestre representa uma ferramenta importantíssima na caracterização de materiais asfálticos ao longo de uma faixa ampla de temperaturas e tempos ou frequências de carregamento.”

A separação dos efeitos da temperatura e da frequência de carregamento é feita por meio de curvas de deslocamento horizontal da temperatura e de curvas mestre. Na obtenção destas curvas, admite-se a validade do princípio de superposição tempo-temperatura ou princípio de variáveis reduzidas que, fundamentalmente, descreve a equivalência entre estes dois fatores, ou seja, que a temperatura e o tempo ou frequência de aplicação de carga têm o mesmo efeito sobre as propriedades reológicas do material (BECHARA *et al*, 2008).

De maneira geral, é complexa a análise de uma curva mestre, isso se relaciona com o fato de que a representação do comportamento reológico do material é construída em função da frequência de carregamento e não da temperatura. Considerando, em geral, termorreologicamente singelos os ligantes asfálticos, pode-se supor a validade do princípio de superposição tempo-temperatura. Levando em conta a validade deste fundamento, pode-se intercambiar os efeitos de tempo e de temperatura sobre a propriedade reológica, o que facilita sobretudo a interpretação da curva mestre. Analisando uma curva mestre, é inferido que o efeito da frequência alta é similar ao da temperatura baixa e inversamente, o efeito da frequência baixa é similar ao da temperatura alta (MELLO, 2014).

Um exemplo de curva mestre do CAP 50/70 pode ser observado na Figura 6, a qual tem como objetivo avaliar o efeito do envelhecimento a curto e longo prazo sobre as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos (CAP 50/70). Os resultados indicaram que o envelhecimento provoca aumento da rigidez, porém, nota-se que o efeito do envelhecimento é mais expressivo nas temperaturas intermediárias à altas e que ele afeta pouco a rigidez nas temperaturas baixas. O envelhecimento torna ambos os CAPs menos suscetíveis à temperatura (MELLO, 2014).

Figura 6: Curva mestre na temperatura de 25°C, para o CAP 50/70



FONTE: Mello, 2014

2.4 MODIFICADORES DE LIGANTES ASFÁLTICOS

O ligante asfáltico modificado é aquele que recebeu a adição de um agente modificador de origem natural, sintética ou polimérica. Estes foram alteradas pela adição de um agente, que pode ser extensores (enxofre, lignina), oxidantes (compostos de Manganês), antioxidantes (carbamatos, sais de cálcio, fenóis e aminas) e polímeros (elastômeros, plastômeros e fibras) (CUNHA, 2011).

Mesmo que os ligantes convencionais, ou seja, sem qualquer modificação, sejam adequados aos pavimentos aos quais são submetidos; alguns fatores contribuem progressivamente para a utilização desses modificadores tais como (MOTHÉ, 2009):

- Aumento no volume do tráfego;

- Aumento no peso de caminhões e demais veículos;
- Aumento da carga por eixo em veículos pesados;

É notável que os cimentos asfálticos convencionais têm apresentado bons desempenhos nas condições de tráfego e clima majoritárias do Brasil. Porém, com o aumento da capacidade de carga, do número de automóveis em circulação e condições climáticas extremas encontradas em algumas regiões do país, a engenharia de pavimentos necessita de uma busca por novos materiais que atendam de forma mais satisfatória as necessidades das rodovias (CEZARO JUNIOR, 2008).

Desta maneira surgiu uma demanda na obtenção de um pavimento com revestimento asfáltico de maior resistência. Os modificadores de ligantes asfálticos surgem como uma melhor opção no aprimoramento das propriedades térmicas, reológicas e mecânicas dos pavimentos (MOTHÉ, 2009).

Diversas pesquisas feitas nas últimas décadas foram impulsionadas por essa busca por modificadores. Se objetivando a produção de cimentos asfálticos mais flexíveis, com menor suscetibilidade as mudanças climáticas, mais resistentes às ações do tráfego e, por consequência, com maior durabilidade. Parte majoritária desses trabalhos se direciona para a incorporação de materiais que modifiquem as propriedades dos ligantes asfálticos (CEZARO JUNIOR, 2008).

Agentes modificadores são utilizados com intenção de conferir aos ligantes asfálticos resistência superior ao envelhecimento, assim como resistência à deformação permanente em temperaturas altas sem, contudo, prejudicar as propriedades destes em outras faixas térmicas (CUNHA, 2011).

Pode-se observar na Tabela 2 os materiais mais usados nos Estados Unidos como modificadores.

