



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

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE LIGANTE ASFÁLTICO
MODIFICADO COM ÓLEO DE LINHAÇA**

CONRADO CESAR VITORINO PEREIRA DA SILVA

Orientador: John Kennedy Guedes Rodrigues
Co-orientadora: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça.

Campina Grande-PB, 30/07/2018

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE LIGANTE ASFÁLTICO
MODIFICADO COM ÓLEO DE LINHAÇA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

Campina Grande-PB, 30/07/2018

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

CONRADO CESAR VITORINO PEREIRA DA SILVA

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

Área de habilitação: Geotécnica /Pavimentação.

Orientador: Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues
Co-orientadora: PhD. Ana Maria Gonçalves Duarte Mendonça

CAMPINA GRANDE – PB

Julho/2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

CONRADO CESAR VITORINO PEREIRA DA SILVA

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO COM ÓLEO DE LINHAÇA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 30/07/2018 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

Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues
Orientador
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
Membro Interno
Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

MSc. Paulo Germano Tavares Marinho Filho
Examinador Externo
Faculdade Maurício de Nassau

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, Jesus Cristo e à Virgem Maria por serem minha base, cuidando de mim todos os momentos e me abençoando em tudo. Nada a reclamar, só agradecer!

Aos meus pais, Rita Maria Vitorino e Conrado Pereira, por todo carinho, dedicação e apoio ao longo desta jornada. Também aos meus irmãos, Matheus Augusto e Marcus Túlio, muito obrigado. Esta vitória é nossa!

Às minhas tias Marluci, Marlene, Branca e Marleide, e ao meu tio Sebastião por todo carinho e apoio que me dão desde sempre.

Ao meu orientador John Kennedy por todas as oportunidades que me deu ao longo do curso, apoio, incentivo e aprendizado, desde antes de entrar para Engenharia, quando era aluno do IFPB, até os dias de hoje.

À minha co-orientadora Ana Maria Gonçalves por absolutamente TUDO! Conversas, conselhos, orientações, aprendizado, oportunidades. Ser orientando da senhora é uma honra!

Aos professores Adriano Elísio e Lêda Christiane por todo aprendizado e orientações durante este tempo todo como colaborador do LEP, muito obrigado!

À Ana Letícia Nóbrega por ser incrível desde que nos conhecemos. Todas as noites de estudo, conversas, trabalhos, projetos, fazendo tudo sempre com excelência. Você vai longe!

À Luís Antônio e Mila Rezende pelo companheirismo desde o começo do curso, todos os trabalhos, estudos, projetos que fizemos. Obrigado!

À João Vitor, Flávia do Socorro, Rodrigo, Laís, Jordan, Matheus Celestino, Priscila Luz, Jeovanesa, Paulo Marinho, Jonny Dantas, Lucas de Assis por toda ajuda, material de estudo, dúvidas tiradas, aprendizado.

Aos meus irmãos de LEP Christian e Daniel pela amizade, momentos de lazer, trabalho, companheirismo. Obrigado!

À Ildinho pela amizade e ajuda que sempre prestou no LEP. À dona Ladjane igualmente, principalmente pelas inúmeras xícaras de café que tomei durante estes anos.

À Denyele Gama pela oportunidade de ser PIVIC e PIBIC pela primeira vez, pelo trabalho juntos, pelo aprendizado, agradecimento extensivos à Paula Oliveira, Luana Varela, Camila Nunes, Talita Miranda e Érika Vitória.

A todas as pessoas que me ajudaram de alguma forma, da mais simples à mais complexa, nesta jornada! MUITO OBRIGADO!

Epígrafe

“Did you exchange
A walk on part in the war
For a lead role in a cage?”

Pink Floyd, 1975.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma simplificado do processo de obtenção do asfalto.....	19
Figura 2 – Esquema de funcionamento do reômetro DSR	24
Figura 3 – Amostra de Rediset WMX	28
Figura 4 – Sasobit, em forma de flocos e de pastilha	30
Figura 5 – Óleo de linhaça para madeira	32
Figura 6 – Óleo e semente de linhaça	33
Figura 7 – Fluxograma das etapas da pesquisa	36
Figura 8 – Viscosímetro Rotacional	38
Figura 9 – Ilustração do Envelhecimento a Curto prazo	39
Figura 10 – Ilustração do Envelhecimento a Curto Prazo.....	39
Figura 11 – Misturador Mecânico	40
Figura 12 – Reômetro de Cisalhamento Dinâmico	41
Figura 13 – Tensões e Deformações durante o ensaio de MSCR durante cada ciclo ..	42
Figura 14 – Localização das 3 leituras de tensões durante um ciclo de MSCR.....	43
Figura 15 – Incremento de deformação segundo (Johnson, 2010) no ensaio LAS.....	45
Figura 16 – Gráfico de Viscosidade Rotacional do ligante asfáltico modificado com óleo de linhaça.....	46
Figura 17 – Temperaturas máxima e mínima de usinagem da mistura asfáltica modificada com óleo de linhaça.	47
Figura 18 – Temperaturas máxima e mínima de compactação da mistura asfáltica modificada com óleo de linhaça.	48
Figura 19 – Resultados de Viscosidade Rotacional após envelhecimento.....	49
Figura 20 – Perda de massa das amostras de ligante asfáltico modificado com óleo de linhaça.	50
Figura 21 – Tela de resultado do ensaio de Performance Grade (PG).....	51
Figura 22 – Temperaturas máximas de PG dos ligantes asfálticos modificado com óleo de linhaça.	52
Figura 23 – Gráfico de Módulo Complexo (G^*) x Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos ligantes modificados com óleo de linhaça.	53

Figura 24 – Gráfico de Módulo Complexo (G^*) x Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos ligantes modificados com óleo de linhaça após RTFO	54
Figura 25 – Gráfico de $G^*/\text{sen}(\delta)$ x Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos ligantes modificados com óleo de linhaça.	55
Figura 26 – Gráfico de $G^*/\text{sen}(\delta)$ x Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos ligantes modificados com óleo de linhaça após RTFO.....	55
Figura 27 – Valores de J_{nr} sob tensões de 100 e 3200 Pa dos ligantes modificados com óleo de linhaça.	57
Figura 28 – Valores de J_{nr} diferencial sob tensões de 100 e 3200 Pa dos ligantes modificados com óleo de linhaça.	58
Figura 29 – Parâmetros A e B para os ligantes modificados com óleo de linhaça.....	59
Figura 30 – Estimativa de vida da fadiga do ligante asfáltico.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificação brasileira para cimento asfáltico de petróleo	21
Tabela 2 – Características físico-químicas do óleo de linhaça.....	35
Tabela 3 - Ensaio de Caracterização do ligante	37
Tabela 4 - Normas para realização dos ensaios no DSR	40
Tabela 5 - Classificação quanto ao valor de J_{nr} pela AASHTO M320	43
Tabela 6 - Valores estimados para a vida de fadiga (N_f) do ligante puro e modificado com óleo de linhaça.....	60

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

δ → Ângulo de fase

G^* → Módulo complexo de cisalhamento

J_{nr} → Compliância não-recuperável do ligante asfáltico

$J_{nr,diff}$ → Diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis nas tensões de 100 e 3.200 Pa

N_f → Número de solitações para que ocorra a ruptura da amostra;

ASTM → American Society for Testing and Material

CAP → Cimento asfáltico de petróleo

DNIT → Departamento Nacional de Infraestrutura e Transportes

DSR → Dynamic Shear Rheometer

FHWA → The Federal Highway Administration

FTIR → Fourier-transform Infrared Spectroscopy

LEP → Laboratório de Engenharia de Pavimentos

MSCR → Multiple Stress Creep Recovery

PG → Performance Grade

RTFO → Rolling Thin Film Oven

SARA → Saturates, aromatics, resins, and asphaltenes

SHRP → Strategic Highway Research Program

TUC → Temperatura de usinagem e compactação

UAEC → Unidade Acadêmica de Engenharia Civil

UFCG → Universidade Federal de Campina Grande

WMA → Warm-Mix Asphalt

DAT → Dispersed Asphalt Technology

RESUMO

As misturas mornas são uma importante alternativa para o desenvolvimento da pavimentação por apresentarem uma opção de menor custo, causando menos impactos ambientais com desempenho similar às misturas quentes. Existem vários tipos de substâncias que adicionadas ao ligante asfáltico proporcionam uma redução na temperatura de usinagem e compactação, o que caracteriza uma mistura morna. Entre os principais modificadores estão os óleos, com resultados já obtidos de redução de cerca de 20°C nas temperaturas de aplicação em campo. Neste sentido, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito da adição de óleo de linhaça nos teores de 1, 2, 3, 4, 5 e 6% nas propriedades reológicas do ligante asfáltico partir dos ensaios reológicos de Performance Grade (PG), MSCR e LAS no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR). A partir da análise dos resultados, verificou-se que a temperatura de usinagem pôde ser reduzida em até 15°C para o teor de 6% de óleo de linhaça, porém se perde em grau de performance, nível de tráfego suportado e vida de fadiga. No teor ideal de modificação encontrado, 4% de óleo de linhaça, há uma redução na temperatura de usinagem da ordem de 10°C, bem como a temperatura máxima de PG, 58°C, reduz em apenas um degrau em comparação ao ligante puro, 64°C, além do ligante asfáltico com este teor apresentar a segunda maior vida de fadiga dos teores estudados, sendo classificado como ideal para o tráfego padrão pelo ensaio MSCR. O óleo de linhaça se mostrou uma boa alternativa verde para produção de misturas mornas, gerando economia com gastos energéticos e redução de emissão de fumos tóxicos nocivos às pessoas e ao meio ambiente.

Palavras-chave: Reologia; Misturas Mornas; Pavimentação; Linhaça; Óleo.

ABSTRACT

Warm asphalt mixtures are an important alternative for the paving development, presenting a lower cost option, less environmental impacts and similar performance as the hot mixtures. There are various types of substances which added to the asphalt binder provide an reduction of the mixing and compaction temperature, what characterizes a warm mixture. Between the main modifiers are the oilseeds, witch reduces the temperature in about to 20°C in field applications. In this way, this research aims to evaluate an modified asphalt binder with linseed oil in the contents of 1, 2, 3, 4, 5 and 6% of the asphalt weight using the Performance Grade (PG), MSCR and LAS tests in the dynamic shear rheometer (DSR). Analyzing the results, it is verified that the mixing temperature can be reduced in up to 15°C with the 6% linseed oil sample, however the binder loses in its performance grade, supported traffic level and lifespan. In the ideal modification content, 4% of linseed oil, a reduction of about 10,8°C in the mixing temperature happens and the maximum PG temperature, 58°C, decreases only one degree comparing to the pure binder, 64°C. In addition, this content of asphalt binder presents the second largest lifespan of the studied contents, being classified by the MSCR test as ideal for standard traffic. The linseed oil showed itself a good green alternative for the production of warm mixtures, generating economy with the energetic spendings and reducing the emissions of toxic smoke which are harmful to people and the environment.

Key words: Rheology; Warm Mixtures; Paving; Linseed; Oil.

SUMÁRIO

1.	
INTRODUÇÃO.....	144
1.1. Justificativa.....	15
1.2 Hipótese da Pesquisa	16
1.3	
Objetivos.....	Error!
Bookmark not defined.6	
1.4 Organização do Trabalho De Conclusão de Curso.....	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
4.1. Viscosidade Rotacional.....	46
4.2. Envelhecimento a curto prazo (RTFO).....	49
4.3. Performance Grade (PG).....	51
4.3. Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR).....	56
4.4. Linear Amplitude Sweep (LAS).....	59
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	63
REFERENCIAS.....	65
ANEXO I – RESULTADOS DOS ENSAIOS OBTIDOS NO DSR.....	69

1. INTRODUÇÃO

A modificação de ligantes asfálticos vem sendo feita desde a primeira metade do século XX, pelos mais variados fatores, como por exemplo, a melhoria de propriedades do ligante asfáltico e, conseqüentemente, da mistura asfáltica. Porém, com o desenvolvimento da humanidade e a degradação ambiental que vem atrelada a ele, a preocupação para com os materiais da construção civil serem os menos agressivos ao meio ambiente aumentou bastante as últimas décadas. A mistura asfáltica convencional tem uma temperatura de aplicação que fica na faixa entre 160 e 175 °C, o que gera uma grande emissão de gases promotores do efeito estufa, colocando em risco a vida dos trabalhadores que venham a executar o serviço e tornando o gasto energético elevado para atingir estas temperaturas nas etapas de usinagem e compactação.

Neste viés, surgiram as misturas asfálticas mornas (MAM), que são usinadas e compactadas a uma temperatura de até 140 °C, economizando cerca de 30% do valor gasto para aquecer uma mistura asfáltica quente convencional e diminuindo consideravelmente as emissões de gases poluentes e expondo menos os trabalhadores às situações de risco. As misturas asfálticas mornas foram desenvolvidas na Europa, em 1997, com o objetivo de adequar os procedimentos empregados pela indústria da pavimentação às premissas do Protocolo de Kyoto.

Entretanto, esta tecnologia ainda é considerada recente e existe um número pequeno de pesquisas avaliando meios de diminuir esta temperatura. No Brasil, os estudos e aplicações destes tipos de tecnologias “verdes” iniciaram-se junto aos institutos de pesquisas, onde são desenvolvidas, em sua maioria, com fins acadêmicos. A adição de aditivos orgânicos / químico, emulsões e ligantes sintéticos podem diminuir as temperaturas de operação de usinagem e campo em cerca de 37 °C. Portanto, logo há a importância de intensificar as pesquisas na área de misturas mornas, para se identificar quais seriam as técnicas ou produtos mais convenientes para o país.

Entre os aditivos orgânicos estudados destaca-se o uso de óleos. Souza (2012) estudou a incorporação do óleo da Mamona em CAP 50/70 para fabricação de misturas

mornas com teores de óleo variando de 2 a 9% em peso. O autor encontrou reduções de 10 °C nas temperaturas de usinagem e compactação quando adicionou 5% do óleo da Mamona sem comprometimento das propriedades mecânicas. Ribeiro (2012) estudou misturas mornas com adição do líquido da castanha de caju variando de 0,5 a 2% em peso do CAP. O autor obteve maiores reduções de viscosidade para a adição de 2% do líquido e verificou que a adição contribuiu para retardar o envelhecimento do CAP.

Segundo Costa (2015), o óleo de linhaça, extraído da semente do linho (*Linus usitatissimum*), apresenta cor alaranjada e odor característico e adocicado, rico em ácidos graxos e proteína, sendo um excelente antioxidante. Este óleo apresenta em sua composição 9% de gorduras saturadas, 18% de gorduras monoinsaturadas e gorduras polisaturadas (ômega 3, 57% e ômega 6, 16%). Trata-se de um composto acessível comercialmente, com uso na construção civil, culinária, medicina, fabricação de linóleo, vernizes, corantes e tintas, agindo como agente secante. O óleo de linhaça apresenta características promissoras por ser um óleo oriundo de fonte renovável e biodegradável, apresentar propriedades tensoativas, ser um óleo inerte, antioxidante, de fácil mistura e apresentar grande quantidade de ácidos linoleico e linolênico em sua composição. Mostra-se promissor para reduzir a elevada viscosidade dos ligantes puros e ligantes modificados por polímeros, reduzindo gastos na usina, além de aumentar a estabilidade à estocagem e a adesividade nas misturas com os agregados.

Neste sentido, este projeto tem o objetivo de avaliar as propriedades reológicas de um ligante asfáltico modificado nos teores de 1, 2, 3, 4, 5 e 6% por peso de óleo de linhaça, por meio de ensaios reológicos no reômetro DSR (Dynamic Shear Rheometer) e comparar os resultados com um ligante asfáltico virgem, a fim de conhecer melhor suas propriedades mais complexas de reologia e contribuir para o estado da arte.

1.1. JUSTIFICATIVA

A consolidação do óleo de linhaça como bom modificador de ligante asfáltico abre um novo mercado para esta cultura e traz grande redução em custos para a

pavimentação e torna a atividade menos impactante ao meio ambiente, por reduzir consideravelmente a emissão de poluentes na atmosfera.

1.2. HIPÓTESE DA PESQUISA

Partiu-se da seguinte hipótese: *“O óleo de linhaça pode ser utilizado como agente modificador das propriedades reológicas de um ligante asfáltico utilizado na composição de uma mistura asfáltica morna”*. Como consequência da aceitação desta hipótese, tem-se uma alternativa para diminuir temperatura de usinagem e de compactação da mistura asfáltica e viabilizar uma nova utilização a este óleo na engenharia civil, diminuindo os gastos energéticos envolvidos na execução de um pavimento asfáltico e evitando que os trabalhadores em serviço sejam expostos a situações insalubres.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo principal estudar o efeito da adição de óleo de linhaça nos teores de 1, 2, 3, 4, 5 e 6% nas propriedades reológicas de um ligante asfáltico.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Encontrar o teor ótimo de adição do óleo de linhaça ao ligante asfáltico;
- Mensurar a perda de temperatura de usinagem e compactação da mistura morna em relação à mistura quente;

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 Trabalho de Conclusão de Curso.

Fundamentação Teórica – São abordados assuntos relacionados ao ligante asfáltico, às misturas mornas e ao óleo de linhaça, dentre outros modificadores do ligante.

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

Resultados e Discussões – São apresentados os resultados obtidos para os ensaios realizados neste estudo.

[Capítulo 5] Considerações Finais e Sugestões para Pesquisas Futuras

Por fim, estão as Referências, onde serão listadas as pesquisas citadas no Trabalho de Conclusão de Curso.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Ligantes Asfálticos

O ligante asfáltico é um material de consistência variável, de cor pardo-escuro ou negro, constituído de misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis de elevada massa molecular e pode ser obtido em jazidas naturais ou pela destilação do petróleo. Os asfaltos naturais podem aparecer impregnados nos poros de algumas rochas, formando as denominadas rochas asfálticas (gilsonitas); podem ocorrer em depressões da crosta, constituindo os lagos de asfaltos e encontrar-se, também, misturados com impurezas minerais (areias e argilas) em quantidades variáveis, os quais são submetidos a processos de purificação para serem utilizados na pavimentação.

O asfalto obtido pelo processamento do petróleo bruto, também dito cru, constitui-se do produto final da destilação desse petróleo, no qual as frações mais leves (gasolina, querosene e diesel) são separadas do asfalto por vaporização, fracionamento e condensação (NEGRÃO, 2012). Segundo Gusmão *et al.*, (2011), esse processo de refinação do petróleo, para obtenção do asfalto, depende do tipo de petróleo e do rendimento em asfalto que ele representa, podendo-se empregar distintos processos nas unidades refinadoras:

- Se o rendimento em asfalto for alto (cru de base naftênica), basta, no processo de refinação, a destilação a vácuo do resíduo que irá remover frações de alto ponto de ebulição possibilitando a obtenção do asfalto de destilação direta;
- Se o rendimento em asfalto for médio (cru de base intermediária), o processo é de destilação em dois estágios: pressão atmosférica e a vácuo;
- Se o rendimento em asfalto for baixo (petróleos leves), além da destilação em dois estágios, inclui-se o processo de desasfaltação, no qual a extração de componentes com volatilidade baixa pode ser feita por solvente.

Entre os processos apresentados o mais utilizado para obtenção dos asfaltos brasileiros é o da destilação em duas etapas, pois além desses asfaltos apresentarem teores de resíduo asfáltico baixos, esse processo produz asfalto normalmente sem a

necessidade de instalações especiais e consiste basicamente de uma separação física dos vários constituintes do petróleo, pela diferença entre seus pontos de ebulição e de condensação (FERNANDES, 2011). A Figura 1 apresenta um fluxograma simplificado do processo de obtenção de asfalto.

