



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Rodrigo de Sousa Rabelo

Aplicação do óleo de palma como agente rejuvenecedor de asfaltos envelhecidos

Florianópolis

2023

Rodrigo de Sousa Rabelo

Aplicação do óleo de palma como agente rejuvenecedor de asfaltos envelhecidos

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Liseane Padilha Thives, Dr^a.

Coorientador: Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito, Dr.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra

Rabelo, Rodrigo de Sousa

Aplicação do óleo de palma como agente rejuvenescedor de asfaltos envelhecidos / Rodrigo de Sousa Rabelo ; orientadora, Liseane Padilha Thives, coorientador, Lélío Antônio Teixeira Brito, 2023.

111 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Reologia do Asfalto. 3. Envelhecimento. 4. Agentes Rejuvenescedores. I. Thives, Liseane Padilha. II. Brito, Lélío Antônio Teixeira. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Rodrigo de Sousa Rabelo

Aplicação do óleo de palma como agente rejuvenescedor de asfaltos envelhecidos

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 05 de dezembro de 2023, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito, Dr.
Coorientador

Prof.^a Lilian Ribeiro de Rezende, Dr.^a
Universidade Federal de Goiás

Prof.^a Helena Paula Nierwinski, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.^a Gracieli Bordin Colpo, Dr.^a
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.^a Luciana Rohde, Dr.^a
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Prof.^a Fernanda Fernandes Marchiori, Dr.^a
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Prof.^a Liseane Padilha Thives, Dr.^a
Orientadora

Florianópolis, 2023.

AGRADECIMENTOS

À minha esposa, Kelline, por todo o apoio dedicado, pelo incentivo nos momentos difíceis, pelo amor e carinho, mesmo nos meus momentos de ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

À professora Liseane, por ter aceitado ser minha orientadora e ter desempenhado esse papel com tamanha dedicação, paciência e amizade, e pelos inúmeros conselhos que me guiaram até este momento.

Ao professor Lélío, também pela orientação, pelas correções e ensinamentos que permitiram aprimorar este trabalho e contribuíram para o meu aprendizado.

Aos meus pais, por tudo que fizeram por mim desde sempre.

Aos meus colegas, Yuri e Kátia, que estiveram comigo no laboratório durante esses anos de pesquisa, por concederem toda a ajuda que podiam dar e pelos valiosos conselhos.

Agradeço à CAPES pela bolsa de fomento concedida; à Rede Temática de Asfalto por providenciar os equipamentos laboratoriais; à CBB Asfaltos por ceder o asfalto avaliado neste trabalho; à Kraton, pelo fornecimento do agente rejuvenescedor; à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) pelo apoio na realização dos ensaios de envelhecimento no PAV e; ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