Tabela 2: Materiais mais usados como modificadores de asfalto nos Estados Unidos

Tipo de modificador	Classe	Aplicação				
		DP	TF	TBT	DU	EO
Polímeros Elastômeros	eStireno-Butadieno (SB)	X		X	X	
	eStireno-Butadieno-eStireno (SBS)	X	X	X		
	eStireno-Butadieno-Rubber (SBR)	X		X		
Polímeros Plastômeros	Etileno-Acetato de Vinila (EVA)	X	X			
Borracha Moída de Pneu	Diferentes tamanhos, tratamentos e processos	X	X	X		
Agentes Antidescolantes	Amidoaminas				X	
	Poliamidas				X	
	Cal Hidratada				X	

Hidrocarbonetos	Asfalto Natural	X	X	X	X	
Fibras	Celulose	X				
	Polipropileno	X	X	X		
	Poliéster	X		X		
	Mineral	X				
Fíler Mineral	Cal Hidratada	X	X	X	X	X
Antioxidantes	Cal Hidratada				X	X
Extensores	Enxofre	X	X	X		

DP - Deformação Permanente

TF – Trincamento por Fadiga

TBT – Trincamento em Baixas Temperaturas

DU – Danos por Umidade

EO – Envelhecimento Oxidativo

FONTE: Cezaro Junior, 2008

Estudos com óleos como modificadores também tem sido feitos com a finalidade de se achar novos modificadores para o ligante que agreguem melhorias sendo, ao mesmo tempo, sustentáveis. Lucena *et al* (2015), verificou que ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera Lam apresentam melhorias, como retardo no envelhecimento do CAP, redução na temperatura de usinagem e compactação.

2.5 LINHAÇA (*Linum usitatissimum L.*)

Valente (2011) define a linhaça como “uma semente oleaginosa originada do linho (*Linum usitatissimum L.*), planta herbácea pertencente à família Linácea”. Os seus frutos têm formato capsular esférico, denominados cachopas, estes contendo duas sementes em cada uma das cinco repartições, somando cerca de 10 sementes por cápsula, esse valor pode variar de 7 a 11 sementes. Parte majoritária da produção da linhaça é remetido à produção de óleo para tintas e para ração animal (VALENTE, 2011).

Na Figura 7 encontram-se algumas variações de flores de linho.

Figura 7: Flores de Linho



FONTE: Fonseca, 2009

O uso de linhaça no Brasil está concentrado na fabricação de tecidos, óleos para tinturas, cosméticos, medicamentos e para a alimentação animal e humana, boa parte dessa produção está concentrada no noroeste do Rio Grande do Sul (NOVELLO, 2011).

A partir de 2006 a variedade dourada da linhaça (de cor marrom-claro) foi introduzida na produção nacional, essa variedade até o momento era importada do Canadá e a produção nacional se concentrava na variedade de cor marrom-avermelhada (NOVELLO, 2011). Segundo Cavalcante (2016), “a semente do linho é plana, ovalada e pontiaguda em uma das bordas. É uma semente pequena, que normalmente mede cerca de $2,5 \times 5,0 \times 1,5$ mm”.

Dentre as variedades de linhaça, duas se destacam: a linhaça dourada, onde o cultivo é mais acentuado no hemisfério norte, em países como Estados Unidos e Canadá, e a variação marrom, em cultivo no Brasil (CAVALCANTE, 2016). A quantidade de pigmentos existente é o que determina a coloração das sementes. A cor também pode ser alterada devido a mudanças na reprodução normal da planta e de acordo com as condições de armazenamento, isso pode alterar o tipo de uso (NOVELLO, 2011). As duas variedades podem ser observadas na Figura 8.

Figura 8: Variedades da linhaça: Marrom (esq) e dourada (dir)



FONTE: Galvão, 2009

No meio industrial a planta da linhaça tem um papel de grande importância e suas aplicações e usos são diversos. O linho, tecido de qualidade reconhecida no mercado é feito a partir das fibras retiradas do caule da linhaça. Óleo e farelo são produzidos a partir das sementes. O óleo é matéria prima para tintas, vernizes, resinas, sabões, linóleo, entre outros fins (CAVALCANTE, 2016).

Na Tabela 3 encontra-se a composição típica do óleo de linhaça.

Tabela 3: Composição típica de ácidos graxos no óleo de linhaça natural

ÁCIDOS GRAXOS	(%)	NOME SISTEMÁTICO	NOTAÇÃO
Palmítico	4-10	Hexadecanóico	C16
Esteárico	2-8	Octadecanóico	C18
Oléico	10-24	(9Z)-octadeca-9-enóico	C18:1
Linoléico	12-19	(9Z, 12Z)-octadeca-9,12-dienóico	C18:2
Linolênico	48-60	(9Z, 12Z, 15Z)-octadeca-9,12,15-trienóico	C18:3

FONTE: Fonseca, 2009

Em termos nutricionais, as sementes de cor marrom e dourada são de grande semelhança. Quimicamente existem poucas diferenças na composição, seguramente resultado de condições de cultivo variadas. A linhaça, semente oleaginosa, é rica em gordura, fibra dietética e proteínas (NOVELLO, 2011).

Sobre a composição típica da linhaça, Novello (2011) disserta:

“Sua composição em média é de 41% de gordura, 28% de fibra alimentar total, 20% de proteína, 7,7% de umidade, 3,5% de cinzas e 1% de açúcares simples. A quantidade de gordura na linhaça pode variar de 34-47%, dependendo da localização, cultivo e condições ambientais. Geadas precoces ou tardias, calor ou períodos de seca podem ter efeitos negativos sobre a qualidade da semente, gerando teores de óleo significativamente menores. Além disso, concentrações mais elevadas de ácido graxo palmítico (C16:0), linoleico (C18:2, ω -6) e α -linolenico (C18:3) e menor de ácido oleico (C18:1) foram observadas prejudicando as sementes. ”

O índice de oxidação (IO) do óleo de linhaça é alto quando comparado com outras oleaginosas. A depender das posições das insaturações em sua cadeia graxa, um óleo vegetal oxidará em velocidade diferente de outro óleo. Os compostos saturados possuem uma resistência à oxidação significativamente maior que os compostos insaturados. Quanto maior for o grau de insaturação, mais suscetível o óleo será à oxidação. Nos óleos vegetais essa propriedade varia bastante a depender do grau de insaturação e do tamanho das suas cadeias

graxas. Ramificações e o posicionamento das insaturações também influenciam na tendência à oxidação (CAVALCANTE, 2016). O índice de oxidação (I.O) é uma forma de avaliar esse parâmetro.

