



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
ÁREA GEOTÉCNICA

Marco Aurélio de Teixeira e Lima

AVALIAÇÃO REOLÓGICA DE LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS
COM ÓLEO DE PEQUI

CAMPINA GRANDE, PB

2025

MARCO AURÉLIO DE TEIXEIRA E LIMA

**AVALIAÇÃO REOLÓGICA DE LIGANTE ASFÁLTICO MODIFICADO COM ÓLEO
DE PEQUI**

Dissertação Apresentada ao Centro de Tecnologia e Recursos
Naturais da Universidade Federal de Campina Grande –
Campina Grande/ PB, como parte dos requisitos necessários
para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL.

Orientadora: Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena

Coorientador: Dr. Paulo Germano Tavares Marinho Filho

CAMPINA GRANDE, PB

2025

L732a

Lima, Marco Aurélio de Teixeira e.

Avaliação reológica de ligante asfáltico modificado com óleo de pequi / Marco Aurélio de Teixeira e Lima. – Campina Grande, 2025.

76 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2025.

"Orientação: Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena, Prof. Dr. Paulo Germano Tavares Marinho Filho".

Referências.

1. Misturas Asfálticas Mornas. 2. Bioligantes. 3. Misturas Asfálticas – Temperatura de Aplicação. 4. Óleo Vegetal - Pequi. 5. Ligante Asfáltico - Óleo de Pequi. 6. Ligante Asfáltico - Aditivo Orgânico. I. Lucena, Lêda Christiane de Figueiredo Lopes. II. Marinho Filho, Paulo Germano Tavares. III. Título.

CDU 667.621.3(043.3)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO ENGENHARIA CIVIL AMBIENTAL
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1. **ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**
2. **ALUNO(A): MARCO AURÉLIO DE TEIXEIRA E LIMA / COMISSÃO EXAMINADORA: DR.^a LÊDA C. DE F. LOPES LUCENA - PPGECA/UFCG (PRESIDENTE), DR. PAULO GERMANO TAVARES MARINHO FILHO –CDSA/UFCG - COORIENTADOR, DR. JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES - PPGECA/UFCG - EXAMINADOR INTERNO; DR. JONNY DANTAS PATRICIO - EXAMINADOR EXTERNO; DR. ADEMIR MONTES FERREIRA - UAEC/UFCG - EXAMINADOR EXTERNO (PORTARIA 28/2025). / TITULO DA DISSERTAÇÃO: “AVALIAÇÃO REOLÓGICA DE LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS COM ÓLEO DE PEQUI” / ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: GEOTECNIA / HORA DE INICIO: 08:00 HORAS / FORMA DA SESSÃO: PRESENCIAL, NA SALA DE TELECONFERÊNCIA DO BLOCO CT.**
3. **EM SESSÃO REALIZADA DE FORMA PRESENCIAL, APÓS EXPOSIÇÃO DE CERCA DE 40 MINUTOS, O(A) CANDIDATO(A) FOI ARGUIDO(A) ORALMENTE PELOS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA, TENDO DEMONSTRADO SUFICIÊNCIA DE CONHECIMENTO E CAPACIDADE DE SISTEMATIZAÇÃO NO TEMA DE SUA DISSERTAÇÃO, SENDO-LHE ATRIBUÍDA O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA”, SENDO QUE A POSSIBILIDADE DE APROVAÇÃO ESTÁ CONDICIONADA À AVALIAÇÃO DA NOVA VERSÃO DO TRABALHO FINAL, SEGUINDO PROCEDIMENTOS PREVISTOS NA RESOLUÇÃO DO PROGRAMA. O PRESIDENTE DA COMISSÃO EXAMINADORA, OUVIDOS OS DEMAIS MEMBROS, DEVERÁ FICAR RESPONSÁVEL POR ATESTAR QUE AS CORREÇÕES SOLICITADAS NA LISTA DE EXIGÊNCIAS FORAM ATENDIDAS NA VERSÃO FINAL DO TRABALHO. A COMISSÃO EXAMINADORA CUMPRINDO OS PRAZOS REGIMENTAIS, ESTABELECE UM PRAZO MÁXIMO DE 30 DIAS PARA QUE SEJAM FEITAS AS ALTERAÇÕES EXIGIDAS. APÓS O DEPÓSITO FINAL DO DOCUMENTO DE DISSERTAÇÃO, DEVIDAMENTE REVISADO E MEDIANTE ATESTADO DO ORIENTADOR, O CONCEITO “EM EXIGÊNCIA” PASSARÁ IMEDIATAMENTE PARA O DE “APROVADO”. NA FORMA REGULAMENTAR, FOI LAVRADA A PRESENTE ATA, QUE É ASSINADA POR MIM, ISABELLY CRISTINNY GOMES GAUDÊNCIO, SECRETÁRIO(A), ALUNO E OS MEMBROS DA COMISSÃO EXAMINADORA PRESENTES.**
4. **CAMPINA GRANDE, 07 DE AGOSTO DE 2025.**



Documento assinado eletronicamente por **LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/08/2025, às 12:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES, PROFESSOR**, em 08/08/2025, às 08:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ISABELLY CRISTINNY GOMES GAUDENCIO, ASSISTENTE EM ADMINISTRACAO**, em 08/08/2025, às 09:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jonny Dantas Patricio, Usuário Externo**, em 08/08/2025, às 11:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **PAULO GERMANO TAVARES MARINHO FILHO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/08/2025, às 11:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **MARCO AURELIO DE TEIXEIRA E LIMA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 11/08/2025, às 15:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ADEMIR MONTES FERREIRA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 11/08/2025, às 15:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **5670743** e o código CRC **959C0158**.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor: MARCO AURÉLIO DE TEIXEIRA E LIMA

**Título: AVALIAÇÃO REOLÓGICA DE LIGANTES ASFÁLTICOS MODIFICADOS
COM ÓLEO DE PEQUI**

Área de Concentração – Geotécnica

Dissertação defendida e aprovada em: 07/08/2025 pela Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 LEDA CHRISTIANE DE FIGUEIREDO LOPES LUCE
Data: 07/08/2025 12:32:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena
PPGECA/UFCG (Presidente)- Orientadora

Documento assinado digitalmente
 PAULO GERMANO TAVARES MARINHO FILHO
Data: 07/08/2025 12:07:59-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo Germano Tavares Marinho Filho
CDSA/UFCG -Coorientador

Documento assinado digitalmente
 JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES
Data: 07/08/2025 13:08:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues
PPGECA/UFCG - Examinador Interno
JONNY DANTAS
PATRICIO:07165586458 Assinado de forma digital por JONNY
DANTAS PATRICIO:07165586458
Dados: 2025.08.07 14:41:30 -03'00'

Prof. Dr. Jonny Dantas Patrício
Examinador Externo

Documento assinado digitalmente
 ADEMIR MONTES FERREIRA
Data: 08/08/2025 09:25:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ademir Montes Ferreira
UAEC/UFCG- Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Jussara pela parceria amorosa de 54 anos e a minha “filha” Lêda por sua “teimosia” em me fazer Mestre.

Por mais que se saiba, há que se aprender mais! (...)

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Jussara, meus filhos Andyara, Natan e Inoan, meu genro Afonso, minhas noras Renata e Lara, meus netos Murilo, Maria Júlia, Milena e Ian, pela união e expressão maior do termo família.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECA), seu corpo docente e administrativo, por todo o apoio.

Aos meus professores Adriano, Kennedy, Ana Maria, Rosires, Veruschka e Zédna pelos ensinamentos, amizade e incentivo.

Aos colegas do mestrado Eduardo, Jefferson, Jisla, Priscila, Tassila, Thamires, Valter e Wlysses pelo convívio, para mim, rejuvenecedor.

A toda Unidade Acadêmica de Engenharia Civil/UFCG, minha segunda casa, notadamente aos colegas Andréa, Dayse, Isabelle, Marcos Simplício, Marília, Milton e Mônica pela amizade, apoio e encorajamento constante.

Aos meus “filhos” Lêda e Paulo pela orientação segura, paciência e dedicação.

Aos amigos do LEP Arthur, Jadilson, Joseildo e Ladjane pela convivência e amizade.

A todos os meus alunos, de ontem e de hoje, que se permitiram receber meu auxílio em sua formação humana e profissional, pois como dizia Paulo Freire – “Não há Docência sem Discência”.

A DEUS POR COLOCAR TODOS VOCÊS EM MINHA VIDA.

Obrigado!

RESUMO

Nos últimos anos tem havido um esforço para desenvolver misturas asfálticas mais sustentáveis, usando materiais alternativos e tecnologias que reduzem a temperatura de aplicação, como as Misturas Asfálticas Mornas (MAM). Essas misturas, preparadas entre 100°C e 150°C, consomem menos energia e emitem menos gases de efeito estufa. No Brasil, o uso de aditivos orgânicos, como óleos vegetais, tem sido estudado para melhorar o desempenho dessas misturas, especialmente na produção de misturas mornas. Um exemplo é o óleo de pequi, extraído do fruto do pequi, uma árvore típica do Cerrado brasileiro. O óleo de pequi é rico em ácidos graxos insaturados e antioxidantes apresentando potencial para uso em ligantes asfálticos. Este trabalho analisou o de óleo de pequi como modificador do ligante asfáltico CAP 50/70. Foram investigados três teores de adição (1%, 2% e 3%), e os ligantes modificados foram comparados ao ligante de referência CAP 50/70. O estudo foi conduzido em duas etapas principais: (i) caracterização empírica, com ensaios de penetração, ponto de amolecimento, índice de suscetibilidade térmica (IST) e envelhecimento a curto prazo (RTFO) e (ii) caracterização reológica, incluindo os ensaios de grau de desempenho (PG), fluência e recuperação sob múltiplas tensões (MSCR), Varredura de Amplitude Linear (LAS) e curva mestra. A espectroscopia na região do infravermelho (FTIR) confirmou a presença de grupos funcionais característicos do óleo, como ésteres e ácidos graxos, além de indicar que esses compostos permanecem na matriz asfáltica mesmo após o envelhecimento a curto prazo (RTFO). Os resultados reológicos mostram que o óleo de pequi reduz a viscosidade rotacional, o módulo complexo (G^*) e a elasticidade do ligante, ao mesmo tempo em que aumenta o ângulo de fase (δ). Essa alteração torna o ligante mais suscetível ao fluxo e menos resistente à deformação permanente. Portanto, a modificação com óleo de pequi exige a limitação do teor incorporado para garantir que o ligante mantenha propriedades compatíveis com as exigências da pavimentação rodoviária. Entre os teores avaliados, a incorporação de 2% apresentou o melhor equilíbrio entre flexibilidade, resistência ao envelhecimento e desempenho reológico.

Palavras-chaves: Misturas Mornas, bioligantes, temperaturas

ABSTRACT

In recent years, there has been an effort to develop more sustainable asphalt mixes, using alternative materials and technologies that reduce application temperatures, such as Warm Asphalt Mixes (WAM). These mixes, prepared between 100°C and 150°C, consume less energy and emit fewer greenhouse gases. In Brazil, the use of organic additives, such as vegetable oils, has been studied to improve the performance of these mixes, especially in the production of warm mixes. One example is pequi oil, extracted from the fruit of the pequi tree, a tree typical of the Brazilian Cerrado. Pequi oil is rich in unsaturated fatty acids and antioxidants, showing potential for use in asphalt binders. This study analyzed the use of pequi oil as a modifier of the CAP 50/70 asphalt binder. Three additional levels (1%, 2%, and 3%) were investigated, and the modified binders were compared to the CAP 50/70 reference binder. The study was conducted in two main stages: (i) empirical characterization, with penetration, softening point, thermal susceptibility index (TSI), and short-term aging (RTFO) tests; and (ii) rheological characterization, including grade of performance (PG), multiple stress creep and recovery (MSCR), linear amplitude scanning (LAS), and master curve tests. Far-infrared spectroscopy (FTIR) confirmed the presence of characteristic functional groups of the oil, such as esters and fatty acids. It indicated that these compounds remain in the asphalt matrix even after short-term aging (RTFO). The rheological results show that pequi oil reduces the rotational viscosity, complex modulus (G^*), and elasticity of the binder, while increasing the phase angle (δ). This change makes the binder more susceptible to flow and less resistant to permanent deformation. Therefore, modification with pequi oil requires limiting the incorporated content to ensure the binder maintains properties compatible with road paving requirements. The incorporation of 2% content presented the best balance between flexibility, aging resistance, and rheological performance.

Keywords: Warm Mixtures, biobinders, temperatures

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação vetorial dos parâmetros reológicos.....	14
Figura 2 – Fluência e recuperação de um fluido em função do tempo.....	15
Figura 3 - Trabalho da pseudo energia de deformação acumulada.....	16
Figura 4 - Exemplo de definição da zona viscoelástica linear nos ensaios de curva mestra	18
Figura 5 - Consumo de combustível e emissão de CO ₂ no aquecimento de 1 tonelada de agregados	20
Figura 6 – Fluxograma de atividades desenvolvidas na pesquisa	29
Figura 7 – Óleo de pequi utilizado na pesquisa.....	30
Figura 8 – Óleo de pequi após ensaio para determinação do teor de voláteis.....	32
Figura 9 – Agitador mecânico por cisalhamento	33
Figura 10 – Exemplo de resultado de PG para uma amostra envelhecida em RTFO	38
Figura 11 - Espectros de FTIR para as amostras de ligante asfáltico modificadas com óleo de pequi	41
Figura 12 - Espectro com faixa reduzida para as amostras de ligante puro e modificado com óleo de pequi, antes e após tratamento em RTFO	43
Figura 13 – Resultados do ensaio de penetração antes e após procedimento RTFO	44
Figura 14 – Resultados do ensaio de ponto de amolecimento antes e após procedimento RTFO	45
Figura 15 – Resultados do índice de susceptibilidade térmica (IST)	46
Figura 16 – Resultados de viscosidade rotacional para o CAP 50/70 com diferentes teores de óleo de pequi	46
Figura 17 – Grau de desempenho (PG) para o CAP 50/70 com diferentes teores de óleo de pequi	47
Figura 18 – Grau de desempenho verdadeiro – “True Grade” para o CAP 50/70 e teores de óleo de pequi	48
Figura 19 – Curva Mestra do Módulo de Cisalhamento Dinâmico x Frequência reduzida	49

Figura 20 – Curva Mestre do Ângulo de Fase x Frequência reduzida	50
Figura 21 – Curva Black do Ângulo de Fase x Módulo de Cisalhamento Dinâmico	51
Figura 22 – Percentual de recuperação no ensaio de MSCR	51
Figura 23 – Compliância não recuperáveis para os teores de óleo incorporados.....	52
Figura 24 – Compliância não recuperável entre as tensões de 100Pa e 3.200 Pa.....	53
Figura 25 – Curvas de Whöler para fadiga obtidas no ensaio de LAS.....	53
Figura 26 – Curva de Integridade versus Dano obtidas no ensaio de LAS	54
Figura 27 – Curvas de tensão versus deformação obtidas pelo ensaio de LAS	55
Figura 28 – Fator de Fadiga do Ligante para os ligantes modificados	56
Figura 29 – Comparativo da penetração de ligantes modificados com óleos vegetais diversos, antes e após RTFO.....	57
Figura 30– Comparativo da penetração retida de ligantes modificados com óleos vegetais diversos	57
Figura 31 - Comparativo do ponto de amolecimento de ligantes modificados com óleos vegetais diversos, antes e após RTFO	59
Figura 32 - Comparativo do índice de susceptibilidade térmica (IST) de ligantes modificados com óleos vegetais diversos	59
Figura 33 - Comparativo das curvas de viscosidade de ligantes modificados com óleos vegetais diversos.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos Fatores de Fadiga do Ligante (FFL) de acordo com Nascimento (2021) apud. Possebon (2021).....	17
Tabela 2 – Resultados obtidos na caracterização do CAP 50/70 e suas especificações	30
Tabela 3 – Massas específicas de alguns tipos de óleos	31
Tabela 4 – Viscosidades de alguns tipos de óleos	31
Tabela 5 – Propriedades do óleo de pequi utilizado nesta pesquisa	31
Tabela 6 – Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) brasileiros classificados por Penetração	34
Tabela 7 – Temperaturas de usinagem e compactação para o CAP 50/70 com diferentes teores de óleo de pequi.....	47

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação de nível de carregamento do pavimento com base nos valores de $J_{nr3,2}$	16
Quadro 2 – Ensaios reológicos desenvolvidos nos ligantes da pesquisa.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CADP	Potencial de Depleção Abiótica Chinês
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CMA	<i>Cold Mix Asphalt</i>
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
FFL	Fator de Fadiga do Ligante
FN	<i>Flow Number</i>
FTIR	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
GWP	Potencial de Aquecimento Global
HMA	<i>Hot Mix Asphalt</i>
HAP	Hidrocarboneto aromático policíclico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IST	Índice de susceptibilidade térmica
Jnr	Complância não-recuperável
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
LVER	Região de viscoelasticidade linear
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
MAM	Misturas Asfáltica Mornas
MSCR	<i>Multiple Stress Creep Recovery</i>
NBR	Norma Brasileira Técnica
PG	<i>Performance Grade</i> (grau de desempenho, tradução livre)
PM _{2,5}	Formação de Material Particulado
POO	Palmitico-oleico-oleico (ácidos graxos)
POP	Palmitico-oleico-palmitico (ácidos graxos)
RRT	Resistência Retida à Tração

RTFO	<i>Rolling Thin Film Oven</i>
RTFOT	<i>Rolling Thin Film Oven Test</i>
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SP	<i>Spindle</i>
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UV	Ultravioleta
WMA	Warm Mix Asphalt

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1 OBJETIVOS.....	10
1.1.1 Objetivo geral	10
1.1.2 Objetivos específicos	10
1.2 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1 Ligante Asfáltico	12
2.1.2 Reologia de ligantes asfálticos.....	13
3. MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 MATERIAIS	30
3.1.1 Ligante Asfáltico.....	30
3.1.2 Óleo de Pequi	30
3.2 MÉTODOS.....	33
3.2.1 Espectroscopia na região do infravermelho médio por Transformada de Fourier - FTIR.....	33
3.2.2 Caracterização do ligante asfáltico	33
4.0 RESULTADOS	41
4.1 Espectroscopia na região do infravermelho médio por Transformada de Fourier - FTIR.....	41
4.2 CARACTERIZAÇÃO EMPÍRICA DOS TEORES DE LIGANTE MODIFICADO	43
4.3 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DOS TEORES DE LIGANTE MODIFICADO	46
4.3.1 Viscosidade Rotacional	46
4.3.2 Performance Grade (PG).....	47
4.3.3 Curva Mestra	48
4.3.4 Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas (MSCR).....	51
4.3.5 Varredura Linear de Amplitude (LAS).....	53
4.3.6 Comparação com outros estudos que utilizaram óleos na modificação de ligantes asfálticos.....	56
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

1. INTRODUÇÃO

A Confederação Nacional do Transporte (2023) estabelece que a malha rodoviária do Brasil é a quarta maior do mundo, com uma extensão de mais de 1,7 milhão de quilômetros de estradas. Em 2022, o país contava com 65.800 km em estradas pavimentadas, sendo 95% desta extensão em revestimento asfáltico.

A mistura asfáltica tem como materiais constituintes o agregado graúdo, o agregado miúdo, o material de enchimento fíler e o ligante asfáltico, os quais devem satisfazer às Normas pertinentes, e às Especificações aprovadas pelo DNIT. (DNIT, 2006).

Trata-se, portanto, de um material heterogêneo que devido ao comportamento viscoelástico do ligante asfáltico, apresenta resposta diferente para carregamentos estáticos e dinâmicos, além de ser também sensível à temperatura. (BERNUCCI et. al, 2022).

Ainda por esses autores, o envelhecimento gradativo devido à oxidação do ligante aumenta a complexidade, já que é difícil a simulação desse fenômeno em laboratório para a devida caracterização do material.

Os revestimentos asfálticos podem ser elaborados mediante dois processos distintos: por meio de misturas asfálticas produzidas a frio (Cold Mix Asphalt – CMA), cuja fabricação ocorre na faixa de 20°C a 50°C e misturas asfálticas a quente (Hot Mix Asphalt – HMA), confeccionadas sob condições térmicas elevadas, geralmente entre 140 °C e 180 °C.

Sob o ponto de vista de desempenho mecânico e da durabilidade, as misturas à frio são mais indicadas para intervenções de conservação, manutenção e restauração de pavimentos em vias com menor intensidade de tráfego, devido à sua aplicabilidade prática e menor custo operacional.

As misturas asfálticas à quente apresentam comportamento superior, sendo amplamente empregadas em obras viárias de alto desempenho, especialmente em rodovias com elevado volume de tráfego e cargas pesadas.

No Brasil, um dos tipos mais empregados são as misturas asfálticas betuminosas à quente, mais conhecidas como Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ).

As misturas à quente demandam uma grande quantidade de energia para sua utilização, com um maior consumo de combustível, aumento na oxidação da mistura e alta emissão de poluentes o que gera um impacto ambiental nefasto pois colabora para o aquecimento global.

Diante desse cenário, têm sido desenvolvidas pesquisas voltadas para métodos

alternativos de produção de misturas asfálticas modificadas. A utilização de materiais sustentáveis e alternativos possui grande relevância tanto para a economia nacional quanto para a preservação ambiental.

Os primeiros experimentos com aditivos que utilizaram a tecnologia de MAMs foram inicialmente desenvolvidos na Europa, a partir de 1995, com uso de produtos como: zeólitas naturais ou sintéticas, parafinas, ceras e produtos orgânicos. Em 2002, cresceu nos Estados Unidos (E.U.A.) o interesse por essas tecnologias. Desde então, foram desenvolvidos uma série de novos produtos, tais como: CCBit 113 AD, pertencente à classe de aditivos orgânicos, Evotherm® e o Rediset™ WMX, aditivos pertencentes à classe surfactante, Double Berrel Green, tipo de tecnologia de espuma de asfalto (KVASNK *et al.*, 2009).

As misturas assim modificadas, denominadas Misturas Asfálticas Mornas (Warm Mix Asphalt - MAM), preparadas com temperaturas entre 100°C e 150 °C, reduzem consideravelmente a energia despendida no aquecimento dos insumos e, também, a emissão de gases de efeito estufa.