RESUMO

O uso de *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP) em misturas asfálticas é atrativo devido aos benefícios econômicos e ambientais que a prática proporciona, principalmente pela redução do consumo de agregados e ligantes virgens, além de promover uma destinação adequada de um material nobre, o asfalto fresado. A técnica tem crescido no cenário brasileiro em virtude do aumento dos custos dos insumos asfálticos e devido à promoção da sustentabilidade e preservação de recursos ambientais. Porém, a quantidade de RAP empregada nas misturas asfálticas é limitada devido ao baixo desempenho em temperaturas baixas e intermediárias proporcionados pelo asfalto envelhecido presente no RAP, que resulta em misturas rígidas e propensas ao trincamento térmico e fadiga. Nesse sentido, torna-se viável o uso de agentes rejuvenescedores, que atuam como restauradores das propriedades do asfalto, afetadas pelo envelhecimento. Os óleos vegetais podem cumprir esse papel, sendo uma alternativa aos produtos já comercializados, em virtude do custo inferior e origem de fontes limpas e renováveis. Este estudo tem como objetivo analisar por meio de ensaios reológicos o uso do óleo de palma como agente de rejuvenecedor de asfaltos envelhecidos como uma alternativa de fonte limpa e renovável para recuperação de asfaltos envelhecidos. Para isso, um asfalto CAP 50/70 (referência) foi envelhecido em laboratório em curto e em longo prazo, nos equipamentos *Rolling Thin-Film Oven Test* (RTFO) e *Pressure Aging Vessel* (PAV), respectivamente. Nas amostras envelhecidas foram incorporados teores de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%, em peso, de óleo de palma (asfaltos rejuvenescidos). Os efeitos do rejuvenescimento foram observados através da avaliação das propriedades físicas obtidas em ensaios convencionais (penetração, ponto de amolecimento e viscosidade), comparativamente ao asfalto referência. As propriedades reológicas, medidas em um reômetro de cisalhamento dinâmico, foram a determinação dos parâmetros do *Superior Performing Asphalt Pavements* (SUPERPAVE) em temperaturas altas e intermediárias, e o desempenho dos resultados dos ensaios *Linear Amplitude Sweep* (LAS) e *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR). Verificou-se que a adição do óleo de palma proporcionou a diminuição do módulo complexo e diminuição do ângulo de fase. Em relação ao desempenho, os asfaltos rejuvenescidos apresentaram maior vida de fadiga, porém mais suscetíveis à deformação permanente. Esses efeitos se tornam mais acentuados à medida que se incrementa óleo de palma no asfalto. A partir dos resultados obtidos, foram determinados modelos matemáticos, em função do teor de óleo de palma, para cada parâmetro, como, Grau PG de alta temperatura, compliância não-recuperável a 3,2 kPa (obtida no ensaio MSCR), parâmetros de predição de desempenho à fadiga da especificação Superpave ($G^* \cdot \sin(\delta)$ e $G^*/\sin(\delta)$) e o número de ciclos na ruptura para as deformações de α 1,25%, 2,5% e 5,0% (obtidos no ensaio LAS). O teor ótimo de óleo de palma obtido foi de 4,3%, definido com base nas propriedades de desempenho do asfalto. Foi produzida uma amostra com teor de 4,3% de óleo de palma e submetida a ensaios reológicos para comparação. Os resultados mostraram que em altas temperaturas, o grau PG, a compliância não-recuperável a 3,2 kPa ($J_{nr3,2}$) e o parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ foram de 64°C, 0,27 kPa⁻¹ (58°C) e 4,45 kPa (58°C), respectivamente, enquanto que para o asfalto de referência foram 58°C, 0,59 kPa⁻¹ (58°C) e 1,98 kPa (58°C), indicando uma tendência de melhor desempenho à deformação permanente pela adição do óleo de palma. Em temperaturas intermediárias, o parâmetro $G^* \cdot \sin(\delta)$ e o fator de fadiga do ligante (FFL), determinados a 19°C, foram de 3,7 MPa e 1,38, respectivamente para o asfalto rejuvenescido, enquanto os resultados para o asfalto de referência foram 3,4 MPa e 1,3. Assim, o óleo de palma poderia promover uma melhoria da resistência à fadiga. Adicionalmente, para representar a condição de campo e comparar o desempenho do óleo de palma com um rejuvenecedor disponível no mercado, uma amostra de asfalto foi extraída de material fresado (RAP) e incorporou-se 7,5% de óleo de palma e do agente rejuvenecedor comercial, valor percentual indicado pelo fabricante. Os resultados mostraram que o óleo de palma pode ser utilizado como rejuvenecedor de asfalto, com resultados similares ao agente rejuvenecedor comercial. Ambos os rejuvenescedores, óleo de palma e comercial, resultaram em amostras de asfalto rejuvenescido classificadas como adequadas ao tráfego muito pesado.

Palavras-chave: Asfalto, Agente rejuvenecedor, Envelhecimento, Óleo de palma

ABSTRACT

The use of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in asphalt mixtures is attractive due to the economic and environmental benefits that the practice provides, mainly by reducing the consumption of virgin aggregates and binders, as well as promoting the proper disposal of a noble material, the milled material. The technique has grown in Brazil due to the rising costs of asphalt inputs and the promotion of sustainability and preservation of environmental resources. However, the amount of RAP used in asphalt mixtures is limited due to the low performance at low and intermediate temperatures provided by the aged asphalt present in RAP, which results in rigid mixtures subject to thermal cracking and fatigue. In this sense, rejuvenating agents use, which act as restorers of asphalt properties affected by aging, become viable. Vegetable oils can fulfill this role as an alternative to products already on the market due to their lower cost and origin from clean and renewable source. This study aims to analyze through rheological tests the use of palm oil as a rejuvenating agent for aged asphalt as an alternative clean and renewable source for recovering aged asphalt. Thus, a CAP 50/70 asphalt (reference) was aged in the laboratory in the short and long term, in the Rolling Thin-Film Oven Test (RTFO) and Pressure Aging Vessel (PAV) equipment, respectively. The aged samples contained 2%, 4%, 6%, 8% and 10% by weight of palm oil (rejuvenated asphalts). The effects of rejuvenation were observed by evaluating the physical properties obtained in conventional tests (penetration, softening point and viscosity) compared to the reference asphalt. The rheological properties, measured in a dynamic shear rheometer, were the determination of the parameters of the Superior Performing Asphalt Pavements (SUPERPAVE) at high and intermediate temperatures and the performance of the results of the Linear Amplitude Sweep (LAS) and Multiple Stress Creep and Recovery (MCSR) tests. It was found that adding palm oil led to a decrease in the complex modulus and a reduction in the phase angle. Regarding performance, the rejuvenated asphalts had a longer fatigue life but were more susceptible to permanent deformation. These effects became more pronounced as palm oil was added to the asphalt. Based on the obtained results, mathematical models were determined, as a function of palm oil content, for each parameter, such as high-temperature PG grade, non-recoverable compliance at 3.2 kPa (from the MSCR test), fatigue performance prediction parameters from the Superpave specification ($G^*_{sen}(\delta)$ and $G^*/sen(\delta)$) and the number of cycles at failure for deformations of 1.25%, 2.5% and 5.0% (from the LAS test). The optimum palm oil content obtained was 4.3%, defined based on the asphalt's performance properties. A sample with 4.3% oil palm content was produced and subjected to rheological tests for comparison. As a result, at high temperatures, the high degree of PG, the non-recoverable compliance at 3.2 kPa ($J_{nr,3.2}$) and the parameter $G^*/sen(\delta)$ were 64°C, 0.27 kPa⁻¹ (58°C) and 4.45 kPa (58°C), respectively, while for the reference asphalt were 58°C, 0.59 kPa⁻¹ (58°C) and 1.98 kPa (58°C) indicating a tendency of better performance to permanent deformation due to oil palm addition. At intermediate temperatures, the $G^*_{sen}(\delta)$ parameter and the binder fatigue factor (FFL), determined at 19°C, were 3.7 MPa and 1.38, respectively for the rejuvenated asphalt, while the results for the reference asphalt were 3.4 MPa and 1.3. Thus, oil palm could able the advance fatigue resistance improvement. In addition, to represent field conditions and compare the performance of palm oil with a commercially available rejuvenator, an asphalt sample was extracted from milled material (RAP), and 7.5% palm oil and the commercial rejuvenating agent were incorporated, the value indicated by the material producer. The results showed that palm oil can be used as an asphalt rejuvenator, producing similar results to the commercial rejuvenating agent. Both oil palm and commercial rejuvenators resulted in samples of rejuvenated asphalt classified as suitable for very heavy traffic.