A Tabela 4 mostra diferentes índices de oxidação para óleos vegetais.

Tabela 4: Índice de oxidação para os óleos vegetais

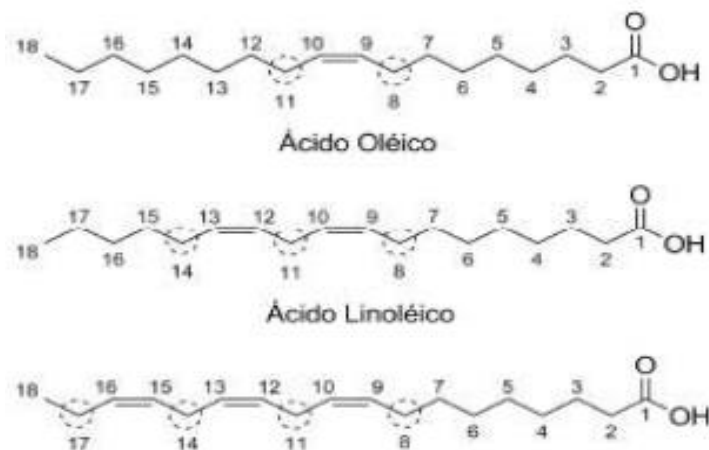
ÓLEOS VEGETAIS	ÍNDICE DE OXIDAÇÃO
Amendoim	0,317
Andiroba	0,132
Babaçu	0,047
Buriti	0,062
Crambe	0,168
Dendé	0,152
Gergilim	0,433
Linhaça	1,058
Macaúba	0,062
Moringa	0,023
Oiticica	0,475
Pequi	0,011
Pinhão Manso	0,375
Uva	0,464

FONTE: Cavalcante, 2016

Os óleos vegetais compostos por ácidos graxos que apresentam polinsaturações são mais propensos a processos oxidativo, principalmente aqueles com proporções variáveis dos ácidos oléico (C18:1), linoleico (C18:2) e linolênico (C18:3). A velocidade das reações de oxidação para estas moléculas depende do número e da posição das duplas ligações (CAVALCANTE, 2016).

Observa-se na Figura 9 as posições nas cadeias graxas mais propensas à oxidação.

Figura 9: Posições nas cadeias graxas mais propensas à oxidação

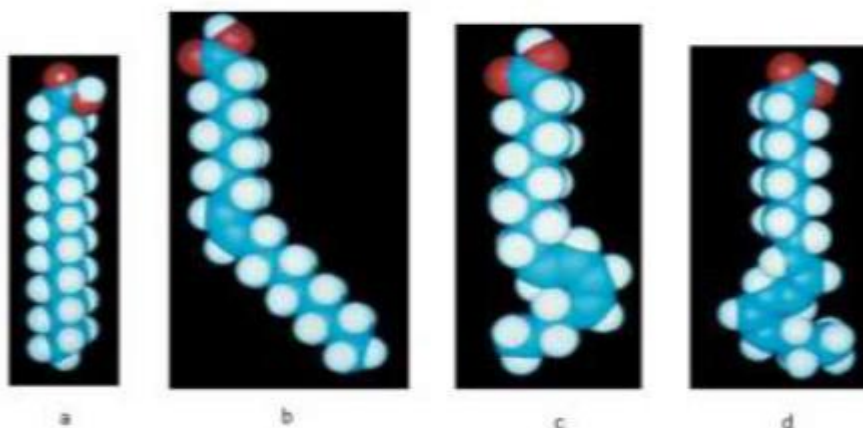


FONTE: Cavalcante, 2016

Os ácidos graxos saturados encontram-se em uma acomodação linear, flexível em estado de menor energia, permitindo uma interação molecular mais concreta, em comparação, os ácidos graxos insaturados demonstram dobramentos na cadeia carbônica, para cada ligação dupla existente. A existência dessas insaturações na molécula torna as interações moleculares menos eficientes (desfavorecimento estérico) e uma viscosidade inferior. Pode-se deduzir que quanto mais interações existirem, menor será o ponto de fusão (CAVALCANTE, 2016).

Na Figura 10 observa-se a diferença de interação.

Figura 10: Diferença de interação: (a) Ácido esteárico C18:0; (b) Ácido oleico C18:1; (c) Ácido oleico C18:2.



FONTE: Cavalcante, 2016

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Para realização deste estudo foram utilizados os seguintes materiais:

- Ligante asfáltico CAP 50/70 proveniente da refinaria de Paulínia-SP – REPLAN;

Figura 11: CAP 50/70



FONTE: NTA Asfaltos, 2018

- Óleo de linhaça disponível comercialmente na cidade de Campina Grande.