Há mais de uma década, iniciou-se no Brasil o uso de aditivos que permitem a redução de temperatura de usinagem, transporte e aplicação das misturas asfálticas. Essas técnicas viabilizam a diminuição em 20 a 30° C em geral no processo de usinagem. A utilização de aditivos orgânicos como óleos vegetais na melhoria do comportamento de Misturas Asfálticas tem sido objeto de estudos e trabalhos na UFCG, desde 2015, tornando-a referência no setor. Nestes já foram utilizados óleos de algodão, canola, coco, girassol linhaça, milho, moringa, soja entre outros (Guerra, 2019; Dantas, 2018; Portugal, 2016; Silva, 2016)).

O óleo de pequi é um produto natural extraído do fruto do pequizeiro (*Caryocar brasiliense*), uma árvore típica do Cerrado brasileiro, especialmente encontrada nos estados de Goiás, Minas Gerais, Tocantins, Bahia e parte do Mato Grosso. Apesar de ser um fruto nativo do Brasil, com uso culinário e na medicina popular, só recentemente vem tendo seu uso na indústria de cosméticos, farmacêutica e na produção de lubrificante e bio-diesel.

De acordo com dados do IBGE (2024) a produção de pequi (fruto) dentro da categoria de extrativismo vegetal alcançou um valor de R\$ 65.750 mil em 2023 e no ciclo anterior (2022) o valor foi de R\$ 49.053 mil, e em 2021 foi de R\$ 49.311 mil. Apesar dos dados do IBGE agregarem os valores de todo o fruto (polpa e sementes), sem separar especificamente o óleo, observa-se um aumento na produção e potencialmente na extração de óleo. Minas Gerais é o principal produtor, com 51,8% do volume nacional, seguido por Tocantins com 39,7%. No Nordeste a maior produção é do Ceará.

De Acordo com Embrapa (2024) e Almeida *et al.* (2018) o rendimento de óleo

extraído da polpa do fruto varia entre 30% e 40% do peso do fruto, podendo chegar até 75% com técnicas modernas de extração a frio e centrífuga. Este óleo é rico em ácidos graxos insaturados (especialmente ácido oleico), carotenoides, vitamina A e compostos antioxidantes.

Esta pesquisa estudou a adição do óleo de pequi em ligantes asfálticos para produção de misturas mornas em razão das propriedades antioxidantes e a presença dos ácidos graxos insaturados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito da incorporação de óleo de pequi sobre as propriedades físicas e reológicas do ligante asfáltico.

1.1.2 Objetivos específicos

- Estudar propriedades físicas e reológicas dos CAP puro e modificados com óleo de pequi;
- Avaliar o envelhecimento a curto prazo dos ligantes modificados com os óleos estudados;
- Comparar o comportamento das misturas asfálticas com ligantes modificados com a adição do óleo de pequi em diversos teores com os valores de referência das misturas quentes.

1.2 ORGANIZAÇÃO DA PESQUISA

O presente trabalho foi estruturado em cinco capítulos conforme apresentado a seguir:

Capítulo 1 – Introdução: este capítulo traz uma introdução sobre o tema a ser abordado por este estudo, apresentando sua relevância e importância. Além disso, são definidos o objetivo geral e específicos do estudo e é apresentada a organização da pesquisa.

Capítulo 2 – Revisão bibliográfica: este capítulo apresenta a fundamentação teórica utilizada como suporte para a realização do estudo proposto.

Capítulo 3 – Materiais e Métodos: este capítulo define e descreve o programa experimental e a metodologia utilizada para o estudo do comportamento físico e reológico dos ligantes asfálticos estudados nesta pesquisa.

Capítulo 4 – Apresentação e análise dos resultados dos ligantes asfálticos modificados com óleo de pequi: através da execução do programa experimental, este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos levando em consideração normativas e pesquisas realizadas anteriormente.

Capítulo 5 –Conclusões: este capítulo destina-se a apresentar as principais conclusões obtidas com o estudo.

Capítulo 6- Referência Bibliográficas

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura necessária para realização desta pesquisa. Este tópico apresenta temas pertinentes ao desenvolvimento desta a exemplo de tópicos sobre ligantes asfálticos, misturas mornas, óleo de Pequi e reologia de ligantes asfálticos.

2.1 Ligante Asfáltico

No Brasil, a predominância dos revestimentos asfálticos na construção de pavimentos rodoviários justifica a importância dos estudos voltados às propriedades e ao comportamento dos ligantes e das misturas asfálticas. Conforme levantamento da Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2024) o modal rodoviário é responsável por aproximadamente 65% do transporte de mercadorias e por 95% do deslocamento de passageiros em território nacional. Ainda assim, apenas cerca de 12% da malha rodoviária brasileira encontra-se pavimentada, o que evidencia a necessidade de soluções técnicas que assegurem maior durabilidade, desempenho e viabilidade na infraestrutura de transportes.

O ligante asfáltico, componente fundamental das misturas, exerce papel aglutinante entre os agregados minerais, conferindo coesão à estrutura e impermeabilidade ao revestimento. Segundo Carter (2018) esse material destaca-se por sua capacidade adesiva, estabilidade térmica e química, além de apresentar comportamento satisfatório frente a diversos agentes agressivos. De origem petrolífera, o ligante é constituído por uma combinação complexa de hidrocarbonetos pesados, obtidos como resíduo da destilação do petróleo após a extração das frações mais leves, como gasolina e diesel (Shell, 2015). Estima-se que cerca de 95% da produção mundial de ligantes asfálticos seja destinada à pavimentação (Lesueur, 2009).

As misturas asfálticas são usualmente preparadas em usinas, onde ocorre a combinação controlada entre agregados – que representam entre 90% e 95% da composição do revestimento – e o ligante, que, embora em menor proporção, é determinante para o desempenho final da estrutura (Bernucci *et al.*, 2022). O traço da mistura é definido com base em metodologias como o método Marshall, amplamente difundido no Brasil, ou o método SUPERPAVE, desenvolvido nos Estados Unidos e atualmente em fase de introdução no país.

A literatura técnica destaca que o ligante não se comporta exclusivamente como um sólido de propriedades elásticas, nem como um fluido puramente viscoso. Seu comportamento é dependente das condições de temperatura e do tempo ou frequência de carregamento, o que o caracteriza como um material termoviscoelástico (Carter, 2015). Em campo, ele é submetido a variações térmicas e ciclos de carga com intensidades distintas, exigindo desempenho compatível com condições operacionais adversas (Mugume & Kakoto, 2020; Lesueur, 2009).

Outro aspecto relevante, não amplamente discutido, refere-se ao envelhecimento do ligante, que ocorre desde sua produção até o fim da vida útil do pavimento. Este envelhecimento, de natureza oxidativa, evaporativa ou exsudativa, compromete gradualmente suas propriedades mecânicas e reológicas, tornando o material mais rígido e susceptível a trincamentos (Cezaro Junior *et al.*, 2008). Essa degradação é potencializada por temperaturas elevadas durante a usinagem e compactação das misturas a quente – procedimento necessário para garantir a remoção da umidade dos agregados e reduzir a viscosidade do ligante, facilitando sua trabalhabilidade (Motta *et al.*, 2012).

Diante disso, as misturas mornas e semimornas surgem como alternativas tecnológicas para reduzir os impactos térmicos no ligante, diminuir o consumo energético e mitigar emissões atmosféricas durante a produção. Além disso, o uso de aditivos modificadores tem se mostrado promissor na tentativa de melhorar o desempenho dos ligantes, conferindo-lhes maior resistência à deformação permanente e à fadiga.

Por fim, embora os ligantes sejam empregados em larga escala na pavimentação, muitos estudos ainda se restringem à análise de seu comportamento macroscópico. Como destaca Partl (2003), há uma lacuna significativa na compreensão da microestrutura desses materiais, cuja influência no desempenho mecânico é inegável. Assim, torna-se essencial investir em métodos de caracterização mais avançados, como os ensaios reológicos, que permitem avaliar as propriedades viscoelásticas em diferentes condições de carregamento e temperatura, alinhando-se às exigências atuais de desempenho e sustentabilidade da infraestrutura rodoviária.

2.1.2 Reologia de ligantes asfálticos

A reologia é a área da ciência que se dedica ao estudo da deformação e do escoamento da matéria sob a ação de tensões aplicadas. Este campo possui papel fundamental na caracterização de materiais complexos, como os ligantes asfálticos, cuja resposta mecânica

depende fortemente da temperatura, tempo de carregamento e da estrutura molecular. A introdução da reologia no contexto dos materiais betuminosos surgiu como alternativa aos métodos empíricos, fornecendo subsídios técnicos mais robustos para a previsão do desempenho em campo.

A aplicação de tensões dinâmicas por meio de equipamentos específicos permite investigar as propriedades viscoelásticas desses ligantes. Dentre os dispositivos mais utilizados, destacam-se o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR), empregado para análises de desempenho em temperaturas intermediárias e elevadas, e o Viscosímetro Rotacional (RV), que avalia a viscosidade em regime de escoamento contínuo.

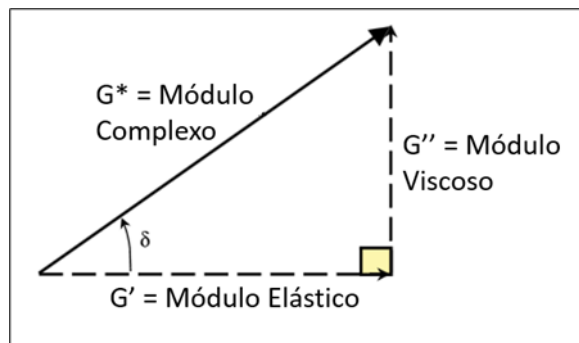
Parâmetros reológicos fundamentais

Nos ensaios realizados com DSR, dois parâmetros são comumente utilizados para representar o comportamento reológico dos ligantes: o módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e o ângulo de fase (δ).

O módulo $|G^*|$ representa a rigidez global do ligante quando submetido a um carregamento oscilatório. É definido como a razão entre a tensão máxima de cisalhamento ($\tau_{\max}$) e a deformação específica máxima ($\gamma_{\max}$), expressa pela Equação 1. De acordo com Mazzoni *et al.* (2020) os testes reológicos devem ser desempenhados dentro da *região viscoelástica linear* (LVER), isto é, a magnitude das tensões aplicadas são pequenas e não causam danos estruturais na avaliação das propriedades reológicas.

$$|G^*| = \tau_{\max} / \gamma_{\max} \quad \text{Equação 1}$$

Figura 1 - Representação vetorial dos parâmetros reológicos



Classificação de ligantes asfálticos por grau de desempenho (PG)

A metodologia de classificação por Grau de Desempenho (PG), introduzida no âmbito do programa SHRP, visa adequar o ligante asfáltico às condições ambientais e de tráfego a

que será submetido. Por meio dessa abordagem, os ligantes são especificados considerando os limites térmicos em que apresentam desempenho satisfatório.

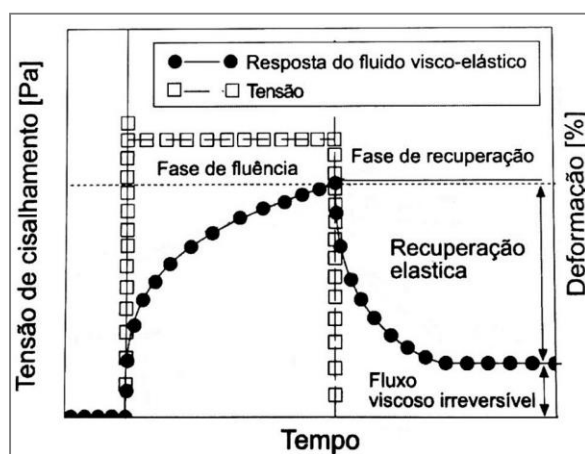
A designação PG XX–YY indica que o ligante atende aos critérios de desempenho para temperaturas máximas de XX °C e mínimas de –YY °C. Os parâmetros utilizados na classificação são obtidos por meio de ensaios realizados com o Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR), o Reômetro de Flexão em Viga (BBR) e o Teste de Tensão Direta (DTT).

Ensaio fluência e relaxação sob tensões múltiplas (Multiple Stress Creep Recovery)

O ensaio MSCR (Multiple Stress Creep Recovery) foi desenvolvido para complementar os critérios de avaliação de ligantes, especialmente quanto à sua suscetibilidade à deformação permanente. O procedimento aplica ciclos de carga e descarga, medindo a deformação residual (compliance J_{nr}) e a capacidade de recuperação elástica (%R).

Valores mais baixos de J_{nr} indicam maior resistência à deformação plástica, enquanto valores elevados de %R refletem melhor desempenho elástico. Esse ensaio é particularmente útil para caracterizar ligantes modificados com polímeros, que apresentam comportamento reológico mais complexo sob tensões elevadas.

Figura 2 – Fluência e recuperação de um fluido em função do tempo



Fonte: Adaptado de Schramm (2006)

Os valores de compliance não-recuperável (J_{nr}), obtidos a partir do ensaio MSCR, podem ser utilizados como critério para classificar os ligantes asfálticos de acordo com o nível de tráfego a que serão submetidos (Quadro 1). A norma AASHTO M 320 estabelece faixas específicas de J_{nr} associadas a diferentes categorias de solicitação de carga nos pavimentos. Além disso, é recomendado que a diferença percentual entre os valores de J_{nr} nas tensões de 0,1 kPa e 3,2 kPa (conhecida como J_{nr} diff) não ultrapasse 75%. Segundo Bastos et al. (2017) quando esse limite é respeitado presume-se que o ligante apresenta baixa

sensibilidade à variação de tensão, o que favorece seu desempenho contra a deformação permanente.

Quadro 1 - Classificação de nível de carregamento do pavimento com base nos valores de $J_{nr3,2}$

Propriedade	Limite J_{nr} (kPa^{-1})	Classificação do tráfego	Nº de passadas em um eixo padrão
J_{nr} a $3,2 \text{ kPa}^{-1}$ e $J_{nr\text{diff}} < 75\%$	2,0 - 4,0	Padrão (S - <i>Standard</i>)	< 10 milhões
	1,0 - 2,0	Pesado (H - <i>Heavy</i>)	> 10 milhões
	0,5 - 1,0	Muito pesado (V - <i>Very Heavy</i>)	> 30 milhões
	0 - 0,5	Extremamente pesado (E - <i>Extremely Heavy</i>)	> 100 milhões

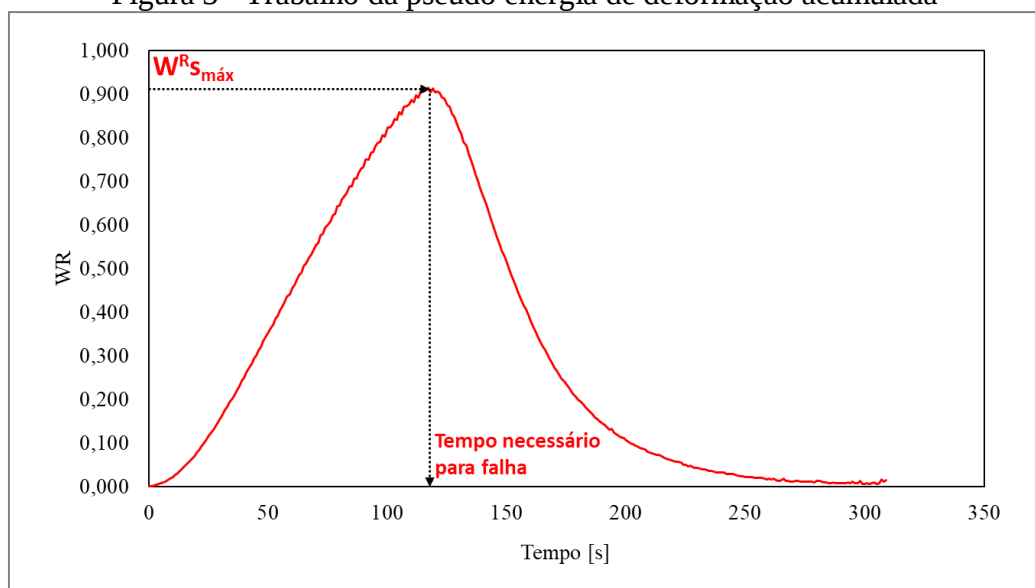
Fonte: AASHTO MP 19

Ensaio LAS e Avaliação de Fadiga

O ensaio LAS (Linear Amplitude Sweep) foi concebido com o objetivo de avaliar a resistência dos ligantes asfálticos à fadiga. Utilizando deformações oscilatórias progressivas, o teste simula a deterioração acumulada do material sob carregamentos cíclicos, permitindo a estimativa do número de ciclos até a ruptura (N_f).

Esse ensaio é fundamentado na Mecânica do Dano Contínuo e executado em duas etapas: uma varredura de frequência para obtenção das propriedades viscoelásticas e uma varredura de amplitude com deformação crescente. A análise dos resultados permite estimar a resistência à fadiga do ligante com base em parâmetros como a pseudoenergia acumulada e o Fator de Fadiga do Ligante (FFL).

Figura 3 - Trabalho da pseudo energia de deformação acumulada



Martins (2014) identificou uma relação significativa entre os resultados do ensaio LAS e o desempenho à fadiga de misturas asfálticas, propondo para isso um parâmetro denominado Fator de Fadiga do Ligante (FFL). Esse fator é determinado com base no número de ciclos até a ruptura (Nf), obtido para deformações de 1,25% e 2,5%, por meio da Equação

2. A autora observou que o FFL apresenta boa correlação com a resistência à fadiga das misturas testadas.

De forma semelhante, Possebon (2021) empregou a mesma equação, explicando que ela representa a área média entre duas curvas de fadiga quando plotadas em escala log-log, para os níveis de deformação mencionados, conforme Equação 2:

$$FFL = \frac{(\log(N_f, \gamma = 2,5\%) + \log(N_f, \gamma = 1,25\%))}{2} \times (\log(0,025) - \log(0,0125)) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Nf = número de ciclos até a falha obtido nos ensaios LAS para os respectivos níveis de deformação.

Com base em um conjunto de dados experimentais da Petrobras, Nascimento (2021) propôs uma escala de classificação para o FFL, conforme apresentada na Tabela 4. Essa classificação permite avaliar o desempenho potencial do ligante frente à fadiga em misturas asfálticas.

Tabela 1 – Classificação dos Fatores de Fadiga do Ligante (FFL) de acordo com Nascimento (2021) apud. Possebon (2021)

Classificação	FFB pse 19°C
1 – Baixo	$FFB \leq 1,22$
2 – Inferior	$1,22 \leq FFB \leq 1,31$
3 – Intermediário	$1,31 \leq FFB \leq 1,48$
4 – Superior	$1,48 \leq FFB \leq 1,57$
5 – Excelente	$FFB \geq 1,57$

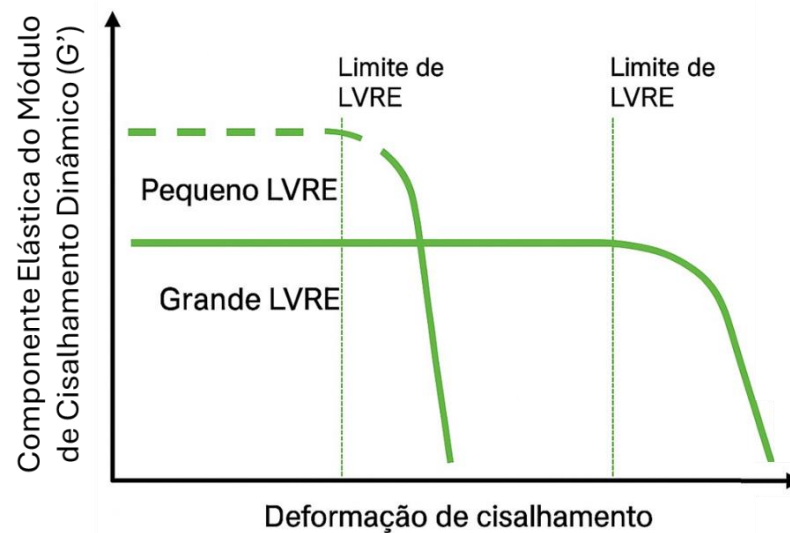
Curva Mestra e Análise Termorreológica

O procedimento consiste na determinação do módulo complexo e do ângulo de fase por meio de ensaios realizados em um reômetro de cisalhamento dinâmico, operando dentro da região de viscoelasticidade linear (LVER). Essa região é fundamental para a caracterização adequada das propriedades viscoelásticas dos materiais, pois, nesse intervalo, tensão e deformação permanecem proporcionais. Dentro dessa faixa, as tensões aplicadas são

suficientemente baixas para não provocar a degradação da estrutura do material, permitindo a avaliação de propriedades microestruturais relevantes.

Quando a tensão ultrapassa o limite de escoamento — ponto a partir do qual o material deixa de se comportar como um sólido e passa a fluir como um líquido — surgem não linearidades e os dados deixam de refletir diretamente as características estruturais internas. A determinação prática do limite da LVRE é feita por meio de ensaios de varredura de tensão ou deformação, observando o ponto em que o módulo elástico (G') começa a variar em função da tensão ou da deformação aplicada, conforme exemplificado na Figura 4.

Figura 4 - Exemplo de definição da zona viscoelástica linear nos ensaios de curva mestra



Fonte: Adaptado de <https://analyzing-testing.netzsch.com/en/know-how/glossary/linear-viscoelastic-region-lver>

A construção da curva mestra permite representar o comportamento reológico do ligante asfáltico em uma ampla faixa de frequências a partir de ensaios realizados em diferentes temperaturas. A técnica baseia-se no princípio da superposição tempo-temperatura, deslocando horizontalmente as curvas obtidas em cada temperatura para compor um único espectro. Os modelos matemáticos mais utilizados para o cálculo do fator de deslocamento são o de Arrhenius e o Williams-Landel-Ferry (WLF), ambos aplicáveis dependendo da faixa térmica de interesse.