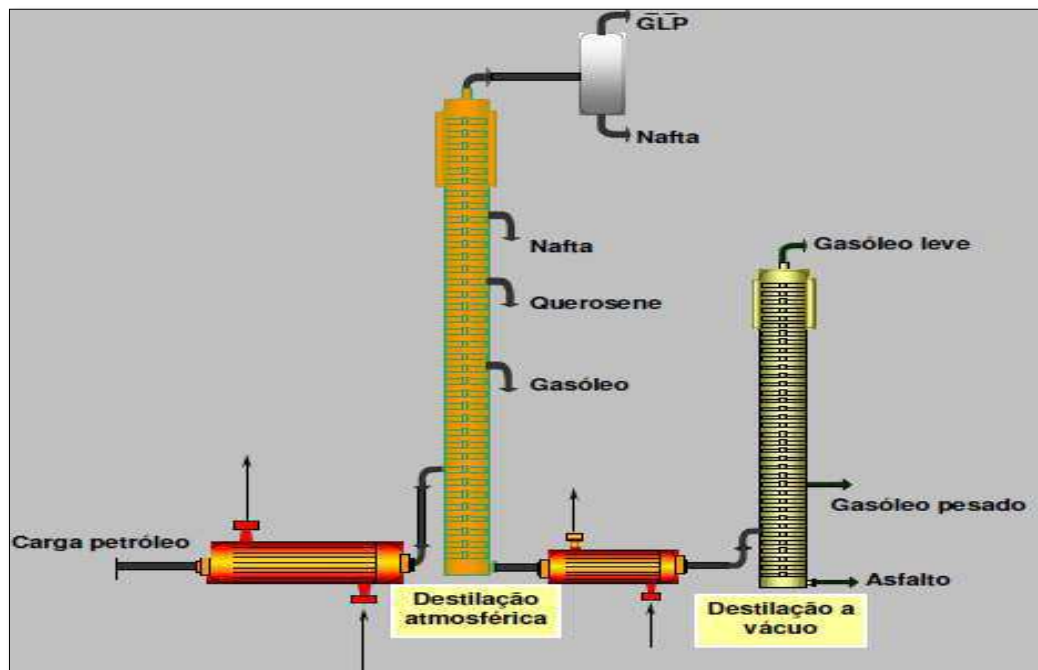


Figura 1 - Fluxograma simplificado do processo de obtenção de asfalto.

Fonte: Fernandes, (2011).

2.2. Principais Funções do Ligante Asfáltico na Pavimentação

Quando em serviços de pavimentação, o ligante asfáltico de petróleo pode ser utilizado com diferentes combinações de esqueleto mineral. Dessa forma, o mesmo tem que apresentar-se com uma consistência adequada, ou seja, suficientemente fluído para facilitar a mistura com agregados, e posterior, lançamento e compactação. Em contrapartida, após a compactação, esse deve ter consistência suficiente para resistir às cargas do tráfego e as variações climáticas. De acordo com Gama, (2016) entre as funções do cimento asfáltico na pavimentação, as principais são:

- Aglutinante: promove a ligação entre os agregados possibilitando que a mistura asfáltica resista à ação mecânica de desagregação, produzida pelas cargas dos veículos;
- Impermeabilização: garantindo ao revestimento vedação eficaz contra a ação da água, proveniente das chuvas, evitando danos ao pavimento;
- Flexibilidade: promovendo ao pavimento uma flexibilidade controlada.

Ainda conforme Gama (2016) nenhum outro material garante melhor que o asfalto a realização econômica e simultânea dessas funções. Contudo, esse autor destaca também que, apesar do cimento asfáltico ser o principal material utilizado na construção de rodovias e vias urbanas, ele apresenta algumas limitações, tais como: em determinadas misturas a presença de umidade na interfase agregado/ligante leva à perda de material pétreo; à resistência a tração do asfalto diminui à medida que o mesmo é flexionado, ou seja, o asfalto perde sua resistência mecânica quando o pavimento sofre deflexões; em baixas temperaturas, se torna rígido e quebradiço, sujeito à trincas, enquanto que em altas temperaturas, amolece e flui, causando deformações permanentes; e ainda apresenta uma tendência ao envelhecimento (oxidativo).

Assim, buscando garantir a qualidade do asfalto utilizado na pavimentação, surgiram às especificações, essas tendo como objetivo definir parâmetros para a produção e utilização desse material, mais precisamente definir faixas de aceitação baseadas em ensaios físicos, químicos e mecânicos segundo normas determinadas. Os asfaltos, comercializados no Brasil, devem então atender as especificações estabelecidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP), instituída pela resolução normativa n. 19, de 11 de julho de 2005, que classifica os asfaltos brasileiros, denominados de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), pelos valores de penetração, os quais devem atender as especificações listadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificação brasileira (Resolução n. 19 da ANP, 11/07/2005) para cimento asfáltico de petróleo – CAP.

CARACTERISTICAS	UNID.	LIMITES			
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200
Penetração (100g,5s,25°C)	0,1mm	30-45	50-70	85-100	150-200
Ponto de amolecimento	°C	52	46	43	37
Viscosidade Rotacional – 20 rpm					
-a 135 °C, SP 21 (mín)	cP	374	274	214	155
-a 150 °C, SP 21 (mín)		203	112	97	81
-a 177°C, SP 21 (mín)		76 – 285	57 – 285	28 - 114	28 - 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
Solubilidade em tricloroetileno, mín	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5
Ductilidade a 25 C, mín	Cm	60	60	100	100

EFEITO DO CALOR E DO AR (RTFO) A 163 °C, 85 mín

Varição em massa (máx)	%	1,0	1,0	1,0	1,0
Ductilidade a 25 C (mín)	Cm	10	20	50	50
Aumento do ponto de amolecimento (máx)	°C	8	8	8	8
Penetração retida (mín*)	%	60	55	55	50

(*) Relação entre a penetração após o efeito do calor e do ar em estufa RTFOT e a penetração antes do ensaio. Fonte: Adaptada da ANP, (2013).

2.3. Reologia de Ligantes Asfálticos

Reologia é a ciência que estuda a deformação e fluxo dos materiais, seja nas formas de líquido ou sólido, em termos da elasticidade e da viscosidade do material. O ligante asfalto é um material viscoelástico e pode exibir tanto um comportamento elástico como viscoso, ou uma combinação destes dois comportamentos, dependendo da temperatura e do tempo no qual o ligante é observado. O estudo do comportamento reológico dos materiais betuminosos tem por objetivo principal encontrar a relação entre deformação, tensão, tempo de aplicação da carga e temperatura. A investigação dessas propriedades contribui para a compreensão do desempenho do ligante asfáltico, quando submetido a tensões provenientes do tráfego e a tensões térmicas devido a variações da temperatura ambiente.

Quando submetidos a temperaturas suficientemente baixas e/ou em altas taxas de carregamento (frequência), o asfalto reage essencialmente como um sólido elástico. Porém, quando a temperatura aumenta e/ou a taxa de carregamento reduz, a viscosidade do asfalto se torna mais evidente. Em temperaturas suficientemente altas e/ou em longo tempo de aplicação de cargas, o asfalto é essencialmente um líquido Newtoniano e pode ser descrito por um valor de viscosidade independente da taxa de aplicação de carga (LU *et al.*, 2009).

As propriedades reológicas dos asfaltos podem influenciar significativamente no desempenho das misturas asfálticas durante a compactação e em serviço. Por estas razões, vários tipos de testes reológicos são incluídos nas especificações dos asfaltos. As propriedades reológicas dos asfaltos são determinadas pelas interações moleculares (forças moleculares), que por sua vez dependem da composição química (LU *et al.*, 2009).

Em princípio, as propriedades reológicas desejadas para o asfalto podem ser conseguidas mudando a composição química do asfalto usando um aditivo ou uma modificação através de reação química. A adição de polímero é uma alternativa versátil de modificar a reologia dos asfaltos. Muitos tipos de polímeros são aproveitáveis, entretanto, não há um polímero universal e uma seleção deve ser realizada de acordo com as necessidades (LU *et al.*, 2009).

As propriedades reológicas dos ligantes asfálticos variam consideravelmente com a variação da temperatura, embora a forma dessa variação não guarde relação de simetria, já que ela varia de forma particular para cada ligante asfáltico, por ser função de dependência direta da sua suscetibilidade térmica. Esta, por sua vez, depende diretamente da constituição química e da forma como as micelas e o meio intermicelar se arranjam para atingir o equilíbrio coloidal estável (DNIT, 1998).

O reômetro de cisalhamento dinâmico (*Dynamical Shear Rheometer* – DSR) é usado para caracterizar as propriedades viscoelásticas do ligante. Com este equipamento é possível medir o módulo complexo de cisalhamento (G^*) e o ângulo de fase (δ), submetendo uma pequena quantidade de ligante a tensões de cisalhamento oscilatórias, entre duas placas paralelas. O módulo G^* pode ser relacionado com a resistência do material em diferentes velocidades de cisalhamento e o ângulo δ fornece informações sobre a razão entre a resposta elástica e viscosa durante o processo de cisalhamento (MOTTA *et al.*, 1996). A Figura 2 apresenta um esquema de um reômetro que consta das especificações da *Strategic Highway Research Program* (SHRP).

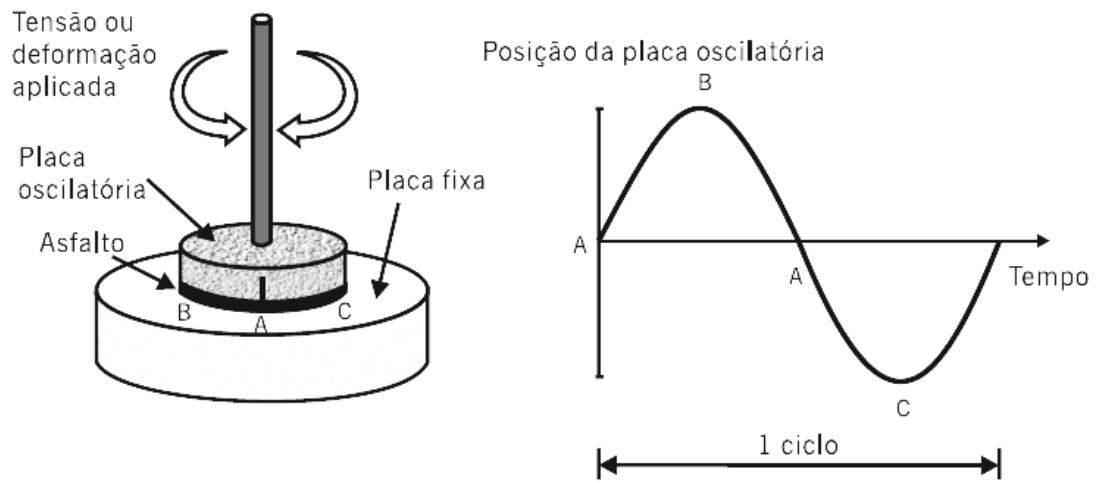


Figura 2 – Esquema de funcionamento do reômetro DSR. Fonte: SHRP

O módulo complexo pode ser definido como:

$$G^* = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\gamma_{m\acute{a}x}} \text{ e } \delta = \omega \cdot (\Delta t)$$

Onde:

G^* = módulo complexo de cisalhamento;

$\tau_{m\acute{a}x}$ = máxima tensão de cisalhamento aplicada;

$\gamma_{m\acute{a}x}$ = máxima deformação devido a tensão de cisalhamento aplicada;

ω = frequência angular;

Δt = tempo de defasagem.

O viscosímetro rotacional (*Rotational Viscometer* – RTV) caracteriza a rigidez do asfalto a 135°C, na qual age quase que inteiramente como um fluido viscoso. É um viscosímetro rotacional de cilindros coaxiais, que mede a viscosidade através do torque necessário para rodar um *spindle* imerso na amostra de asfalto quente, à velocidade constante. A especificação de ligante para o CAP 50-70, por exemplo, requer que este tenha uma viscosidade inferior a 3,5 Pa*s (3.500 cP) a 135°C. Isto assegura que o ligante pode ser bombeado e facilmente usado (LEITE, 2009).

O principal objetivo de se usar ensaios reológicos na especificação de ligantes é identificar correlações confiáveis entre as propriedades fundamentais dos ligantes asfálticos com o desempenho da mistura em serviço e, a partir desses ensaios, obterem previsões da vida de fadiga, resistência à deformação permanente e resistência às trincas térmicas dos concretos asfálticos que são os defeitos estruturais predominantes nas pavimentações asfálticas.

2.4. Misturas Mornas

Para a produção de misturas asfálticas convencionais devemos aquecer o ligante asfáltico bem como os agregados em temperaturas que variam entre 150°C e 175°C para que o ligante seja capaz de envolver os agregados formando assim uma mistura homogênea. Para a obtenção de tais temperaturas existe um processo que requer uma alta quantidade de energia que geralmente ocorrem devido a queima de combustíveis fósseis, que por sua vez liberam uma grande quantidade de gases tóxicos nocivos ao homem e ao meio ambiente. Se torna clara então a necessidade de redução deste consumo de energia e por consequência a emissão destes gases, o que abre espaço para as misturas asfálticas mornas. Estas são capazes de manter as mesmas qualidades de uma mistura a quente gerando melhores ambientes de trabalho, melhor trabalhabilidade, maiores lucros, qualidade, durabilidade e menos danos ao meio ambiente.

Para a obtenção das misturas asfálticas mornas, existem vários processos que podem ser utilizados, variando assim, desde a tecnologia empregada à escolha do ligante asfáltico.

2.4.1. Classificação

Atualmente, a produção de misturas asfálticas mornas é possível devido as seguintes técnicas: espumejo do asfalto, introdução de aditivos orgânicos e aditivos surfactantes.

2.4.1.1. Aditivos Surfactantes

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

Segundo Silva (2016), a introdução dos aditivos surfactantes pode ser realizada antes e durante a usinagem possuindo um sistema de utilização simples que não necessita de alterações na planta de usina evitando assim custos iniciais. De acordo com a tecnologia utilizada se torna possível a redução da temperatura de usinagem por volta de 30°C à 40°C. Dentre os aditivos pertencentes a classe surfactante podemos citar alguns exemplos como: Cecabase RT, Evotherm, Gemul XT14, Rediset WMX, Revix.

Evotherm

A tecnologia de mistura morna Evotherm utiliza um “pacote químico” misturado a uma emulsão ou a um asfalto, tendo sido desenvolvida pela empresa norte-americana MeadWestvaco. A tecnologia Evotherm permite uma redução da temperatura de usinagem e de compactação de misturas mornas seja da ordem de 50 a 75°C em comparação com uma mistura em temperatura convencional.

O produto possui como finalidade, melhorar a adesividade, o recobrimento e a trabalhabilidade das misturas asfálticas podendo ser alterado de acordo com o agregado a ser utilizado. Denominado Evotherm *Emulsion Technology (ET)*. O pacote

químico é misturado a uma emulsão com alto resíduo de asfalto (70%) e, posteriormente, a estocagem deve ser feita a 80°C. Ainda segundo Silva (2016), na usinagem esta emulsão deve ser misturada com os agregados aquecidos, visando fabricar misturas asfálticas com temperaturas que variam entre 85 e 115°C, sendo que nesta etapa a maior parte da água contida na emulsão sofre vaporização ao entrar em contato com os agregados quentes. Por fim, estes últimos ficam bem recobertos e a mistura morna resultante aparenta uma cor negra, bem característica de misturas a quente.

Posteriormente, o Evotherm passou a ser substituído por um novo processo denominado Evotherm *Dispersed Asphalt Technology* (DAT), no qual o pacote químico passou a ser diluído com uma pequena quantidade de água e injetado no ligante asfáltico, e não mais em uma emulsão, sendo esta injeção realizada diretamente na linha de asfalto, imediatamente antes do misturador de usinas drum-mixer ou diretamente no pugmill de usinas gravimétricas.

No caso da tecnologia ET, o pacote químico é vendido já misturado à emulsão, enquanto na DAT o cliente apenas recebe o produto para incorporá-lo ao ligante, ocasionando uma redução dos custos de transporte, permitindo assim que a usina transite rapidamente entre os processos de fabricação da mistura morna e da mistura convencional.

No caso do método ET, a emulsão pode ser bombeada diretamente da carreta ou estocada em um tanque, mas deve-se atentar para a quantidade de asfalto residual na emulsão, podendo haver a necessidade de aumento do seu teor para que a quantidade de água fique em 30%. Já na técnica DAT, se faz necessário a instalação de uma bomba volumétrica para o pacote químico e de um ponto de injeção na linha existente de asfalto.

Rediset WMX

O RedisetTM WMX, ilustrado na Figura 3, é um aditivo surfactante desenvolvido pela empresa holandesa Akzo Nobel, que combina agentes surfactantes e aditivos

orgânicos, sendo comercializado em forma de pastilhas. Possui elementos capazes de melhorar o recobrimento do ligante sobre a superfície dos agregados, proporcionando efeito antistripping à mistura asfáltica por atuarem como melhoradores de adesividade e que ainda conferem alguma redução da viscosidade do ligante, reduzindo a temperatura da mistura asfáltica final em cerca de 30°C comparada à de uma mistura em temperatura convencional.



Figura 3 – Amostra de Rediset WMX.

Fonte: Silva (2016)

Em geral, este produto é empregado utilizando-se uma taxa de 1,5 a 2,5% em massa de ligante, o que não é suficiente para alterar significativamente as propriedades de consistência do asfalto em que é adicionado. A incorporação do RedisetTM WMX na produção de misturas mornas é simples e não requer alterações na planta de usina, podendo ser feita diretamente no tanque de asfalto aquecido ou na mistura em usinas gravimétricas ou drum-mixer.

Revix

O Revix é uma tecnologia de misturas mornas produzidas com aditivos surfactantes, que foi desenvolvida pelas empresas norte-americanas Mathy Technology and Engineering Services e Paragon Technical Services. Este sistema é baseado na

utilização de uma variedade de surfactantes, ceras, auxiliares de processo, polímeros, ácidos e outros materiais, o que permite que haja uma redução do atrito interno entre as partículas de agregados e as finas películas de ligante quando estes materiais se encontrarem submetidos às altas taxas de cisalhamento durante o processo de mistura e à grandes tensões de cisalhamento na compactação.

Cecabase RT e Gemul XT14

O Cecabase RT é produzido pela empresa francesa Ceca do grupo Arkema, já o Gemul XT14 é um produto da empresa brasileira Quimigel. De acordo com o fornecedor do Gemul XT14, este aditivo é um agente tensoativo composto de amidas sintéticas. O Cecabase RT e o Gemul XT14 são aditivos encontrados em forma líquida, que atuam como tensoativos ou agentes de superfície (surfactantes), que permitem que o ligante possa recobrir os agregados de forma adequada quando a usinagem ocorre em temperaturas mais baixas que o habitual para a produção de misturas mornas, além disso, atuam como melhoradores de adesividade (MOTTA, 2012).

O Cecabase RT e o Gemul XT14 podem ser utilizados em misturas mornas com ligantes convencionais ou modificados, permitindo que a temperatura da mistura asfáltica final seja cerca de 30°C inferior à de uma mistura em temperatura convencional.