Keywords: Asphalt, Rejuvenating Agent, Aging, Palm Oil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de micelas da estrutura do asfalto.....	25
Figura 2. Relação da estrutura do asfalto com o desempenho de pavimentos asfálticos ...	26
Figura 3. Resposta ao carregamento aplicado	28
Figura 4. Esquema do procedimento do ensaio no DSR.....	29
Figura 5. Representação gráfica do módulo complexo e suas componentes	29
Figura 6. Etapas do envelhecimento do asfalto	35
Figura 7. Comportamento do módulo complexo e do ângulo de fase em função do teor de óleo adicionado para um asfalto convencional.....	42
Figura 8. Comportamento do módulo complexo e do ângulo de fase em função do teor de óleo adicionado para um asfalto modificado por polímero (SBS)	42
Figura 9. Valores de $G^*/\sin(\delta)$ para diferentes teores de óleo de cozinha residual.....	43
Figura 10. Valores de $G^*\cdot\sin(\delta)$ para diferentes teores de óleo de cozinha residual.....	44
Figura 11. Resultados do ensaio BBR conduzido para diferentes amostras de asfalto rejuvenescidas com resíduo de óleo de cozinha	45
Figura 12. Rendimento da produção de diferentes oleaginosas	47
Figura 13. Local de origem do material fresado utilizado neste estudo.....	52
Figura 14. Rejuvenescedores utilizados. (a) Óleo de palma; (b) Éster de poliálcool.....	53
Figura 15. Procedimento experimental adotado.....	54
Figura 16. Amostras de asfalto analisadas	55
Figura 17. Procedimento adotado para o rejuvenescimento dos asfaltos envelhecidos.....	56
Figura 18. Procedimento adotado para comparação entre o óleo de palma e o agente rejuvenescedor.....	61
Figura 19. Penetração dos asfaltos rejuvenescidos com óleo de palma	64
Figura 20. Ponto de amolecimentos dos asfaltos rejuvenescidos com óleo de palma	64
Figura 21. Viscosidade aparente dos asfaltos rejuvenescidos com óleo de palma.....	65
Figura 22. Módulo complexo (G^*) em altas temperaturas dos asfaltos rejuvenescidos com óleo de palma.....	66
Figura 23. Ângulo de fase (δ) em altas temperaturas dos asfaltos rejuvenescidos com óleo de palma.....	67
Figura 24. Módulo complexo (G^*) em temperaturas intermediárias dos asfaltos rejuvenescidos com óleo de palma	68
Figura 25. Ângulo de fase (δ) em temperaturas intermediárias dos asfaltos rejuvenescidos com óleo de palma.....	68