Figura 12: Óleo de Linhaça



FONTE: Costa, 2013

As características técnicas do óleo de linhaça utilizado podem ser observadas na Tabela 5.

Tabela 5: Características do óleo de Linhaça

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 (Wljs)	100 - 140	139,59	*IAL 329/IV
Índice de Peróxido (meq/kg)	< 10	0,8	*IAL 326/IV
Índice de Refração (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
*Metodologia Instituto Adolfo Lutz			
CONTAGEM MICROBIANA			
CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS	Especificação *	Resultado	
Bactérias totais - 100 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	
<i>Staphylococcus Aureus</i>	Ausente	De acordo	
<i>Pseudomonas SP</i>	Ausente	De acordo	
*Metodologia - Farmacopéia Brasileira			

FONTE: Cavalcante, 2016

3.2 MÉTODOS

A metodologia utilizada para realização desta pesquisa consiste em ensaios e procedimentos feitos em 2 etapas:

A primeira etapa consistiu da modificação do cimento asfáltico de petróleo puro por meio da adição de óleo de linhaça no teor de 3% por peso. Por consequência, na segunda etapa foram feitos os ensaios reológicos no Reômetro de Cisalhamento Dinâmico para o CAP modificado e o CAP puro, com a obtenção de suas Curvas Mestre.

3.2.1 Primeira Etapa – Incorporação do Óleo de Linhaça ao Ligante Asfáltico

O procedimento de mistura do ligante asfáltico ao óleo de Linhaça foi realizada em um misturador mecânico FISATOM, modelo 72, o procedimento foi realizado no Laboratório de Pavimentos, na Universidade Federal de Campina Grande. O misturador pode ser observado na Figura 13.

O processo de modificação foi feito da seguinte forma:

- Feito em rotação de 500 rpm;
- O ligante asfáltico mantido entre 130 e 135°C;
- Adicionou-se o óleo de linhaça misturando durante 20 minutos no teor estabelecido de 3%;

Figura 13: Misturador Mecânico – LEP/DEC/UFCG



FONTE: Autoria Própria

3.2.2 Segunda Etapa - Caracterização por meio das Curvas Mestre

A curva mestre expressa uma propriedade reológica do ligante asfáltico em função da frequência ou do tempo de aplicação do carregamento, descrevendo seu comportamento reológico para uma única temperatura em um espectro amplo de tempos ou frequência de carregamento. Os efeitos da temperatura e da frequência de carregamento são separados por meios de curvas de deslocamento horizontal. Na obtenção desta curva admite-se que a

temperatura e o tempo ou frequência de aplicação de carga tem o mesmo efeito sobre as propriedades reológicas do material (BECHARA *et al*, 2008).

Os ensaios foram produzidos no Laboratório de Pavimentos, na Universidade Federal de Campina Grande.

Para se obter as Curvas Mestre, foi usado uma superposição de tempo e frequências, uma faixa inicial de temperatura foi colocada de modo controlado, entre 46 °C e 52°C. Essa temperatura é acrescida a cada medição de frequências e cada faixa de medições dura em média 7 minutos.

A amostra aquecida foi colocada no suporte do equipamento, que após um breve período de resfriamento foi acoplado à placa paralela superior para que a mesma fique aderida a esta parte. Um comando no equipamento faz com que o material na placa superior desça até formar uma película de 1 mm de ligante asfáltico, o excesso de ligante deve ser removido antes do início do teste.

Logo após coloca-se o controlador de temperatura e o equipamento inicia o teste na menor temperatura indicada para o procedimento, subindo essa temperatura periodicamente. A partir daí o software do aparelho interligado ao computador processa os dados e gera as Curvas Mestre.

Na Figura 14 encontra-se um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico, aparelho usado para os testes.

Figura 14: Reômetro de Cisalhamento Dinâmico



FONTE: Autoria Própria

A tensão (σ) e a deformação (γ) estão ligadas por meio de um número complexo, denominado de módulo complexo, G^* . O módulo complexo é normalmente medido e relatado em termos de resposta ao cisalhamento. O ângulo de fase, δ , indica o atraso na resposta de tensão em comparação com a deformação aplicada (MATOS, 2017).

A defasagem entre a tensão cisalhante e a deformação no material é expressa levando em consideração o atraso necessário para essa recuperação (Δt) multiplicado pela frequência angular (ω), sendo esse resultado o ângulo de fase (ζ) (BERNUCCI et al., 2008).