2.4.1.2. Aditivos Orgânicos

Ao serem misturados com o ligante os aditivos orgânicos possuem a capacidade de modificar suas propriedades reológicas resultando principalmente na redução de sua viscosidade. Silva (2016) afirma que tais mudanças ocorrem ao elevarmos a temperatura do ligante acima do seu ponto de amolecimento. A escolha do tipo e da taxa de aditivo orgânico utilizados para a produção de uma mistura morna deve ser feita de modo cauteloso, visando à temperatura na qual ocorre o ponto de amolecimento destes produtos e à temperatura esperada na vida de serviço do pavimento, a fim de se obter uma redução do risco de deformação permanente e também minimizar o potencial

de trincamento por baixas temperaturas. Isto se deve ao fato de que pode haver uma redução drástica da viscosidade do ligante, além de existir o risco de um forte enrijecimento da mistura asfáltica devido a grandes quantidades de aditivo utilizado.

Os aditivos orgânicos podem ser incorporados antes e durante a usinagem, resultando em uma redução da temperatura de mistura em cerca 30 a 40°C. Após o resfriamento da mistura asfáltica, estes elementos passam por um processo onde os mesmos se cristalizam de modo disperso no ligante, resultando num aumento da rigidez do asfalto e, por consequência, da mistura como um todo (RÜHL, 2014). Entre alguns tipos de aditivos orgânicos encontram-se: Asphaltan B, CCBit 113AD, Licomont BS 100 e Sasobit.

Sasobit

Trata-se de uma cera parafínica, ilustrada na Figura 4, tipo Fischer-Tropsch (F-T), produzida pela empresa alemã Sasol Wax GmbH que permite a produção de misturas mornas por redução da viscosidade do ligante, consequentemente reduzindo as temperaturas de trabalho de 18°C a 54 °C. As ceras F-T são obtidas a partir da gaseificação do carvão na presença de um catalisador e caracterizam-se por uma longa cadeia de hidrocarbonetos alifáticos de polimetileno (HURLEY e PROWELL, 2005).



Figura 4 – Sasobit, em forma de flocos e de pastilha, respectivamente.

Fonte: Prowell e Hurley (2005)

Os processos de mistura asfálticas com Sasobit vem sendo realizados do mesmo modo que os de misturas convencionais, havendo somente a incorporação do produto na mistura e a redução da temperatura de usinagem. Sua adição pode ser feita tanto ao CAP antes da usinagem, quanto à mistura imediatamente antes da entrada do CAP ou em conjunto com este. A temperatura final da mistura asfáltica morna com Sasobit chega a ser até 30°C menor do que a temperatura de uma mistura convencional.

CCBit

De acordo com Silva (2016) o CCBIt é um éster metílico de ácido graxo, fornecido na forma de pó, pode também ser encontrado na forma de grânulos ou flocos possui cor amarela esbranquiçada e não possui odor. Seu ponto de liquefação é de aproximadamente 139°C e ponto de fulgor de 279°C. Sendo insolúvel em água à 20°C e com densidade variando entre 0,99 – 1,01 g/cm³ (23°C). Seu pH é 9 (10g diluídos em 100 ml de água) e sua viscosidade dinâmica é de aproximadamente 15mPa.s (150°C).

Oliveira (2014) fez um estudo analisando os efeitos do CCBIt 113AD no comportamento mecânico de misturas asfálticas e ficou constatado que a adição de 2,5% de aditivo era capaz de reduzir a temperatura de usinagem e compactação em até 40°C. Esta redução de temperatura ocorre sem que haja perdas das propriedades originais do CAP gerando uma melhor trabalhabilidade do material.

Cera de Carnaúba

A carnaúba (*Copernicia prunifera*) é uma palmeira nativa da região semiárida do Nordeste brasileiro. É encontrada em grande quantidade no estado do Ceará sendo considerada uma planta xerófila, ou seja, capaz de resistir às secas. A carnaúba tem folhas em forma de leque, cobertas em ambas as superfícies, por uma camada cerosa. Os sertanejos têm diferentes denominações para as folhas da carnaúba: as folhas novas que ainda não abriram são os “olhos”, as folhas verdes maduras são as “palhas”,

as folhas intermediárias ou olhos recém-abertos são as “medianas ou bandeiras” e as folhas velhas secas aderidas à carnaúba são as “palhas bravas”.

Silva (2016) apresentou um estudo que concluiu que utilizando-se um teor de 5% de cera de carnaúba em relação ao peso do CAP se torna possível a utilização da mistura asfáltica a 125°C. O CAP modificado com cera proporcionou uma expressiva redução da viscosidade quando comparado aos CAP puro, aumento na resistência ao envelhecimento e maior resistência a tração por compressão, comprovando assim sua eficácia como aditivo orgânico.

2.4 Óleo de Linhaça

O óleo de linhaça apresenta coloração castanho-escura e odor característico e adocicado. Trata-se de um composto acessível comercialmente para uso na construção civil, com resultados já comprovados, sendo utilizado como aditivo em tintas, conferindo a estas maior brilho, durabilidade e poder de secagem; acabamento estético em madeira, entre outros. O óleo de linhaça apresenta características promissoras, sendo um óleo oriundo de fonte renovável e biodegradável, apresenta propriedades tensoativas, é um óleo inerte, antioxidante, de fácil mistura e apresenta grande quantidade de ácidos linoléico e linolênico em sua composição. Este óleo mostra-se promissor para reduzir a elevada viscosidade dos ligantes convencionais e ligantes modificados por polímeros, reduzindo gastos na usinagem, além de aumentar a estabilidade à estocagem e a adesividade nas misturas com os agregados.



Figura 5 – Óleo de linhaça para madeira.

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 (CAVALCANTE, 2016). As sementes podem ser utilizadas para produção de óleo e farelo. O óleo é vendido como matéria-prima para empresas produtoras de tintas, vernizes, resinas, sabões, linóleo e outros fins industriais (BICKERT, LÜHS e FRIEDT, 1994), podendo ser também encontrado encapsulado ou engarrafado para fins alimentícios; já o farelo, pode ser produzido para o consumo humano ou mais comumente, ser utilizado como matéria-prima para produção de rações animais. As sementes são utilizadas ainda na fabricação de pães, bolos, biscoitos, barras de cereais e suplementos alimentares (GALVÃO, 2009).

No hemisfério sul o plantio da linhaça ocorre nos meses de outono (abril a junho) e a colheita se dá nos meses de primavera e verão (novembro a dezembro). No Brasil, a cultura convencional é a da linhaça marrom, pela adaptação ao clima, ao solo e às técnicas de manuseio. Quando não orgânica, consome baixa carga de insumos agrícolas (máximo 150 kg/hectare) em relação às culturas do trigo (cerca de 800 kg/hectare) e da soja (cerca de 300 kg/hectare). Dentre os estados brasileiros, o que mais se destaca na produção é o Rio Grande do Sul, principalmente depois de 2008, quando foram plantadas as primeiras lavouras para produção comercial da semente.



Figura 6 – Óleo e semente de linhaça.

O óleo de Linhaça possui a particularidade, dentre as oleaginosas, de possuir o maior índice de oxidação – IO. A oxidação de óleos vegetais ocorrerá a diferentes velocidades, levando em consideração a quantidade e posição das insaturações na cadeia graxa. Compostos insaturados são significativamente mais susceptíveis à oxidação que os compostos saturados. Essa tendência à oxidação cresce na medida em que aumenta o grau de insaturação. Esta propriedade é variável nos óleos vegetais e depende do grau de insaturação e tamanho das cadeias graxas que os compõem. Podendo também ser influenciada pela presença de ramificações e posicionamento das insaturações (MELO, 2010).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais utilizados na pesquisa foram:

CAP 50/70 → Proveniente da refinaria de Paulínia/SP – REPLAN, obtidos da distribuidora Stratura Asfaltos S/A (antiga Ipiranga Asfaltos S/A).

Óleo de Linhaça → Obtido na distribuidora Mundo dos óleos, cujas características estão descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características físico-químicas do óleo de Linhaça.



Óleo de Linhaça

Nome científico	<i>Linum usitatissimum</i> – <i>Linaceae</i> (Linum Óil)
Procedência	Produto de fabricação nacional (Made in Brazil)
Forma de obtenção	Prensagem a frio e filtração (Cold press and filtration)
CAS / EINECS	8001-26-1 / 232-278-6
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 Refração (n _D , 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

Característica	Especificação *	Resultado
Bactérias totais – 1.000 UFC/g	<10 ³ UFC/g	De acordo
Fungos e leveduras – 100 UFC/g	<10 ³ UFC/g	De acordo
Coliformos totais	Ausente	De acordo
E.Coli	Ausente	De acordo
Staphylococcus Aureus	Ausente	De acordo
Pseudomonas SP	Ausente	De acordo

* Metodologia - Farmacopéia Brasileira

LOTE: LIN 079/389

DATA DE FABRICAÇÃO: 25/11/2011

DATA DE VALIDADE: 18 meses após a data de fabricação em embalagens lacradas.

Conservar em local seco e arejado, temperatura máxima 25°C não expor este produto ao calor nem a raios solares.

PRINCIPAIS APLICAÇÕES: Uso alimentício, cosmético, farmacêutico.

Liberado por:  RODRIGO HENRIQUE Chefe de Produção	Analisado por:  PAMELA K. VICIGIANI CRP 50346 Controle de Qualidade	Aprovado por:  RENATO VASCONCELOS CRP 35445 Responsável Técnico
--	---	---

As informações aqui contidas são fornecidas de boa fé. Recomendamos que nossos produtos sejam testados para verificar a conveniência de seu uso antes de adotá-los industrialmente. Estas informações não devem ser entendidas como permissão para utilização de métodos ou composição cobertas por qualquer patente.

Tel: (011) 3028-1447 / 3022-0500 / 0466-0930 - Visite nosso site: <http://www.mundodosoleos.com.br> ou e-mail: contato@mundodosoleos.com.br

2.2. Metodologias

A Figura 7 ilustra o Fluxograma das etapas da pesquisa, atividades e ensaios a serem realizados. Este projeto será dividido basicamente em três etapas:

Primeira Etapa – Seleção e Caracterização de Materiais: descrição dos materiais, critérios adotados para escolha e laboratórios utilizados, além de realização de ensaios para determinação das propriedades físicas do cimento asfáltico de petróleo puro.

Segunda Etapa – Modificação do cimento asfáltico de petróleo com o óleo de linhaça nos teores de 1, 2, 3, 4, 5 e 6% por peso de ligante;

Terceira Etapa – Ensaios reológicos no DSR e caracterização das propriedades físicas com o ligante asfáltico modificado.

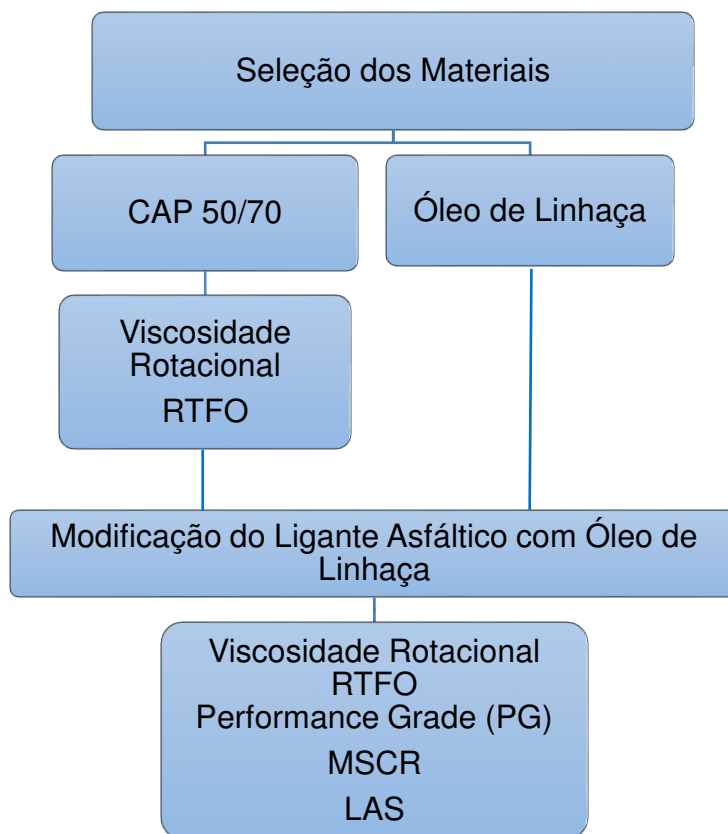


Figura 7 - Fluxograma das etapas da pesquisa.

3.1. Primeira Etapa: Seleção e Caracterização dos Materiais

Na Tabela 3 estão descritas as normas de ensaios de caracterização do ligante asfáltico que foram utilizadas nesta pesquisa.

Tabela 3 – Ensaios de Caracterização do ligante puro e modificado

ENSAIO	NORMA TÉCNICA
Viscosidade Rotacional	ASTM D 4402
Envelhecimento a curto prazo	ASTM D2572/2010

3.1.1. *Ensaio de Viscosidade Rotacional*

A descrição e normatização deste ensaio são feitas pela NBR 15184/05 e pela ASTM D 4402/02. O ensaio de viscosidade rotacional permite medir as propriedades de consistência dos ligantes. Utilizou-se o viscosímetro rotacional, ilustrado na Figura 8, acoplado a um controlador de temperatura, a partir do qual é medido o torque necessário para rodar uma haste de prova (spindle) imersa em uma amostra de ligante aquecida sob velocidade constante. Este ensaio foi realizado nas temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C e a unidade de medida da viscosidade dinâmica é expressa em centipoise (cP). A partir destes dados é possível obter-se a curva viscosidade-temperatura. Além de ser usada como propriedade de controle na formulação de ligantes asfálticos modificados, a viscosidade também é empregada na estimativa das temperaturas de usinagem e de compactação da mistura asfáltica.



Figura 8 - Viscosímetro Rotacional - LEP/DEC/UFCG.

Fonte: Autor

3.1.2. Envelhecimento a Curto Prazo (RTFO)

Neste ensaio, oito recipientes cilíndricos de vidro (jarros) contendo 35 gramas de ligante são fixados em uma prateleira vertical rotativa, como apresentado na Figura 9, que são aquecidos na estufa ilustrada na Figura 10. Durante o teste, o ligante asfáltico flui continuamente em volta da superfície interna de cada recipiente, como uma película relativamente fina (1,25 mm) com ar pré-aquecido periodicamente soprado dentro de cada jarro de vidro. A amostra literalmente rola no recipiente de vidro durante 85 minutos à temperatura de 163°C com ventilação.

Após este procedimento, é possível submeter o ligante asfáltico residual a vários ensaios, como penetração, ponto de amolecimento, ductilidade, viscosidade, entre outros, além da obtenção da perda de massa.



Figura 9 - Envelhecimento a Curto Prazo - LEP/DEC/UFCG.

Fonte: Dados da Pesquisa (2018)



Figura 10 – Estufa para realização de ensaio de RTFO - LEP/DEC/UFCG.

Fonte: Dados da Pesquisa (2018)

3.2. Segunda Etapa: Modificação do Ligante Asfáltico com Óleo de Linhaça

A mistura do ligante asfáltico com o óleo de Linhaça foi realizada em um misturador mecânico FISATOM, modelo 72 (Figura 11). O processo de modificação foi feito da seguinte forma:

- Rotação de 500 rpm;
- Ligante asfáltico mantido entre 130 e 135°C;

- Adiciona-se óleo de linhaça misturando durante 20 minutos nos teores estabelecidos;



Figura 11 - Misturador Mecânico - LEP/DEC/UFCG.

Fonte: Autor

3.3. Terceira Etapa: Caracterização reológica do ligante

Após a modificação do ligante, foram realizados ensaios de caracterização reológica descritos na Tabela 4, realizados no reômetro DSR conforme ilustra a Figura 12.

Tabela 4 – Ensaios de caracterização reológica.

ENSAIO	NORMA
Determinação das propriedades reológicas	ASTM D7175 – 08
Determinação do grau de desempenho (PG)	ASTM D6373 - 15
Ensaio de fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR)	ASTM D7405-15
Linear Amplitude Sweep - LAS	-



Figura 12 – Reômetro de Cisalhamento Dinâmico. Série DHR1 – TA Instruments

Fonte: Dados da pesquisa (2018)

3.3.1. Performance Grade

O ensaio de PG (performance grade) determina as temperaturas máxima e mínima em que o ligante asfáltico mantém certas propriedades reológicas de desempenho. Devido ao clima tropical no Brasil, foi identificado nesta pesquisa apenas o PG máximo para as amostras de CAP puro e modificado. A normatização do ensaio é descrita pela ASTM D6373-15.

Para se definir o PG de uma amostra de ligante asfáltico, é feita uma varredura em função da razão entre o módulo complexo (G^*) e o seno do ângulo de fase ($\text{sen}\delta$) para temperaturas variando em uma faixa de 6°C entre cada leitura. A faixa de temperaturas inicial utilizada para se alcançar o PG foi a de 46°C-52°C.

O PG corresponde à faixa de temperaturas na qual os valores de $G^*/\text{sen}\delta$ são superiores a 1,0 kPa e 2,2 kPa, respectivamente para as amostras antes e após o envelhecimento a curto prazo. A temperatura máxima será obtida com o ponto de falha determinado no ensaio. Sendo assim, estes valores são capazes de garantir a adequada resistência ao acúmulo de deformações permanentes (BERNUCCI et. al.,

2007). Nesta pesquisa foi dispensado a realização do ensaio para se determinar a temperatura mínima de PG, devido ao fato de que no Brasil não é comum a ocorrência de temperaturas negativas, detendo-se apenas à temperatura máxima de PG.

3.3.2. Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)

O ensaio de MSCR (Multiple Stress Creep Recovery) busca avaliar o comportamento fluência-recuperação do ligante asfáltico e é regido pela norma ASTM D7405-15. De acordo com a norma, aplica-se uma carga constante durante o período de 1 segundo sobre uma amostra de ligante asfáltico, removendo-a logo em seguida para que o material repouse por 9 segundos. Primordialmente este ciclo era repetido por 10 vezes em 11 níveis diferentes de tensão controlada. Porém, posteriormente este número de níveis foi reduzido para 2 (a 100Pa e a 3200Pa), mantendo-se os 10 ciclos. Para este ensaio, a temperatura utilizada para cada amostra de CAP modificado pelo óleo de linhaça, correspondeu a sua temperatura do PG. A Figura 13 ilustra as tensões e deformações durante o ensaio MSCR.

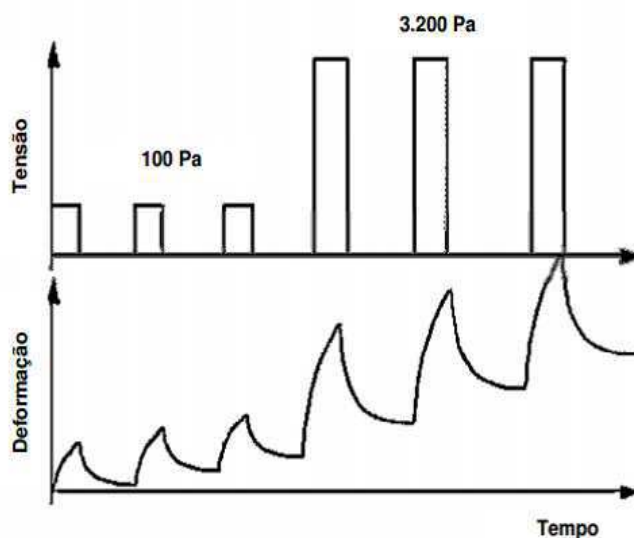


Figura 13 - Tensões e Deformações durante o ensaio de MSCR durante cada ciclo

Fonte: D'Angelo e Dongré (2009)

Domingos (2011) cita que ao final destes ciclos de tensão controlada são obtidos o percentual de recuperação (R) e a compilância não-recuperável (J_{nr}) através dos valores das 3 leituras de deformação de cada ciclo, as quais são a recuperação no início da fluência (ϵ_0), após a aplicação da tensão controlada (ϵ_c) e após o tempo de recuperação da amostra (ϵ_r). Estas leituras ocorrem nos tempos, 0 s, 1 s e 10 s. A Figura 14 ilustra a localização das 3 leituras de tensões durante um ciclo de fluência e recuperação durante o ensaio MSCR.