Figura 26. Parâmetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ dos asfaltos.....	69
Figura 27. Parâmetro $G^*\cdot\text{sen}(\delta)$ dos asfaltos.....	69
Figura 28. Compliância não recuperável dos asfaltos	71
Figura 29. Deformação e recuperação durante um ciclo do ensaio.....	72
Figura 30. Curvas tensão-deformação do ensaio LAS	73
Figura 31. Integridade dos asfaltos em função do dano causado	74
Figura 32. Curvas de fadigas dos asfaltos obtidas através do LAS.....	75
Figura 33. Blending Charts dos parâmetros reológicos analisados em função do teor de óleo de palma. Parâmetros: (a) PG Verdadeiro (alto); (b) $J_{nr3,2}$ a 58°C; (c) $G^*/\text{sen}(\delta)$ a 58°C; (d) $G^*\cdot\text{sen}(\delta)$ a 19°C; (e) $N_{f-1,25}$ a 19°C; (f) $N_{f-2,5}$ a 19°C; (g) $N_{f-5,0}$; (h) FFL a 19°C	78
Figura 34. (a) Módulo complexo e (b) ângulo de fase dos asfaltos em altas temperaturas	82
Figura 35. (a) Módulo complexo e (b) ângulo de fase em temperaturas intermediárias....	82
Figura 36. Parâmetros de deformação permanente (a) $G^*/\text{sen}(\delta)$ e (b) J_{nr} dos asfaltos a 58°C.....	83
Figura 37. Parâmetros de fadiga (a) $G^*\cdot\text{sen}(\delta)$ e (b) N_f dos asfaltos a 19°C.....	84
Figura A.1. Frações químicas do asfalto	101
Figura A.2. Representação esquemática dos componentes do asfalto	101
Figura A.3. Representação esquemática do comportamento “sol” do asfalto.....	102
Figura A.4. Representação esquemática do comportamento “gel” do asfalto	102
Figura C.1. Curva dano versus integridade do material.....	106
Figura C.2. Cálculo do FFL a partir da curva de fadiga	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Frações do petróleo bruto e seus usos.....	23
Tabela 2. Composição química do asfalto.....	24
Tabela 3. Finalidade dos ensaios da especificação Superpave.....	31
Tabela 4. Tipos de rejuvenescedores.....	39
Tabela 5. Efeitos nas propriedades físicas do asfalto após rejuvenescimento com óleos vegetais.....	41
Tabela 6. Principais óleos vegetais: produção mundial e custo médio.....	47
Tabela 7. Propriedades físico-químicas de alguns óleos vegetais.....	48
Tabela 8. Propriedades do asfalto convencional (CAP 50/70) utilizado neste estudo.....	51
Tabela 9. Propriedades físicas do asfalto envelhecido extraído do material fresado utilizado neste estudo.....	52
Tabela 10. Propriedades do agente rejuvenecedor comercial.....	53
Tabela 11. Nomenclatura adotada para os asfaltos produzidos em laboratório.....	56
Tabela 12. Ensaio de caracterização física.....	57
Tabela 13. Resumo dos ensaios reológicos no DSR.....	58
Tabela 14. Critérios de seleção do teor ótimo de óleo de palma.....	60
Tabela 15. Nomenclatura das amostras de asfalto envelhecida e rejuvenescida com o óleo de palma e o agente rejuvenecedor.....	61
Tabela 16. Propriedades físicas do asfalto envelhecido em curto e em longo prazo e do asfalto virgem.....	63
Tabela 17. Pico de tensão dos asfaltos a partir do ensaio LAS.....	73
Tabela 18. Parâmetros de fadiga do ensaio LAS obtidos.....	76
Tabela 19. Valores de $N_{f-1,25}$, $N_{f-2,5}$ e FFL dos asfaltos.....	77
Tabela 20. Escolha do teor ótimo de óleo de palma.....	79
Tabela 21. Parâmetros reológicos do asfalto rejuvenescido com óleo de palma na dosagem ótima.....	80
Tabela 22. Teor de rejuvenecedor calculado de acordo com o fornecedor do AR.....	81
Tabela 23. Efeito do rejuvenescimento do asfalto extraído do RAP com óleo de palma e um agente rejuvenecedor nas suas propriedades físicas.....	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AE	AV envelhecido mediante RTFO + PAV
AE10OP	AE + 10% de óleo de palma em massa
AE2OP	AE + 2% de óleo de palma em massa
AE4OP	AE + 4% de óleo de palma em massa
AE6OP	AE + 6% de óleo de palma em massa
AE8OP	AE + 8% de óleo de palma em massa
AE10OP	AE + 10% de óleo de palma em massa
AEOP _{ót}	Asfalto rejuvenescido com óleo de palma na dosagem ótima
ANP	Agência Nacional do Petróleo
AR	Agente rejuvenescedor
ARAP	Asfalto recuperado do RAP
ARAP + X% AR	Asfalto recuperado + X% de agente rejuvenescedor
ARAP + X% OP	Asfalto recuperado + X% de óleo de palma
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AV	Asfalto virgem (referência)
BBR	<i>Bending Beam Rheometer</i>
BSI	<i>British Standard Institution</i>
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
DSR	<i>Dynamic Shear Rheometer</i>
GEPPASV	Grupo de Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária
LAS	<i>Linear Amplitude Sweep</i>
MSCR	<i>Multiple Stress Creep and Recovery</i>
NBR	Norma Brasileira
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
PAV	<i>Pressurized Aging Vessel</i>
PG	<i>Performance Grade</i>
PPSPO	Programa de Produção Sustentável da Palma de Óleo
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>
RS	Rio Grande do Sul