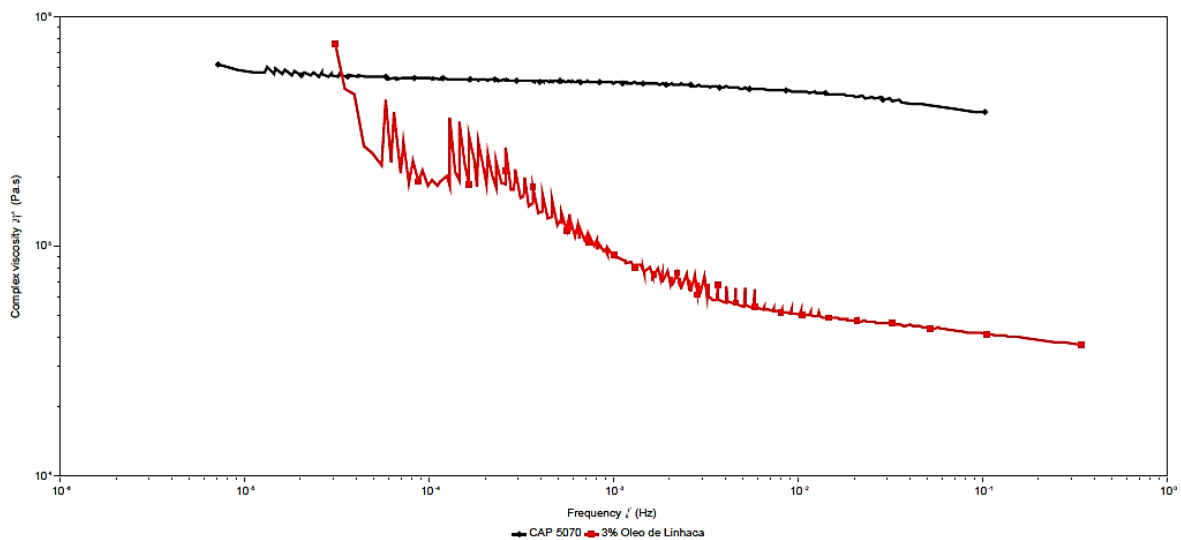
O ângulo de fase (ζ) simplificadamente mostra se o material exibe um comportamento puramente elástico sem defasagem, ou seja, o ângulo de fase igual a zero, e com o retorno imediato após o término da aplicação da tensão cisalhante, ou puramente viscoso com uma defasagem total no ângulo de fase, ou seja 90° , não retornando a sua forma original após o término da aplicação de uma tensão cisalhante (BERNUCCI et al., 2008).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 VISCOSIDADE COMPLEXA

Com base no ensaio de curva mestre, por meio do reômetro de cisalhamento direto, obteve-se a curva mestre da viscosidade complexa para o CAP puro e modificado com óleo de linhaça, para diferentes frequências. A Figura 15 ilustra a curva mestra versus frequência referente a cada amostra.

Figura 15: Curva Mestre da Viscosidade Complexa



Observa-se que para frequências menores que 10^{-3} Hz, as curvas de viscosidade se aproximam. Pode-se inferir que neste intervalo o modificador não alterou de forma significativa a viscosidade do ligante. Também nota-se que neste intervalo a curva para o CAP modificado se torna oscilante. Tais oscilações podem ser causadas por interferências durante o ensaio, pois nessa faixa de frequência o experimento tem uma sensibilidade alta.

Considerando o trecho com frequências superiores a 10^{-3} Hz, verifica-se que houve redução da viscosidade complexa no CAP modificado em relação ao CAP puro. Essa redução pode ser notada com mais clareza ao separar algumas frequências, como ilustra a Tabela 6.

Tabela 6: Viscosidade complexa versus frequência

Frequência	CAP Puro (Pa.S)	CAP Modificado (Pa.S)	Queda
5×10^{-5} Hz	$5,5 \times 10^5$	$3,2 \times 10^5$	-41,8%
1×10^{-4} Hz	$5,4 \times 10^5$	$2,5 \times 10^5$	-53,7%
2×10^{-4} Hz	$5,3 \times 10^5$	$2,3 \times 10^5$	-56,6%
1×10^{-2} Hz	$4,7 \times 10^5$	$0,51 \times 10^5$	-89,1%
5×10^{-2} Hz	$4,2 \times 10^5$	$0,45 \times 10^5$	-89,3%
1×10^{-1} Hz	$3,8 \times 10^5$	$0,41 \times 10^5$	-89,2%

É possível observar da Tabela 6 um decréscimo uniforme da viscosidade conforme o aumento das frequências. Essa queda na viscosidade era esperada, pois sendo o modificante um óleo, o mesmo agrega uma fluidez característica deste tipo de aditivo.

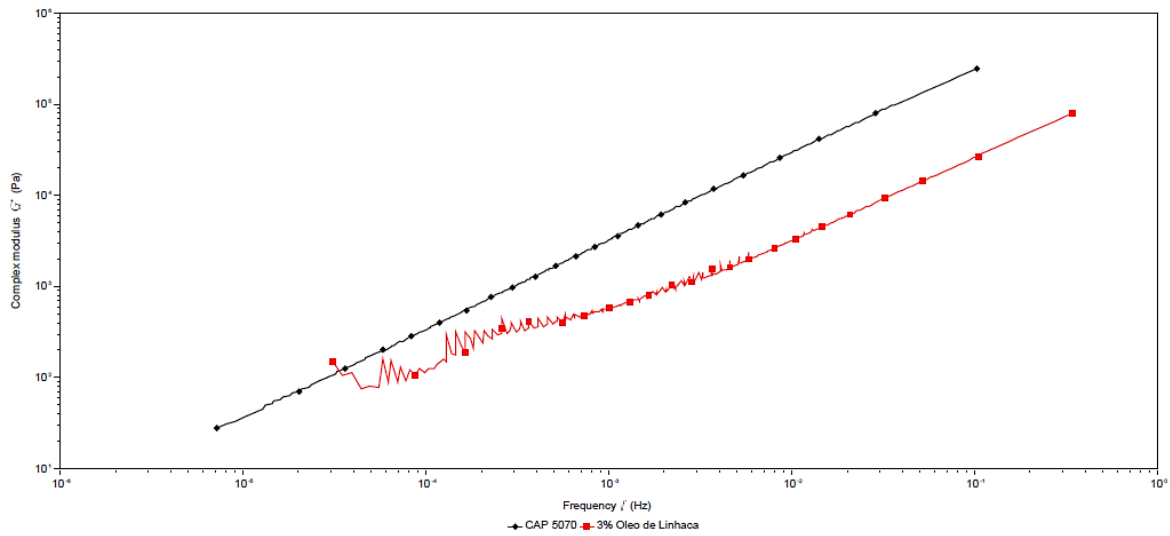
A redução da viscosidade complexa traz benefícios econômicos e ambientais, pelo fato desta reduzir a temperatura de usinagem e compactação do ligante asfáltico, agregando uma economia energética na sua produção e aplicação, mitigando assim as emissões de gases poluentes na atmosfera. Outro ponto importante é que uma menor temperatura de compactação traz uma maior segurança aos operadores do asfalto.