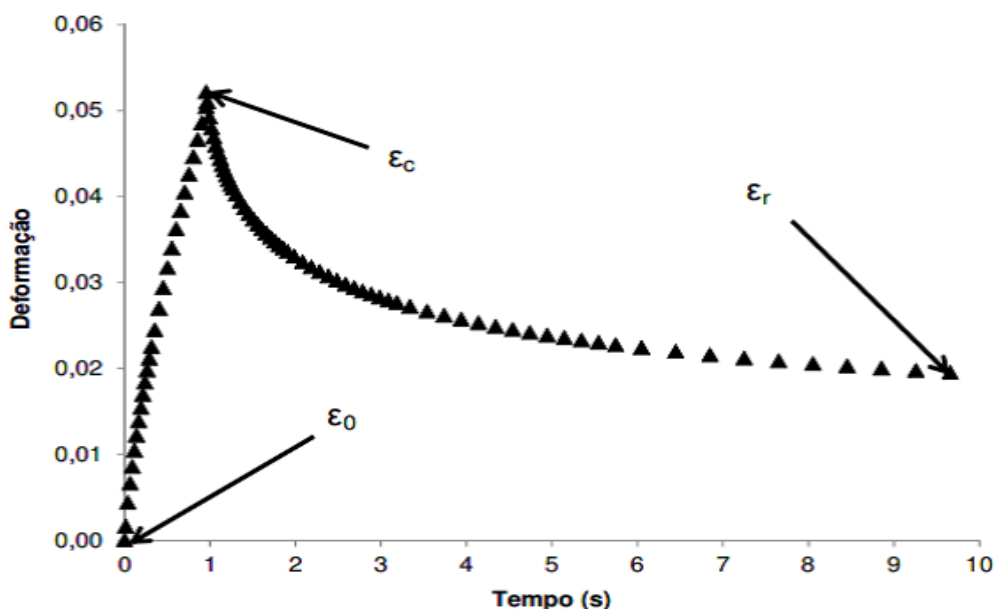


Figura 14 - Localização das 3 leituras de tensões durante um ciclo de MSCR

Fonte: Domingos (2011)

De acordo com D'Angelo (2010), o J_{nr} se trata de um parâmetro para altas temperaturas obtido no MSCR. A partir dele, foi desenvolvida uma tabela baseada nos diferentes níveis de carregamento no tráfego, classificados como: padrão (*Standard*), pesado (*Heavy*), muito pesado (*Very Heavy*) e extremamente pesado (*Extremely Heavy*). Na Tabela 5 está apresentada a classificação quanto ao valor de J_{nr} segundo a AASHTO M320.

Tabela 5 - Classificação quanto ao valor de J_{nr} pela AASHTO M320.

Condição de envelhecimento	Propriedade	Limite Máximo (kPa ⁻¹)	Nível de Tráfego	Número de Solicitações
Envelhecido no RTFO	Jnr a 3200Pa	4,0	Padrão (S)	< 10 milhões
	na	2,0	Pesado (H)	> 10 milhões
	temperatura	1,0	Muito Pesado (V)	> 30 milhões
	do PG	0,5	Extremamente Pesado (E)	> 100 milhões

Fonte: Pamplona (2013)

Segundo o Asphalt Institute (2010), a diferença porcentual do J_{nr} a 100 Pa e a 3200 Pa não deve exceder 75%, a fim de assegurar que o ligante asfáltico não seja excessivamente sensível a variação no nível de tensão.

3.3.4 Linear Amplitude Sweep (LAS)

Este ensaio preconizado pela norma AASHTO TP101-14, busca caracterizar o comportamento do ligante asfáltico através de esforços de fadiga. Para isto, o ensaio é feito em duas etapas distintas: Na primeira, faz-se uma varredura de frequência de 0,1-30Hz, a uma amplitude de deformação de 0,1%. Já na segunda etapa faz-se uma varredura de amplitude de deformação a uma amplitude de 0,1-30% de deformação, a uma frequência fixa de 10Hz. Para estes ensaios foi utilizada a temperatura de 25°C e a sequência de carregamentos consiste em intervalos de 10 segundos a uma amplitude de deformação constante, sendo cada intervalo seguido por outro intervalo com uma amplitude de deformação maior. Após estas etapas são feitas leituras do comprimento das trincas ocasionadas nas rupturas por fadiga para posterior análise (PAMPLONA, 2013). A Figura 15 ilustra o incremento de deformação durante o ensaio LAS.

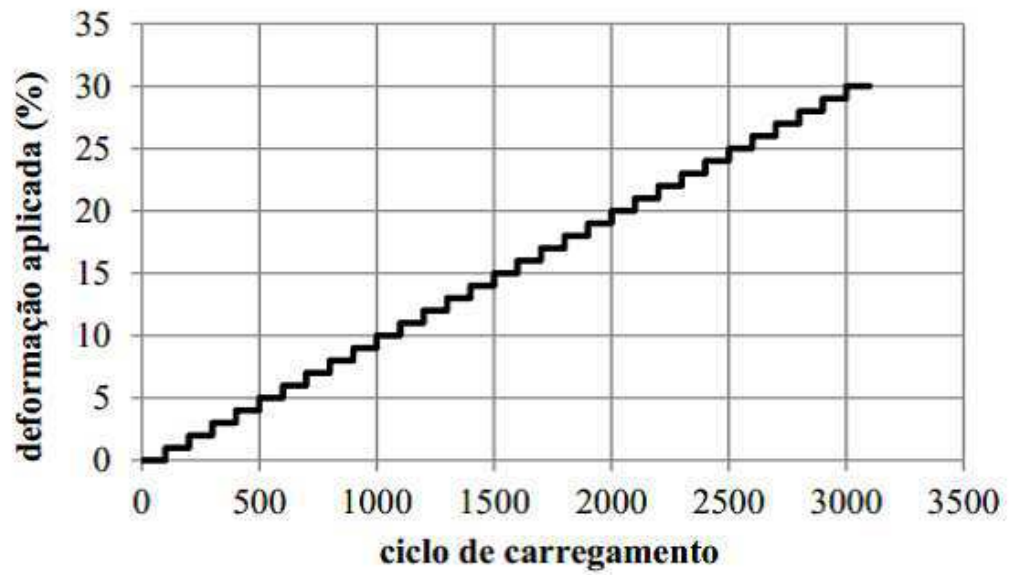


Figura 15 - Incremento de deformação segundo (Johnson, 2010) no ensaio LAS.

Fonte: Pamplona, 2013

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Viscosidade Rotacional

Foi realizado o ensaio de viscosidade rotacional do ligante virgem e do ligante envelhecido, com o intuito de mensurar o efeito da oxidação na viscosidade, bem como o efeito antioxidante do óleo de linhaça. A Figura 16 ilustra os resultados do ensaio de viscosidade rotacional às temperaturas de 135, 150 e 177 °C.

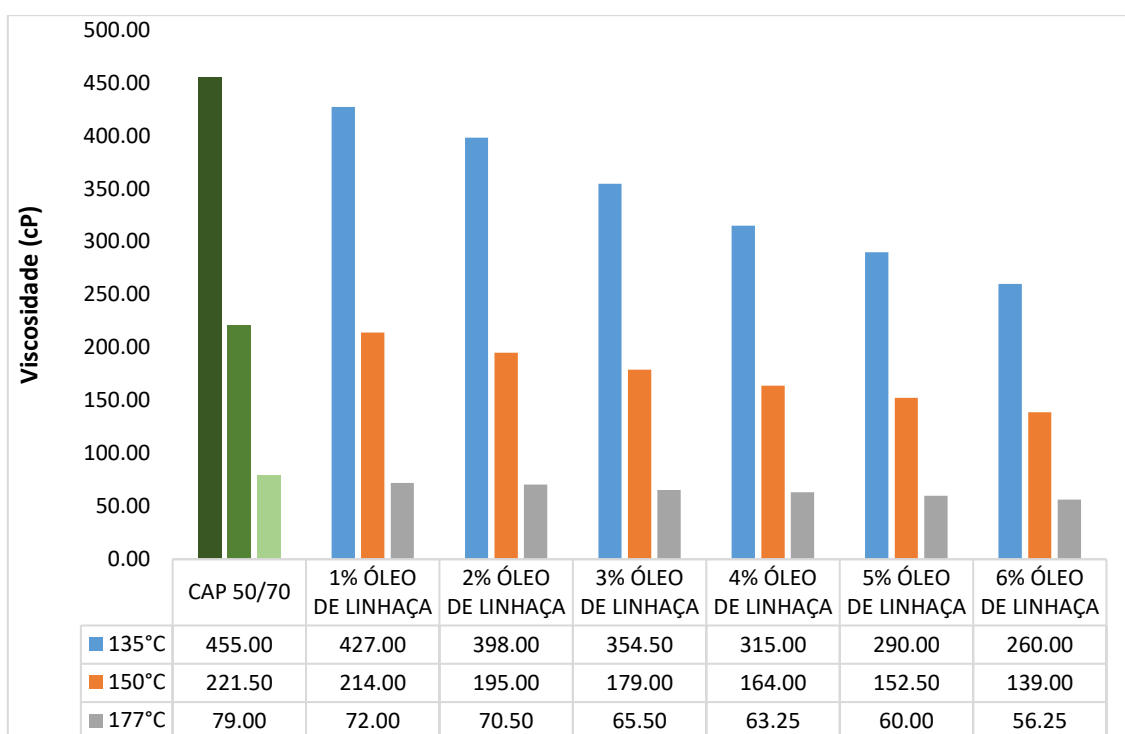


Figura 16 – Viscosidade Rotacional do ligante asfáltico modificado com óleo de linhaça.

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que com o aumento do teor de adição de óleo de linhaça ao ligante asfáltico, sua viscosidade diminui continuamente. Comparando os resultados obtidos para o ligante puro, aos resultados obtidos para o ligante com teor de 6% de óleo de linhaça, observa-se uma redução média de 36% da viscosidade em todas as temperaturas, enquanto que o teor de 3% de óleo de linhaça houve uma redução média de 19% no valor da viscosidade em todas as temperaturas. É importante notar a proporcionalidade dos resultados, tendo em vista que o

decréscimo de viscosidade se dá de forma gradativa com o aumento dos teores de óleo de linhaça presente no ligante asfáltico.

A partir dos dados do ensaio de viscosidade rotacional, Bernucci (2007) recomenda adotar o intervalo de $0,17 \pm 0,02$ Pa*s para a obtenção das temperaturas máxima e mínima de usinagem a partir do gráfico viscosidade x temperatura, bem como recomenda o intervalo de $0,28 \pm 0,03$ Pa*s para obter as temperaturas máxima e mínima de compactação da mistura asfáltica. Desta forma, as Figuras 17 e 18 ilustram, respectivamente, as temperaturas máxima e mínima de usinagem e compactação (TUC) dos ligantes asfálticos modificados com óleo de linhaça para os teores em estudo.

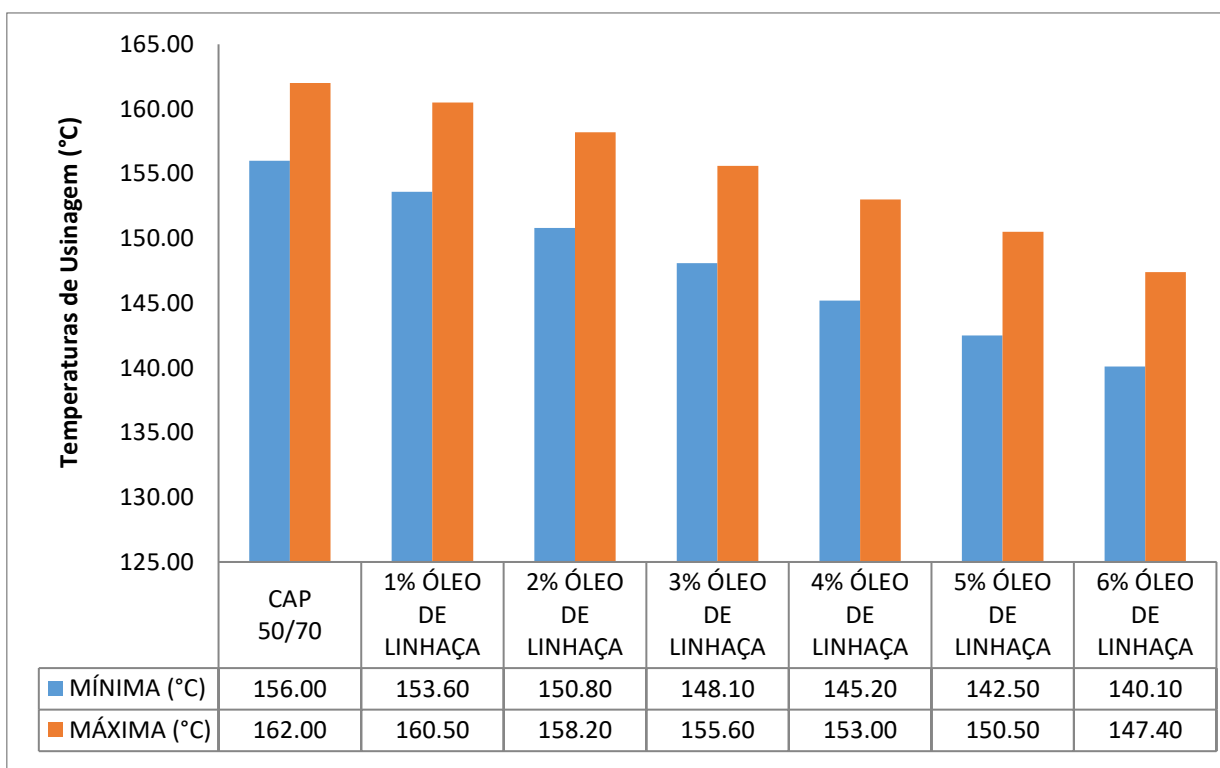


Figura 17 – Temperaturas máxima e mínima de usinagem da mistura asfáltica modificada com óleo de linhaça.

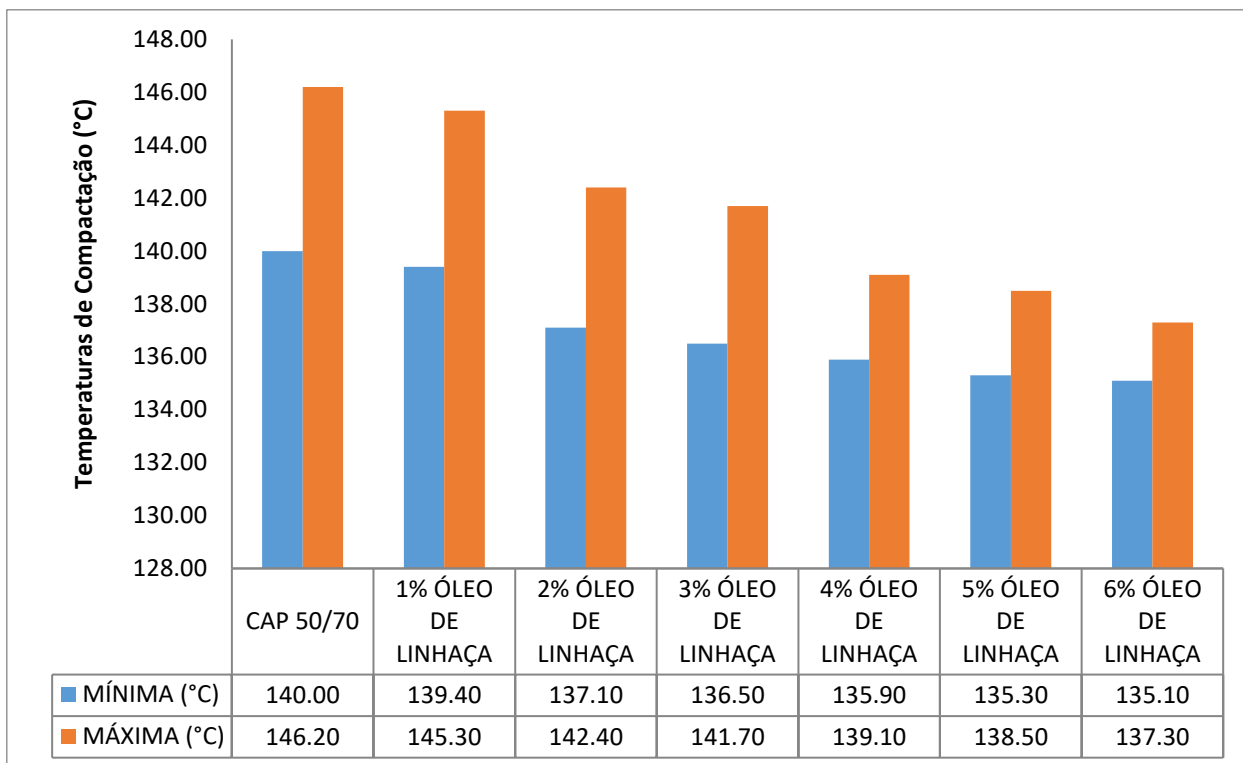


Figura 18 – Temperaturas máxima e mínima de compactação da mistura asfáltica modificada com óleo de linhaça.

Conforme resultados obtidos, 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. O ligante modificado com 6% de óleo de linhaça apresenta uma redução média de 10% nas temperaturas máxima e mínima de usinagem em relação ao ligante puro, o que em números práticos se converte em uma redução de 15°C, corroborando os resultados obtidos por Cavalcante (2016), verificando percentagens de redução de TUC entre 14 e 16% para o ligante modificado com 6% de óleo de linhaça.

Após o ligante ter sido submetido ao processo de envelhecimento a curto prazo (RTFO), também foram realizados os ensaios de viscosidade rotacional ilustrados na Figura 19. É possível notar um acréscimo no valor das viscosidades em relação ao ligante virgem, o que era esperado, resultante do processo de oxidação que o ligante sofre mediante o envelhecimento.