RTFO	<i>Rolling Thin-Film Oven Test</i>
SARA	Saturados, Aromáticos, Resinas, Asfaltenos
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
Superpave	<i>Superior Performing Asphalt Pavements</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UV	Ultravioleta
VECD	<i>Viscoelastic Continuum Damage</i>
WCO	<i>Waste Cooking Oil</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Por cento
<	Menor que
=	Igual a
>	Maior que
±	Mais ou menos
≤	Menor ou igual a
≥	Maior ou igual a
°	Graus
°C	Graus celsius
A	Parâmetro de fadiga, obtido no LAS
B	Parâmetro de fadiga, obtido no LAS
C	Integridade do material
C_1	Coefficiente de ajuste da curva dano versus integridade
C_2	Coefficiente de ajuste da curva dano versus integridade
cP	Centipoise
D	Dano acumulado
D_f	Dano acumulado na falha
dmm	Décimos de milímetros
f	Frequência
FFL	Fator de fadiga do ligante
g	grama
G^*	Módulo dinâmico de cisalhamento ou módulo complexo
$G^*/\text{sen}(\delta)$	Parâmetro de predição do comportamento quanto à deformação permanente
$G^*\cdot\text{sen}(\delta)$	Parâmetro de predição do comportamento quanto à fadiga
G'	Módulo de armazenamento
G''	Módulo de dissipação ou de perda
Hz	Hertz
J_{nr}	Complância não recuperável
$J_{nr0,1}$	Complância não recuperável em 0,1 kPa
$J_{nr3,2}$	Complância não recuperável em 3,2 kPa
$J_{nr-diff}$	Diferença percentual entre $J_{nr0,1}$ e $J_{nr3,2}$
km	Quilômetro
kPa	Quilopascal

min	Minuto
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
<i>m-value</i>	Parâmetro de relaxação
N_f	Número de ciclos na ruptura, obtido no LAS
$N_{f-1,25}$	Número de ciclos na ruptura, a 1,25% de deformação
$N_{f-2,5}$	Número de ciclos na ruptura, a 2,5% de deformação
N_{f-5}	Número de ciclos na ruptura, a 5% de deformação
$R_{0,1}$	Média percentual da deformação recuperada para o nível de tensão de 0,1 kPa
$R_{3,2}$	Média percentual da deformação recuperada para o nível de tensão de 3,2 kPa
rad/s	Radianos por segundo
rpm	Rotações por minuto
S	Módulo de rigidez à fluência
s	segundo
SP	<i>Spindle</i>
t	Tempo
$T_{crit,Rap}$	Temperatura crítica do RAP (alta, baixa ou intermediária)
$T_{crit,Ref}$	Temperatura crítica do asfalto de referência (alta, baixa ou intermediária)
$T_{PG\ alto}$	Temperatura alta do grau PG
$T_{PG\ Intermediário}$	Temperatura intermediária do grau PG
$X\%$	Teor de agente rejuvenescedor
$X_{ótima}$	Teor ótimo de óleo de palma
α	Parâmetro do asfalto na condição intocada, obtido no LAS
$\gamma_{máx}$	Deformação máxima esperada
δ	Ângulo de fase
Δt	Variação no tempo
ϵ	Deformação
ϵ_r	Percentual de deformação recuperada
η_0	Viscosidade inicial do asfalto
η_a	Viscosidade em uma dada condição de envelhecimento
π	Número pi
ω	Frequência angular

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Objetivo geral	20
1.2. Objetivos específicos	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1. O Asfalto	23
2.1.1. Composição química	24
2.1.2. Modelo da estrutura coloidal	25
2.2. Reologia	26
2.2.1. Comportamento reológico do asfalto	27
2.2.2. Caracterização reológica dos asfaltos	28
2.3. Especificação do asfalto	30
2.3.1. Especificação brasileira	30
2.3.2. Especificação Superpave	31
2.3.3. Limitação dos parâmetros reológicos da especificação Superpave	32
2.4. Processo de envelhecimento do asfalto	34
2.5. Rejuvenescimento do asfalto	38
2.6. Estudos acerca do uso de óleos vegetais como agentes rejuvenescedores	40
2.7. Óleo de palma	46
3. MATERIAIS E MÉTODO	51
3.1. Materiais	51
3.1.1. Asfalto convencional	51
3.1.2. Asfalto envelhecido	51
3.1.3. Rejuvenescedores	52
3.2. Método	53
3.2.1. Preparo das amostras de asfalto	54
3.2.2. Caracterização das amostras de asfalto	57