O modelo de Arrhenius, é apresentado na Equação 3.

$$\text{Log } a_T [T] = \frac{-E_a}{2,303 \cdot R} \cdot \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right] \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$a_T [T]$ = fator de deslocamento de uma curva isotérmica para uma temperatura T;

E_a = energia de ativação característica do material[J/mol];

R = constante universal dos gases perfeitos [(J/mol)/(°K)];

T = Temperatura de uma curva isotérmica (°K);

T_{ref} = Temperatura de referência de uma curva isotérmica (°K)

O modelo de WLF é definido pela Equação 4

$$\text{Log } a_T [T] = \frac{C_1 (T - T_{ref})}{C_2 + T - T_{ref}} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

C_1 e C_2 = parâmetros do modelo, calculados por regressão linear e dependentes do material;

T_{ref} = Temperatura de referência de uma curva isotérmica (°K)

Curvas Espaço Black

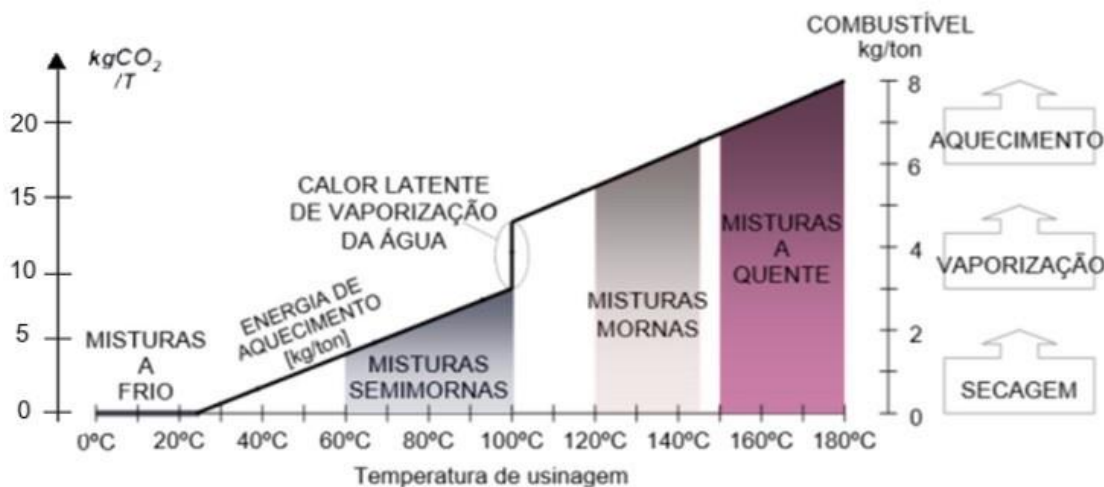
As curvas espaço Black são representações gráficas que relacionam o módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e o ângulo de fase (δ), permitindo avaliar o comportamento viscoelástico sem a necessidade de modelagem numérica direta. Ao plotar δ versus $\log |G^*|$, é possível identificar inconsistências experimentais, mudanças de fase e a homogeneidade do material (Cravo, 2016).

2.2 Mistura Asfáltica Morna (WMA)

As tecnologias de mistura asfáltica morna (WMA, do inglês *Warm Mix Asphalt*) surgiram como uma alternativa promissora para diminuir as temperaturas de produção das misturas asfálticas, promovendo maior eficiência energética e a redução das emissões de poluentes (Alizadeh, Hajikarimi e Nejad, 2025; Williams e Willis 2022).

A WMA integra o conjunto de misturas asfálticas classificadas com base nas temperaturas de usinagem, que incluem: misturas frias (temperatura ambiente), semimornas (HWMA), mornas (WMA) e quentes (HMA) (D'Angelo *et al.*, 2008; Rubio *et al.*, 2013). A Figura 6 ilustra essas diferentes categorias em relação à temperatura de usinagem, ao consumo energético e à emissão de CO₂.

Figura 5 - Consumo de combustível e emissão de CO₂ no aquecimento de 1 tonelada de agregados



Fonte: Adaptado de Olard (2008) e D'Angelo *et al.* (2008)

Esse tipo de mistura permite uma redução de temperatura entre 10 °C e 50 °C no processo produtivo, em comparação às misturas asfálticas a quente (HMA, do inglês *Hot Mix Asphalt*). Uma diminuição de apenas 13 °C na temperatura de fabricação pode reduzir pela metade as emissões de compostos voláteis, especialmente os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), substâncias que oferecem riscos à saúde humana (Olard, 2008; EAPA, 2010). Complementarmente, D'Angelo *et al.* (2008) demonstram que a aplicação das tecnologias WMA pode resultar em uma redução de 10% a 50% nas emissões de gases e de 11% a 35% no consumo de combustível.

Motta *et al.* (2012) realizaram uma estimativa do consumo energético necessário para a produção de misturas asfálticas quentes e mornas, considerando a execução de um trecho experimental com aproximadamente 160 toneladas de massa asfáltica. As temperaturas de usinagem e compactação adotadas foram de 160 °C e 150 °C para a mistura à quente, e de 135 °C e 125 °C para a mistura morna. Os resultados indicaram que a mistura morna apresentou um consumo total de energia na etapa de secagem e aquecimento dos agregados de aproximadamente 15,4 milhões de megajoules (MJ), enquanto a mistura à quente demandou cerca de 19,9 milhões de MJ. Essa redução representa uma economia de energia da ordem de 22,6%, evidenciando o potencial das tecnologias de mistura morna para diminuir os impactos ambientais e operacionais relacionados ao processo de produção.

No estudo de Ma, Zhang e Wu (2019) foi conduzida uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) comparativa entre HMA e WMA. O modelo de ACV englobou desde a produção das

matérias-primas até o descarte final do pavimento, e foram analisadas categorias de impacto como: Potencial de Aquecimento Global (GWP), Potencial de Depleção Abiótica Chinês (CADP) e Formação de Material Particulado (PM_{2.5}), considerando cinco cenários variados de desempenho de longo prazo. Os resultados indicaram que, salvo no cenário em que o WMA apresentasse desempenho substancialmente pior do que o HMA, os pavimentos WMA geraram emissões significativamente menores de gases de efeito estufa e PM_{2.5} ao longo de seu ciclo de vida. Por outro lado, o consumo de recursos naturais (CADP) foi praticamente equivalente entre os dois tipos de pavimento. Assim, concluiu-se que, mesmo com consumo similar de recursos, o pavimento WMA mostrou-se mais ambientalmente amigável quando comparado ao HMA em termos de emissões

Em termos de desempenho, Wang e Kim (2021) reforçam que as misturas WMA, produzidas a temperaturas mais baixas, apresentam menor envelhecimento durante a fase de envelhecimento de curto prazo, devido à menor volatilização e oxidação do ligante. No entanto, observou-se que essas misturas tendem a envelhecer mais rapidamente nos primeiros anos após a aplicação, quando comparadas às misturas HMA. Após esse período inicial, as taxas de envelhecimento se tornam semelhantes entre os dois tipos de mistura. Essa redução no envelhecimento inicial das WMA é apontada por Newcomb (2006) e por Prowell e Hurley (2007) como um fator que contribui para o aumento da resistência à fadiga e da durabilidade dos pavimentos a longo prazo.

2.2.1 Técnicas para produção de Misturas Mornas

No campo das metodologias de fabricação de WMA são promovidas alterações temporárias ou permanentes nas características do ligante asfáltico com o objetivo de reduzir a temperatura de produção. Entre essas alterações, destaca-se a redução da viscosidade do ligante, que pode ser alcançada por diferentes abordagens: adição de aditivos redutores de viscosidade, introdução controlada de água para gerar espuma aglutinante com volume ampliado (expansão), promovendo maior revestimento e trabalhabilidade, ou ainda a substituição parcial por ligantes vegetais de baixa viscosidade (Kristjánsdóttir *et al.*, 2007; Kheradmand *et al.*, 2014; Sukhija, Wagh e Saboo, 2021). Em todos esses casos, as tecnologias aplicadas possibilitam a redução das temperaturas de usinagem e compactação, com potencial em apresentar desempenho mecânico comparável à mistura convencional HMA (Sterling, 2012).

A incorporação de aditivos orgânicos, como ceras ou amidas graxas, tem se mostrado eficaz na redução da viscosidade do ligante asfáltico em temperaturas acima de seu ponto de fusão. Entre os produtos comerciais mais amplamente empregados nesta categoria, destaca-se o Sasobit. Outros aditivos orgânicos, como o Asphaltan B, uma combinação de ceras derivadas da destilação por solvente de linhito ou carvão marrom (cera de montano) e amida de ácido graxo, também foram investigados (Capitão, Picado-Santos e Martinho, 2012; Rodríguez-Alloza, Gallego e Pérez, 2013; Alizadeh, Hajikarimi e Nejad, 2025).

Na produção de misturas mornas (WMA) com o uso desses materiais, o ligante é mantido em alta temperatura durante as fases de mistura e compactação, o que garante a atuação efetiva do aditivo. À medida que a mistura esfria, o aditivo cristaliza, formando uma rede de partículas microscópicas que contribui para o aumento da rigidez do ligante e para sua maior resistência às deformações permanentes (Capitão, Picado-Santos e Martinho, 2012). A presença desses aditivos possibilita a redução significativa das temperaturas de produção, com diminuições entre 20 °C e 30 °C (Li *et al.*, 2017).

A adição de ácidos oleicos, compostos de origem vegetal, representam uma alternativa para reduzir a viscosidade durante as fases de usinagem e compactação, promovendo melhor trabalhabilidade da mistura. No entanto, esses óleos também diminuem a consistência do ligante em temperatura ambiente, o que pode comprometer a qualidade e o desempenho mecânico das misturas. Por esse motivo, sua incorporação deve ser cuidadosamente dosada, considerando a concentração do aditivo e as características do ligante asfáltico base (Lucena *et al.*, 2016; Guerra, 2019).

Como o ligante está em alta temperatura, esse fenômeno é mantido durante todo o processo de mistura e compactação. Quando o asfalto esfria, o aditivo cristaliza, formando uma estrutura de rede de partículas microscópicas, aumentando a rigidez do ligante e sua resistência à deformação. A adição de aditivos orgânicos a misturas asfálticas geralmente diminui a temperatura de mistura em aproximadamente 20°C a 30°C (Li *et al.*, 2017).

No âmbito dos aditivos químicos, estes são incorporados ao ligante asfáltico para melhorar o revestimento dos agregados, a adesão do ligante e a trabalhabilidade da mistura. Em geral, os agentes químicos não afetam significativamente o desempenho geral da mistura asfáltica. Eles podem ser formulados para finalidades específicas, como promover a adesão entre ligante e agregados, melhorar o revestimento dos agregados, atuar como agentes emulsificantes ou funcionar como surfactantes (Mazumder *et al.*, 2016; Behnood, 2020).

Um grupo promissor são os aditivos à base de emulsão, que consistem em uma mistura de água, emulsificantes e outros agentes químicos. Exemplos como Evotherm ET, DAT e 3G são amplamente estudados e demonstraram reduzir as temperaturas de mistura e compactação, melhorar a trabalhabilidade, adesão e propriedades de revestimento, e otimizar as propriedades mecânicas de ligantes de borracha asfáltica. Outro grupo importante são os agentes surfactantes, que melhoram a adesão entre o ligante asfáltico e o agregado, reduzindo a probabilidade de danos por umidade e desgaste (Alizadeh, Hajikarimi e Nejad, 2025). Silva (2016) enfatiza que os aditivos surfactantes podem ser introduzidos ao ligante antes ou durante o processo de usinagem, possibilitando uma redução de 30-40°C, a depender do tipo de produto.

A tecnologia de espumação envolve basicamente aumentar temporariamente o volume do ligante e diminuir sua viscosidade, por meio da injeção de pequenas quantidades de água, agregado úmido ou material hidrofílico (Sousa, 2020). O vapor gerado pela evaporação da água causa uma expansão significativa do ligante asfáltico, reduzindo temporariamente sua viscosidade e melhorando a trabalhabilidade e o revestimento dos agregados (Hasan, You e Yang, 2017). As técnicas são geralmente classificadas em duas categorias: espumação direta, a água é injetada diretamente no ligante asfáltico quente por meio de instrumentos como bicos; e espumação indireta, à base de água que utilizam zeólita sintética finamente triturada, que contém aproximadamente 20% de água, na mistura asfáltica. Quando aquecidos, esses materiais liberam água, produzindo vapor e iniciando o processo de espumação (Costa *et al.*, 2024).

Conforme Jalali (2016) é recomendado que nos processos de formação de espuma, a água adicionada seja suficiente para não causar problemas de aderência, sendo aconselhável a utilização de aditivos melhoradores de adesividade, para minimizar a susceptibilidade dessas misturas à umidade.

A combinação das tecnologias WMA com materiais de asfalto reciclado (RAP) tem sido extensivamente investigada. A redução da viscosidade proporcionada pelas WMA facilita a incorporação de elevadas quantidades de RAP, o que rejuvenesce o ligante envelhecido e pode resultar em um desempenho comparável ou superior ao do HMA convencional (Sagar, Venudharan e Saha, 2025).

2.2.2 Utilização de óleos vegetais residuais como modificador de ligante para WMA

Os óleos vegetais são considerados aditivos promissores devido à sua riqueza em ácidos graxos insaturados e melhor resistência à temperatura, podendo inclusive atuar na regeneração do ligante asfáltico (Ji *et al.*, 2017). Estudos recentes indicam que, apesar de poderem favorecer o afundamento de trilha de roda e diminuir a recuperação elástica dos ligantes, esses óleos contribuem para o alívio das tensões, melhor desempenho à fadiga e maior resistência ao trincamento térmico (Sun *et al.* 2016; Guarin *et al.*, 2016, Al-Omari *et al.* 2018). Além disso, o uso de óleos pós-consumo, como os de milho e soja, promove a redução do passivo ambiental através da destinação adequada (Luz *et al.*, 2019).

A aplicação de óleos residuais no ligante asfáltico é ecologicamente vantajosa, pois eles demonstram boa estabilidade oxidativa e a capacidade de reduzir a alta viscosidade dos ligantes, diminuindo custos na usina e aumentando a estabilidade de estocagem e a adesividade com os agregados (Portugal *et al.*, 2017). O óleo de cozinha residual, em particular, apresenta um ponto de fulgor elevado (acima de 220°C), o que contribui para a segurança no aquecimento dos ligantes, e não libera elementos voláteis tóxicos quando reaquecido, por já ter passado pelo processo de cocção (Sun *et al.*, 2016).

Luz *et al.* (2019) realizaram estudos mecânicos em misturas asfálticas contendo ligantes modificados com óleos vegetais residuais de soja e milho, avaliando seu desempenho frente às propriedades mecânicas e reológicas. Os resultados mostraram que, apesar da viabilidade técnica do uso desses aditivos, as misturas com ligante asfáltico convencional apresentaram desempenho superior, principalmente nos ensaios de resistência à tração e Flow Number, indicando menor suscetibilidade à deformação permanente nos ligantes não modificados. Ensaio reológicos demonstraram que a adição dos óleos vegetais impactou significativamente a consistência do ligante em temperaturas mais baixas, como evidenciado na redução da penetração a 25°C, mas com influência menos expressiva em temperaturas elevadas, típicas da fase de serviço do pavimento.

A utilização dos óleos também proporcionou uma leve redução nas temperaturas de usinagem e compactação — de aproximadamente 7°C — chegando a 150°C e 140°C, respectivamente. Embora modesta, essa redução contribui para benefícios ambientais, como a menor emissão de gases e menor consumo energético. No que diz respeito à durabilidade, o ensaio de Lottman Modificado evidenciou que as misturas contendo óleo de milho (novo e residual) apresentaram resistência à umidade satisfatória, com valores de Resistência Retida à

Tração (RRT) superiores a 70%. Por outro lado, as misturas com óleo de soja apresentaram RRT inferior, o que foi atribuído à maior instabilidade das cadeias de hidrocarbonetos insaturados desse tipo de óleo, comprometendo a adesividade entre ligante e agregado. Essa limitação pode ser contornada com o uso de aditivos promotores de adesividade, como cal hidratada ou aditivos químicos comerciais (Shu *et al.*, 2022).

Em síntese, a incorporação de óleos vegetais residuais em ligantes asfálticos para WMA representa uma estratégia promissora do ponto de vista ambiental e econômico. Apesar de algumas perdas em desempenho mecânico — como redução de resistência e maior propensão à deformação permanente — os benefícios ligados à sustentabilidade, reaproveitamento de resíduos e redução da viscosidade tornam os óleos vegetais alternativas viáveis para a produção de misturas asfálticas mais sustentáveis (Nogueira *et al.*, 2019; Costa, 2023).

2.2 ÓLEO DE PEQUI

O óleo de pequi, extraído do fruto do *Caryocar brasiliense* ou *Caryocar coriaceum*, é um produto natural de grande valor nutricional, econômico e sociocultural, especialmente no bioma Cerrado brasileiro. Este óleo é valorizado por ser uma fonte concentrada de nutrientes importantes, incluindo ácidos graxos, como o ácido oleico e o ácido palmítico, além de ser rico em vitaminas A e E, na forma de carotenoides e tocoferóis, respectivamente. O óleo é obtido da polpa ou da amêndoa do fruto por meio de processos artesanais (como fervura e prensagem manual) ou industriais (prensagem a frio ou extração com solventes), com rendimento de óleo na polpa variando entre 30% e 40%, dependendo do método e da qualidade do fruto. A otimização dos métodos de extração tem sido foco de pesquisas para aumentar o rendimento e a qualidade do óleo (Colares *et al.*, 2021; Fracasso *et al.*, 2023; Lima *et al.*, 2007).

Quimicamente, o óleo de pequi apresenta um perfil lipídico dominado por ácidos graxos monoinsaturados e saturados, sendo o ácido oleico (ômega-9) o principal componente, variando de 51% a 55%. O ácido palmítico também é bastante expressivo, com teores entre 35% e 46%. Em menor proporção, aparecem o ácido linoleico (ômega-6) entre 1,3% e 2%, ácido linolênico (ômega-3) entre 0,3% e 0,7%, além de traços de ácido esteárico (~1%) e outros ácidos de cadeia longa (Miranda-Vilela *et al.*, 2009; Roll *et al.*, 2018).

Os principais triacilgliceróis presentes no óleo de pequi incluem POP (palmitico-oleico-palmitico), que representa cerca de 27,6% a 33,7%, e POO (palmitico-oleico-oleico), variando entre 22,9% e 38,7%. Essa composição torna o óleo estruturalmente semelhante a outras gorduras nobres, como a manteiga de cacau, o que pode justificar seu potencial uso na indústria alimentícia e cosmética (Miranda-Vilela *et al.*, 2009; Roll *et al.*, 2018).

Além dos lipídeos, o óleo de pequi é extremamente rico em compostos bioativos, como carotenoides (especialmente o β -caroteno), com concentrações de carotenoides totais (15-27mg 100g⁻¹), responsáveis pela coloração amarelo-alaranjada intensa do óleo. Compostos fenólicos diversos também foram identificados na polpa, casca e amêndoa, reforçando a atividade antioxidante do óleo (Cordeiro *et al.*, 2013).

As propriedades físico-químicas do óleo variam conforme a origem e o método de extração. Em amostras de *C. brasiliense*, os valores típicos são: índice de saponificação variando entre 0,1 a 0,3 mg NaOH/g, e densidade em torno de 0,8560 g/mL a 25 °C. O teor de umidade é geralmente baixo, cerca de 0,797%, o que favorece a estabilidade do produto. Óleos extraídos das amêndoas, embora menos utilizados, também apresentam elevada proporção de ácidos oleico e palmítico, porém com maior acidez (em torno de 3,86 mgKOH/g) e índice de peróxidos que pode chegar a 27,6 meq/kg (Colares *et al.*, 2021).

O consumo do óleo de pequi tem sido associado a diversos benefícios à saúde. Estudos clínicos e experimentais sugerem que ele possui ação antioxidante, anti-inflamatória e cardioprotetora. A ingestão regular pode contribuir para a redução do colesterol LDL e aumento do HDL, além de exercer um possível efeito protetor hepático. Em ensaios com atletas, o consumo de cápsulas de óleo de pequi demonstrou reduzir processos inflamatórios induzidos por exercícios físicos intensos (Roll *et al.*, 2018).

O óleo de pequi é um ingrediente essencial na culinária regional do Cerrado. É tradicionalmente utilizado para dar sabor e aroma a pratos como sopas, ensopados, arroz, frango e peixes. Seu perfil aromático único também o torna um candidato para inovações culinárias, como a incorporação em pipocas ou até mesmo em produtos de confeitaria, em combinação com manteiga de cacau para a produção de chocolates e brigadeiros (Kerr; Silva; Tchucarramae, 2007; Lima *et al.*, 2007; Pianovski *et al.*, 2008).

Devido às suas propriedades nutritivas, hidratantes e regeneradoras, o óleo de pequi é amplamente empregado na formulação de produtos cosméticos. Sua riqueza em ácidos graxos essenciais permite que atue como um excelente emoliente, formando uma barreira protetora

sobre a pele que reduz a perda trans epidérmica de água, contribuindo para a hidratação e restauração da barreira cutânea (Pianovski *et al.*, 2008). Para os cabelos, o óleo de pequi tem demonstrado capacidade de penetrar na fibra capilar, fornecendo nutrição intensa, regeneração, redução do frizz e proteção contra danos oxidativos, resultando em fios mais fortes, brilhantes e saudáveis. A presença de carotenoides e tocoferóis confere ao óleo uma capacidade de absorver e dissipar parte da radiação UV, oferecendo uma proteção adjuvante contra o fotoenvelhecimento. Há ainda pesquisas sobre sua aplicação como matéria-prima para produção de biodiesel, dada sua alta concentração de ácidos graxos estáveis e sua estrutura lipídica adequada (Guimarães *et al.*, 2022).

Do ponto de vista socioeconômico e ambiental, o óleo de pequi tem grande relevância. Ele representa uma alternativa sustentável de geração de renda para comunidades extrativistas e agricultores familiares do Cerrado, especialmente quando oriundo de práticas de manejo ecológico. No entanto, sua cadeia produtiva ainda enfrenta desafios como a sazonalidade da oferta, ausência de padronização industrial, limitações de escala e carência de certificações de qualidade. (Kerr; Silva; Tchucarramae, 2007)

As propriedades do óleo de pequi são amplamente estudadas, com destaque para suas ações antioxidante e anti-inflamatória (Fracasso *et al.*, 2023; Miranda-Vilela *et al.*, 2009; Roll *et al.*, 2018). A capacidade antioxidante é atribuída à sinergia entre carotenoides, tocoferóis e compostos fenólicos, que atuam sequestrando radicais livres e protegendo as células do corpo contra o estresse oxidativo, fator implicado no desenvolvimento de doenças crônicas. Estudos *in vitro* e *in vivo* têm demonstrado a eficácia do óleo na redução do dano oxidativo. Em relação à sua ação anti-inflamatória, pesquisas em modelos animais indicaram que o extrato de pequi pode modular a produção de mediadores inflamatórios, como citocinas e prostaglandinas, sugerindo um potencial terapêutico para condições inflamatórias. Além disso, o óleo de pequi exibe um potencial considerável na saúde cardiovascular, contribuindo para a redução do colesterol e a regulação da pressão sanguínea, o que é corroborado pela sua composição em ácidos graxos monoinsaturados (Fracasso *et al.*, 2023; Miranda-Vilela *et al.*, 2009; Roll *et al.*, 2018).