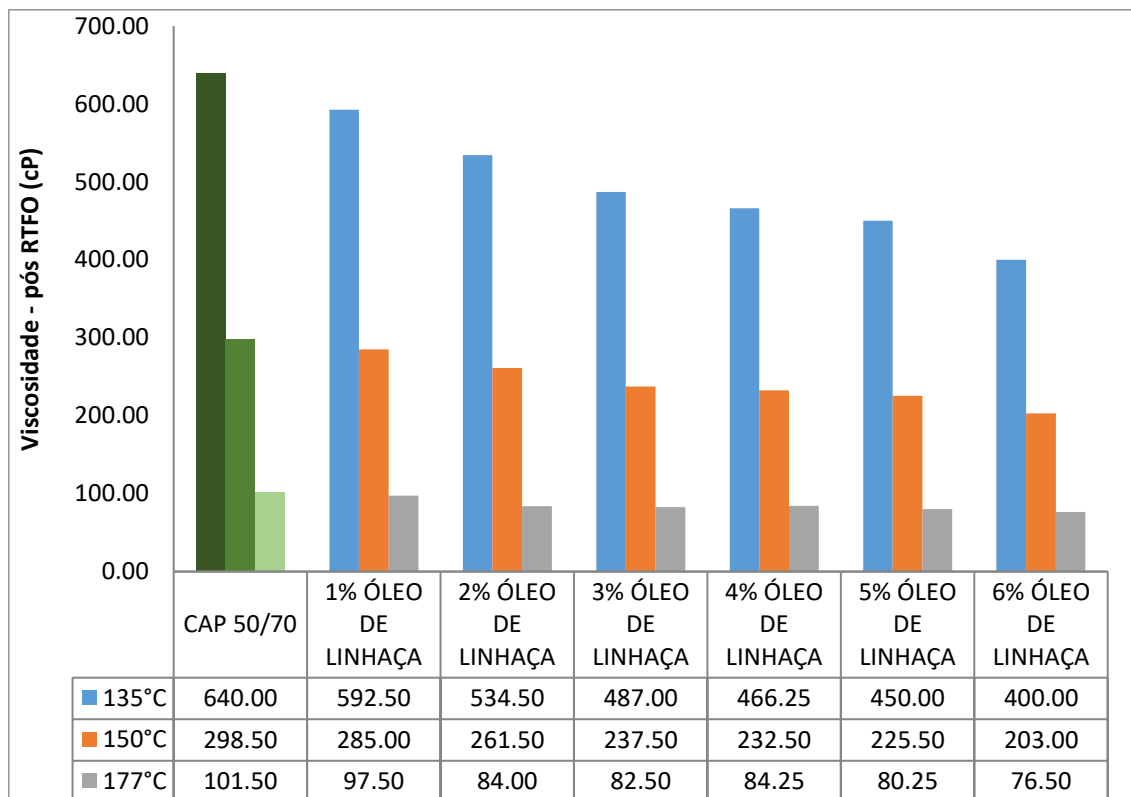


Figura 19 – Viscosidade Rotacional após envelhecimento.

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que o ligante puro sofreu um acréscimo médio de viscosidade de 35% em todas as temperaturas, enquanto que o ligante modificado com 3% de óleo de linhaça sofreu um acréscimo médio de 32% e, para comparação, o ligante modificado com 6% de linhaça obteve um acréscimo de viscosidade médio de 27% em relação ao ligante virgem. Tal fato se deve à propriedade antioxidante presente no óleo de linhaça, o que impede que o ligante asfáltico perca suas propriedades caso haja o processo de envelhecimento.

4.2. Envelhecimento a Curto Prazo (RTFO)

A Figura 20 ilustra a perda de massa média, expressa em porcentagem, das amostra de ligante asfáltico modificado com óleo de linhaça. Cavalcante (2016), em seu estudo, verificou que o óleo de linhaça age como agente antioxidante, diminuindo a

susceptibilidade do ligante asfáltico aos efeitos danosos da oxidação durante o processo de usinagem e/ou compactação.

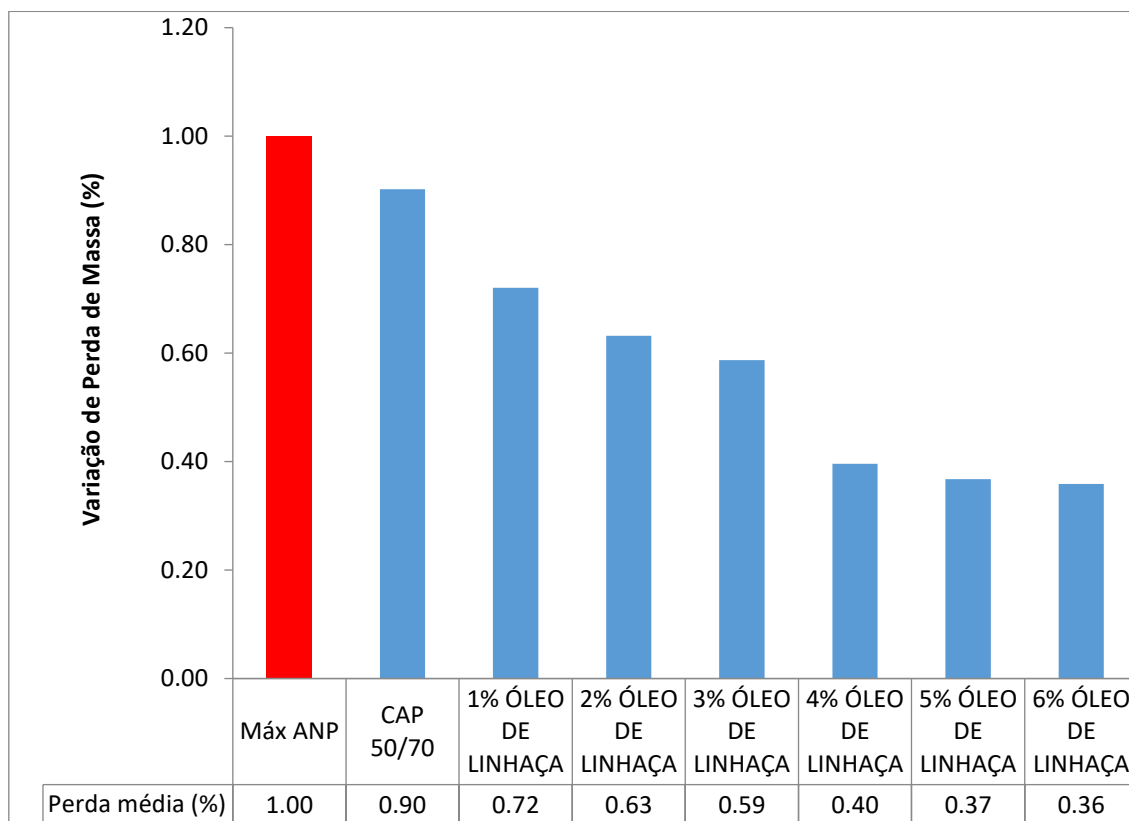


Figura 20 – Perda de massa das amostras de ligante asfáltico modificado com óleo de linhaça.

Conforme resultados obtidos, verifica-se que todos os ligantes estudados se apresentam dentro dos limites estabelecidos pela ANP, que estipula o máximo de 1% de perda de massa, para garantir que o ligante asfáltico utilizado na pavimentação não seja exageradamente volátil. Os teores de maior adição de óleo de linhaça, 5 e 6%, apresentaram uma redução da perda de massa da ordem 60% em relação ao ligante puro. Importante notar, também, que a partir do teor de 4% ocorre um ponto de saturação, tendo em vista que aumentando-se a porcentagem de óleo ao ligante, a redução da perda de massa se mantém praticamente constante.

4.3. Performance Grade (PG)

Os ensaios de reologia avançada, realizados no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR), são extremamente necessários para se entender a fundo quais os efeitos do óleo de linhaça no comportamento visco-elástico do ligante modificado. O ensaio de PG foi realizado tanto antes como após o envelhecimento a curto prazo e fornece informações acerca da temperatura máxima de utilização daquele ligante asfáltico, bem como parâmetros de deformabilidade e rigidez. A Figura 21 ilustra os resultados fornecidos pelo DSR do ensaio de PG do ligante asfáltico puro.

Test: Original Binder
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 μm

RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. $^{\circ}\text{C}$	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	2.31	12.1	83.3	19.1	19.2	Pass
2	10.0	52.0	0.89	12.0	85.1	7.37	7.39	Pass
3	10.0	58.0	0.37	12.1	86.6	3.08	3.09	Pass
4	10.0	64.0	0.16	12.0	87.6	1.37	1.37	Pass
5	10.0	70.0	0.08	12.0	88.2	0.642	0.642	Fail

Figura 21 – Ensaio de Performance Grade (PG).

A partir deste ensaio, se obtêm os parâmetros de Módulo Complexo (G^*), que está relacionado à rigidez do ligante, o ângulo delta (δ) que está relacionado à elasticidade, o parâmetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ que reflete a deformabilidade do ligante asfáltico e, como resultado principal, delimita a faixa de temperatura de uso mínima e máxima de utilização do ligante. A Figura 22 ilustra o resultado das temperaturas máximas de utilização do ligante asfáltico antes e após o processo de envelhecimento a curto prazo (RTFO).

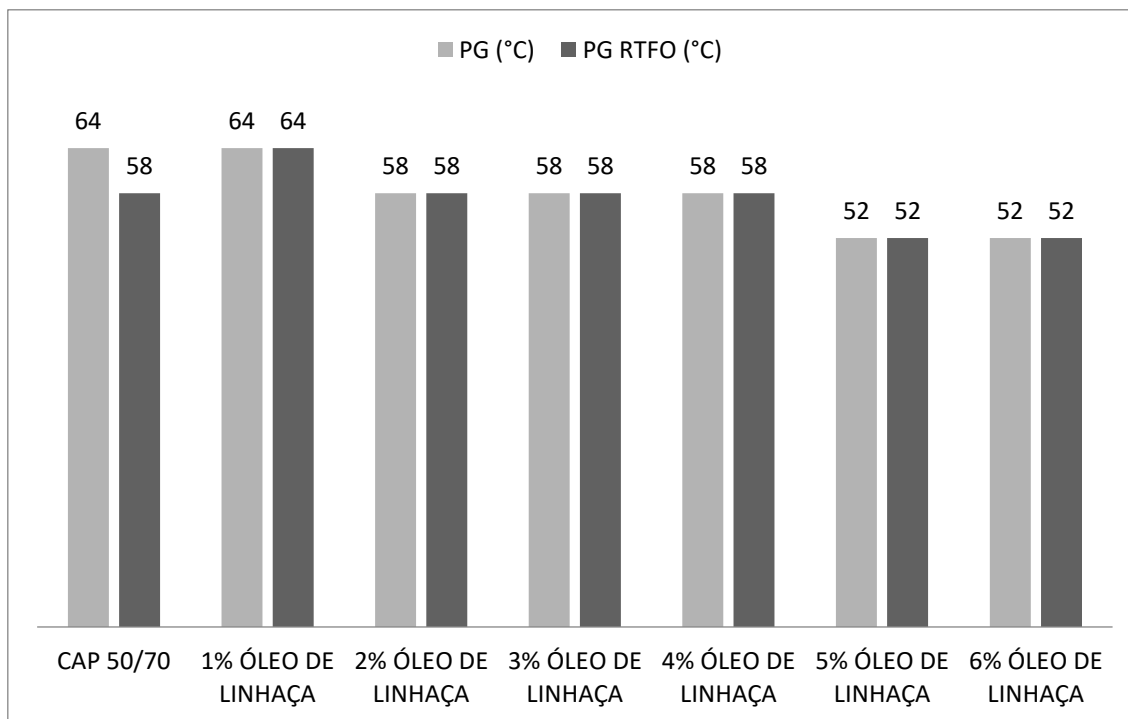


Figura 22 – Temperaturas máximas de PG dos ligantes asfálticos em estudo.

Um fato importante na análise deste resultado é o fato de que o ligante asfáltico puro, CAP 50/70, apresenta uma redução na temperatura de PG após o envelhecimento, decrescendo de 64 para os 58 °C, ou seja, fica suscetível ao efeito da oxidação e perde suas propriedades de deformabilidade e rigidez frente a altas temperaturas. Observa-se que para a adição de 1% de óleo de linhaça que já ocorreu à ação de antioxidante, impedindo o efeito degenerativo, mantendo a temperatura de PG constante tanto para o ligante virgem como para o ligante envelhecido em 64 °C. À medida que aumenta-se o teor de adição de óleo de linhaça ao ligante, perde-se em temperatura de PG, fato este explicado pela perda de viscosidade e consequente aumento de deformabilidade que ocorre frente ao incremento de temperatura.

Para os teores de 5% e 6%, verifica-se uma perda significativa em temperatura de utilização, detendo-se aos 52°C, temperatura esta facilmente atingida pelo pavimento asfáltico em dias quentes no nordeste brasileiro, o que torna sua utilização prejudicada nesta situação. Em se tratando de módulo complexo (G^*), que está ligado à rigidez do ligante, as Figuras 23 e 24 ilustram que este parâmetro sofre queda com o

aumento do teor de adição do óleo de linhaça, ou seja, o ligante se torna menos rígido, tanto antes como após o processo de envelhecimento a curto prazo- RTFO, respectivamente.

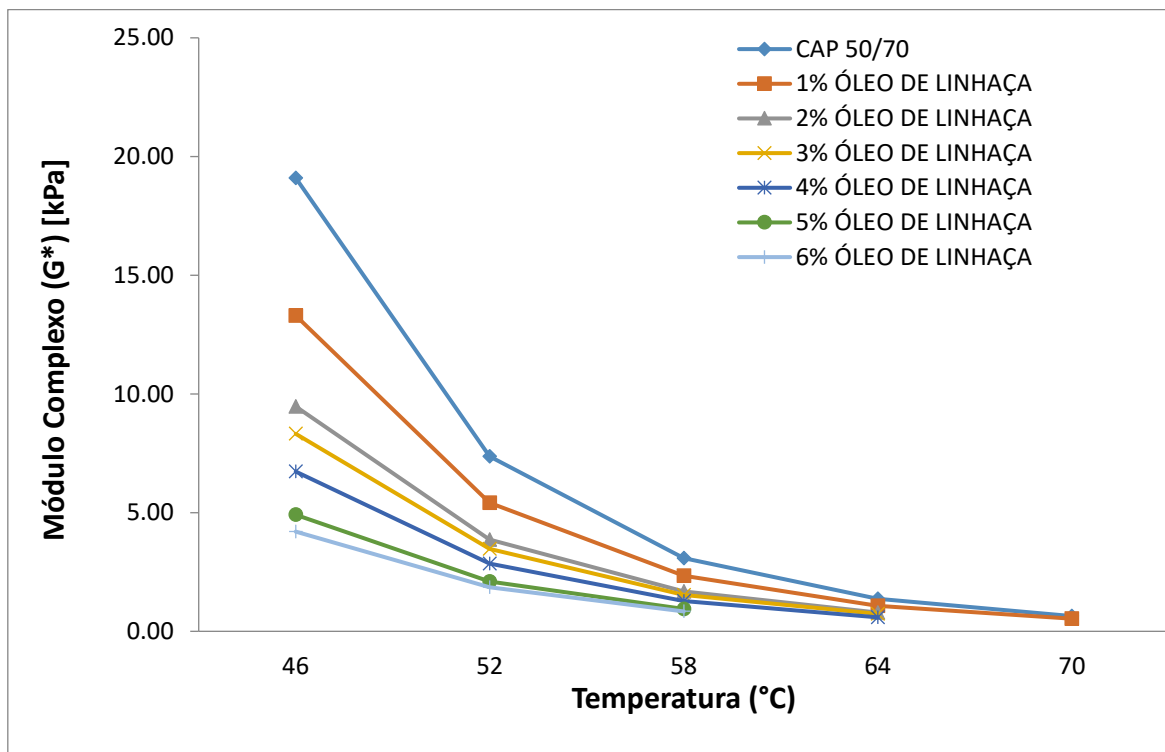


Figura 23 – Módulo Complexo (G^*) x Temperatura ($^{\circ}C$) dos ligantes em estudo

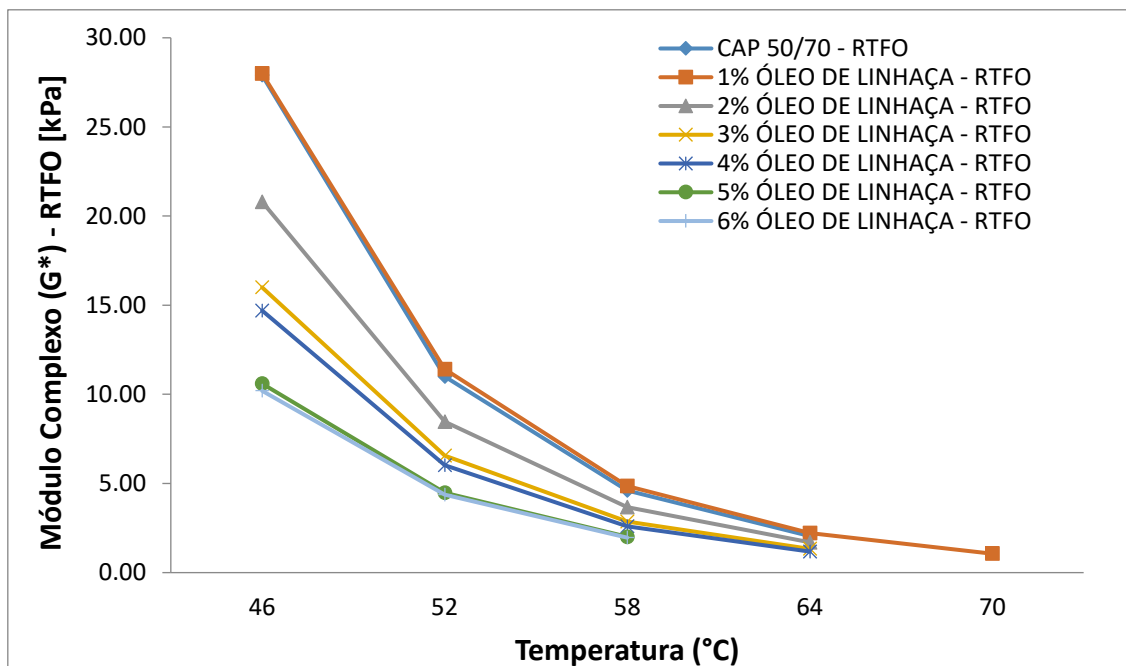


Figura 24 – Módulo Complexo (G^*) x Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) dos ligantes em estudo após RTFO.

Conforme resultados obtidos, verifica-se que a temperatura de 46°C antes do envelhecimento a curto prazo-RTFO, o ligante puro apresenta um módulo complexo superior aos demais ligantes, da ordem de 20 kPa, valor este que vai diminuindo e convergindo com o aumento de temperatura para valores mais próximos aos obtidos para os ligantes modificados com óleo de linhaça. Fazendo esta mesma análise para os ligantes envelhecidos, nota-se que o ligante puro e o ligante modificado com 1% de óleo de linhaça apresentam valores praticamente iguais, da ordem de 28 kPa, também diminuindo com o incremento de temperatura, porém o ligante modificado com óleo apresenta valores de módulo complexo até a temperatura de 70°C , o que reforça a ideia de que esta substância confere propriedades antioxidantes ligante asfáltico, permitindo-o ser melhor utilizado em altas temperaturas sem perder muito seu desempenho.

Em consonância à análise do módulo complexo (G^*), as Figuras 25 e 26 ilustram a variação do parâmetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ com o incremento de temperatura durante o ensaio, antes e após o envelhecimento, respectivamente.