3.2.3.	Determinação do teor ótimo de óleo de palma	59
3.2.4.	<i>Comparação do óleo de palma com o agente rejuvenescedor comercial</i>	60
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1.	Efeito nas propriedades físicas	63
4.2.	Efeito nas propriedades reológicas	66
4.2.1.	Performance Grade (PG)	66
4.2.2.	<i>Multiple Stress Creep and Recovery</i> (MSCR).....	70
4.2.3.	<i>Linear Amplitude Sweep</i> (LAS).....	72
4.3.	Avaliação da dosagem de óleo de palma	77
4.3.1.	Definição da dosagem ótima de óleo de palma	77
4.3.2.	Validação do teor ótimo de óleo de palma	80
4.4.	Comparação do óleo de palma com um rejuvenescedor comercial	81
5.	CONCLUSÃO	85
5.1.	Sugestões para trabalhos futuros	87
	REFERÊNCIAS	89
	ANEXO A – ESTRUTURA QUÍMICA DO ASFALTO	101
A.1.	Fracionamento do asfalto	101
A.2.	Comportamento “sol-gel” do asfalto	102
	ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO DO ASFALTO	103
	ANEXO C – <i>LINEAR AMPLITUDE SWEEP</i> (LAS)	105
C.1.	Varredura de Frequências	105
C.2.	Varredura de amplitudes	105
	ANEXO D – <i>MULTIPLE STRESS CREEP AND RECOVERY</i> (MSCR)	109

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país de dimensões continentais com predomínio do modo rodoviário no transporte de cargas e de pessoas. No entanto, apesar da importância das rodovias na integração nacional e economia do país, apenas 213.500 km são pavimentadas, o que representa 12,4% do total (CNT, 2022).

Segundo o Ministério dos Transportes, entre 2013 e 2022, o aumento da frota de veículos total no país foi de 41% (Brasil, 2023), ao passo que, no mesmo período, conforme dados do Sistema Nacional de Viação, houve um crescimento de apenas 2% da rede rodoviária pavimentada (DNIT, 2022), indicando que a extensão da malha rodoviária não acompanhou a demanda interna de transporte rodoviário. O desequilíbrio entre o número de veículos em circulação e a extensão de rodovias pavimentadas impõe uma maior solicitação sobre a infraestrutura, que tende a acelerar o processo de deterioração e o precoce surgimento de defeitos no pavimento. Diante deste cenário, considerando o elevado percentual de vias não pavimentadas e a demanda interna, constata-se a necessidade de ampliação da malha rodoviária pavimentada e de intervenções de manutenção mais frequentes das rodovias existentes.

Contudo, a construção de rodovias, em especial o pavimento, demanda um grande consumo de energia e de materiais, o que impacta negativamente nas condições ambientais do planeta e vai de encontro ao desenvolvimento sustentável. Assim, é necessário o conhecimento de técnicas que possam diminuir os impactos ambientais, mantendo a qualidade de serviço aceitável e ainda, com redução de os custos. A promoção da sustentabilidade de qualquer etapa da execução de obras rodoviárias tem o potencial de proporcionar benefícios ambientais, sociais e econômicos substanciais (Hu; Shu; Huang, 2019).

No Brasil, mais de 90% das rodovias são construídas em pavimento flexível, com revestimento e camada de ligação compostas por misturas asfálticas (CNT, 2022). O principal material utilizado nessas camadas é o ligante asfáltico, em especial o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), obtido a partir do refino do petróleo e outros asfaltos modificados. As características do asfalto afetam as propriedades mecânicas das misturas asfálticas com ele produzidas, e tem influência direta no comportamento reológico (Hunter; Self; Read, 2015).

Devido às cargas de tráfego e às intempéries as quais o pavimento está submetido em campo ao longo do tempo, as misturas asfálticas e seus componentes têm suas propriedades modificadas, como elevação da viscosidade, incremento da penetração, elevação da rigidez

e perda da ductilidade, resultantes do envelhecimento em serviço. Como consequência, ocorre a aceleração da deterioração e aparecimentos de defeitos como a fissuração térmica e o trincamento por fadiga (Li *et al.*, 2022). O processo de envelhecimento do asfalto está associado a diversos fatores, mas sobretudo devido à perda de componentes voláteis durante o processo de usinagem e a oxidação ao longo da vida de projeto (Sobreiro, 2014).

Ao final do ciclo de vida, o qual não necessariamente corresponde à vida do projeto, quando os defeitos são irreversíveis, em termos de desempenho funcional e estrutural, a solução típica a ser adotada é a reabilitação do pavimento. Diversas técnicas de reabilitação podem ser empregadas e dependem da avaliação funcional e estrutural do pavimento. As soluções mais simples de reabilitação se referem ao reestabelecimento da capacidade funcional do revestimento. Por outro lado, no caso de defeitos de maior severidade, a recomposição da capacidade varia desde a colocação de uma nova camada até a fresagem das camadas comprometidas, novo recapeamento e até mesmo reconstrução (DNIT, 2006).