A pesquisa científica também explorou o potencial terapêutico do óleo de pequi. Estudos pré-clínicos têm investigado seu papel na modulação de parâmetros metabólicos, sugerindo um potencial na redução de colesterol e triglicerídeos, e na melhora da sensibilidade à insulina, o que pode ser relevante no manejo de dislipidemias e resistência à insulina (Roll *et al.*, 2018). Devido à sua alta concentração de betacaroteno, o óleo de pequi é

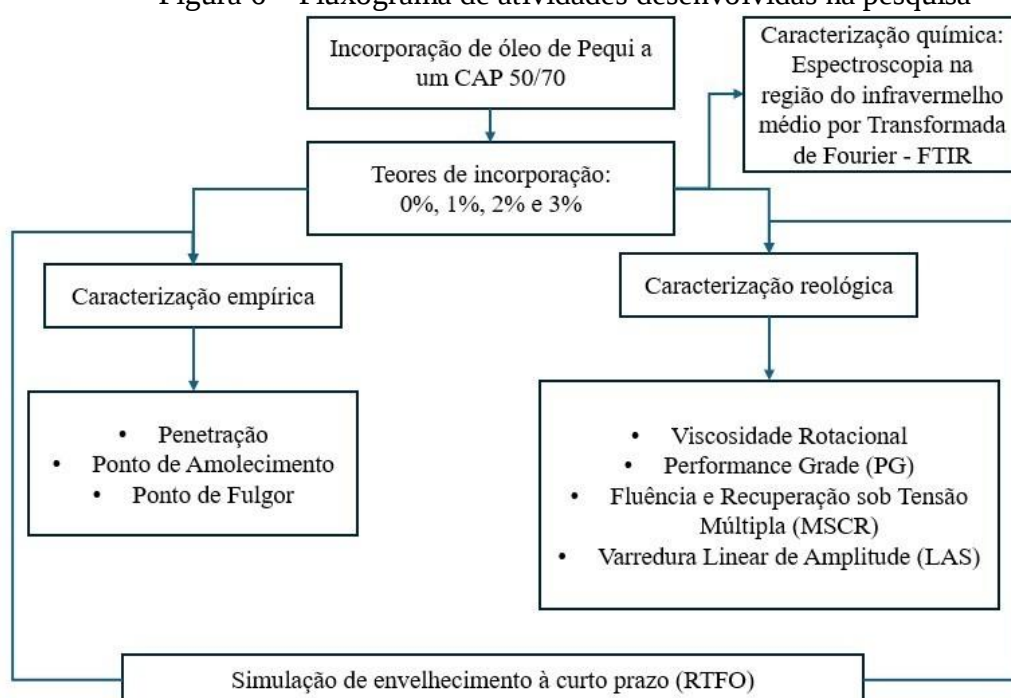
considerado um potencial suplemento para a saúde ocular, auxiliando na prevenção de doenças degenerativas da retina. Além disso, algumas pesquisas preliminares indicam uma possível atividade antimicrobiana contra certas cepas de bactérias e fungos, abrindo portas para futuras aplicações na área da saúde e conservação de alimentos (Colares *et al.*, 2021).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais, os equipamentos e os procedimentos experimentais adotados ao longo da pesquisa. As metodologias empregadas para a caracterização e avaliação dos materiais foram selecionadas com base em normas técnicas reconhecidas, incluindo aquelas publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT).

O detalhamento das etapas experimentais, bem como a sequência lógica das atividades desenvolvidas, pode ser visualizado no fluxograma representado na Figura 7. A primeira etapa compreendeu a incorporação de óleo de pequi ao ligante asfáltico CAP 50/70 nos teores de 0, 1%, 2% e 3% em massa. Em seguida, os ligantes foram submetidos a uma caracterização química pela Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier, uma caracterização empírica, por meio dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento, e a uma caracterização reológica, que envolveu ensaios de viscosidade rotacional, determinação do Performance Grade (PG), ensaio de fluência e recuperação sob tensão múltipla (MSCR) e varredura linear de amplitude (LAS). Após a caracterização inicial, foi realizada a simulação de envelhecimento a curto prazo por meio do procedimento RTFO (Rolling Thin Film Oven), com o intuito de avaliar o comportamento dos ligantes modificados após o processo de envelhecimento térmico.

Figura 6 – Fluxograma de atividades desenvolvidas na pesquisa



3.1 MATERIAIS

3.1.1 Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi CAP 50/70 fornecido pela Construtora Rocha Cavalcante LTDA, com sede localizada em Campina Grande – PB. A caracterização física deste é apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados obtidos na caracterização do CAP 50/70 e suas especificações

Propriedade	Resultado	Especificação	Norma
Penetração (dmm)	51	50-70	ABNT NBR 6576
Ponto de Amolecimento (°C)	46	> 46	ABNT NBR 6560
Viscosidade Rotacional a 135°C (cP)	402	> 274	ABNT NBR 15184
Viscosidade Rotacional a 150°C (cP)	204	> 112	
Viscosidade Rotacional a 177°C (cP)	75	57 – 285	

3.1.2 Óleo de Pequi

O óleo de Pequi, produzido pela empresa Aroma D'Minas, foi adquirido em comércio digital.

Figura 7 – Óleo de pequi utilizado na pesquisa



Fonte: O autor.

Na pesquisa de Brock *et al.* (2007) são apresentadas as massas específicas e viscosidade para diferentes óleos comumente produzidos no Brasil (Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente).

Tabela 3 – Massas específicas de alguns tipos de óleos

	Óleo						
	Soja	Milho	Arroz	Girassol	Algodão	Oliva	Canola
$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$	0,883	0,875	0,877	0,877	0,875	0,879	0,878
μ	0,004	0,003	0,002	0,004	0,002	0,003	0,002

Tabela 4 – Viscosidades de alguns tipos de óleos

Temperatura (°C)	Viscosidade (mPa·s)						
	Soja	Milho	Girassol	Arroz	Algodão	Oliva	Canola
20	59,0	67,6	58,3	73,8	67,7	79,7	73,1
30	41,2	47,4	41,3	50,5	47,3	55,4	50,5
40	29,5	32,3	29,1	34,3	33,4	37,8	35,6
50	22,3	24,8	21,3	24,5	24,6	26,2	25,2
60	16,7	18,5	16,4	19,2	18,0	21,4	19,1
70	12,6	14,0	12,6	14,2	14,0	14,9	14,5

O óleo de pequi utilizado na pesquisa possui a massa específica, viscosidade e teor de voláteis apresentados na Tabela 5. Verifica-se que o óleo de Pequi apresenta massa específica na mesma ordem de grandeza das massas específicas dos demais óleos, entretanto ele é um pouco mais viscoso que os óleos estudados por Brock *et al.* (2007). A Figura 9 apresenta o óleo após a perda de voláteis sem constatação de alterações de sua coloração.

Tabela 5 – Propriedades do óleo de pequi utilizado nesta pesquisa

Propriedade	Resultado obtido
Massa específica (g/cm ³)	0,887
Viscosidade a 25°C (cP)	62,5
Viscosidade a 70 °C (cP)	27,5
Viscosidade a 140 °C (cP)	22,5
Teor de voláteis (%)	0,27

Figura 8 – Óleo de pequi após ensaio para determinação do teor de voláteis



Incorporação dos teores de óleo de Pequi

A incorporação de teores de óleo de Pequi no ligante asfáltico ocorreu da seguinte maneira: O ligante virgem foi inicialmente aquecido a uma temperatura de 135°C. Adicionou-se o óleo em teores de 1%; 2% e 3% e a mistura foi agitada em 410 rotações por minuto (rpm), por 20 minutos, com adição lenta e fracionada do material durante os primeiros 5 minutos. Os componentes foram misturados com agitação frequente, tomando-se cuidado para não exceder a temperatura e o tempo de reação. A Figura 10 ilustra o equipamento utilizado para homogeneização do ligante asfáltico com adição do óleo de pequi.

Figura 9 – Agitador mecânico por cisalhamento



3.2 MÉTODOS

3.2.1 Espectroscopia na região do infravermelho médio por Transformada de Fourier - FTIR

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) é uma técnica analítica que se baseia na absorção de radiação eletromagnética na região do infravermelho médio (4000 a 400 cm^{-1}). Esta técnica permite analisar os diferentes tipos de ligações e funções químicas nas moléculas contidas nas amostras, em especial moléculas orgânicas, apresentando picos relacionados a vibrações (estiramentos e deformações). É utilizada na análise do ligante asfáltico para determinar níveis de oxidação, bem como determinar de maneira qualitativa e/ou semi-quantitativa a presença de aditivos orgânicos.

3.2.2 Caracterização do ligante asfáltico

3.2.1.1 Propriedades reológicas empíricas

A avaliação da qualidade dos ligantes asfálticos empregados nesta pesquisa foi conduzida por meio de ensaios empíricos, conforme estabelecido pelas normativas da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), entidade responsável pela regulação da produção e distribuição desses materiais no território nacional.

Os procedimentos de ensaio, os parâmetros de especificação e as respectivas normas técnicas, tanto nacionais quanto internacionais, adotadas para a caracterização dos ligantes, assim como os resultados obtidos para o cimento asfáltico de petróleo (CAP) virgem utilizado no estudo, encontram-se sistematizados no Tabela 6.

Tabela 6 – Especificações dos Cimentos Asfálticos de Petróleo (CAP) brasileiros classificados por Penetração

Características	Unidades	CAP 50/70	Caracterização do CAP 50/70 desta pesquisa	Métodos	
				ABNT	ASTM
Penetração (100g, 5s, 25°C)	0,1 mm	50 a 70	55,0	NBR 6576	D 5
Ponto de Amolecimento, mín	°C	46	50,5	NBR 6560	D 36
Viscosidade Rotacional	cP	-	-	NBR 15184	D4402
a 135°C, SP 21, 20 rpm, mín		274	443,12		
a 150°C, SP 21, mín		112	219,64		
a 177°C, SP 21		57 a 285	79,73		
Índice de Suscetibilidade Térmica (IST)	-	(-1,5) a (+0,7)	-1,0	-	-
Ponto de Fulgor, mín	°C	235	247	NBR 11341	D 92
Efeito do calor e do ar (RTFOT) a 163°C, 85 min; Variação em massa, máx	% massa	0,5	0,2	D 2872	
Aumento do ponto de amolecimento, máx	°C	8	5	NBR 6560	D 36
Penetração retida, mín	%	55	63%	NBR 6576	D 5

Fonte: adaptado de DNIT 095/2006-ES

Ensaio de penetração

O ensaio de penetração foi utilizado para determinar a consistência do ligante asfáltico em estado semissólido, sendo regido pela norma DNIT-ME 155/2010. A metodologia consistiu em medir, em décimos de milímetro, a profundidade atingida por uma agulha padronizada ao penetrar o material durante cinco segundos, sob carga total de 100 g, à temperatura de 25 °C. O ensaio foi realizado com auxílio de um penetrômetro, utilizando amostras devidamente acondicionadas e resfriadas sob condições controladas de temperatura e tempo, de forma que sua altura seja, no mínimo, 120% da penetração esperada. Após ajuste preciso da agulha sobre a superfície do ligante, sem exercer pressão, a penetração foi realizada e registrada. Foram efetuadas pelo menos três determinações em pontos distintos da amostra, garantindo distância mínima de 10 mm entre si e das bordas do recipiente. A rigorosa

preparação das amostras, bem como o controle térmico do banho d'água ($\pm 0,1$ °C), foram fundamentais para assegurar a confiabilidade dos resultados.

Ponto de amolecimento

O ensaio de ponto de amolecimento visa determinar a temperatura na qual o ligante asfáltico atinge consistência tal que permite a movimentação de uma esfera metálica através do material até tocar uma base metálica inferior. De acordo com a norma DNIT-ME 131/2010, o ensaio foi realizado vertendo as amostras em anéis padronizados, com leve excesso acima da borda, resfriada ao ar por 30 minutos e, em seguida, nivelada com uma espátula aquecida. Após a limpeza dos anéis, estes foram submetidos a um banho térmico a (5 ± 1) °C por 15 minutos. Colocou-se então as esferas sobre o ligante e iniciou-se o aquecimento à taxa de $(5 \pm 0,5)$ °C por minuto. A temperatura em que a esfera atingiu a placa inferior foi registrada como o ponto de amolecimento. O ensaio foi realizado em duplicata, devendo ser repetido caso a diferença entre os valores obtidos ultrapasse 1 °C.

O índice de Susceptibilidade Térmica (IST), proposto por Pfeiffer e Van Doormaal, em 1936, foi calculado a partir da Equação 5. Botaro *et al.* (2006) e Marinho Filho (2020) comentam que ligantes asfálticos que possuem IST baixos, ou seja, pouco susceptíveis, tornam-se duros e quebradiços sob baixas temperaturas enquanto aqueles que apresentam IST baixos, ou seja, muito susceptíveis, apresentam alteração de sua consistência sob efeito de pequenas variações de temperatura.

$$IST = \frac{500 \times \text{LOG}(\text{Penetração}) + 20 \times (\text{Temperatura do Ponto de amolecimento}) - 1951}{120 - 50 \times \text{LOG}(\text{Penetração} + \text{Temperatura de Ponto de amolecimento})} \quad \text{Equação 5}$$

3.2.2.2 Propriedades reológicas fundamentais

Além da caracterização empírica, procedeu-se à caracterização reológica dos ligantes asfálticos por meio de ensaios realizados com reômetro de cisalhamento dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer* – DSR), modelo DHR-1, da fabricante *TA Instruments*, pertencente ao Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Esse equipamento possibilita a análise do comportamento reológico dos ligantes com base em critérios de desempenho, contribuindo, assim, para a previsão da durabilidade e da segurança das estruturas viárias pavimentadas com tais materiais.

A caracterização foi conduzida segundo os protocolos estabelecidos pela metodologia SUPERPAVE, abrangendo tanto os ligantes virgens, provenientes diretamente da refinaria, quanto as misturas com adição dos óleos desenvolvidas ao longo desta pesquisa. Após a

formulação, os ligantes foram submetidos a procedimentos específicos de envelhecimento propostos no presente estudo, sendo então avaliados quanto à Viscosidade Dinâmica, Grau de Desempenho (*Performance Grade* – PG), Fluência e Recuperação sob Tensões Múltiplas (*Multiple Stress Creep and Recovery* – MSCR), resistência à fadiga por meio do ensaio de Varredura de Amplitude Linear (*Linear Amplitude Sweep* – LAS), além da elaboração das Curvas Mestra e Black.

No Quadro 2 estão descritos os ensaios reológicos executados, acompanhados das respectivas normas técnicas que regem os métodos de ensaio adotados.

Quadro 2 – Ensaos reológicos desenvolvidos nos ligantes da pesquisa

Ensaio reológicos	Norma
Viscosidade Dinâmica em Viscosímetro Brookfield	ASTM D 2196-18 ASTM D4402/D4402M-15 AASHTO T 316
Grau de Desempenho (PG)	ASSHTO T 315-2016 AASHTO M 320 ASTM D 7643-16
Fluência e Recuperação de Ligantes Asfálticos Determinados sob Tensão Múltipla (MSCR)	AASHTO M 332 AASHTO T 350 DNIT ME 423/2020
Varredura Linear de Amplitude (LAS)	AASHTO T 391-20 DNIT ME 439/2022
Curva Mestra	ASSHTO T 315-2016
Curva Black	ASSHTO T 315-2016

Viscosidade rotacional

A determinação da viscosidade é uma etapa fundamental na caracterização dos ligantes asfálticos, sejam eles convencionais ou modificados, uma vez que fornece informações cruciais para o seu processamento, aplicação e desempenho durante as fases de mistura e execução dos serviços de pavimentação. Esse parâmetro está diretamente associado ao comportamento do material em altas temperaturas, sendo, portanto, essencial para garantir a trabalhabilidade e a qualidade da mistura asfáltica.

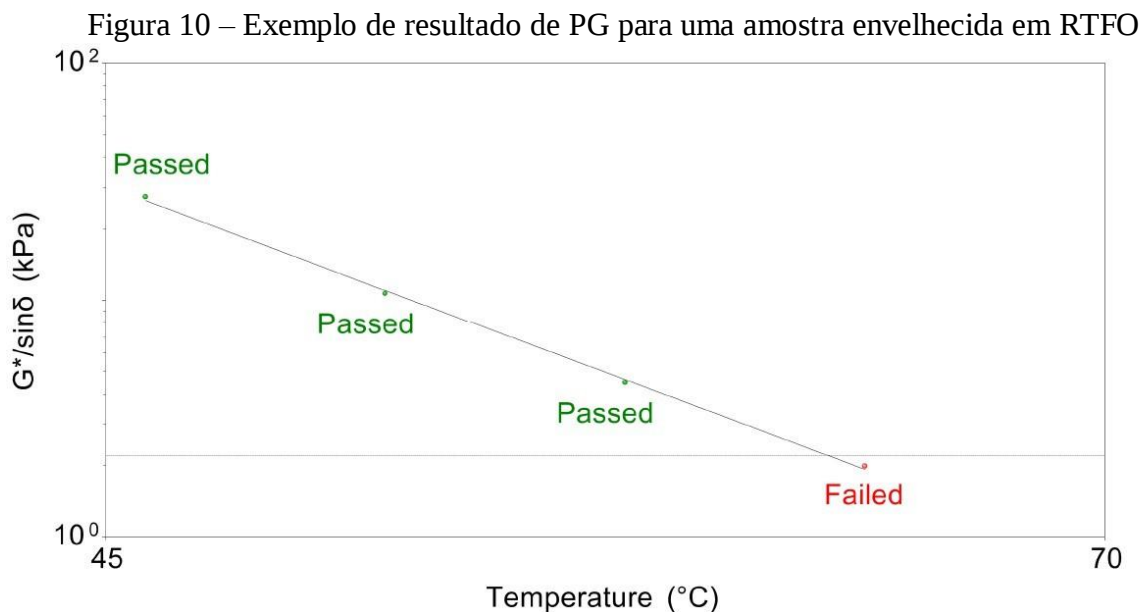
Para a realização desse ensaio foi utilizado um viscosímetro rotacional da marca Brookfield, modelo DVII+, acoplado ao sistema de controle de temperatura THERMOSEL, o qual permite a medição precisa da viscosidade dinâmica dos ligantes sob condições térmicas controladas. O procedimento seguiu os preceitos estabelecidos pela norma ABNT NBR 15184:2007, com determinações realizadas nas temperaturas de 135 °C, 150 °C e 177 °C, sob velocidades de rotação de 20, 50 e 100 rpm, respectivamente.

Performance Grade (PG)

A especificação dos ligantes asfálticos pelo sistema SUPERPAVE baseia-se na rigidez do material, tanto em seu estado original quanto após envelhecimento, sendo avaliada por meio de propriedades viscoelásticas que variam conforme a temperatura e o tempo de carregamento aplicados (McGennis *et al.*, 1994). Essa abordagem busca representar com maior precisão as condições reais a que os ligantes estarão submetidos durante a vida útil do pavimento.

Com base nesses critérios, os ligantes são classificados por meio do Grau de Desempenho (PG – *Performance Grade*), o qual está diretamente relacionado às temperaturas extremas de campo. Por exemplo, na designação PG 64-22, o primeiro número, 64, refere-se à temperatura máxima em que o ligante mantém desempenho adequado, sendo denominado "grau de alta temperatura". Já o segundo número, -22, corresponde à temperatura mínima em que o ligante conserva suas propriedades físicas, sendo chamado de "grau de baixa temperatura". Dessa forma, a classificação PG expressa a faixa de temperatura na qual o ligante pode atuar satisfatoriamente sem comprometer o desempenho do revestimento asfáltico.

O ensaio foi realizado a partir da inserção de amostras de ligante asfáltico com 25mm de diâmetro e 1mm de espessura em um reômetro de cisalhamento dinâmico antes e após o procedimento de simulação de envelhecimento à curto prazo (RTFO). A rotina de ensaio é programada para que a amostra seja testada em temperaturas que crescem de maneira escalonada a cada 6°C. Dados reológicos como módulo de cisalhamento dinâmico e ângulo de fase são calculados e fornecidos pelo software Trios – TA Instruments. Para amostras de ligante antes do envelhecimento o ensaio deve ser conduzido sob deformação controlada de 12% e a temperatura de falha é aquela em que o ligante supera o valor do parâmetro $G^*/\sin\delta$ em 1kPa. Enquanto para amostras envelhecidas, a deformação é de 10% e $G^*/\sin\delta$ deve superar o valor de 2,2 kPa, seguindo as recomendações de DNIT – ME 448/2024. Os resultados podem ser apresentados nos valores de temperatura em rampa a cada 6°C (eg. 64°C, 70°C, 76°C etc.) ou na temperatura denominada de True Grade, em que seria a temperatura exata na qual o ligante falhou, calculada a partir curva obtida da dispersão de pontos de $G^*/\sin\delta$, conforme apresentado em Figura 11.



Curva Mestra

A curva mestra representa uma propriedade reológica do ligante asfáltico em função da frequência ou do tempo de aplicação da carga, descrevendo seu comportamento para uma temperatura única ao longo de um amplo espectro de tempos ou frequências de carregamento. Nesse processo, os efeitos da temperatura e da frequência são dissociados por meio do deslocamento horizontal das curvas em função da temperatura, possibilitando a construção da curva mestra. Esse procedimento parte do pressuposto de que a temperatura e o tempo ou frequência de aplicação de carga exercem efeitos equivalentes sobre as propriedades reológicas do material (Bechara *et al.*, 2008).

O ensaio foi conduzido entre 5 °C e 65 °C, variando-se a temperaturas em escaladas de 10°C, com varreduras de frequência variando de 0,01 a 25 Hz. São utilizadas geometrias com diâmetros de 8 mm, até 45°C e 25 mm, até 65°C. As taxas de tensão ou deformação de cisalhamento adotadas devem ser compatíveis com a viscosidade do ligante e respeitar os limites da região LVE.