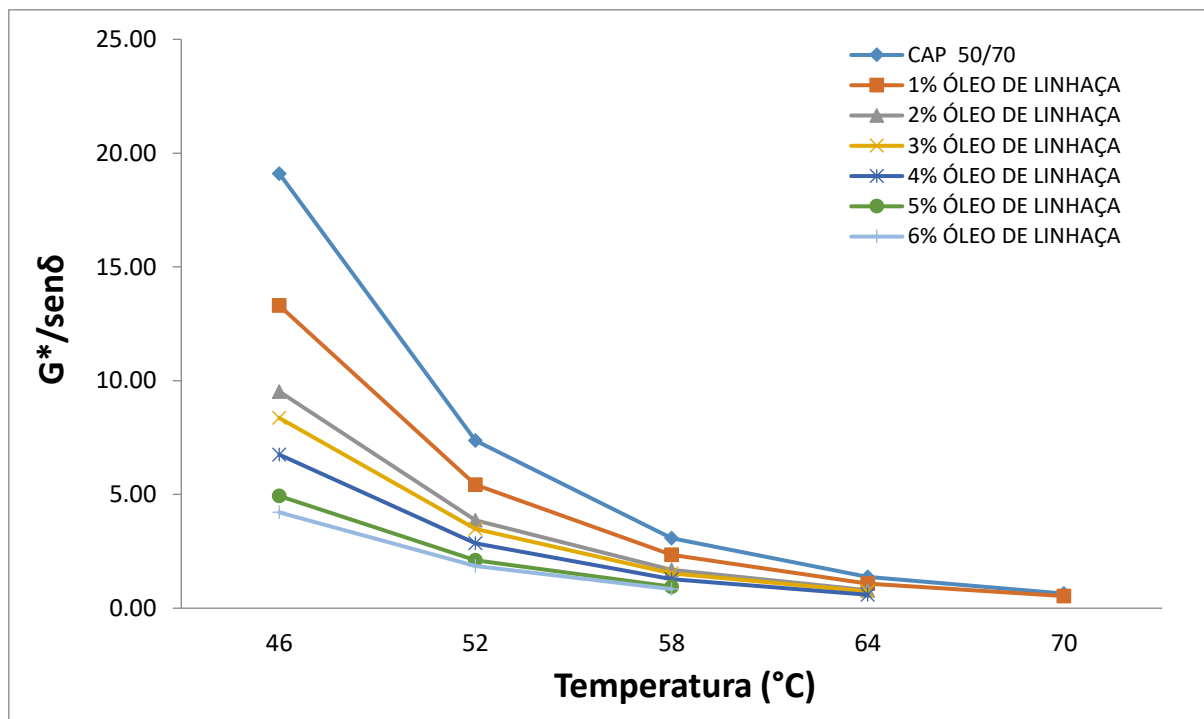


Figura 25 – Gráfico de $G^*/\text{sen}(\delta)$ x Temperatura (°C) dos ligantes em estudo.

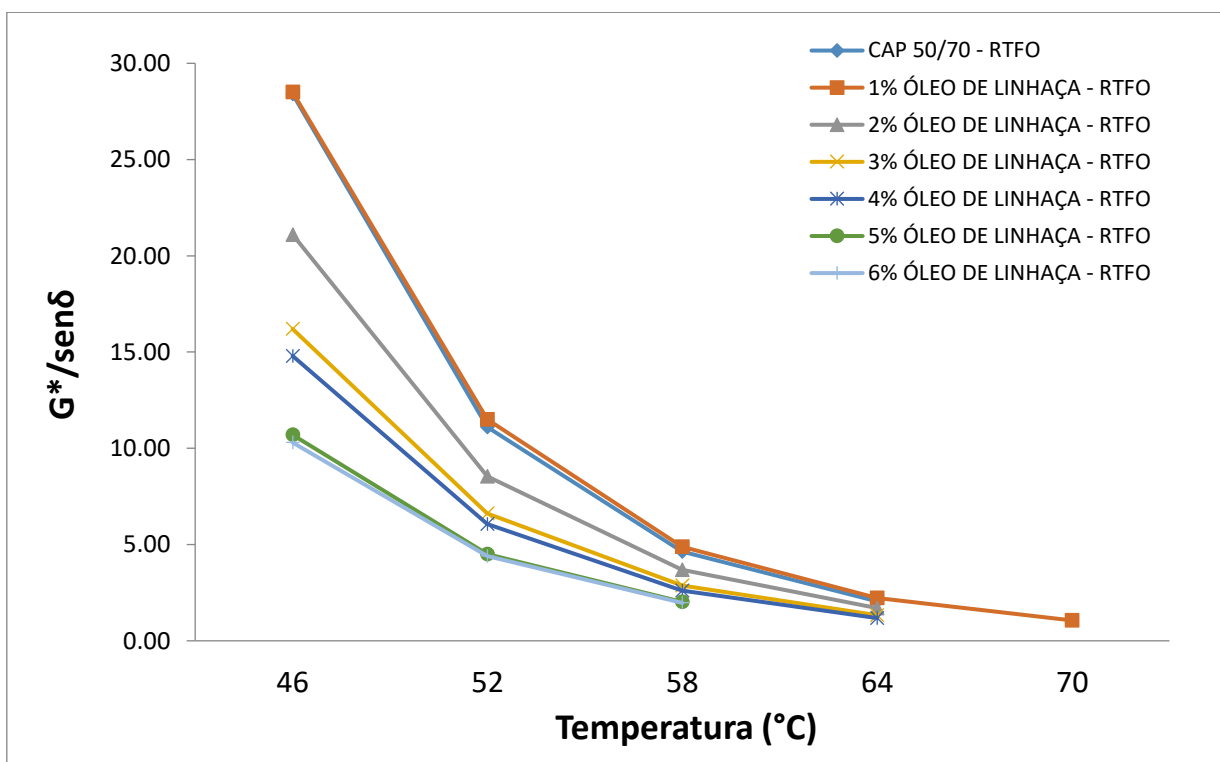


Figura 26 – Gráfico de $G^*/\text{sen}(\delta)$ x Temperatura (°C) dos ligantes em estudo após RTFO.

O parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ mede a resistência à deformação permanente do ligante asfáltico e é estabelecido como critério de parada do ensaio de PG. No ligante virgem, quando $G^*/\sin(\delta)$ for menor que 1,0 o ensaio é encerrado, pois admite-se que a partir daí o ligante está muito deformável e não atende aos critérios de desempenho mínimo. No ensaio com o ligante envelhecido, a análise é a mesma, porém o critério de parada do ensaio se dá quando $G^*/\sin(\delta)$ for menor que 2,0.

Comparando dois ligantes que apresentam o mesmo valor de PG, 3 e 4% por exemplo (58 °C), observa-se que o ligante com 4% de óleo de linhaça apresenta uma redução de 20% no valor de $G^*/\sin(\delta)$ com relação ao teor de 3%, tornando o ligante mais deformável, o que coloca em evidência que o incremento na quantidade óleo na mistura é determinante frente ao desempenho do ligante quanto à deformação permanente na mesma temperatura de utilização. Desta forma, a análise do teor ótimo de adição do óleo de linhaça deve ser bastante criteriosa, tendo em vista que se ganha em algumas propriedades, porém ocorre perda em outras.

4.3. Ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR)

O ensaio de MSCR é, por norma, realizado apenas com o ligante asfáltico envelhecido. Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 27 e representam o valor da compilância não-recuperável, J_{nr} , sob o carregamento de 100 e 3200 Pa.

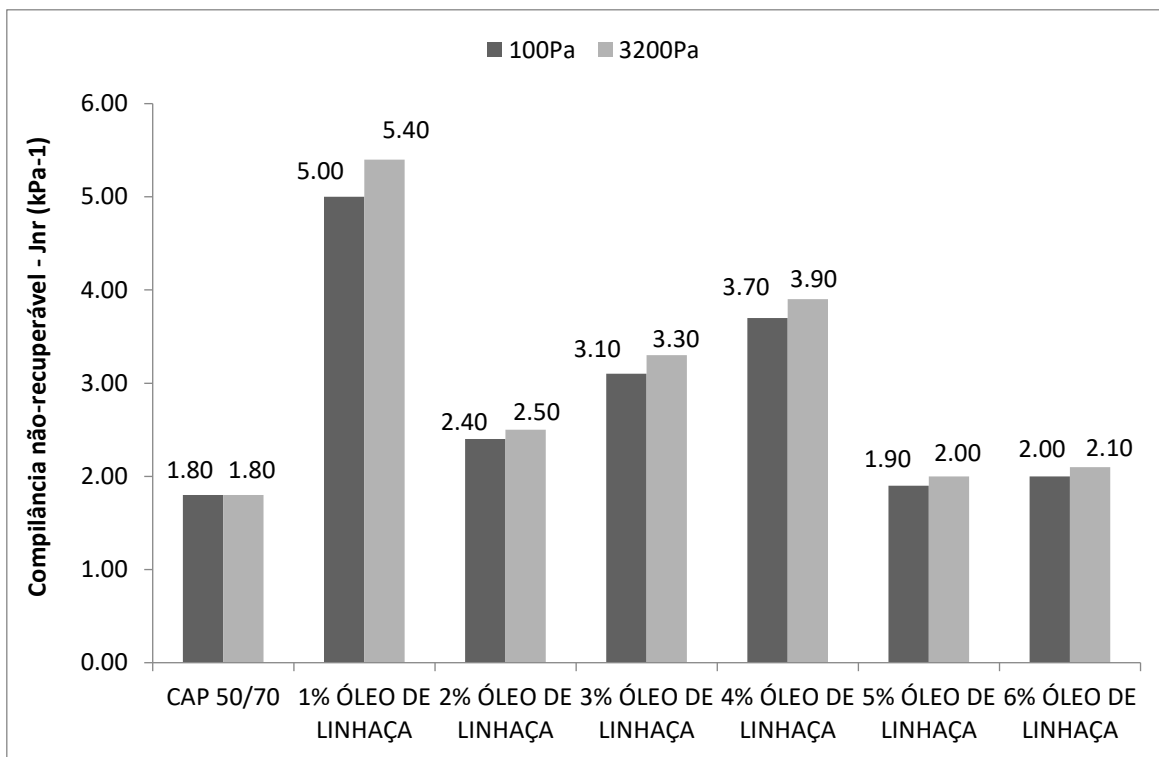


Figura 27 – Valores de J_{nr} sob tensões de 100 e 3200 Pa dos ligantes em estudo

De acordo com a classificação AASHTOO M320, o ligante puro é indicado para tráfego pesado, ou seja, tem um número de solicitações acima de 10 milhões se utilizado na temperatura do PG, 58 °C. O ligante modificado com 5% de óleo de linhaça aparece no limite máximo de solicitação do tráfego pesado, porém seu PG é de 52 °C, o que torna sua utilização bastante dependente de mudanças de temperatura. O ligante modificado com 1% de óleo de linhaça não é indicado para pavimentação, pois está muito acima do limite máximo estabelecido pela norma, que é de 4,0 kPa⁻¹. Tal fato é decorrente de que o ensaio foi realizado na temperatura de 64 °C, o que deixa o ligante bastante fluido e deformável, sendo estes resultados corroborados por Cavalcante (2016). Os demais ligantes com adição de óleo de linhaça se enquadram na categoria de tráfego padrão, com número de solicitações menor que 10 milhões.

Destaca-se o teor de 4% de óleo de linhaça como possível teor ótimo da pesquisa, devido ao fato deste se enquadrar como uma mistura morna, já que sua temperatura de usinagem e compactação ficam abaixo de 150 °C, seu PG máximo não

apresentou grande redução em relação ao ligante puro e ainda assim é classificado como adequado ao tráfego padrão.

Outro parâmetro importante de atender no estudo do ensaio MSCR é o J_{nr} diferencial, que é a medida da diferença entre o J_{nr} a 100 e a 3200 Pa, expresso em porcentagem. Os resultados estão ilustrados na Figura 28.

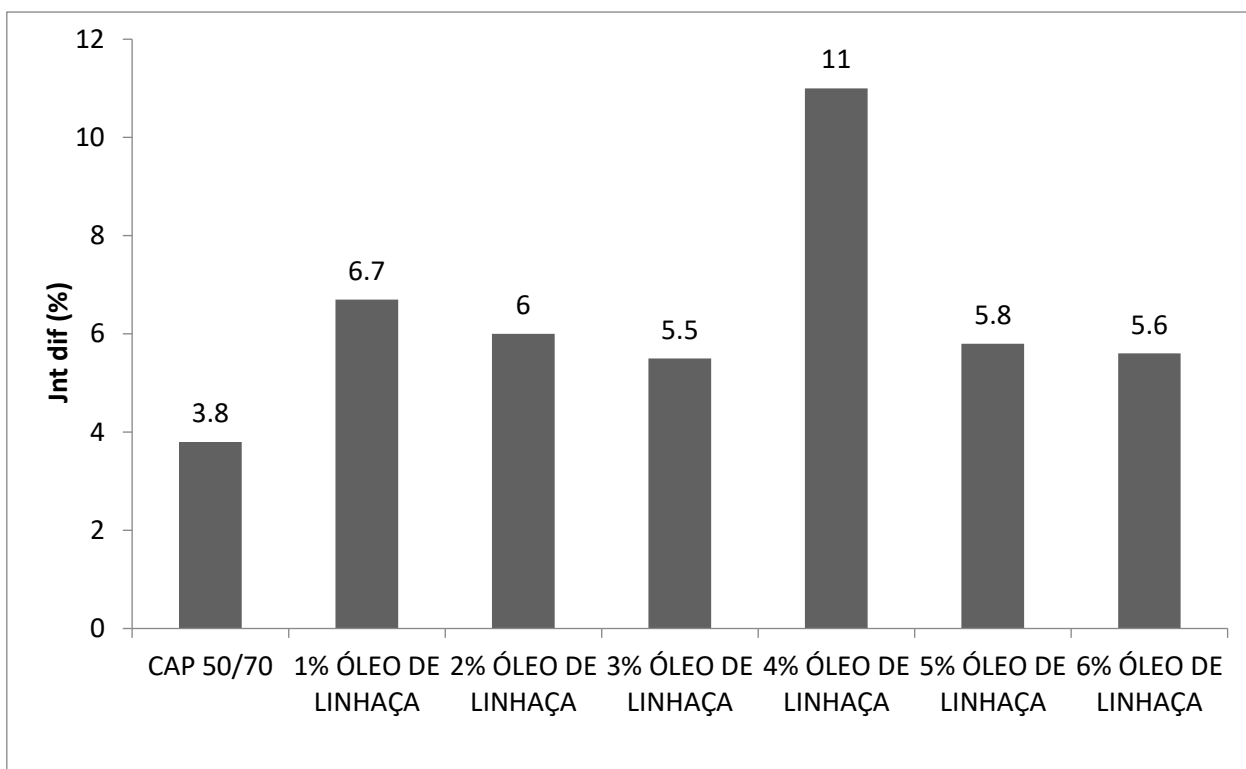


Figura 28 – Valores de J_{nr} diferencial sob tensão de 100 e 3200 Pa dos ligantes em estudo

Segundo Sobreiro (2014), a diferença entre o J_{nr} sob tensão de 100 e 3200 Pa deve ser inferior a 75% para que se ateste a propriedade do ligante não ser demasiadamente sensível às mudanças de carregamento. Desta forma, todos os ligantes pesquisados atendem aos critérios estabelecidos e são adequados à pavimentação. O ensaio de MSCR no DSR também fornece o resultado de recuperação elástica, expresso em porcentagem, que mede as propriedades elásticas do ligante asfáltico. O ligante puro apresentou, como o padrão, recuperação elástica praticamente nula, da ordem de 1,90%. Tal valor não se alterou à medida que se adiciona o óleo de

linhaça nos teores pesquisados, pelo fato de que este não possui propriedades elásticas.

4.4. Linear Amplitude Sweep (LAS)

A Figura 29 apresenta os resultados de avaliação dos parâmetros A e B na resistência ao dano obtidas pelo ensaio da varredura linear de amplitude (LAS) para as amostras de CAP 50/70 e amostras modificadas com o óleo de linhaça nos teores em estudo.

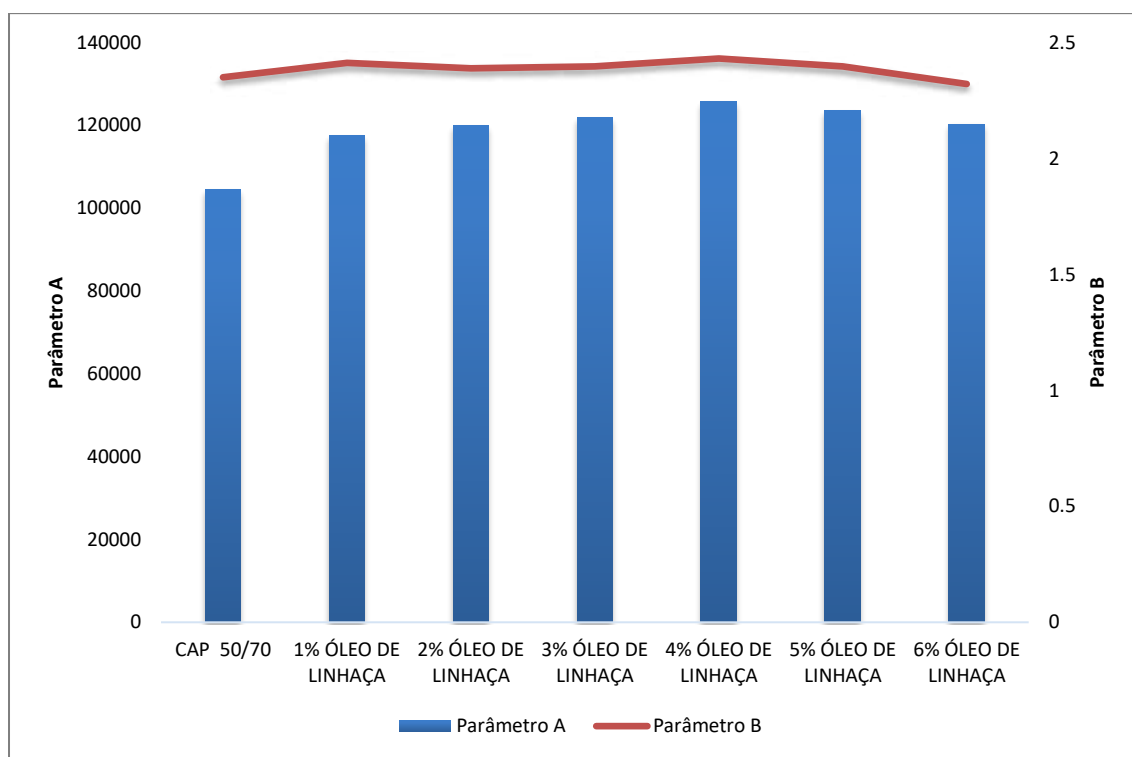


Figura 29 – Parâmetros A e B para os ligantes em estudo.

De acordo com Filho (2017), o parâmetro A, está relacionado à variação da integridade do material devido ao dano acumulado, valores maiores de A significam que a amostra manteve a sua integridade inicial. Portanto, notou-se com o auxílio do gráfico, que a amostra que obteve a maior integridade inicial foi a de 4% de óleo de linhaça, tendo um aumento de 20% em relação ao ligante puro. É perceptível também

que houve um gradativo aumento deste padrão até se atingir o pico na amostra de 4%. Em se tratando do ligante puro, este apresenta um parâmetro A 12,60% menor que o ligante de menor teor de óleo de linhaça, 1%. Tal fato atesta que, mesmo em pequena proporção, o óleo de linhaça atua em benefício da deformabilidade do ligante asfáltico.

O parâmetro B, indicado pela inclinação da reta da frequência versus módulo de armazenamento (G'), demonstrou que apesar de a amostra de 4% de óleo de linhaça possuir uma maior resistência ao dano acumulado, se mostrou mais sensível aos níveis de deformação. Segundo Filho (2017), esta sensibilidade não é desejada para os ligantes asfálticos, pois indica fácil susceptibilidade a deformações sob variações de temperaturas. Levando-se isto em consideração, a amostra de 3% obteve o melhor parâmetro B, por ter uma variação praticamente nula em relação a amostra de 2%.