Ainda, menores viscosidades denotam um ligante com melhor trabalhabilidade, trazendo um envolvimento mais uniforme com o agregado e melhorando sua distribuição dentro do asfalto.

4.2 MÓDULO COMPLEXO

A Figura 16 ilustra as curvas mestre de módulo complexo do CAP puro e do modificado a diferentes frequências.

Figura 16: Curva Mestre do Módulo Complexo



Analisando as curvas mestre, verifica-se que os valores de G^* do CAP modificado com óleo de linhaça foram menores que os observados no CAP puro, evidenciando assim uma diminuição na rigidez do ligante.

A redução dos valores de frequência corresponde a um aumento da temperatura, sendo assim, na faixa de 10^{-5} e 10^{-3} , parcela com as maiores temperaturas, o CAP puro apresenta valores de G^* próximos dos valores do ligante modificado, evidenciando maior rigidez.

Com o aumento da taxa de frequência e correspondente redução da temperatura, a partir de 10^{-3} em diante, a diferença de rigidez entre ambos se acentuou e observou-se um crescimento linear nos valores para ambos os ligantes. Esse comportamento pode ser melhor exemplificado através da Tabela 7.

Tabela 7: Módulo complexo versus frequência

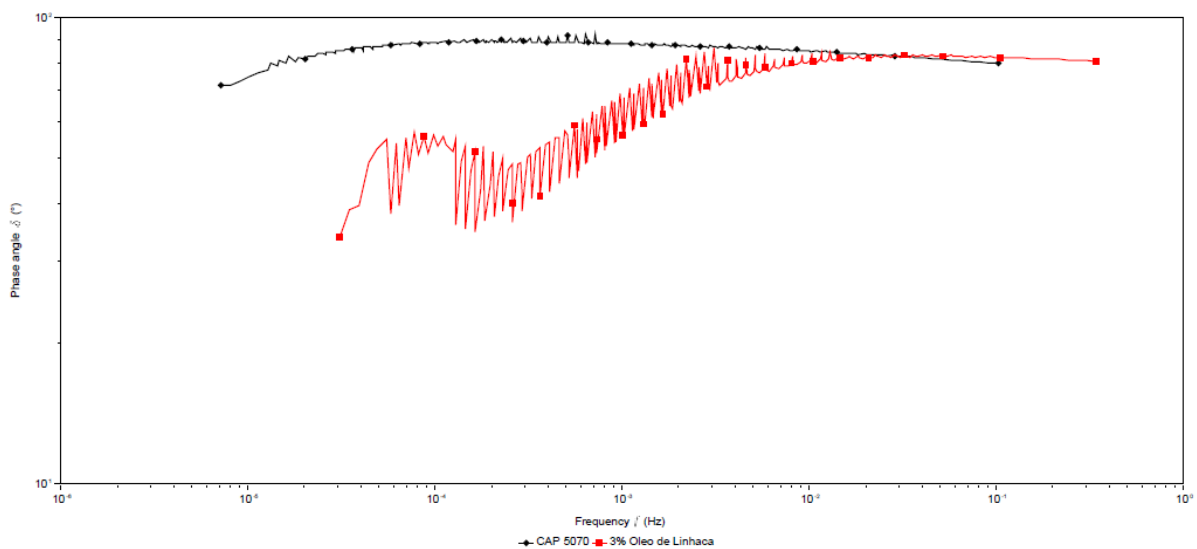
Frequência	CAP Puro (Pa)	CAP Modificado (Pa)	Queda
1×10^{-4} Hz	$3,4 \times 10^2$	$1,7 \times 10^2$	-50,0%
3×10^{-4} Hz	$1,0 \times 10^3$	$0,37 \times 10^3$	-63,0%
5×10^{-4} Hz	$1,8 \times 10^3$	$0,41 \times 10^3$	-77,22%
1×10^{-2} Hz	$3,0 \times 10^4$	$0,30 \times 10^4$	-90,0%
3×10^{-2} Hz	$8,5 \times 10^4$	$0,90 \times 10^4$	-89,4%
5×10^{-2} Hz	$1,3 \times 10^5$	$0,14 \times 10^5$	-89,2%

Este comportamento indica que, com a redução da temperatura, o ligante modificado com óleo apresenta uma perda de rigidez mais expressiva em relação ao CAP 50/70, portanto, a adição de óleo de linhaça ao CAP puro apresenta maior benefício, em termos de rigidez, a temperaturas mais elevadas.