Fluência e recuperação de ligantes asfálticos determinados sob tensões múltiplas (MSCR)

O ensaio de Fluência e Recuperação sob Tensão Múltipla (MSCR) foi conduzido conforme os procedimentos estabelecidos pela norma AASHTO T350 e, no contexto nacional, de acordo com a especificação DNIT ME 423/2020. As amostras foram previamente submetidas ao processo de envelhecimento de curto prazo por meio do método RTFOT

(*Rolling Thin Film Oven Test*) e, posteriormente, ensaiadas à temperatura de 64 °C, compatível com a faixa de desempenho térmico dos ligantes avaliados.

Durante a execução, o ensaio foi conduzido por meio de ciclos alternados de carregamento e relaxamento, utilizando duas condições distintas de aplicação de tensão: inicialmente com 0,1 kPa e, na sequência, com 3,2 kPa. Para cada ciclo, foram registradas as deformações permanentes e elásticas dos ligantes. A compliância não recuperável foi determinada a partir da razão entre a deformação residual e a tensão aplicada. Já a percentual de recuperação elástica foi calculada com base na média da deformação recuperada total dividida pelo número de ciclos realizados.

Foram avaliadas três amostras distintas, sendo os resultados expressos por meio dos valores médios obtidos, acompanhados do desvio padrão amostral, permitindo assim uma análise estatística da reprodutibilidade e consistência dos dados experimentais.

Varredura linear de amplitude (LAS)

A Varredura Linear de Amplitude (LAS) é um ensaio que avalia a resistência dos ligantes asfálticos à fadiga por meio da aplicação de deformações oscilatórias crescentes em frequência constante. O procedimento é realizado conforme as normas DNIT ME 439/2022 no Brasil e AASHTO T391-20 internacionalmente, que estabelecem os parâmetros e critérios para execução e análise do teste. O LAS fornece informações importantes sobre a durabilidade dos ligantes frente a carregamentos repetidos, auxiliando na seleção de materiais com melhor desempenho em pavimentos.

O ensaio foi conduzido com amostras envelhecidas por meio do procedimento RTFO e com 8 mm de diâmetro por 2 mm de espessura. Em seguida, submetida a uma varredura de frequência à 19°C com variações de 0,2 Hz; 0,4 Hz; 0,6 Hz; 0,8 Hz; 1,0 Hz; 2,0 Hz; 4,0 Hz; 6,0 Hz; 8,0 Hz; 10 Hz; 20 Hz e 30 Hz, registrando os valores de G^* e δ . Posteriormente, a mesma amostra é avaliada por meio de uma varredura de amplitude de deformação na mesma temperatura, variando entre 0,1% a 30% aplicando-se um carregamento oscilatório com frequência constante de 10Hz.

Estufa de filme fino rotativo (RTFO)

O procedimento RTFO (*Rolling Thin Film Oven*), regulamentado pela norma ASTM D2872-97, tem como finalidade avaliar o envelhecimento do ligante asfáltico provocado pela oxidação e evaporação decorrentes da exposição ao calor e ao ar durante a usinagem. No ensaio, uma película fina de aproximadamente 35 gramas de material asfáltico é continuamente girada dentro de um recipiente de vidro a 163 °C durante 85 minutos, com injeção constante de ar.

Os efeitos combinados do calor e da oxidação são avaliados por meio das alterações nas propriedades físicas do ligante, comparando-se os resultados obtidos antes e após o tratamento no forno. Esse procedimento possibilita a detecção de mudanças nas características do asfalto que podem ocorrer durante o processamento a temperaturas próximas a 150 °C, refletidas principalmente nas variações de suas propriedades de consistência. Além disso, o ensaio permite determinar a perda de massa do ligante, fornecendo indicações sobre sua volatilidade e grau de oxidação

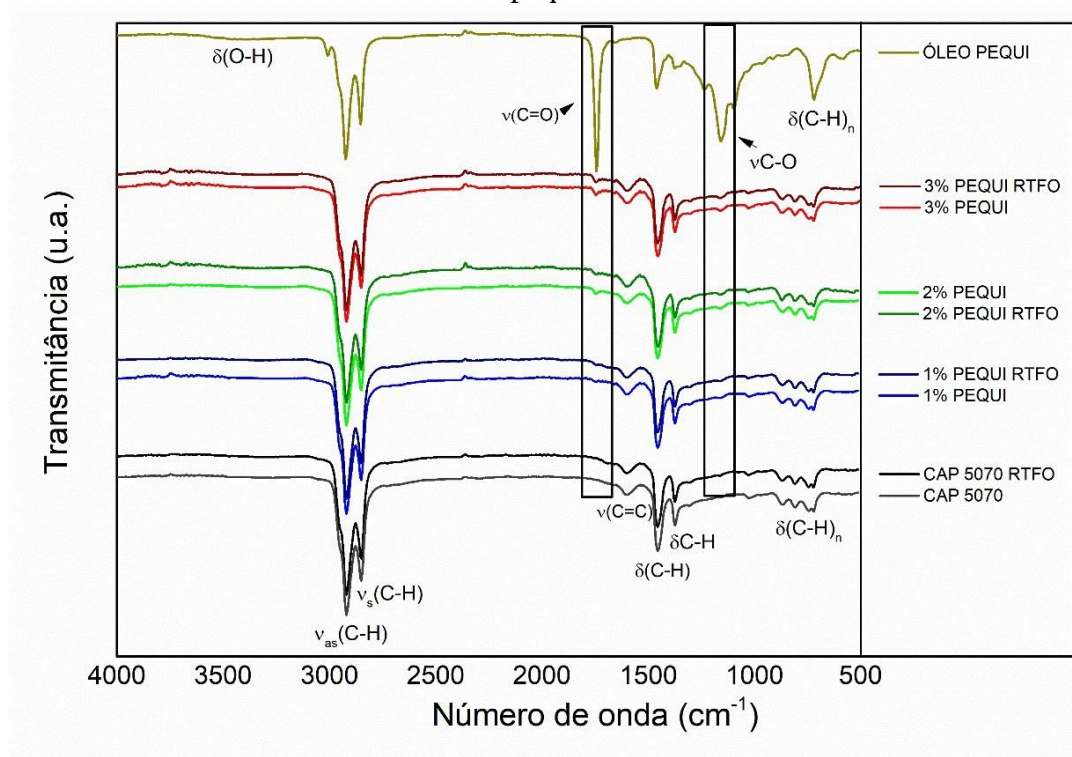
4.0 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na fase experimental desta pesquisa. Nestes encontram-se a caracterização física do ligante puro e do ligante com incorporação do óleo de pequi, antes e após o procedimento de simulação de envelhecimento à curto prazo (RTFO).

4.1 Espectroscopia na região do infravermelho médio por Transformada de Fourier - FTIR

Os ensaios de FTIR foram realizados para as amostras de ligante puro e contendo óleo de pequi nas proporções de 1%, 2% e 3%, antes e após RTFO. Os espectros obtidos para estas amostras estão contidos na Figura 12.

Figura 11 - Espectros de FTIR para as amostras de ligante asfáltico modificadas com óleo de pequi.



Os espectros obtidos revelam informações importantes quanto a composição do ligante puro e com o óleo. Para os espectros dos ligantes (antes e após RTFO), foi obtido um perfil semelhante para as amostras. Não foi encontrado algum pico com intensidade relevante para indicar um alto grau de oxidação para o tratamento por RTFO, como em regiões entre 1760 e 1700 cm^{-1} , para estiramentos de carbonilas ($\text{C}=\text{O}$) ou entre 1250 e 1050 cm^{-1} , para

estiramentos de grupos C-O. Outra região em que não foi encontrado algum sinal indicativo de funções oxigenadas foi entre 3100 e 3600 cm^{-1} , relativo à vibração em grupos OH.

Quanto a caracterização do ligante, os principais sinais indicativos da sua composição estão presentes em regiões comuns a compostos hidrocarbonetos, sendo estas caracterizadas por picos de alta intensidade, referentes a estiramentos (ou deformações axiais) para grupos alifáticos saturados entre 3000 e 2800 cm^{-1} . Nesta faixa foram encontrados picos em 2951 cm^{-1} e 2867 cm^{-1} , para estiramentos assimétrico e simétrico em grupos metila ($-\text{CH}_3$) e picos em 2919 cm^{-1} e 2850 cm^{-1} , para estiramentos assimétrico e simétrico em grupos metileno ($-\text{CH}_2-$), além de um pico em 2890 cm^{-1} para estiramento de grupos metina ($-\text{CH}-$), parcialmente obscurecido pelo 2919 cm^{-1} .

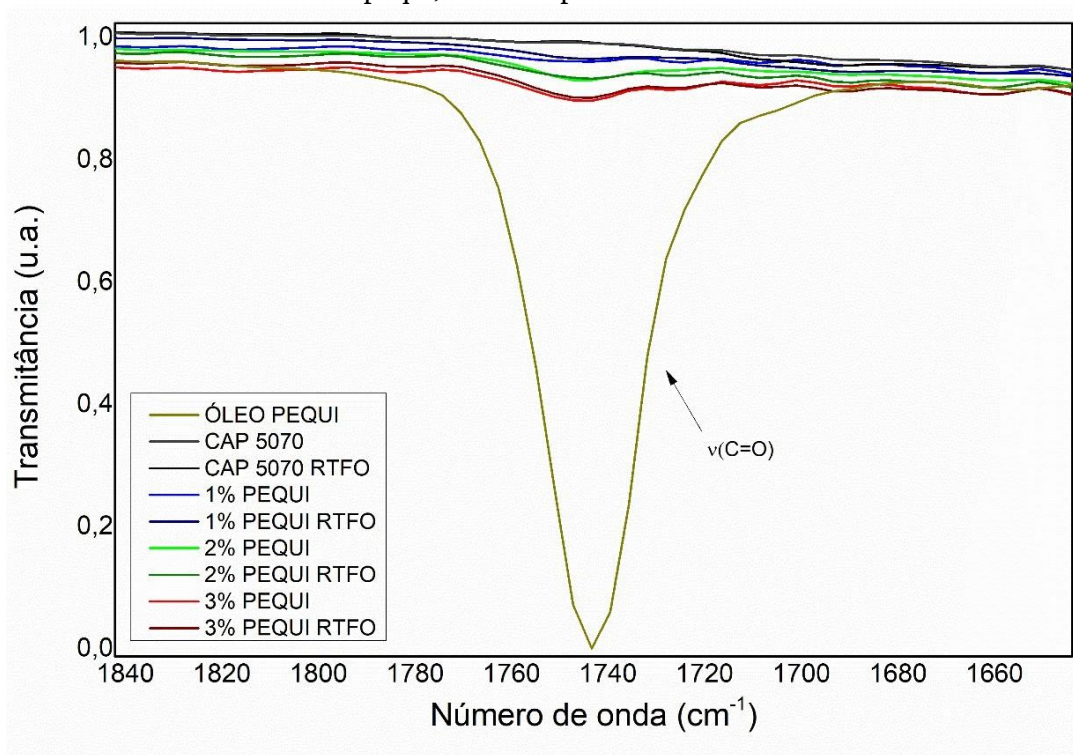
Picos com baixa intensidade foram encontrados entre 2000 e 1700 cm^{-1} , indicando bandas harmônicas para aromáticos substituídos, bem como pequenos picos para grupos carbonilas (C=O) em pequena quantidade entre 1760 e 1700 cm^{-1} . A presença de um pico em torno de 1600 cm^{-1} é indicativo de insaturações (C=C) em anéis, juntamente com picos em torno de 1475 cm^{-1} , sendo este último geralmente obscurecido pelo pico de deformação angular de grupos metileno ($-\text{CH}_2-$) em 1455 cm^{-1} . O aparecimento deste último está em conformidade com os picos deste grupo para deformação axial (2919 e 2850 cm^{-1}), enquanto que o pico em 1375 cm^{-1} , referente a deformação angular em grupos metila ($-\text{CH}_3$), está em conformidade com picos de deformação axial em 2951 e 2867 cm^{-1} . Por fim, o pico em torno de 720 cm^{-1} é referente a vibração do tipo “*rocking*” para cadeias saturadas acima de 4 carbonos, $-(\text{CH})_n-$, com $n \geq 4$, confirmando a característica orgânica do ligante com presença de grupos saturados, insaturados e aromáticos.

O espectro do óleo de pequi apresentou alguns picos semelhantes ao do ligante asfáltico em relação a ligações entre carbono e hidrogênio, que são espécies em comum entre as estruturas orgânicas. Neste espectro foi observada a presença de picos entre 2950 e 2870 cm^{-1} , relacionados a grupos metila e metileno (estiramentos assimétricos e simétricos) e em 1460 e 1375 cm^{-1} , para deformação angular destes mesmos grupos metileno e metila. O pico em 1740 cm^{-1} indica estiramento de grupos carbonila, e junto ao pico em 1162 cm^{-1} para estiramento da ligação C-O, são o indicativo da presença de grupos ésteres na amostra. O aparecimento de uma banda leve entre 3100 e 3600 cm^{-1} é indicativo de que o óleo possui baixo (porém significativo) teor de ácidos graxos, que é comum em alguns tipos de óleo vegetal, sendo essa banda com maior intensidade nas amostras com maiores quantidades de

óleo. Por fim, o pico em 719 cm^{-1} , para estiramentos do tipo *rocking*, indica que há cadeias alifáticas longas nas moléculas contidas no óleo.

Na Figura 13 está contida uma ampliação da área dos espectros, próximos ao pico em 1740 cm^{-1} . A observação deste pico é também um indicativo da presença de óleo no ligante e o aumento da intensidade deste é proporcional a quantidade de óleo. Observa-se que para os diferentes teores, o tratamento por RTFO obteve baixa diferença nas intensidades dos picos, o que indica que o óleo ainda permanece nas mesmas proporções.

Figura 12 - Espectro com faixa reduzida para as amostras de ligante puro e modificado com óleo de pequi, antes e após tratamento em RTFO.



4.2 CARACTERIZAÇÃO EMPÍRICA DOS TEORES DE LIGANTE MODIFICADO

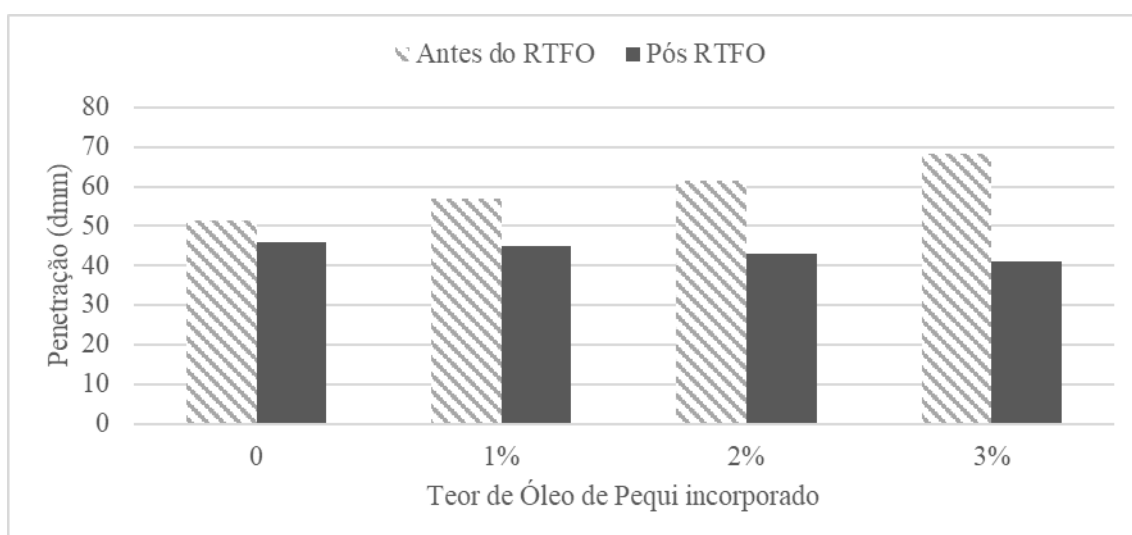
A Figura 13 mostra os resultados do ensaio de penetração, expressos em décimos de milímetro (dmm), para os diferentes teores de óleo de pequi incorporados.

Nas amostras antes da simulação de envelhecimento à curto prazo (RTFO), observou-se que a penetração aumenta progressivamente com o acréscimo do óleo de pequi, variando de aproximadamente 51 dmm (0%) para cerca de 68 dmm (3%). Esse comportamento indica que o óleo atua como agente plastificante, promovendo maior mobilidade molecular e, consequentemente, reduzindo a consistência do ligante. Para as amostras após RTFO, todas apresentaram redução nos valores de penetração, o que é esperado em função do

envelhecimento térmico e da volatilização dos constituintes mais leves. No entanto, o decréscimo percentual foi mais acentuado para os ligantes com maiores teores de óleo. Ainda assim, mesmo após o RTFO, os ligantes com 2% e 3% de óleo mantiveram penetração superior ao ligante virgem, o que sugere um efeito mitigador do envelhecimento promovido pelo óleo de pequi. A incorporação do óleo de pequi confere maior flexibilidade ao ligante, com potencial para melhorar o desempenho em baixas temperaturas. No entanto, a susceptibilidade ao envelhecimento oxidativo aumenta com o teor de óleo.

Em todos os teores, observou-se que a penetração retida foi superior a 55%, mínimo estabelecido pela especificação da ANP (2006). A amostra com 2% de óleo de pequi foi a que apresentou menor variação da penetração retida, indicando que neste caso houve maior preservação da consistência do material após a simulação do envelhecimento à curto prazo.

Figura 13 – Resultados do ensaio de penetração antes e após procedimento RTFO

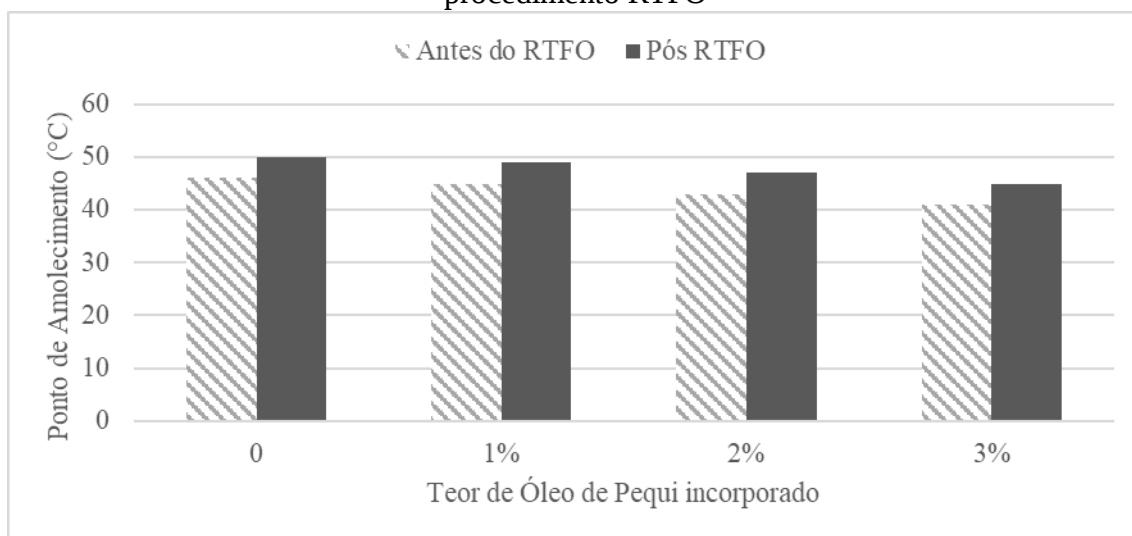


Os resultados do ponto de amolecimento para os mesmos teores de incorporação são mostrados na Figura 14. Os resultados indicam que o ponto de amolecimento diminui com o aumento do teor de óleo, passando de cerca de 46 °C (0%) para cerca de 41 °C (3%). Esse comportamento é esperado pela incorporação do óleo de pequi, que reduz a rigidez térmica do ligante.

Após a simulação de envelhecimento à curto prazo, pelo procedimento RTFO, foi observado um aumento generalizado no ponto de amolecimento em todos os teores, confirmando o aumento da rigidez induzida pelo envelhecimento térmico. Contudo, mesmo após o RTFO, os ligantes com óleo mantêm valores inferiores ao do CAP 50/70 puro,

indicando que o óleo retarda o endurecimento, mas sem anulá-lo completamente. O óleo de pequi reduz a rigidez térmica do ligante, o que pode ser vantajoso em regiões de clima mais frio. Entretanto, há uma redução da resistência ao fluxo em temperaturas elevadas, o que pode comprometer o desempenho em climas quentes se não houver compensação por outros modificadores adicionais.

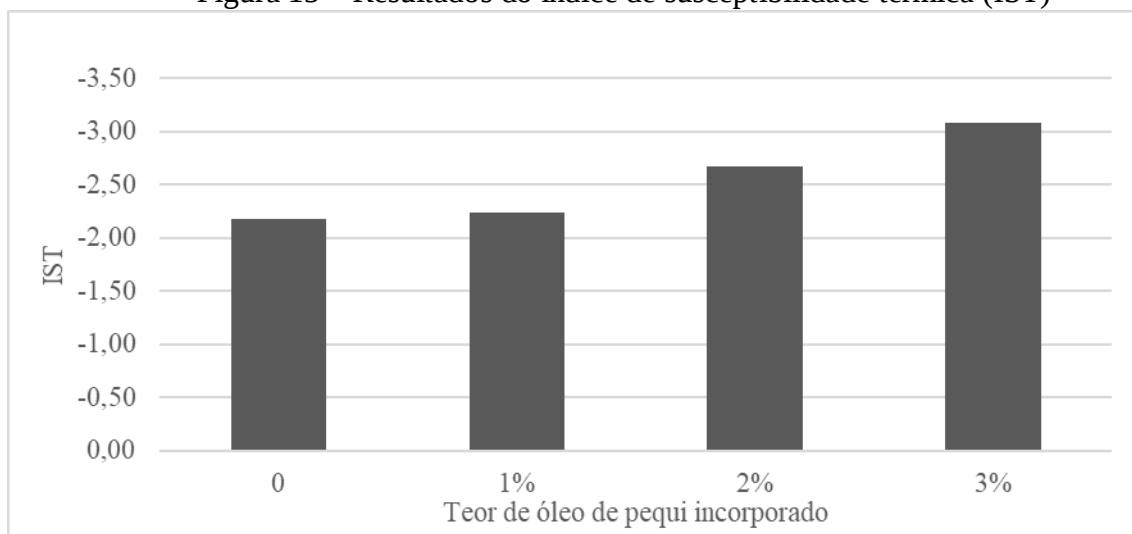
Figura 14 – Resultados do ensaio de ponto de amolecimento antes e após procedimento RTFO



Observa-se a na Figura 15 que o Índice de Suscetibilidade Térmica (IST) torna-se progressivamente mais negativo com o aumento do teor de óleo de pequi. Tal comportamento indica que a suscetibilidade térmica do ligante aumenta com a incorporação de óleo — ou seja, o ligante se torna mais sensível às variações de temperatura.