Também a partir do ensaio LAS, é possível estimar a vida de fadiga do ligante asfáltico (N_f) em função de níveis de deformação. A Tabela 6 foi originada a partir da utilização da estimativa da vida de fadiga dos ligantes modificados com óleo de linhaça para os níveis de deformação de 1%, 2,5%, 5% e 10% e por meio desta é possível traçar o gráfico de vida de fadiga (N_f) em função da amplitude de deformação, ilustrado na Figura 30.

Tabela 6 - Valores estimados para a vida de fadiga (N_f) dos ligantes em estudo

AMPLITUDE DE DEFORMAÇÃO	1,0%	2,5%	5,0%	10,0%
CAP 50/70	63370	12082	2364	463
1% ÓLEO DE LINHAÇA	67145	12899	2400	496
2% ÓLEO DE LINHAÇA	69134	13181	2517	511
3% ÓLEO DE LINHAÇA	69433	13238	2553	557
4% ÓLEO DE LINHAÇA	69709	13528	2603	600
5% ÓLEO DE LINHAÇA	69332	13151	2453	568
6% ÓLEO DE LINHAÇA	67981	13249	2332	526

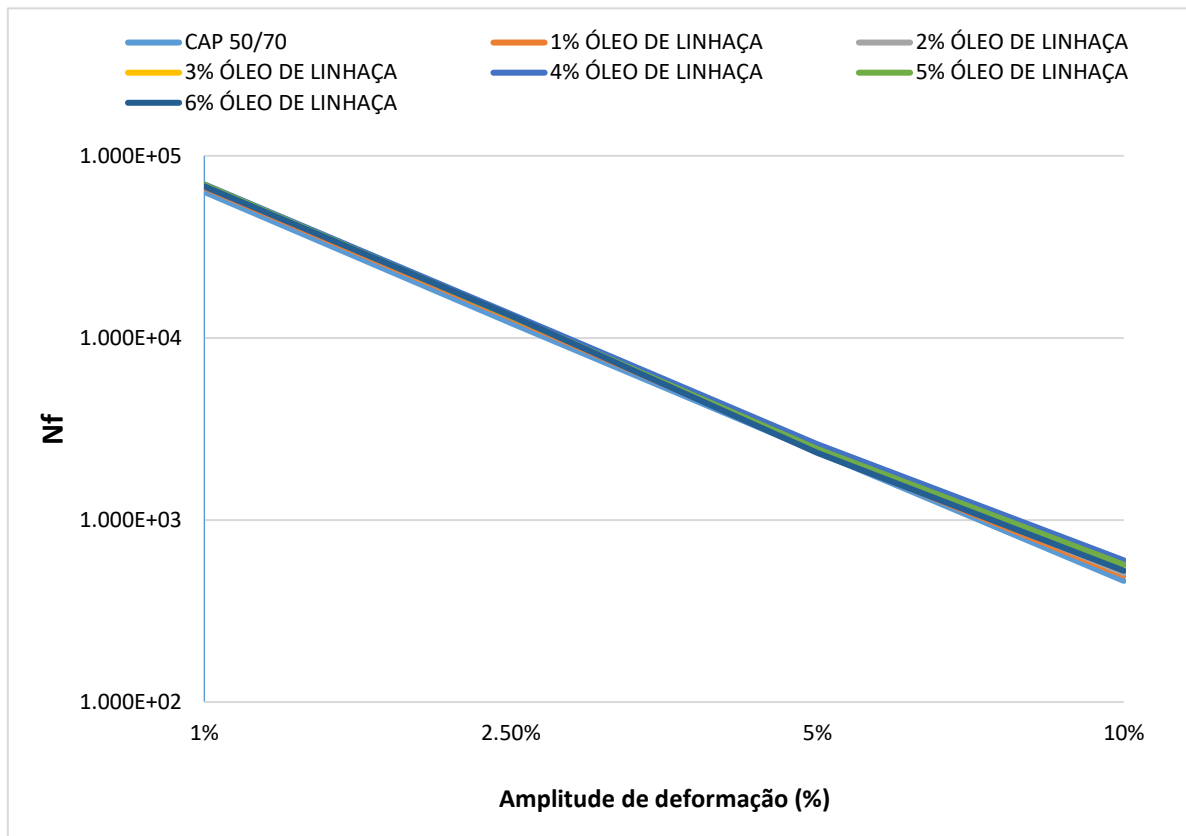


Figura 30 – Estimativa de vida da fadiga do ligante asfáltico em estudo

De acordo com Nascimento (2015), níveis de deformação de até 3% são características de pavimentos com baixos níveis deflectométricos e possuem comportamento semelhante a um pavimento rígido. Em contrapartida, altos níveis deflectométricos são melhor comparados aos pavimentos flexíveis.

Analisando-se os dados da Tabela 6, pode-se perceber que o Nf para os teores de óleo de linhaça possui um aumento gradativo conforme são acrescidas as porcentagens do modificante. Porém, a partir da amostra com adição de 5% do óleo de linhaça, notou-se uma diminuição deste parâmetro, o que pode ser ocasionado pela saturação do ligante asfáltico, ou seja, as quantidades de óleo de linhaça que sejam inseridas a partir deste ponto não oferecem benefícios. Para altos níveis deflectométricos no pavimento, é sugerido que se utilize os teores com as maiores vidas de fadiga, que nesta pesquisa são os de 3% e de 4%.

Outro fato importante ao se analisar os dados da Tabela 6 é de que, entre 2 e 5% de óleo de linhaça adicionado ao ligante asfáltico, as alterações na vida de fadiga são praticamente nulas. O acréscimo inicial de vida de fadiga, da ordem média de 5%, do ligante modificado com 1% de óleo de linhaça em comparação ao ligante puro reforça a ideia de que o óleo de linhaça atua como um agente que impede o envelhecimento precoce do ligante asfáltico.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os objetivos delimitados e os resultados obtidos neste estudo, pode-se estabelecer as seguintes considerações:

O ensaio de viscosidade rotacional ao qual as amostras foram submetidas demonstrou que a temperatura ideal de usinagem da mistura diminuiu em praticamente 15 °C para o teor de 6% de óleo de linhaça, se observando as temperaturas mínimas de usinagem, o que representa um percentual de 10,20% de perda de temperatura. A temperatura de compactação sofreu uma redução de 5 °C.

Quando analisado em relação ao grau de performance, o ligante modificado conseguiu manter-se na mesma classe de temperatura de 64°C do ligante puro no teor de 1% de óleo de linhaça. A partir do ligante com o teor 2% de óleo linhaça em diante, o ligante modificado diminuiu a sua resistência ao ponto de diminuir o seu PG para a temperatura de 58 °C e, por fim, 52 °C nos teores de 5 e 6% de óleo de linhaça. O efeito antioxidante do óleo de linhaça, confirmado no ensaio de envelhecimento a curto prazo (RTFO), é reforçado no ensaio de PG das amostras após envelhecimento, tendo em vista que o ligante puro sofreu redução do PG de 64 °C quando virgem, para 58 °C quando envelhecido. Nas amostras modificadas com óleo, não houve queda do PG comparando amostras virgens e envelhecidas.

O ensaio do MSCR demonstrou que com o acréscimo do teor de óleo no ligante o nível de tráfego suportado por este diminui. Desta forma, é necessário compensar em até que ponto é vantajoso perder temperatura de usinagem e compactação, ganhar em resistência ao envelhecimento, mas também se perder em desempenho e aplicabilidade do ligante asfáltico.

Através do parâmetro A encontrado no ensaio da varredura linear de amplitude, percebeu-se que os ligantes modificados possuíram uma maior integridade de suas características e a amostra de 3% possuiu uma sensibilidade nula aos demais níveis de

deformação. Notou-se também que as amostras modificadas possuíram uma maior vida de fadiga, principalmente para pavimentos com altos níveis deflectométricos.

Os resultados demonstraram que a amostra com 4% de óleo de linhaça possui o melhor desempenho reológico sem que haja uma redução brusca da resistência do ligante. Utilizando este teor, pode-se reduzir em 10,8 °C a temperatura de usinagem, com valores da ordem de 145,2 °C, classificando-a assim, como uma mistura morna. Além disso, sua temperatura máxima de PG, 58 °C, sofre redução de apenas um degrau em relação ao ligante puro, 64 °C. Este teor também apresentou a segunda maior vida de fadiga dos ligantes estudados e é classificado como ideal para tráfego padrão.

Desta forma, a adição do óleo de linhaça se provou uma excelente alternativa como modificante verde para incorporação ao CAP, reduzindo-se assim o gasto energético e a liberação de fumos tóxicos aos seres humanos e ao meio ambiente.

5.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

De acordo com os resultados encontrados nesta pesquisa e com o intuito de um maior aprofundamento do tema, são postas as seguintes sugestões para futuras pesquisas envolvendo a adição do óleo de linhaça ao ligante asfáltico:

- a) Estudar as misturas asfálticas produzidas com o teor ótimo de 4% do óleo de linhaça nas temperaturas determinadas pelo ensaio de viscosidade rotacional;
- b) Avaliar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas produzidas;
- d) Realizar a análise da composição química dos ligantes modificados por meio do ensaio FTIR;
- e) Realizar a análise química SARA do ligante modificado;

REFERÊNCIAS

- AASHTO (2005) M320 – Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D. C., EUA.
- AASHTO (2014) TP101 – Standard Method of Test for Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D. C., EUA.
- ASPHALT INSTITUTE (2010a) Guidance on the use of the MSCR test with the AASHTO M320 specification. Asphalt Institute Guidance Document.
- ASPHALT INSTITUTE (2010b) Implementation of the multiple stress creep recovery test and specification. Asphalt Institute Guidance Document.
- ASSOCIACAO NACIONAL DE PETROLEO – ANP. N°19. Especificação brasileira para cimento asfáltico de petróleo – CAP.
- ASTM (2002) D4402 – Standard Test Method for Viscosity Determinations of Unfilled Asphalts Using the Brookfield Thermosel Apparatus. American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM (2013) D 2872 – Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). American Society for Testing and Materials, EUA.
- ASTM D6373 – 15 (2008) Specification for Performance Graded Asphalt Binder. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D7175 – 08 (2005) Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D7405-15 Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L.M.G.; CERATTI, J.A.P.; SOARES, J.B. Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros. Petrobras, ABEDA, Rio de Janeiro, 2007.
- BICKERT C, LUHS W, FRIEDT W. 1994. Variation for fatty acid content and triacyl glycerol composition in different *Linum* species. *Ind Crops Prod* 2 229–237.
- 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 doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2016.
- COSTA, D. B.; CAVALCANTE, F. P.; RODRIGUES, J. K. G.; MENDOÇA, A. M. G. D.; LIRA, Y. C. Influência da adição do óleo de linhaça nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo. 44° RAPV e 17° ENACOR. Maceio, 2015.
- D'ÁNGELO (2010). The multiple stress creep recovery (MSCR) procedure. Technical Brief. Office of Pavement Technology. Federal Highway Administration United States Department of Transportation. FHWA-HIF-10-XXX.
- D'ANGELO, J. et al. (2009). Revision of the Superpave high-temperature binder specification: the multiple stress creep recovery test. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. White Bear Lake, v. 76, p. 123-162.
- DNIT (1998) Manual de reabilitação de pavimentos asfálticos. Rio de Janeiro
- DOMINGOS, M. D. I. (2011) Caracterização do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados virgens e envelhecidos. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.
- FERNANDES, M.R.S. Efeito de aditivo tipo óleo e enxofre na reologia de CAPs modificados com SBS. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- FILHO, P. G. T. M. Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.
- GALVÃO, P. F. C. (2009). Avaliação termoanalítica da Eficiência de antioxidantes na Estabilidade oxidativa do Biodiesel de mamona. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte / UFRN/RN.
- GAMA, D. A. Efeito da adição de polímeros reativo, não-reativo e ácido polifosfórico e suas combinações nas propriedades de ligantes asfálticos / Dennyale Alves Gama. -- Campina Grande, 2016.
- GUSMÃO, M. Restauração rodoviária usando asfalto modificado por polímero. Ouro Preto, MG: Universidade Federal de Ouro Preto, 2011. (Dissertação de Mestrado).
- HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. Evaluation of Sasobit® for use in warm mix asphalt. Report 05-06. Auburn: NCAT, 2005b.

- LEITE, L. M. F. Estudos de preparo e caracterização de asfaltos modificados por polímeros. 1999. 266f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloísa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- LU, X., ISACSSON, U., EKBLAD, J. Rheological Properties of SEBS, EVA and EBA Polymer Modified Bitumens. *Materials and Structures*, V. 32, p. 131-139, 2009.
- MELO, A. M. F. (2010) Avaliação das Propriedades de Óleos Vegetais visando a Produção de Biodiesel. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba/PB.
- MOTTA, L., Tonial, I., LEITE, L., & Constantino, R. (1996). Princípios do projeto e análise superpave de misturas asfálticas. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo. 1996.
- MOTTA, R. S. Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissões de poluentes e de consumo energético, 2012. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil.
- NASCIMENTO T. C. B. Efeito dos envelhecimentos termo-oxidativo e foto-oxidativo sobre propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados. Dissertação de mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- NEGRAO, A. P. Estudo de Asfaltos Modificados por Polímeros do tipo RET para Aplicação em Pavimentos. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- OLIVEIRA, R. B. ESTUDO SOBRE O EFEITO DO CCBIT-113AD NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS, 2014. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil.
- PAMPLONA, T. F. (2013) Efeito da adição de ácido polifosfórico em ligantes asfálticos de diferentes fontes. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo/USP, São Paulo/SP.
- RIBEIRO, E.A. *O efeito da modificação de ligante asfáltico com o líquido da castanha de caju (LCC) na resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas.* Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012
- RÜHL, R. Lower temperatures: The best for asphalt, bitumen, environment and health and safety. In: EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS, 4. 2014, Copenhagen. Anais... 2014.

- SILVA, G. G. Estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas – Campina Grande, 2016.
- SOBREIRO, F. P. (2014) Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo/USP, São Paulo/SP.
- SOUZA, J.L.S. *Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas com Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado com Óleo de Mamona*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012

ANEXO I – RESULTADOS DOS ENSAIOS OBTIDOS NO DSR

Performance Grade (PG) dos ligantes virgens

DSR Report

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 Operator: DANIEL Project:

Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2017\Cristian\PG\CAP5070.tri Time and

Date: 6/14/2017 1:41:17 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments Model:

Bearing Type: Temperature Control:

Test: Original Binder

Geometry Diameter: 25.00 mm Gap: 1000 μ m

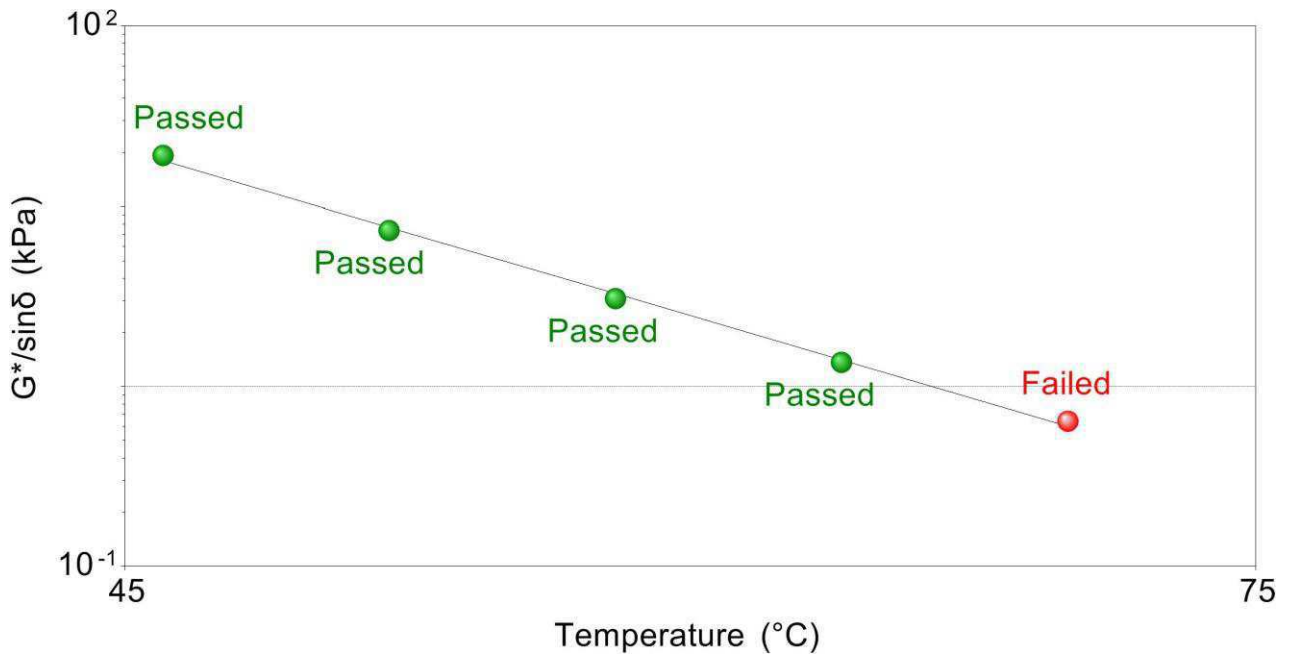
RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degree s	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	2.31	12.1	83.3	19.1	19.2	Pass
2	10.0	52.0	0.89	12.0	85.1	7.37	7.39	Pass
3	10.0	58.0	0.37	12.1	86.6	3.08	3.09	Pass
4	10.0	64.0	0.16	12.0	87.6	1.37	1.37	Pass
5	10.0	70.0	0.08	12.0	88.2	0.642	0.642	Fail

FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 5070

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2017\Cristian\PG\CAP5070.tri Fail Temperature:
66.4 °C



DSR Report

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 + 1% oleo linhaca
Operator: Paulo
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\PG\CAP 5070 + 1% oleo linhaca.tri
Time and Date: 5/10/2018 4:00:08 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: Original Binder
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.59	12.0	83.9	13.3	13.3	Pass
2	10.0	52.0	0.65	12.0	85.5	5.41	5.42	Pass
3	10.0	58.0	0.28	12.0	86.8	2.34	2.34	Pass
4	10.0	64.0	0.13	12.1	87.7	1.08	1.08	Pass
5	10.0	70.0	0.06	12.0	87.9	0.532	0.533	Fail

DSR Report

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 + 2% oleo de linhaca
Operator: Daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\PG\CAP 5070 + 2% oleo de linhaca.tri
Time and Date: 5/15/2018 3:34:34 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: Original Binder
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.14	12.0	84.3	9.47	9.52	Pass
2	10.0	52.0	0.46	12.0	85.9	3.86	3.87	Pass
3	10.0	58.0	0.20	12.0	87.2	1.68	1.69	Pass
4	10.0	64.0	0.09	12.0	88.0	0.790	0.790	Fail

DSR Report

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 + 3% oleo de linhaca
Operator: Daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\PG\CAP 5070 + 3% oleo de linhaca.tri
Time and Date: 5/23/2018 3:28:11 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: Original Binder
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.00	12.0	84.7	8.32	8.36	Pass
2	10.0	52.0	0.42	12.0	86.2	3.47	3.48	Pass
3	10.0	58.0	0.18	12.0	87.4	1.53	1.53	Pass
4	10.0	64.0	0.09	12.0	88.0	0.734	0.735	Fail

DSR Report

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 + 4% oleo de linhaca
Operator: Daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\PG\CAP 5070 + 4% oleo de linhaca.tri
Time and Date: 6/4/2018 5:36:21 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: Original Binder
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	0.81	12.0	85.3	6.73	6.75	Pass
2	10.0	52.0	0.34	12.0	86.7	2.85	2.85	Pass
3	10.0	58.0	0.15	12.0	87.7	1.27	1.27	Pass
4	10.0	64.0	0.07	12.0	88.1	0.589	0.589	Fail