Conforme terminologia adotada pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2007), fresagem é o “desbastamento a quente ou a frio de superfície asfáltica, como parte de um processo de reciclagem de pavimento asfáltico”. Os agregados e ligantes provenientes da fresagem de camadas deterioradas podem ser reutilizados na produção de novas misturas, a serem aplicadas na reabilitação de pavimentos comprometidos ou de novas rodovias. Esse material é denominado pavimento de asfalto recuperado (*Reclaimed Asphalt Pavement* – RAP) e seu aproveitamento está em consonância com as questões de sustentabilidade e redução nos custos.

O emprego do RAP para produção de misturas asfálticas possibilita a redução do consumo de agregados e ligantes virgens, para além de uma destinação ambientalmente adequada de materiais nobres, antes considerados resíduos que são descartados ou utilizados como revestimento primário de vias não pavimentadas (Nosetti *et al.*, 2018).

Entretanto, a quantidade de RAP incorporada nas misturas asfálticas tem sido limitada em até 30%, uma vez que percentuais mais elevados tendem a afetar as propriedades mecânicas (Chen *et al.*, 2021). Uma das causas é atribuída ao asfalto envelhecido presente no RAP, o qual, tende a sofrer um novo processo de envelhecimento durante a produção da nova mistura (por aquecimento), resultando em um revestimento suscetível a fissuras e trincas prematuras (Ali *et al.*, 2016; Hettiarachchi *et al.*, 2019).

Deste modo, uma alternativa para minimizar os problemas decorrentes do envelhecimento (asfalto contido no RAP) é o uso de agentes rejuvenescedores, que têm a função de reestabelecer as propriedades do asfalto envelhecido. Contudo, os agentes rejuvenescedores disponíveis são majoritariamente produtos comercializados, que geram

custos adicionais na produção das misturas asfálticas que podem desestimular a aplicação de RAP. Além disso, em geral, os produtos comerciais são óleos minerais ou aromáticos, sendo que o primeiro não é estável o suficiente com tendência à rápida volatilização; o que se torna indesejado, uma vez que a produção de misturas asfálticas requer temperaturas elevadas que propiciam a perda de componentes leves. Quanto aos aromáticos, foi verificada a presença de substâncias danosas ao meio ambiente e assim, não recomendado o uso. Assim, pesquisas têm desenvolvidas e alternativas propostas para o uso de agentes rejuvenescedores que possibilitam a incorporação de maiores teores de RAP sem prejuízo ao desempenho estrutural e ao meio ambiente (Yan; Peng; You, 2020).

Estudos recentes comprovaram que os óleos vegetais apresentam potencial como aditivos modificadores dos asfaltos podendo atuar como agentes rejuvenescedores, e ainda possibilitar a incorporação de percentuais mais elevados de RAP nas misturas asfálticas recicladas. Os aditivos comumente testados foram o óleo de cozinha (Leng; Chen; Wu, 2014; Zaumanis et al., 2014; Zaumanis; Mallick; Frank, 2014a, 2014b; Azahar et al., 2017; Zhang et al., 2017; Cao et al., 2018; Joni; Al-Rubaei; Al-Zerkani, 2019), novo e residual, óleo de mamona (Nayak; Sahoo, 2017; Souza, 2012; Zeng et al., 2018), algodão (NORAMBUENA-Contreras et al., 2018; Nogueira; Soares; Soares, 2019; Sun et al., 2020), girassol (Al-Mansoori *et al.*, 2017), linhaça (Cavalcante, 2016), milho (Portugal, 2016), pongamia (Nayak; Sahoo, 2017), tungue (Peng; You, 2020; Yan et al., 2021; Yan).

Cada país tem concentrado suas pesquisas em materiais disponíveis, passíveis de incorporação, priorizando a proteção do meio ambiente. Neste cenário, no Brasil, óleo de palma, conhecido como azeite de dendê, se insere como um material com potencial como uma agente rejuvenescedor. A palma, da qual é extraído o óleo, é uma das oleaginosas de maior produção e consumo no mundo (Ocampo Batlle *et al.*, 2020). Atualmente, a palma é uma cultura permanente que apresenta viabilidade no Brasil devido às condições climáticas e a sua alta rentabilidade.

O óleo de palma, é oriundo de uma palmeira nativa da África, que se adaptou de forma satisfatória nas regiões tropicais do planeta, inclusive no Brasil. A produção no país tem crescido devido subsídios e incentivos fiscais e, principalmente, após 2010 com o lançamento do Programa de Produção Sustentável da Palma de Óleo (Brasil, 2010), como parte da estratégia de estimular a produção de biocombustíveis e recuperar a vegetação de áreas degradadas.

A produtividade média do óleo de palma por área cultivada é superior às outras culturas agrícolas semelhantes. Quando comparada à soja, a palmeira pode ser até dez vezes mais produtiva e requer uma menor área plantada (Gabriel, 2015). No Brasil a área cultivada

é de 236.000 hectares, localizados principalmente nos Estados do Pará e Bahia (Geraque, 2021).