Na prática, IST mais negativo pode indicar uma redução da resistência a deformações permanentes (como trilhas de roda) em altas temperaturas, aumento da flexibilidade e melhor desempenho em baixas temperaturas, podendo mitigar trincas térmicas. O ligante puro (0%) obteve o menor valor de IST, indicando melhor estabilidade térmica comparado aos ligantes modificados.

Figura 15 – Resultados do índice de susceptibilidade térmica (IST)

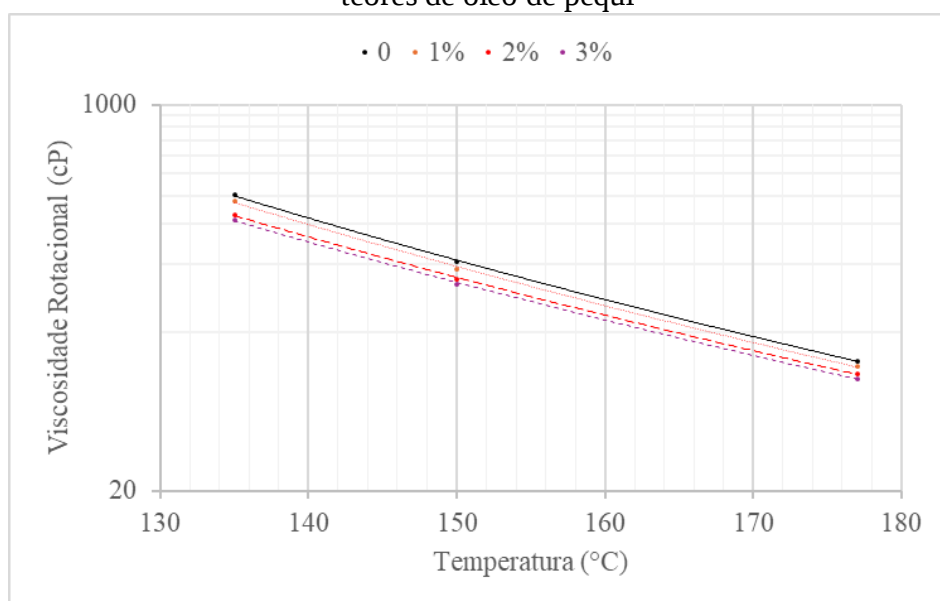


4.3 CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DOS TEORES DE LIGANTE MODIFICADO

4.3.1 Viscosidade Rotacional

A Figura 16 apresenta os resultados de viscosidade rotacional para os ligantes estudados. Os resultados de viscosidade rotacional corroboram com os valores de IST, visto que o ligante se torna mais fluido à medida que o teor de óleo aumenta. A redução da viscosidade é mais acentuada nas temperaturas de 135°C, sendo positivo do ponto de vista de trabalhabilidade, bombeamento e aplicação do asfalto.

Figura 16 – Resultados de viscosidade rotacional para o CAP 50/70 com diferentes teores de óleo de pequi



As temperaturas de usinagem e compactação calculadas para cada teor de incorporação de óleo de pequi ao ligante asfáltico são apresentadas na Tabela 7. Isto indica que teores maiores incorporados permitem obter menor consumo energético em usina. Entretanto destaca-se que a diminuição de temperatura apresentada pelo óleo de Pequi deu-se em função apenas da diminuição da viscosidade, para avaliar o efeito real da contribuição do óleo para produção de misturas mornas deve-se estudar o efeito da lubricidade.

Tabela 7 – Temperaturas de usinagem e compactação para o CAP 50/70 com diferentes teores de óleo de pequi

Teor de óleo incorporado	0%	1%	2%	3%
T _{Usinagem} (°C)	155	156	152	150
T _{Compactação} (°C)	142	144	139	137

4.3.2 Performance Grade (PG)

A Figura 17 apresenta o PG dos ligantes estudados enquanto a Figura 18 apresenta o PG estimado. Verifica-se que a adição de 1% do óleo não interfere na classificação de PG do ligante modificado, entretanto, ao adicionar 2 e 3% do óleo ocorre uma redução em 1 classe da classificação do PG. No gráfico apresentado pelo PG estimado verifica-se que a cada 1% de adição de óleo ocorre a redução em cerca de 2°C na temperatura do PG. Este fato indica que as misturas mornas fabricadas com esse óleo tendem a ser menos rígidas e mais susceptíveis a influência da temperatura que as misturas tradicionais

Figura 17 – Grau de desempenho (PG) para o CAP 50/70 com diferentes teores de óleo de pequi

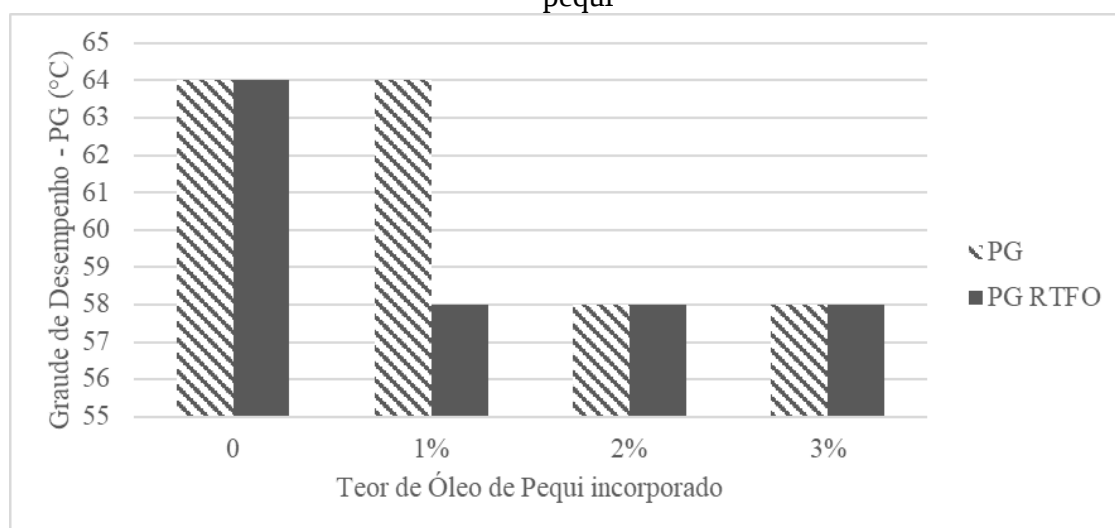
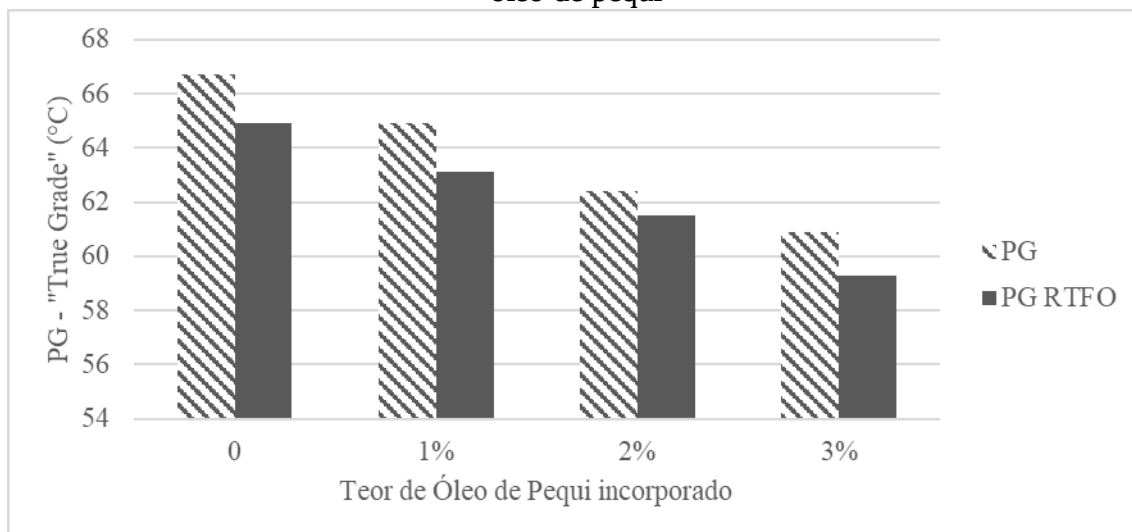


Figura 18 – Grau de desempenho verdadeiro – “True Grade” para o CAP 50/70 e teores de óleo de pequi

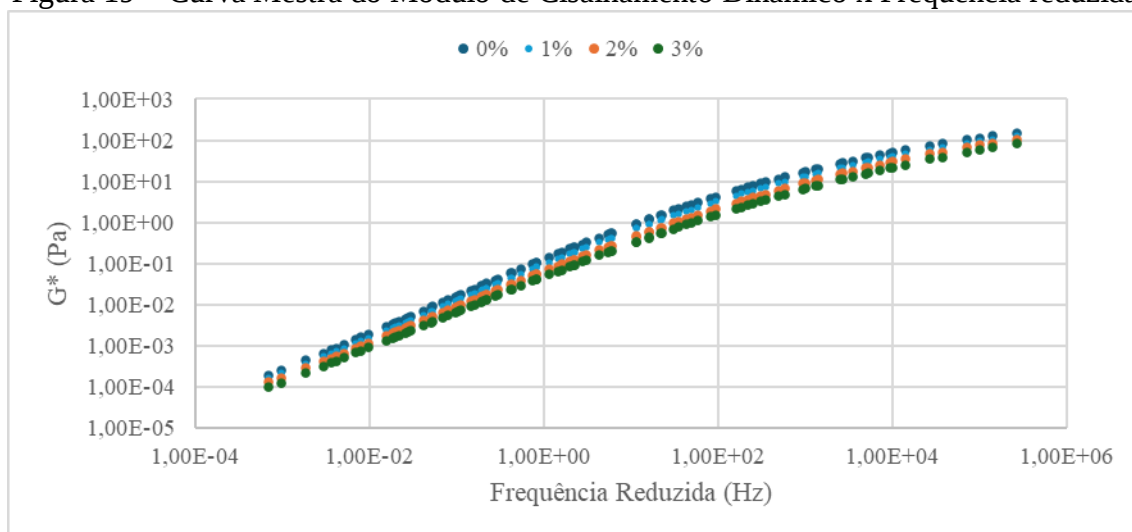


4.3.3 Curva Mestra

A Figura 19 apresenta as Curva Mestra do Módulo de Cisalhamento Dinâmico x Frequência reduzida para os ligantes estudados. Observa-se que o módulo G^* aumenta com a frequência reduzida, como esperado para materiais viscoelásticos, refletindo a maior rigidez em baixas temperaturas (altas frequências) e menor rigidez em altas temperaturas (baixas frequências).

O ligante puro apresenta os maiores valores de G^* em praticamente toda a faixa de frequência, indicando comportamento mais rígido. À medida que se aumenta o teor de óleo, principalmente 2% e 3%, os valores de G^* diminuem sistematicamente, mostrando que o óleo atua reduzindo sua rigidez em todas as escalas de frequência e, por consequência, de temperatura. Essa redução pode melhorar o desempenho em baixas temperaturas, mas também reduzir a resistência à deformação permanente em altas temperaturas.

Figura 19 – Curva Mestra do Módulo de Cisalhamento Dinâmico x Frequência reduzida

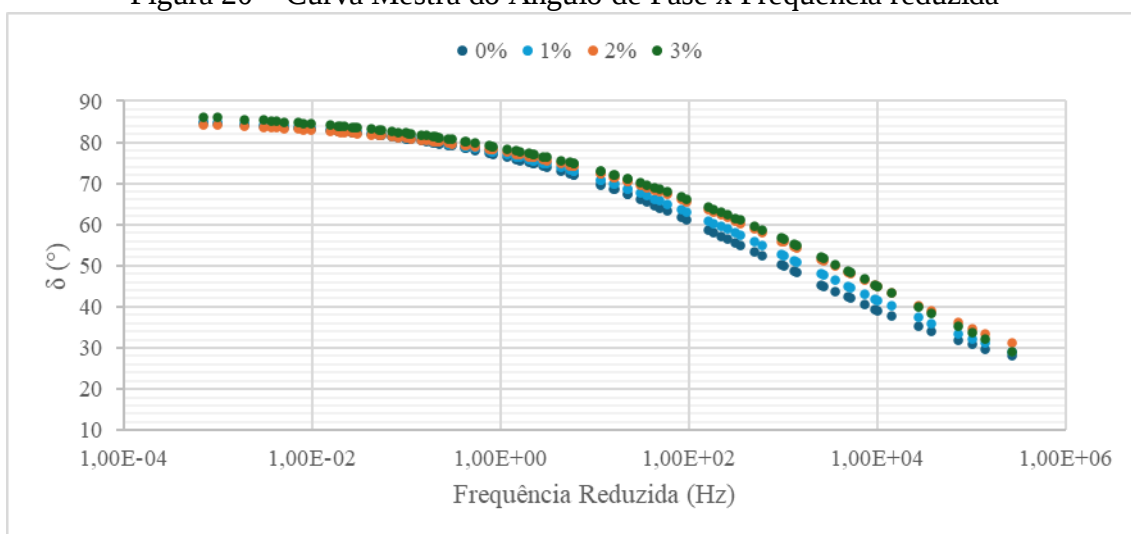


O ângulo de fase δ indica a proporção de comportamento viscoso (para δ se aproximando de 90°) e elástico (para δ se aproximando de 0°). Em baixas frequências (altas temperaturas), as curvas se sobrepõem, indicando que todos os ligantes apresentam comportamento predominantemente viscoso, apresentando δ na faixa de 85° a 90° .

O ligante puro apresentou os menores valores de δ nas altas frequências (baixas temperaturas), indicando maior elasticidade nessa condição. Com o aumento do teor de óleo, há uma tendência de aumento de δ , principalmente nas altas frequências, o que reflete diminuição do caráter elástico e maior predominância do comportamento viscoso, indo de encontro com o que é esperado para a incorporação do óleo de pequi, tornando o ligante mais suscetível ao fluxo em condições de carregamento rápido.

A incorporação de óleo de pequi ao CAP 50/70 promove alterações sistemáticas no comportamento viscoelástico do ligante, conforme evidenciado pelas curvas mestras. Os ligantes modificados apresentam redução do módulo G^* e aumento do ângulo de fase δ , especialmente em teores mais elevados, caracterizando uma diminuição da rigidez e da elasticidade. Isso pode ser indicativo de melhoria da resistência a trincas térmicas em baixas temperaturas, mas requer atenção quanto à resistência a deformação permanente, especialmente sob tráfego pesado e altas temperaturas. A Figura 20 apresenta as Curvas Mestras do Ângulo de Fase x Frequência reduzidas para os ligantes estudados.

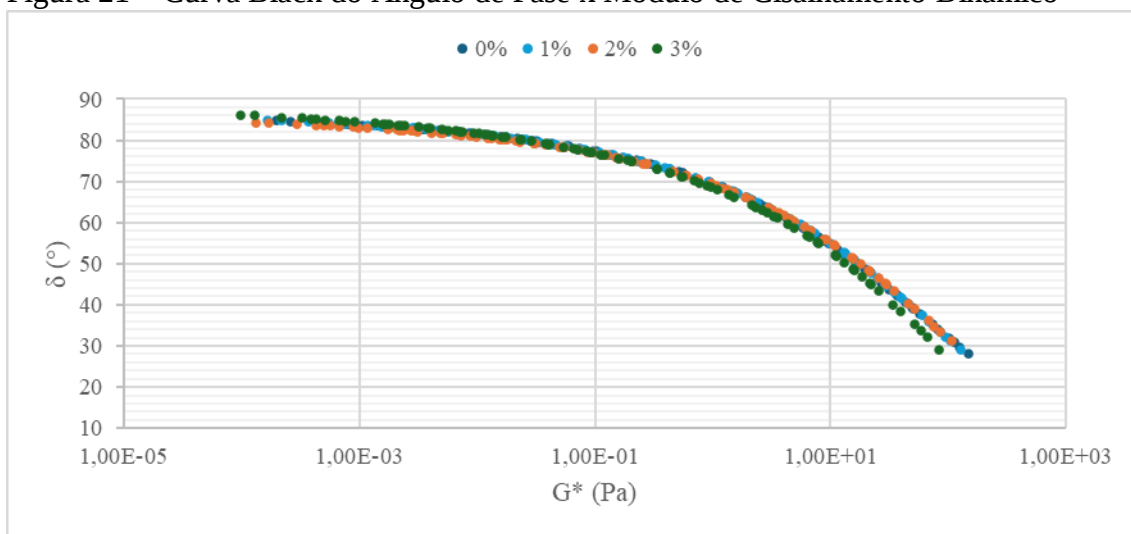
Figura 20 – Curva Mestra do Ângulo de Fase x Frequência reduzida



O gráfico da Figura 22, que apresenta $\delta \times G^*$, permite avaliar a homogeneidade da estrutura do ligante e o efeito do modificador sobre a transição viscoelástica. Observa-se uma tendência única e contínua para todos os ligantes, o que indica que a modificação com óleo de pequi não comprometeu a uniformidade do ligante, mantendo o seu caráter termorreologicamente simples.

A Figura 21 apresenta a curva Black para os ligantes estudados. De acordo com Elkashef et al. (2017), a principal vantagem das curvas black é que os valores obtidos durante o experimento são diretamente plotados, o que reduz a necessidade de modelagem numérica para ajustar ou deslocar os dados, minimizando assim possíveis erros. O autor observa que esses dados devem formar curvas suaves, evidenciando uma diminuição do ângulo de fase à medida que $|G^*|$ aumenta, até atingir uma assíntota em ângulos próximos a 90° . As curvas apresentadas na Figura 21 são suaves indicando o comportamento newtoniano do material nessa região.

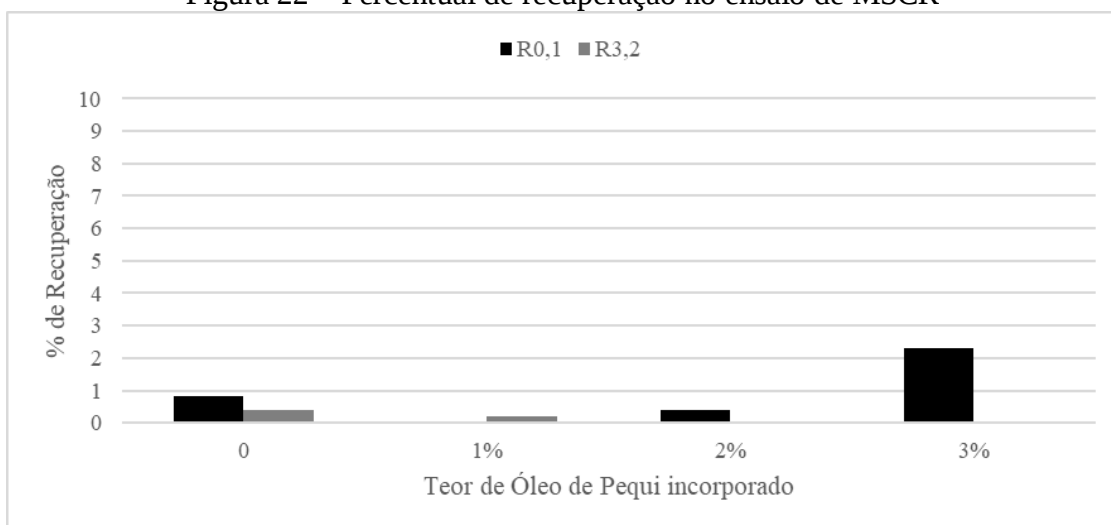
Figura 21 – Curva Black do Ângulo de Fase x Módulo de Cisalhamento Dinâmico



4.3.4 Fluência e recuperação de ligante asfáltico determinados sob tensões múltiplas (MSCR)

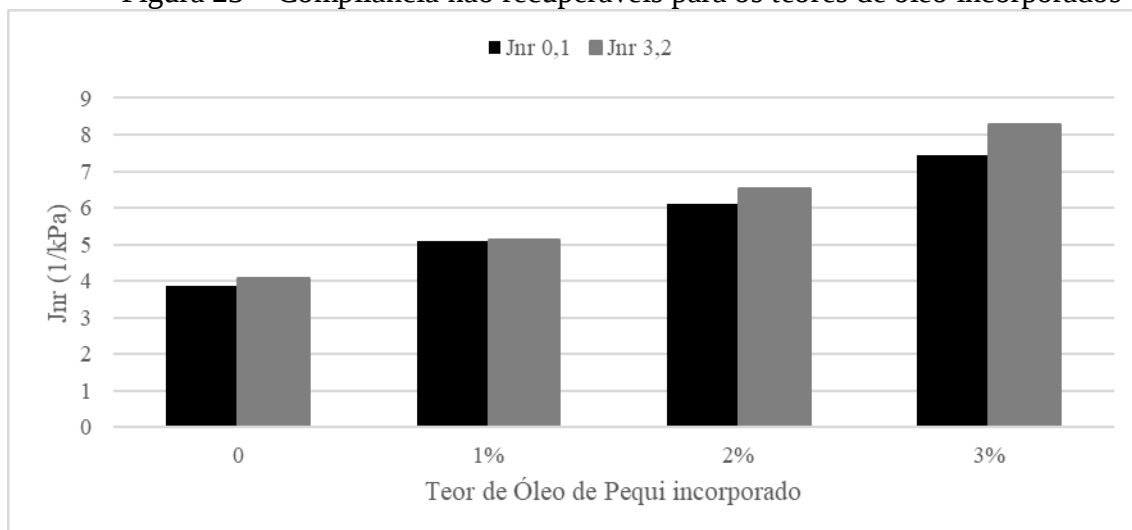
A Figura 22 apresenta o percentual de recuperação do ensaio de MSCR e a Figura 24 apresenta os valores Compliância não recuperáveis para os teores de óleo incorporados. O percentual de recuperação apresentado na Figura 22 é praticamente nula em todos os teores, indicando que o ligante não apresenta capacidade de retornar à sua forma original após a aplicação da carga, o que sinaliza um comportamento majoritariamente viscoso, típico de ligantes sem aditivos poliméricos. O ligante com 3% de óleo apresentou o maior valor de recuperação em $R_{0,1}$, cerca de 2%, possivelmente devido a alguma estruturação interna transitória, embora não tenha recuperação sob carga mais elevada.