DSR Report

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: 5% oleo linhaca
Operator: Paulo
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\PG\5% oleolinhaca.tri
Time and Date: 6/6/2018 9:23:03 AM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: Original Binder
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	0.59	12.0	85.8	4.91	4.93	Pass
2	10.0	52.0	0.25	11.9	87.0	2.10	2.10	Pass
3	10.0	58.0	0.11	12.0	87.7	0.942	0.943	Fail

DSR Report

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: 6% oleo linhaca
Operator: Paulo
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\PG\6% oleolinhaca.tri
Time and Date: 6/6/2018 12:32:10 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: Original Binder
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	0.50	11.9	86.0	4.20	4.21	Pass
2	10.0	52.0	0.22	12.0	87.2	1.85	1.85	Pass
3	10.0	58.0	0.10	12.1	88.0	0.838	0.839	Fail

Performance Grade (PG) dos ligantes envelhecidos a curto prazo (RTFO)

DSR Report

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070
Operator: DANIEL
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2017\Cristian\PG RTFO\CAP 5070.tri
Time and Date: 6/22/2017 1:13:01 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: RTFO Residue
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 µm

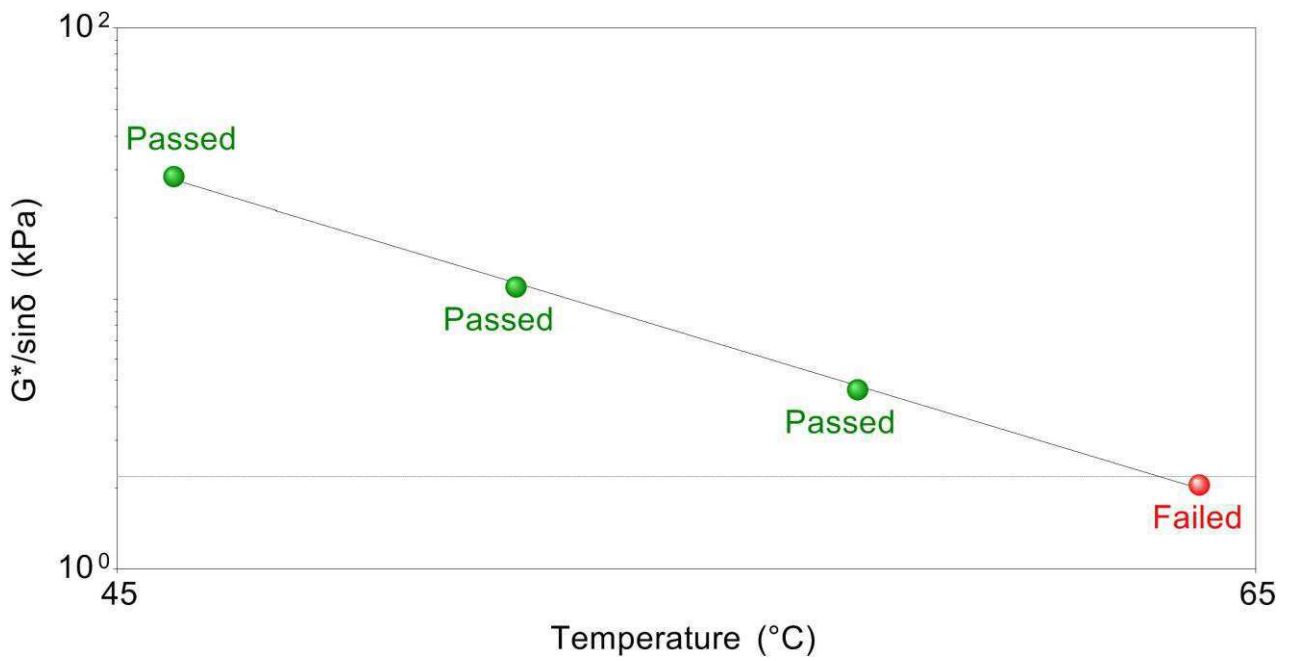
Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	2.79	10.0	79.8	27.9	28.4	Pass
2	10.0	52.0	1.11	10.0	82.2	11.0	11.1	Pass
3	10.0	58.0	0.46	10.0	84.3	4.60	4.63	Pass
4	10.0	64.0	0.21	10.1	85.9	2.05	2.05	Fail

FAIL GRAPH

Sample Name: CAP 5070
File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2017\Cristian\PG RTFO\CAP 5070.tri
Fail Temperature: 63.3 °C



DSR Report

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 + 1% oleo linhaca
Operator: Daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\PG RTFO\1% oleo linhaca.tri
Time and Date: 6/6/2018 2:58:18 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: RTFO Residue
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	2.77	9.9	79.4	28.0	28.5	Pass
2	10.0	52.0	1.14	10.0	81.8	11.4	11.5	Pass
3	10.0	58.0	0.48	10.0	83.9	4.86	4.88	Pass
4	10.0	64.0	0.22	10.0	85.5	2.22	2.22	Pass
5	10.0	70.0	0.11	10.0	86.7	1.06	1.06	Fail

DSR Report

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 + 2% oleo linhaca
Operator: daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\PG RTFO\2% oleo linhaca.tri
Time and Date: 6/6/2018 4:13:46 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: RTFO Residue
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	2.09	10.1	80.6	20.8	21.1	Pass
2	10.0	52.0	0.85	10.0	82.7	8.47	8.54	Pass
3	10.0	58.0	0.37	10.0	84.5	3.67	3.69	Pass
4	10.0	64.0	0.17	10.0	86.0	1.70	1.70	Fail

DSR Report

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 + 3% oleo linhaca
Operator: daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\PG RTFO\3% oleo linhaca.tri
Time and Date: 6/12/2018 12:47:11 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: RTFO Residue
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.61	10.0	80.9	16.0	16.2	Pass
2	10.0	52.0	0.66	10.0	83.0	6.57	6.62	Pass
3	10.0	58.0	0.29	10.0	84.8	2.86	2.87	Pass
4	10.0	64.0	0.13	10.0	86.3	1.33	1.33	Fail

DSR Report

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 + 4% oleo linhaca
Operator: daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\PG RTFO\4% oleo linhaca.tri
Time and Date: 6/12/2018 1:52:39 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: RTFO Residue
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.46	10.0	81.5	14.7	14.8	Pass
2	10.0	52.0	0.60	10.0	83.6	6.02	6.06	Pass
3	10.0	58.0	0.26	10.0	85.2	2.59	2.60	Pass
4	10.0	64.0	0.12	10.1	86.5	1.18	1.18	Fail

DSR Report

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 + 5% oleo linhaca
Operator: daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\PG RTFO\5% oleo linhaca.tri
Time and Date: 6/12/2018 2:45:14 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: RTFO Residue
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Temp. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G* kPa	G*/sin(delta) kPa	Pass/Fail
1	10.0	46.0	1.06	10.0	82.2	10.6	10.7	Pass
2	10.0	52.0	0.45	10.0	84.1	4.48	4.50	Pass
3	10.0	58.0	0.20	10.0	85.7	2.01	2.02	Fail

DSR Report

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 + 6% oleo

linhaca Operator: daniel

Project

:

Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\PG RTFO\6% oleo

linhaca.tri Time and Date: 6/12/2018 3:43:57 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA

Instruments Model:

Bearing Type:

Temperature Control:

Test: RTFO Residue

Geometry Diameter: 25.00 mm

Gap: 1000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

	Angular Freq. rad/s	Tem p. °C	Osc. Stress Pa	% Strain	Delta degrees	G * k P a	G*/sin(delta) kPa	Pass/F ail
1	10.0	46 .0	1.02	10 .0	81 .9	10 .2	10.3	Pass
2	10.0	52.0	0.44	10.1	83.9	4.38	4.41	Pass
3	10.0	58.0	0.20	10.0	85.5	1.96	1.97	Fail

Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

DSR Report

Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070
Operator: DANIEL
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2017\Cristian\MSCR\CAP5070.tri
Time and Date: 7/20/2017 1:55:00 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: MSCR
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 μm

RESULTS

Test Temperature:	58.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	1.8%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	1.5%
R_{diff} - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	17.8%
$J_{\text{nr } 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	1.8kPa ⁻¹
$J_{\text{nr } 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	1.8kPa ⁻¹
$J_{\text{nr diff}}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	3.8%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

DSR Report, continued

INDIVIDUAL CYCLE DATA

Cycle #	E 0	E c	E r	E 1	E 1 0
11	1.77691	1.95809	1.95500	0.1811 74	0.1780 91
12	1.95500	2.13594	2.13280	0.1809 35	0.1777 99
13	2.13280	2.31332	2.31018	0.1805 20	0.1773 81
14	2.31018	2.49127	2.48818	0.1810 86	0.1779 95
15	2.48818	2.66923	2.66579	0.1810 48	0.1776 07
16	2.66579	2.84608	2.84298	0.1802 95	0.1771 95
17	2.84298	3.02373	3.02039	0.1807 44	0.1774 09
18	3.02039	3.20197	3.19853	0.1815 84	0.1781 42
19	3.19853	3.37883	3.37581	0.1802 94	0.1772 80
20	3.37581	3.55632	3.55308	0.1805 03	0.1772 62
21	3.55308	9.52654	9.44077	5.97346	5.88770
22	9.44077	15.4210	15.3325	5.98027	5.89169
23	15.3325	21.3133	21.2275	5.98087	5.89501
24	21.2275	27.2091	27.1235	5.98161	5.89601
25	27.1235	33.1097	33.0252	5.98620	5.90176
26	33.0252	39.0174	38.9276	5.99219	5.90236
27	38.9276	44.9293	44.8381	6.00168	5.91048
28	44.8381	50.8374	50.7450	5.99936	5.90695

Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 + 1% oleo linhaca
Operator: Daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\MSCR\1% oleolinhaca.tri
Time and Date: 6/12/2018 4:13:39 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: MSCR
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 μm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

Test Temperature:	64.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	0.6%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	0.2%
R_{diff} - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	63.3%
$J_{nr 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	5.0kPa ⁻¹
$J_{nr 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	5.4kPa ⁻¹
$J_{nr diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	6.7%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

Page | 1

Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 + 2% oleo linhaca
Operator: Daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\MSCR\2% oleolinhaca.tri
Time and Date: 6/12/2018 4:50:18 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: MSCR
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 μm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

Test Temperature:	58.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	1.9%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	1.0%
R_{diff} - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	46.9%
$J_{nr 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	2.4kPa ⁻¹
$J_{nr 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	2.5kPa ⁻¹
$J_{nr diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	6.0%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 + 3% oleo linhaca
Operator: Daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\MSCR\3% oleolinhaca.tri
Time and Date: 6/13/2018 1:09:26 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: MSCR
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 μm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

Test Temperature:	58.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	1.7%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	0.7%
R_{diff} - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	56.5%
$J_{nr 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	3.1kPa ⁻¹
$J_{nr 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	3.3kPa ⁻¹
$J_{nr diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	5.5%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 + 4% oleo linhaca
Operator: Daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\MSCR\4% oleolinhaca.tri
Time and Date: 6/13/2018 1:44:31 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: MSCR
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 μm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

Test Temperature:	58.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	1.1%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	0.3%
R_{diff} - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	72.8%
$J_{nr 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	3.7kPa ⁻¹
$J_{nr 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	3.9kPa ⁻¹
$J_{nr diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	11.0%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 + 5% oleo linhaca
Operator: Daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\MSCR\5% oleolinhaca.tri
Time and Date: 6/13/2018 2:13:52 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: MSCR
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 μ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

Test Temperature:	52.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	2.7%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	1.4%
R_{diff} - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	47.8%
$J_{nr 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	1.9kPa ⁻¹
$J_{nr 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	2.0kPa ⁻¹
$J_{nr diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	5.8%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070 + 6% oleo linhaca
Operator: Daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\MSCR\6% oleolinhaca.tri
Time and Date: 6/13/2018 2:42:37 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
Model:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: MSCR
Geometry Diameter: 25.00 mm
Gap: 1000 μm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

Test Temperature:	52.0°C
$R_{0.1}$ - Average Percent Recovery at 0.100kPa:	2.4%
$R_{3.2}$ - Average Percent Recovery at 3.200kPa:	1.5%
R_{diff} - Percent difference between average recovery at 0.100kPa and 3.200kPa:	36.0%
$J_{nr 0.1}$ - Non-recoverable creep compliance at 0.100kPa:	2.0kPa ⁻¹
$J_{nr 3.2}$ - Non-recoverable creep compliance at 3.200kPa:	2.1kPa ⁻¹
$J_{nr diff}$ - Percent difference between non-recoverable creep compliance at 0.100kPa and 3.200kPa:	5.6%

The binder is not modified with an acceptable elastomeric polymer

LAS Test

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: CAP 5070
Operator:
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2017\Cristian\LAS\CAP5070.tri
Time and Date: 7/25/2017 2:02:31 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
DSR Description:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: LAS Test
Geometry Diameter: 8.00 mm
Gap: 2000 μ m

RESULTS

Test Temperature: 25.0°C

Fatigue model : A 104400

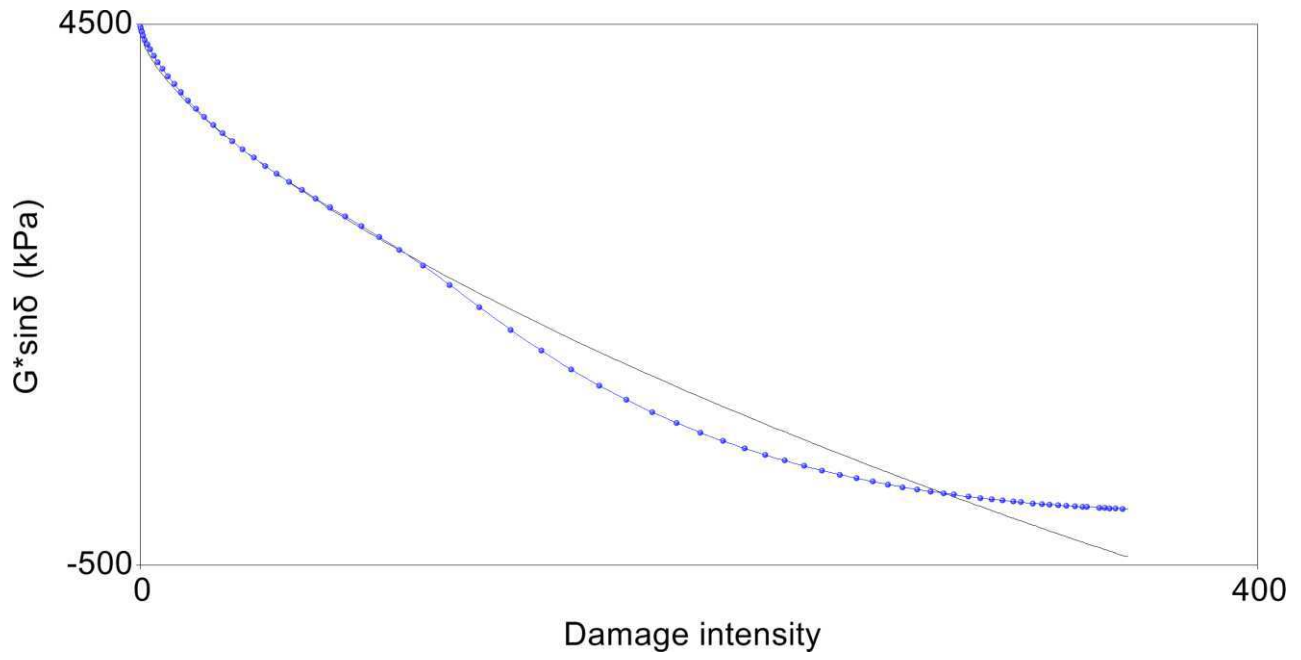
Fatigue model : B 2.354

Alpha (for testing only) 1.17677

Binder fatigue performance parameter

Strain %	N _f
2.5	12082
5	2364
10.0	463

VECD Damage Curve from Amplitude Sweep



DSR Report

LAS Test

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: 1% oleo linhaca
Operator: Daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\LAS\1% oleolinhaca.tri
Time and Date: 7/4/2018 11:33:30 AM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
DSR Description:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: LAS Test
Geometry Diameter: 8.00 mm
Gap: 2000 μ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

Test Temperature: 25.0
°C

Fatigue model : A 117600

Fatigue model : B 2.412

Alpha (for testing only) 1.20593

Binder fatigue performance parameter

Strain %	N _f
2.5	14899
5	2800
10.0	526

DSR Report

LAS Test

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: 2% oleo linhaca
Operator: Daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\LAS\2% oleolinhaca.tri
Time and Date: 7/11/2018 11:44:23 AM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
DSR Description:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: LAS Test
Geometry Diameter: 8.00 mm
Gap: 2000 μ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

Test Temperature: 25.0
°C

Fatigue model : A 119900

Fatigue model : B 2.389

Alpha (for testing only) 1.19443

Binder fatigue performance parameter

Strain %	N _f
2.5	13181
5	2517
10.0	481

DSR Report

LAS Test

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: 3% oleo linhaca
Operator: Daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\LAS\3% oleolinhaca.tri
Time and Date: 7/11/2018 1:05:34 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
DSR Description:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: LAS Test
Geometry Diameter: 8.00 mm
Gap: 2000 μ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

Test Temperature: 25.0
°C

Fatigue model : A 121800

Fatigue model : B 2.397

Alpha (for testing only) 1.19851

Binder fatigue performance parameter

Strain %	N _f
2.5	13238
5	2513
10.0	477

DSR Report

LAS Test

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: 4% oleo linhaca
Operator: Daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\LAS\4% oleolinhaca.tri
Time and Date: 7/11/2018 1:53:40 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
DSR Description:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: LAS Test
Geometry Diameter: 8.00 mm
Gap: 2000 μ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

Test Temperature: 25.0
°C

Fatigue model : A 125700

Fatigue model : B 2.431

Alpha (for testing only) 1.16179

Binder fatigue performance parameter

Strain %	N _f
2.5	12528
5	2503
10.0	500

DSR Report

LAS Test

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: 5% oleo linhaca
Operator: Daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\LAS\5% oleolinhaca.tri
Time and Date: 7/11/2018 2:41:34 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
DSR Description:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: LAS Test
Geometry Diameter: 8.00 mm
Gap: 2000 μ m

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

Test Temperature: 25.0
°C

Fatigue model : A 123500

Fatigue model : B 2.397

Alpha (for testing only) 1.21558

Binder fatigue performance parameter

Strain %	N _f
2.5	12151
5	2253
10.0	418

DSR Report

LAS Test

SAMPLE INFORMATION

Sample Name: 6% oleo linhaca
Operator: Daniel
Project:
Notes:

File Name: C:\Users\TA\Documents\ENSAIOS\ensaios 2018\Conrado\LAS\6% oleolinhaca.tri
Time and Date: 7/11/2018 3:45:54 PM

DSR/TEST SPECIFICATIONS

Manufacturer: TA Instruments
DSR Description:
Bearing Type:
Temperature Control:
Test: LAS Test
Geometry Diameter: 8.00 mm
Gap: 2000 µm

Warning : The test was run with out of date or missing calibrations

RESULTS

Test Temperature: 25.0
°C

Fatigue model : A 120300

Fatigue model : B 2.321

Alpha (for testing only) 1.21442

Binder fatigue performance parameter

Strain %	N _f
2.5	15249
5	2832
10.0	526