4.3 ÂNGULO DE FASE

A Figura 17 ilustra as curvas mestre de ângulo de fase para o CAP puro e o CAP modificado por óleo de linhaça.

Figura 17: Curva Mestre do Ângulo de Fase



A partir da análise da figura, verifica-se que na zona de baixa frequência, que compreende a faixa entre 10^{-5} Hz e 10^{-2} Hz, a oscilação dos valores predomina. Nessa zona o CAP puro apresenta os maiores valores de δ , permanecendo estes com uma certa constância durante todo o ensaio, enquanto a amostra modificada com óleo de linhaça apresenta redução nos valores de δ com a diminuição da taxa de frequência e consequente aumento de temperatura.

Para frequências maiores que 10^{-2} Hz há uma convergência dos ângulos de fase para valores muito semelhantes, indicando que não houve influência expressiva da adição de

óleo de linhaça no comportamento elástico do ligante ou este fenômeno ocorreu de forma reduzida. Exemplos desses valores podem ser vistos na Tabela 8.

Tabela 8: Ângulo de fase versus frequência

Frequência	CAP Puro (%)	CAP Modificado (%)	Diferença
3×10^{-4} Hz	89,0	46,0	-43,0%
6×10^{-4} Hz	88,0	54,0	-34,0%
1×10^{-3} Hz	87,0	63,0	-24,0%
1×10^{-2} Hz	85,0	80,5	-4,5%
2×10^{-2} Hz	84,0	82,0	-2,0%
3×10^{-2} Hz	83,0	83,0	0,0%

Sendo assim, a melhoria da elasticidade, proveniente da modificação do ligante com óleo de linhaça, é mais expressiva em temperaturas elevada

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Levando em conta os objetivos traçados neste trabalho e os resultados encontrados no mesmo, as considerações finais são:

A curva mestre do módulo complexo demonstrou que a adição de óleo de linhaça trouxe ao CAP uma diminuição nos valores de G^* , demonstrando assim que o óleo de linhaça tornou material mais fluido e menos viscoso, essa característica traz melhorias em alguns aspectos, como na sua elasticidade. Porém, em relação ao cisalhamento, sua resistência diminuiu em relação ao ligante puro, tendo um menor desempenho ante as deformações.

Em relação ao ângulo de fase, a curva mestre mostrou que a baixas frequências houve uma diminuição no parâmetro. Sabendo que, quão menor for o ângulo de fase, melhor a resposta elástica. Desta forma, em frequências inferiores a $10^{(-2)}$ Hz, a modificação com óleo de linhaça apresentou ao ligante melhoria em sua elasticidade.

Observando os resultados da curva de viscosidade complexa, evidencia-se que o óleo de linhaça tornou o ligante mais fluido, ou seja, menos viscoso, o que diminui as temperaturas de usinagem e compactação da mistura, gerando uma economia energética durante a execução da obra, em outras palavras, tornando a pavimentação mais barata.

Assim, o óleo de linhaça se provou uma alternativa viável e sustentável para modificação das propriedades reológicas de ligantes asfálticos, reduzindo sua viscosidade e seu gasto energético.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- Avaliar o efeito do envelhecimento a curto prazo para o ligante modificado por óleo de linhaça em teores diferentes dos utilizados neste estudo;
- Avaliar o efeito do envelhecimento a longo prazo para o ligante modificado por óleo de linhaça nos teores utilizados neste estudo.

REFERÊNCIAS

BECHARA, M. F., FAXINA, A. L., FABRI, G. T. P., LEITE, F. M., SOARES, J. B., SOARE, S. A. “**Avaliação dos Efeitos dos Envelhecimentos a Curto e a Longo Prazos por meio de Curvas Mestre**”. In: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis – IBP no 19º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro, Jun, 2008.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA L. M. G.; CERATTI J. A. P.; SOARES J.B.S. **Pavimentação Asfáltica. Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, 2010.

BLASIUS, C. B. et al. **Uso de lã de vidro na produção de misturas asfálticas SMA**. Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade. Dezembro, 2016.

CAVALCANTE, F. P. **Efeito da adição dos óleos de Ricinus communis e Linus usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado**. Tese de D. Sc. UFCG/CCT. Campina Grande. Fevereiro, 2016.

CEZARO JUNIOR, T. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas convencionais e modificadas**. 2008. Dissertação de M. Sc. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2008

CNT, Confederação Nacional dos Transportes. **Modal Rodoviário**. Acesso: <http://www.cnt.org.br/Modal/modal-rodoviario-cnt>. Acesso em 03 de Junho de 2018

COSTA, D. B.; CAVALCANTE, F. B.; RODRIGUES, J. K. G.; MENDONÇA, A. M. G. D.; LIRA, Y. C. **Influência da adição de óleo de linhaça nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo**. 44ª RAPv, 18º ENACOR, 2015.