Figura 22 – Percentual de recuperação no ensaio de MSCR



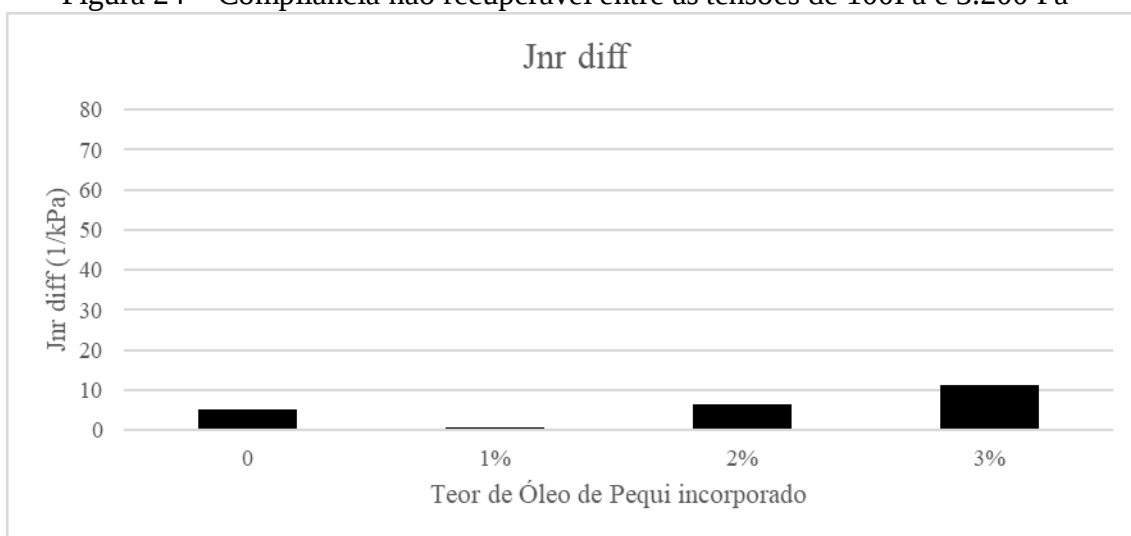
Todos os ligantes modificados apresentaram J_{nr} superior 4,00, classificando-se como inadequados para tráfego severo segundo a AASHTO M332, uma vez que quanto maior o J_{nr} , menor a resistência à deformação permanente. O aumento expressivo do J_{nr} com o teor de óleo de pequi mostra que ele reduz substancialmente a rigidez necessária para resistir à deformação permanente.

Figura 23 – Compliância não recuperáveis para os teores de óleo incorporados



A Figura 24 apresenta o J_{nr} diff para os ligantes estudados. Esse parâmetro mede a variação percentual do J_{nr} com o aumento da tensão aplicada, sendo um indicativo da linearidade do comportamento viscoelástico. O teor de 1% de óleo apresentou o menor J_{nr} diff (0,75%), o que sugere comportamento mais estável e previsível sob diferentes tensões. Já o teor de 3% apresentou J_{nr} diff acima de 10%, o que indica alta sensibilidade ao nível de carga e possível risco de instabilidade sob tráfego pesado. Os dados, portanto, corroboram com os demais resultados apresentados, principalmente da curva mestra, indicando que o óleo se dispersa bem na matriz asfáltica, mas torna-o mais suscetível aos efeitos de carregamento.

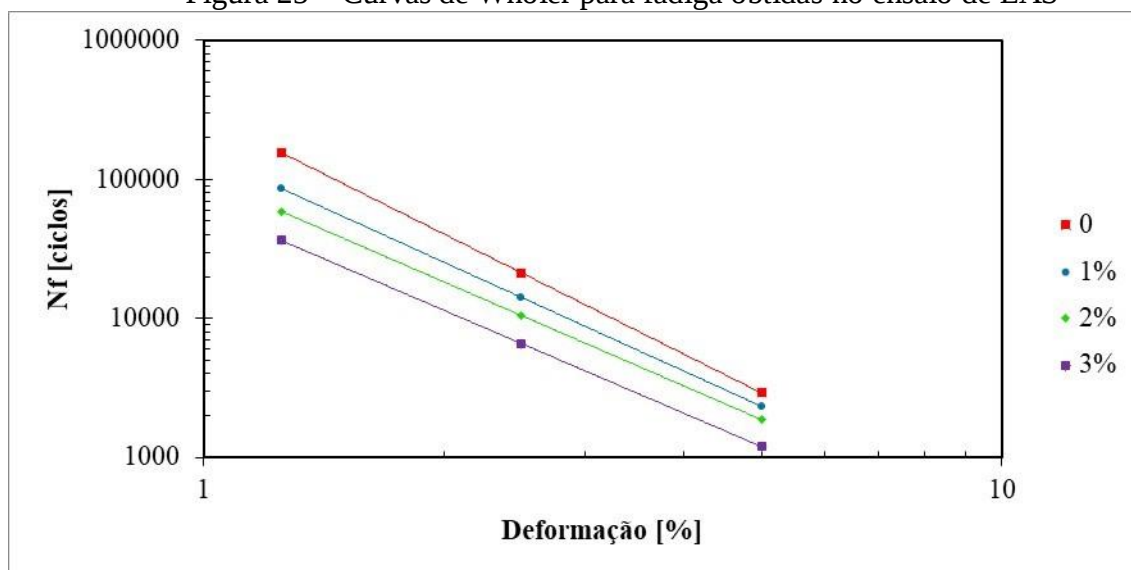
Figura 24 – Compliância não recuperável entre as tensões de 100Pa e 3.200 Pa



4.3.5 Varredura Linear de Amplitude (LAS)

A Figura 25 apresenta as Curvas de Whöler para fadiga obtidas no ensaio de LAS. O ligante puro apresenta maior número de ciclos até a falha para todas as deformações analisadas. A vida de fadiga diminui de maneira sistemática na medida em que se aumenta o teor de óleo de pequi. O ligante com 3% de óleo apresenta a menor resistência à fadiga, especialmente sob maiores deformações, indicando maior suscetibilidade à falha por fadiga. Portanto, a diminuição da rigidez comprovada em testes já apresentados associada ao efeito das cargas cíclicas durante o ensaio de fadiga, há comprometimento do seu desempenho à fadiga.

Figura 25 – Curvas de Whöler para fadiga obtidas no ensaio de LAS

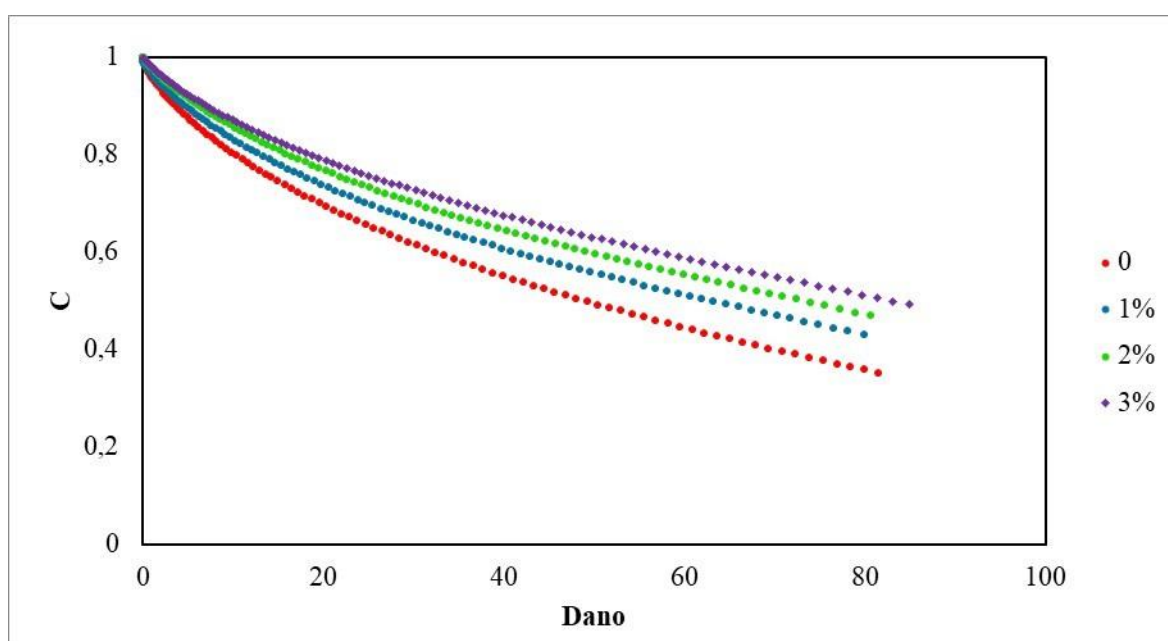


A Figura 26 apresenta a Curva de Integridade versus Dano obtidas no ensaio de LA Spara os ligantes estudados. O parâmetro C representa a parcela de integridade do ligante

remanescente durante o acúmulo de dano ao longo do ensaio de LAS. A amostra de ligante puro apresenta a maior taxa de degradação inicial, com queda mais rápida dos valores de C conforme o dano se acumula. Na medida em que são aumentados os teores de óleo incorporado, é verificado o empilhamento das curvas, sendo o teor de 3% aquele que apresentou maior integridade frente ao acúmulo de dano. Isso indica que, embora esse ligante tenha demonstrado menor vida de fadiga no gráfico $N_f \times$ Deformação, ele apresenta maior resistência à progressão do dano uma vez iniciado, o que pode ser indicativo de comportamento mais resiliente em regime de dano acumulado.

Esse comportamento sugere que, apesar da redução da vida de fadiga (N_f) observada anteriormente, os ligantes com maior teor de óleo apresentam maior tenacidade e resistência à progressão da falha, o que pode ser vantajoso em aplicações com tensões de baixa a média intensidade, onde o dano se acumula de forma progressiva ao longo do tempo.

Figura 26 – Curva de Integridade versus Dano obtidas no ensaio de LAS

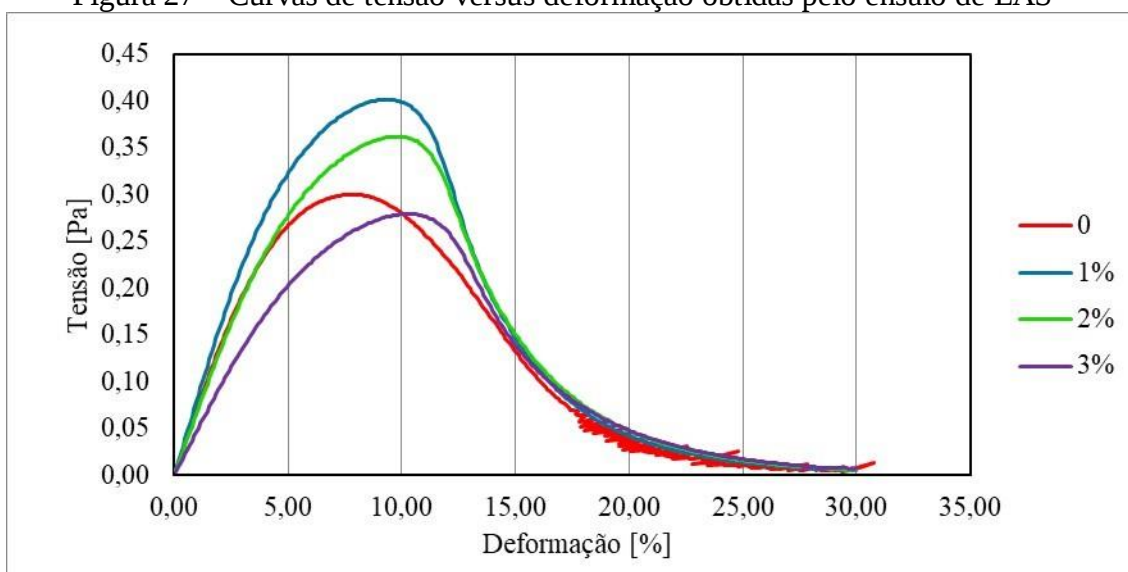


A Figura 27 apresenta as Curvas de tensão versus deformação obtidas pelo ensaio de LAS. O gráfico mostra que todos os ligantes atingem o pico de tensão entre 8 e 10% de deformação, indicando que o início da falha ocorre em deformações relativamente elevadas. O ligante com 1% de óleo apresenta o maior valor de pico de tensão, indicando melhor resistência mecânica inicial à deformação, em contrapartida, o teor de 3% apresentou a menor tensão de pico entre as amostras.

Após o pico de tensão, todos os ligantes mostram queda acentuada na tensão com o aumento da deformação, caracterizando uma degradação progressiva do ligante. Os teores que possuem menores quantidades de óleo (0% e 1%) mantêm valores ligeiramente superiores de tensão residual em relação aos teores mais altos, o que reflete maior capacidade de resistência residual.

A sequência de desempenho mostra que a adição de óleo até certo limite (1–2%) pode melhorar a resistência inicial, mas teores elevados reduzem a capacidade de suportar aplicação de tensão.

Figura 27 – Curvas de tensão versus deformação obtidas pelo ensaio de LAS

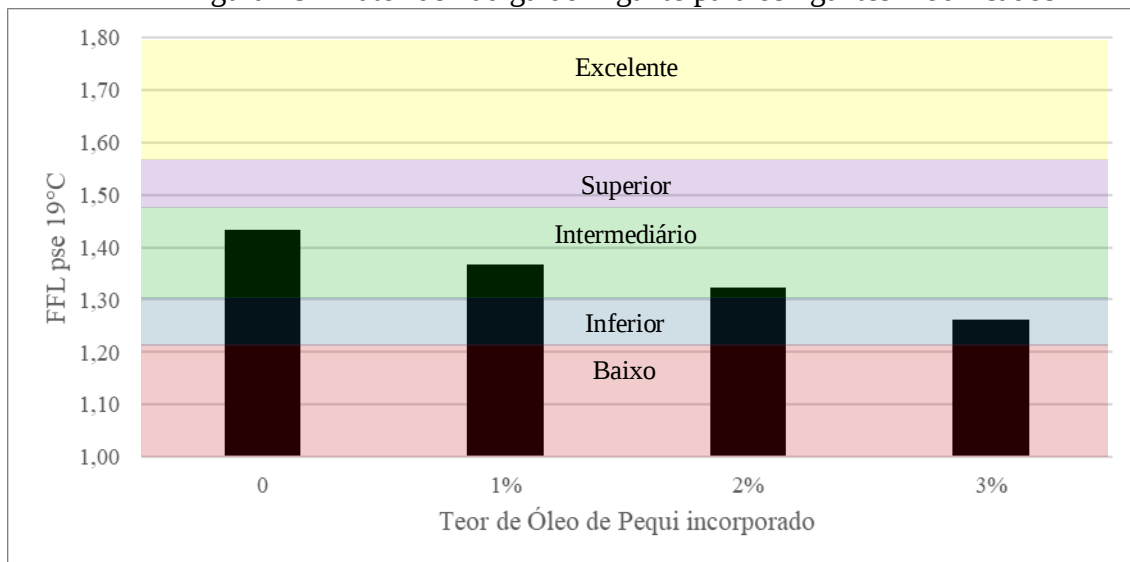


A Figura 28 apresenta a classificação do parâmetro de Fator de Fadiga do Ligante (FFL). O FFL é calculado a partir da pseudoenergia de deformação e apresentou tendência de redução à medida que aumentaram os teores de óleo de pequi incorporado. Essa redução é indicativa de uma menor resistência à fadiga dos ligantes modificados, conforme evidenciado pela transição nas classificações de desempenho: o ligante puro apresentou valor de FFL classificado como “Intermediário”, enquanto as amostras com 1% e 2% de óleo permaneceram na mesma faixa, porém com índices menores. Já as amostras com teor de 3% transicionou para a classe “Inferior”.

Essa tendência sugere que, embora o óleo de pequi possa conferir benefícios à trabalhabilidade, ele reduz a capacidade do ligante de dissipar energia acumulada sob carregamentos repetidos, principal situação imposta pelo tráfego de veículos em misturas asfálticas. Assim, a incorporação do óleo, especialmente em teores mais elevados, deve ser

cuidadosamente dosada para que não prejudique o desempenho à fadiga do ligante modificado.

Figura 28 – Fator de Fadiga do Ligante para os ligantes modificados



4.3.6 Comparação com outros estudos que utilizaram óleos na modificação de ligantes asfálticos

Esta seção apresenta a comparação das propriedades empíricas e reológicas obtidas com os ligantes modificados com óleo de Pequi com os ligantes modificados com óleo de Canola (Guerra, 2019), Algodão (Dantas, 2018), Soja (Portugal, 2016), Milho (Portugal, 2016), Girassol (Silva, 2016) e Moringa (Silva, 2016).

As Figuras 29 e 30 apresentam o comparativo dos resultados dos ligantes modificados com o óleo de Pequi em comparação com ligantes modificados com outros óleos para os parâmetros de penetração e da penetração retida, respectivamente.

Figura 29 – Comparativo da penetração de ligantes modificados com óleos vegetais diversos, antes e após RTFO

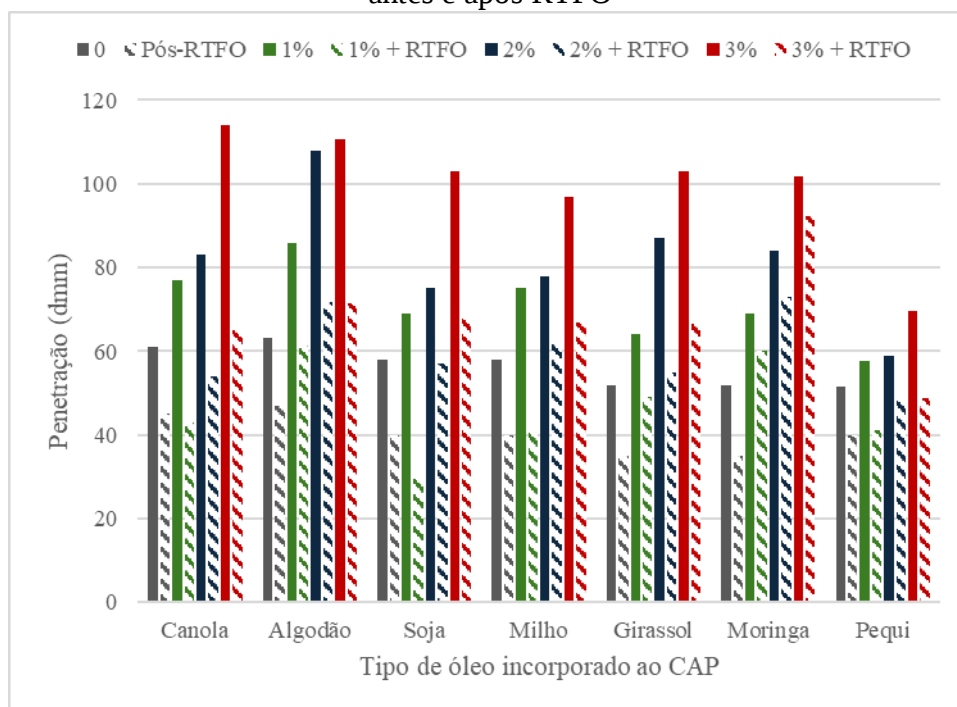
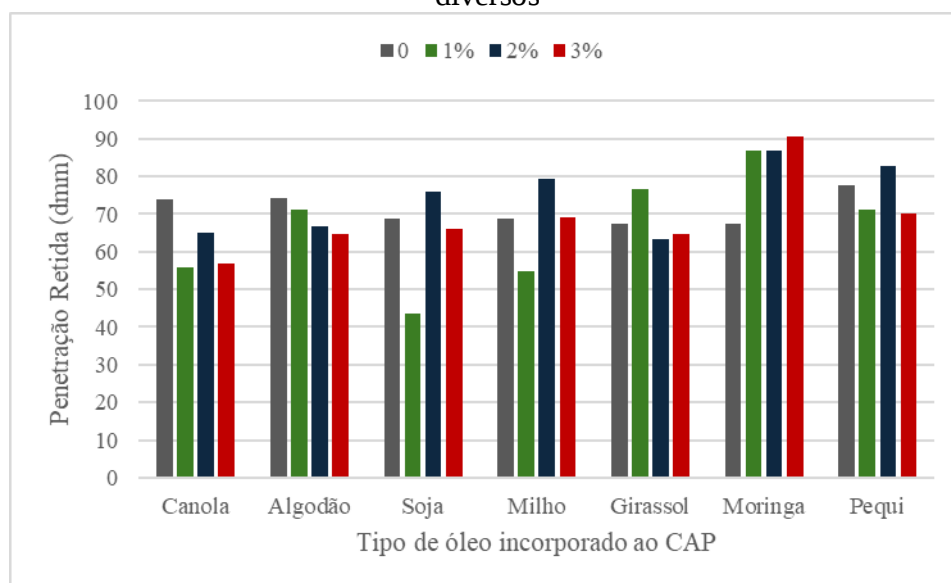


Figura 30– Comparativo da penetração retida de ligantes modificados com óleos vegetais diversos



Pelos dados da Figura 29 observa-se que a incorporação de óleos vegetais ao ligante asfáltico geram uma tendência de aumento significativo da penetração em todos os teores analisados (1%, 2% e 3%), indicando um efeito redutor de consistência associado à presença dos óleos. Contudo, ocorreu variação da resistência ao envelhecimento à curto prazo entre os diferentes tipos de óleo, sendo possível avaliar essa característica por meio do índice de retenção de penetração (PEN RET), apresentado na Figura 30. Dentre os óleos estudados, o óleo de moringa apresentou o melhor desempenho, com os maiores valores de PEN RET. Isso

indica que, em termos de penetração, o óleo de moringa proporciona maior estabilidade frente ao envelhecimento oxidativo de curto prazo, o que é desejável para preservar o desempenho mecânico ao longo do tempo.

Em contrapartida, o óleo de canola, estudado por Guerra, 2019 apresentaram valores sutilmente inferiores de PEN RET, revelando maior sensibilidade à oxidação. Em termos do óleo de pequi, verifica-se que o seu efeito é mais moderado em comparação aos demais óleos, resultando em menores valores absolutos de penetração mesmo com o aumento do teor. No entanto, os valores de PEN RET foram relativamente elevados, especialmente no teor de 2%, sugerindo que o óleo de pequi pode contribuir para reduzir a rigidez do ligante sem comprometer excessivamente sua estabilidade térmica e oxidativa. Assim, embora não promova a mesma magnitude de manutenção da consistência observada com outros óleos, o óleo de pequi mostra desempenho para aplicações em que se busca um ajuste fino na consistência do ligante, com menor impacto no envelhecimento.

A Figura 31 apresenta a comparação dos ligantes obtidos com a adição de óleo de Pequi e com outros óleos (GUERRA, 2019; DANTAS, 2018; PORTUGAL, 2016; SILVA, 2016) para o parâmetro de ponto de amolecimento. De maneira geral, a adição dos óleos promoveu uma redução do ponto de amolecimento em relação ao ligante original, e essa redução foi mais acentuada com o aumento do teor incorporado. Essa tendência é esperada, pois os óleos reduzem a rigidez do ligante e, conseqüentemente, o ponto de amolecimento. Também foi observada a redução do ponto de amolecimento após o envelhecimento RTFO para todos os ligantes, indicando que há aumento da rigidez térmica devido à oxidação e perda de voláteis. Para todos os tipos de óleo o comportamento nesse quesito foi bastante similar, indicando que a rigidez não é alterada significativamente a partir da variação dos tipos de óleo estudados.

O IST (Figura 32) mostra a variação relativa entre penetração e ponto de amolecimento, sendo um indicador da sensibilidade térmica do ligante. Nesse quesito, o óleo de algodão apresentou os menores valores de IST, porém, verifica-se também que o ligante asfáltico puro utilizado no estudo de Dantas (2018) possui menor susceptibilidade térmica comparado aos demais e que, comparado aos demais alcançou maior variação do índice com relação ao ligante puro. Dentre todas as amostras, o óleo de canola obteve maiores valores de índice de susceptibilidade térmica, seguido pelo óleo de pequi, moringa, girassol e soja, e milho respectivamente. Porém, fica evidente que esse parâmetro sofre grande influência do

ligante puro, que apesar da classe ser a mesma em todos os trabalhos, são oriundos de diferentes lotes.

Figura 31 - Comparativo do ponto de amolecimento de ligantes modificados com óleos vegetais diversos, antes e após RTFO

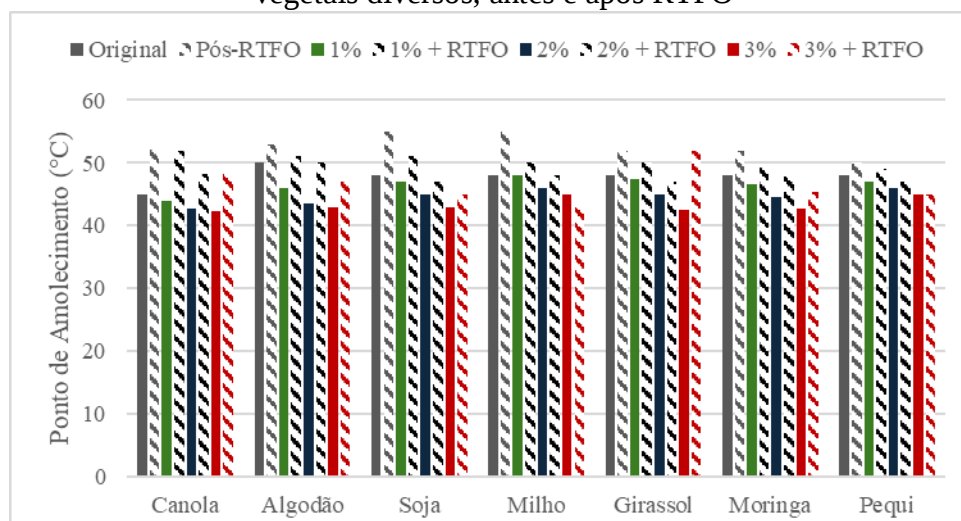
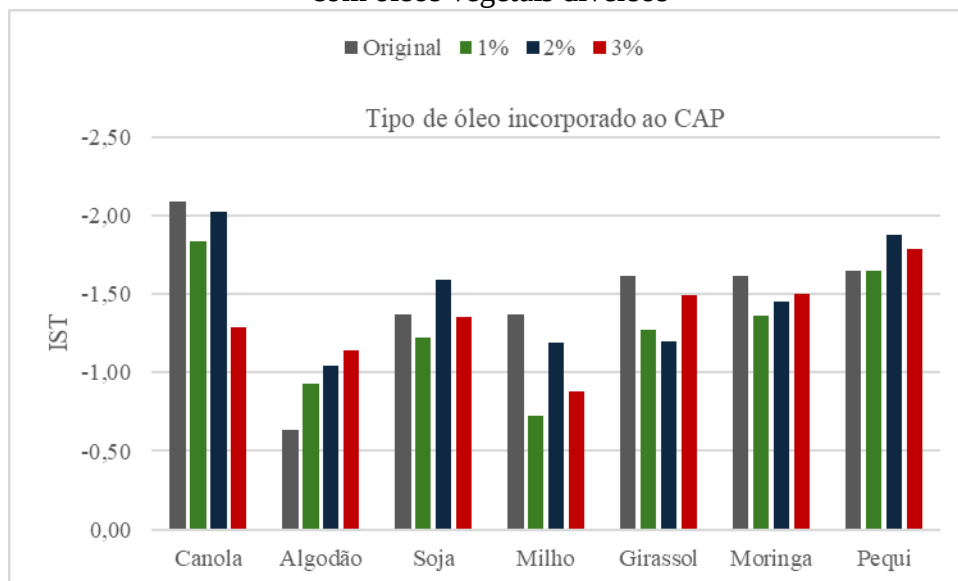


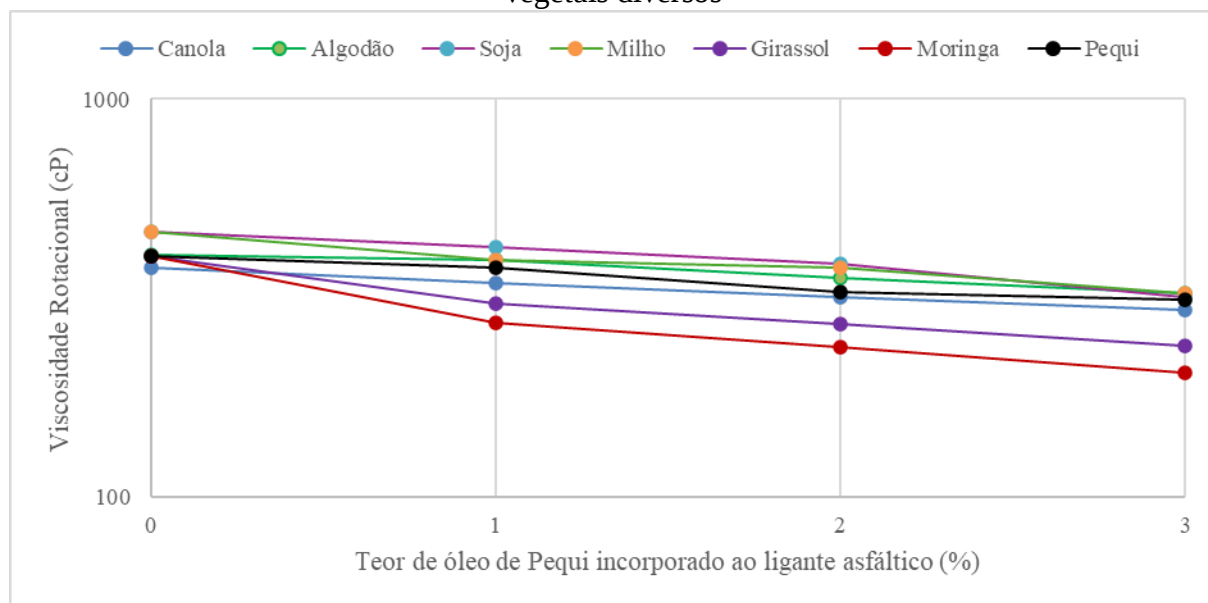
Figura 32 - Comparativo do índice de susceptibilidade térmica (IST) de ligantes modificados com óleos vegetais diversos



Na Figura 33 são apresentadas as curvas de viscosidade para os teores de 0%, 1%, 2% e 3% de diferentes óleos incorporados a um ligante asfáltico tipo CAP 50/70. Observa-se que óleos como Moringa e Girassol reduzem drasticamente a viscosidade, o que pode facilitar a produção e aplicação do ligante, mas pode comprometer a resistência mecânica e a estabilidade a altas temperaturas. O óleo de Pequi se destaca por promover redução gradual e menos acentuada da viscosidade rotacional, mantendo o ligante dentro de uma faixa desejável para processamento e aplicação sem comprometer sua resistência térmica. A mesma tendência se segue para as demais temperaturas de ensaio e, portanto, optou-se por apresentar os

resultados apenas na temperatura de 135°C, próxima à de aplicação de misturas asfálticas mornas.

Figura 33 - Comparativo das curvas de viscosidade de ligantes modificados com óleos vegetais diversos



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos ao longo desta pesquisa, conclui-se que a incorporação do óleo de pequi ao ligante asfáltico tipo CAP 50/70 promove alterações em suas propriedades físico-químicas, empíricas e reológicas. A espectroscopia na região do infravermelho (FTIR) confirmou a presença de grupos funcionais característicos do óleo, como ésteres e ácidos graxos, além de indicar sua permanência na matriz asfáltica mesmo após o envelhecimento a curto prazo (RTFO). Nos ensaios empíricos, o óleo de pequi atuou como agente amolecedor, promovendo aumento da penetração e redução do ponto de amolecimento, sobretudo em teores mais elevados. Esse efeito está associado à diminuição da rigidez e à alteração do balanço coloidal entre asfaltenos e maltenos no ligante, o que sugere uma reorganização interna da matriz betuminosa. Análises químicas complementares devem ser conduzidas para confirmar essa hipótese e elucidar os mecanismos envolvidos.

Do ponto de vista reológico, os resultados mostram que o óleo de pequi reduz a viscosidade rotacional, o módulo complexo (G^*) e a elasticidade do ligante, ao passo que aumenta o ângulo de fase (δ), tornando-o mais suscetível ao fluxo e menos resistente à deformação permanente. Embora esses efeitos possam ser benéficos para melhorar a trabalhabilidade e o desempenho em baixas temperaturas, há prejuízo no comportamento frente à fadiga e sob tráfego pesado, como evidenciado nos ensaios LAS e MSCR. A modificação com óleo de pequi, portanto, exige limitação do teor incorporado para que o ligante mantenha propriedades compatíveis com as exigências da pavimentação rodoviária. Dentre os teores avaliados, a incorporação de 2% apresentou o melhor compromisso entre flexibilidade, resistência ao envelhecimento e desempenho reológico.

Adicionalmente, existe a hipótese de desenvolvimento de um compósito asfáltico de maior desempenho por meio da combinação do óleo de pequi com agentes que promovam incremento da rigidez e elasticidade, preferencialmente resíduos industriais ou agroindustriais, com o objetivo de balancear os efeitos plastificantes do óleo. Tal abordagem poderá viabilizar a formulação de ligantes modificados ambientalmente sustentáveis, com desempenho técnico ajustado às diferentes condições climáticas e de tráfego. Assim, a incorporação do óleo de pequi mostra-se possível, desde que associada a um criterioso controle de dosagem e, potencialmente, à adição de modificadores complementares.

SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Utilização de teores inferiores a 1% para o uso óleos em ligantes asfálticos convencionais;
- Utilização de óleos com misturas asfálticas recicladas, visando reativas o ligante envelhecido do RAP;
- Dosar misturas asfálticas com uso de óleos e avaliar seu comportamento mecânico quanto à módulo de resiliência, fadiga e deformação permanente.
- Avaliar a incorporação e compatibilização de óleos em ligantes asfálticos modificados com polímeros.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIZADEH, Mohsin; HAJIKARIMI, Pouria; NEJAD, Fereidoon Moghadas. **Advancing asphalt mixture sustainability: a review of WMA-RAP integration**. Results in Engineering, v. 25, p. 103678, 2025.

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

BEHNOOD, A. (2020). **A review of the warm mix asphalt (WMA) technologies: Effects on thermo-mechanical and rheological properties**. In Journal of Cleaner Production (Vol. 259). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120817>

BERNUCCI, L. B; MOTTA L. M. G. da; CERATTI J. A. P.; SOARES J. B. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro, 2ª edição, 2022.

CAPITÃO, S. D., PICADO-SANTOS, L. G., & MARTINHO, F. (2012). **Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt**. In Construction and Building Materials (Vol. 36). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.038>

CARVALHO, J. R; **Estudo do Comportamento do Asfalto Modificado com Óleo de Girassol visando a Obtenção de Misturas Mornas**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal d Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2018.

CNT, CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Transporte rodoviário: impactos da qualidade do asfalto sobre o transporte rodoviário. [S.l.]. 2019

COLARES, Luthian Melo *et al.* Avaliação química e microbiológica do óleo de Pequi (Caryocar brasiliense) comercializado em feira de São Luis - MA / Chemical and microbiological evaluation of Pequi oil (Caryocar brasiliense) marketed at São Luis fair - MA. **Brazilian Journal of Development**, [s. l.], v. 7, n. 9, p. 86836–86852, 2021. Disponível em: <https://brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/35425>.

CORDEIRO, Madison Willy Silva *et al.* Características físicas, composição químico-nutricional e dos óleos essenciais da polpa de Caryocar brasiliense nativo do estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Fruticultura**, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 1127–1139, 2013. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-29452013000400024&lng=pt&tlng=pt.

COSTA, Laiana Ferreira da *et al.* **Misturas asfálticas recicladas a quente contendo aditivos: avaliação do desempenho mecânico, econômico e ambiental**. 2023.

CRAVO, M. C. C. **Efeitos do envelhecimento térmico e fotoquímico em ligantes asfálticos, mástique e matriz de agregados finos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2016.

DA COSTA, L. F., DE MEDEIROS MELO NETO, O., DE MACÊDO, A. L. F., DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, L. C., & DE FIGUEIREDO LOPES LUCENA, L. (2024). **Optimizing recycled asphalt mixtures with zeolite, cottonseed oil, and varied RAP**

content for enhanced performance and circular economy impact. Case Studies in Construction Materials, 20. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02707>

DANTAS, I.S. **Efeito Da Adição Do Óleo De Algodão Refinado Nas Propriedades Reológicas Do Cimento Asfáltico De Petróleo.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Campina Grande. 2018

DAVID WANG, Y., & KIM, Y. R. (2021). **Effects of Aging on Pavement ME Predictions of Permanent Deformation for HMA and WMA Mixtures.** Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 147(4). <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000319>

EAPA - Associação Europeia de Pavimentos Asfálticos. Asfalto. Disponível em: <https://eapa.org/asphalt/>.

EMBRAPA. Agência Embrapa de informação Tecnológica. Disponível em: . Acesso em: 08 maio 2024.

FRACASSO, Julia Amanda Rodrigues *et al.* **Anti-Inflammatory Effect and Toxicological Profile of Pulp Residue from the Caryocar Brasiliense**, a Sustainable Raw Material. *Gels*, [s. l.], v. 9, n. 3, p. 234, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2310-2861/9/3/234>.

Guerra, T. D **Utilização Do Óleo De Canola Para Redução Das Temperaturas De Usinagem E Compactação De Misturas Asfálticas.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande

GUIMARÃES, Munique *et al.* Extraction and Characterization of Pequi Seed Oil for Biodiesel Production: A Green Management of Waste to Biofuel Using Ethanol and Heterogeneous Catalysis. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, [s. l.], v. 33, n. 4, p. 327–339, 2022. Disponível em: http://jbcs.sbq.org.br/audiencia_pdf.asp?aid2=11245&nomeArquivo=2021-0250AR.pdf.

KERR, Warwick Estevam; SILVA, Francisco Raimundo da; TCHUCARRAMAE, Bdiyai. Pequi (Caryocar Brasiliense Camb.): informações preliminares sobre um pequi sem espinhos no caroço. *Revista Brasileira de Fruticultura*, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 169–171, 2007. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-29452007000100035&lng=pt&tlng=pt.

KHERADMAND, B., MUNIANDY, R., HUA, L. T., YUNUS, R. B., & SOLOUKI, A. (2014). **An overview of the emerging warm mix asphalt technology.** International Journal of Pavement Engineering, 15(1). <https://doi.org/10.1080/10298436.2013.839791>

KRISTJÁNSDOTTIR, Ó., MUENCH, S. T., MICHAEL, L., & BURKE, G. (2007). **Assessing potential for warm-mix asphalt technology adoption.** Transportation Research Record, 2040. <https://doi.org/10.3141/2040-10>

LESUEUR, D. **The colloidal structure of bitumen: consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification.** Adv. Colloid Interface Sci., v. 145, p. 42–82, 2009

LI, X., ZHOU, Z., LV, X., XIONG, K., WANG, X., & YOU, Z. (2017). **Temperature segregation of warm mix asphalt pavement: Laboratory and field evaluations.** Construction and Building Materials, 136. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.195>

LIMA, Alessandro de *et al.* Composição química e compostos bioativos presentes na polpa e na amêndoa do pequi (*Caryocar brasiliense*, Camb.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, [s. l.], v. 29, n. 3, p. 695–698, 2007. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-29452007000300052&lng=pt&tlng=pt.

LUZ, P. M. S. G., MARTINS, S. F., COSTA, D. B., & LUCENA, L. C. (2019). **Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas modificadas com adição de óleos vegetais**. *Transportes*, 27(1), 141-155.

MARINHO FILHO, P. G. T. **Análise do comportamento reológico e de envelhecimento de ligantes asfálticos contendo nanofibrilas de celulose**. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2023.

MAZUMDER, M., SRIRAMAN, V., Kim, H. H., & Lee, S. J. (2016). **Quantifying the environmental burdens of the hot mix asphalt (HMA) pavements and the production of warm mix asphalt (WMA)**. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(3). <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2016.06.001>

MIRANDA-VILELA, Ana L. *et al.* **Pequi fruit (*Caryocar brasiliense* Camb.) pulp oil reduces exercise-induced inflammatory markers and blood pressure of male and female runners**. *Nutrition Research*, [s. l.], v. 29, n. 12, p. 850–858, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.nutres.2009.10.022>.

MOHD HASAN, M. R., YOU, Z., & YANG, X. (2017). **A comprehensive review of theory, development, and implementation of warm mix asphalt using foaming techniques**. In *Construction and Building Materials* (Vol. 152). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.135>

MOTTA, R. S.; BERNUCCI, L. B.; FARIAS, V. C. **Misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos produzidos com baixa energia e redução de temperatura, para diminuição de consumo energético e de emissão de poluentes**. *Revista ANTT*, v. 4, n. 2, 2012.

MOTTA, R. S.; BERNUCCI, L. B.; FARIAS, V. C. **Misturas asfálticas para revestimentos de pavimentos produzidos com baixa energia e redução de temperatura, para diminuição de consumo energético e de emissão de poluentes**. *Revista ANTT*, v. 4, n. 2, 2012.

MUGUME, R.; KAKOTO, D. **Effect of inappropriate binder grade selection on initiation of asphalt pavement cracking**. *Sustainability*, v. 12, p. 6099, 2020.

NOGUEIRA, R. L., SOARES, J. B., & DE AGUIAR SOARES, S. (2019). **Rheological evaluation of cotton seed oil fatty amides as a rejuvenating agent for RAP oxidized asphalts**. *Construction and Building Materials*, 223, 1145-1153.

ÓLEO DE PEQUI (*CARYOCAR BRASILIENSE* CAMB) **Métodos De Extração, Constituição Química E Propriedades Medicinais** Almeida, Anderson Soares De; Macedo, Erijane Da Silva; Silva, Deysiane Carollyne Gonçalves Da; Silva, Igor Jean Moura Da; Farias, Edylane De; Santos, Carlos Roberto De Oliveira. *Diversitas Journal*. Santana do Ipanema/AL. vol. 3, n. 3, p.557-563, set./dez. 2018.

PAVIA, D. L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G. S.; VYVYAN, J. R.. **Introdução à Espectroscopia**. Tradução da 4ª edição norte-americana. Cengage Learning, 2010.

PIANOVSKI, Aline Rocha *et al.* Uso do óleo de pequi (*Caryocar brasiliense*) em emulsões cosméticas: desenvolvimento e avaliação da estabilidade física. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, [s. l.], v. 44, n. 2, p. 249–259, 2008. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-93322008000200010&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt.

PORTUGAL, A.C.X. **Avaliação Reológica de Cimento Asfáltico de Petróleo modificados com óleo de Cozinha**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande

RODRÍGUEZ-ALLOZA, A. M., GALLEGÓ, J., & PÉREZ, I. (2013). **Study of the effect of four warm mix asphalt additives on bitumen modified with 15% crumb rubber**. *Construction and Building Materials*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.025>

ROLL, Mariana Matos *et al.* The pequi pulp oil (*Caryocar brasiliense* Camb.) provides protection against aging-related anemia, inflammation and oxidative stress in Swiss mice, especially in females. **Genetics and Molecular Biology**, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 858–869, 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-47572018000500858&tlng=en.

SAGAR, K. A., VENUDHARAN, V., & SAHA, G. (2025). **Prospects of Warm Mix Asphalt in Maximizing Reclaimed Asphalt Pavement Utilization: Review on Mix Design and Performance**. *Cleaner Waste Systems*, 100229.

SHU, S.; CHUANYI, Z.; RUIBO, R.; BAODONG, X.; KUN, C.; GEN, L. SHU, Shiqi *et al.* **Effect of Different Anti-Stripping Agents on the Rheological Properties of Asphalt Coatings**, v. 12, n. 12, p. 1895, 2022.

SILVA, G. G. da. **Estudos Reológicos de Aditivos Utilizados na Fabricação de Misturas Mornas**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2016.

SILVESTEIN, R.M.; WEBSTER, F.X.; KIEMLE, D.J. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**, 7th ed., LTC, 2007.

SUKHIJA, M., WAGH, V. P., & SABOO, N. (2021). **Development of workability based approach for assessment of production temperatures of warm mix asphalt mixtures**. *Construction and Building Materials*, 305. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124808>

WILLIAMS, B. A., RICHARD WILLIS, J., & SHACAT, J. (2022). *Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage 2021 Information Series 138*. 12th Annual Asphalt Pavement Industry Survey, July.

ELKASHEF, M., William, C.; COCHRAN, E. **Investigation of fatigue and thermal cracking behavior of rejuvenated reclaimed asphalt pavement binders and mixtures**. *International Journal of Fatigue*, November 2017