COSTA, A. **Linhaça - Linum usitatissimum**. Acesso: <http://www.naturezabela.com.br/2013/12/linhaca-linum-usitatissimum.html>. Natureza Bela. Dezembro de 2013. Acesso em 09 de Dezembro de 2018.

CUNHA, T. M. F. **Estudo do Comportamento Físico, Químico e Reológico de Ligante Asfáltico Modificado com Polímero e Materiais Advindos de Plantas Amazônicas para Aplicação em Revestimentos Asfálticos**. 2011. 161 f. Dissertação de M. Sc. – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos da Amazônia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2011.

DIAS, D. F. et al. **Asfalto-borracha: características e benefícios ambientais da tecnologia**. Belém, PA. Setembro, 2016.

FERNANDES, M. R. S. **Efeitos de aditivo tipo óleo e enxofre na reologia de asfaltos modificados com SBS**. Tese de D. Sc. UFRS/PPGEM. Porto Alegre. 2009.

FONSECA, M. M. e YOSHIDA, M. I. **Análise térmica do óleo de linhaça natural e oxidado**. Vértices, Campos dos Goytacaz/RJ, v. 11, n. 1/3, p. 61-75, jan./dez. 2009.

GALVÃO, E. L. et al. **Avaliação do potencial antioxidante e extração subcrítica de óleo de linhaça**. Ciênc. Tecnol. Alim., v. 28, n. 3, p. 551-557, 2008.

HIJJAR, M. F. **Cenário da infraestrutura rodoviária no Brasil**. Acesso: <http://www.ilos.com.br/web/cenario-da-infraestrutura-rodoviaria-no-brasil/>. Instituto ILOS. Setembro. 2011. Acesso em 03 de Junho de 2018

LEE, S., KIM, H., AMIRKHANIAN, S. **“Influence of Warm Mix Additives on PMA Mixture Proper-ties”**, Journal Materials Civil Engineering, pp. 991–997, 2012

LEITE, L. F. **Sustentabilidade de Pavimentos Asfálticos**. SINICESP. São Paulo, 2013.

LUCENA, L.; SILVEIRA, I.; COSTA, D. **Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera Lam para uso em misturas mornas**. Revista Matéria, [S.l.], v. 21, n. 1, p. 72-82, jul. 2015. ISSN 1517-7076. Disponível em: <<https://revistas.ufrj.br/index.php/rm/article/view/3558>>. Acesso em: 23 Mai. 2018.

MARINHO, P. G. T. **Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio**. Dissertação de M. Sc. UFCG/CTRN. Campina Grande. Junho, 2017.

MATOS, T. S. **Investigação das propriedades dinâmico-mecânicas de ligantes asfálticos brasileiros como indicadores de seus desempenhos operacionais em campo**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR. 2017.

MELLO, M. S., **Avaliação das propriedades reológica e mecânica de ligantes e misturas asfálticas irradiadas**. Tese de D. Sc. UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro. 2014

- MOTHÉ, M. G. **Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica.** Dissertação de Mestrado, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2009.
- MOTTA, R. S., **Estudo de Misturas Asfálticas Mornas em Revestimentos de Pavimentos para Redução de Emissão de Poluentes e de Consumo Energético.** Tese de D. Sc. POLI, USP, São Paulo, SP, Brasil, 2011.
- NOGUEIRA, M.G., **Comparação do comportamento em campo de concretos asfálticos com CAP 30-45 e com CAP 50-70 para revestimentos de pavimentos.** Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008
- NOVELLO, D.; POLLONIO, M. A.R. **Caracterização e propriedades da linhaça (*Linum usitatissimum* L.) e subprodutos.** Boletim do Ceppa, v. 29, n. 2, p. 317-330, 2011.
- NTA ASFALTOS. **CAP 50/70.** Acesso: <http://www.nta-asfaltos.com.br/cap-50-70>. Novas Técnicas de Asfalto. Acesso em 09 de Dezembro de 2018
- OTTO, G. G. **Misturas asfálticas mornas: verificação da fadiga e do módulo complexo.** Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Florianópolis, 2009
- SANTOS, G. B. **Gerenciamento de resíduos na indústria de exploração e produção de petróleo: atendimento ao requisito de licenciamento ambiental no Brasil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade do Sul de Santa Catarina, 1, 2013.
- SANTOS, N. S. **Propriedades reológicas do ligante asfáltico (CAP 50/70) modificado por adição de lignina.** Dissertação de M. Sc. UFCG/PPGECA. Campina Grande. Maio, 2017.
- SILVA, G. G. et al. **Estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas.** Dissertação de M. Sc. UFCG/DEC. 2016.
- SINISTERRA, S. Q. **Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas.** Tese de D. Sc. UNB/DECA. Brasília. Setembro, 2014.

SOUZA, M. V. R. Efeito de fibras sintéticas nas propriedades de ligantes e concretos asfálticos. Dissertação de M. Sc. UNB/DECA. Brasília. Março, 2010

TAVARES, D. S. Avaliação laboratorial de mistura asfáltica do tipo SMA com agregado siderúrgico. Dissertação de M. Sc. UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro. 2012

VALENTE, M. C. C. Avaliação das condições de secagem no rendimento e na qualidade do óleo de linhaça (*Linum usitatissimum* L.). Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Belém, p.123. 2011.