Considerando as pesquisas recentes realizadas com sucesso com óleos vegetais como agente rejuvenecedor de asfaltos envelhecidos, o óleo de palma possui potencial para este fim. Uma vantagem deste material em relação aos aditivos comercializados, pode ser atribuída ao fato de ter um baixo custo de produção e de obtenção e ainda, de fonte limpa e renovável. No Brasil, a cultura da palma está primordialmente voltada ao ramo de alimentação e de produção de biocombustíveis.

Tendo em vista a demanda nacional por agentes rejuvenecedores de baixo custo, a necessidade ambiental do uso de RAP e sendo o óleo de palma um produto de fácil obtenção e custo reduzido no Brasil, este trabalho propõe o estudo da viabilidade técnica deste material como agente rejuvenecedor de asfaltos envelhecidos. Esta é a principal lacuna científica de contribuição deste trabalho.

No estudo, desenvolvido em laboratório, foi avaliado o efeito que o óleo de palma possui no asfalto envelhecido, visando sua aplicação na produção de misturas com alto teor de RAP, melhoria da técnica de execução de pavimentos reciclados e um maior aproveitamento dos resíduos.

O estudo tem como base a avaliação do comportamento reológico quanto ao rejuvenescimento do Cimento Asfáltico do Petróleo (CAP) envelhecido, tipo CAP 50/70 classificado por penetração, modificado com variados teores de óleo de palma.

1.1. Objetivo geral

Analisar a viabilidade técnica do uso de óleo de palma como agente rejuvenecedor de um asfalto CAP 50/70 envelhecido, por meio de caracterização reológica.

1.2. Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- i. Avaliar o efeito do envelhecimento nas propriedades físicas e reológicas de um CAP 50/70;
- ii. Analisar o nível de recuperação das propriedades perdidas do asfalto devido ao envelhecimento após o rejuvenescimento com óleo de palma;

- iii. Determinar o teor ótimo de óleo de palma através da análise de amostras rejuvenescidas com óleo de palma em diversos teores;
- iv. Comparar a eficiência do aditivo proposto com um agente rejuvenescedor já disponível no mercado.

1.3. Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, cujos conteúdos são descritos a seguir.

O Capítulo 1, Introdução, apresenta uma contextualização acerca do tema, a importância e justificativa da pesquisa. Os objetivos e a estrutura do trabalho também são expostos.

No Capítulo 2, Revisão Bibliográfica, o estado da arte relacionado aos temas essenciais para o desenvolvimento do trabalho é apresentado, bem como resultados de trabalhos de outros autores inseridos na temática.

O Capítulo 3, Materiais e Método, a metodologia adotada é apresentada e descrita, apoiada em normas e literatura consultada que embasam o estudo.

No Capítulo 4, Resultados e Discussão, é apresentada a discussão acerca dos resultados obtidos neste trabalho.

O Capítulo 5, Conclusão, apresenta as conclusões obtidas por meio deste estudo bem como as sugestões para pesquisas futuras.

Nas Referências, consta a bibliografia citada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão de literatura com foco na aplicação de agentes rejuvenescedores em asfaltos envelhecidos. Outros temas descritos incluem o comportamento reológico, requisitos de especificação dos asfaltos e fenômeno de envelhecimento. Foram consultados artigos publicados em periódicos, teses e dissertações, cuja pesquisa realizada abrangeu a temática deste estudo, principalmente quanto ao rejuvenescimento de asfaltos por meio do uso de óleos vegetais e suas propriedades. Especial abordagem foi direcionada à descrição do óleo de palma, objeto de estudo deste trabalho.

2.1. O Asfalto

O asfalto é um material proveniente do refino do petróleo bruto, durante o processo de destilação, que consiste no fracionamento de seus componentes com base em faixas estabelecidas de pontos de ebulição (Hunter; Self; Read, 2015). A Tabela 1 mostra os principais produtos resultantes do refino da destilação do petróleo e os seus respectivos usos e aplicações.

Tabela 1. Frações do petróleo bruto e seus usos

Fração	Faixa de ponto de ebulição (°C)	Usos e aplicações
Gás	-160 a 30	Combustíveis gasosos
Gasolina	30 a 200	Combustível de motor
Querosene	180 a 400	Diesel e combustível de alto-forno
Lubrificantes	Acima de 350	Lubrificantes
Parafinas	Sólidos de baixa fusão	Velas, fósforos
Asfalto	Resíduos pastosos	Pavimentação

Fonte: Adaptado de Brown et al. (2016)

O asfalto deve atender e estar enquadrado em especificações para ser empregado na pavimentação. No Brasil, Agência Nacional do Petróleo (ANP) é responsável por estabelecer as especificações dos produtos derivados de petróleo, gás natural e biocombustíveis. O asfalto utilizado em pavimentação para produção de misturas asfálticas a quente é denominado Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), de acordo com a Resolução ANP nº 19/2005 (ANP, 2005).

Cerca de 85% dos ligantes asfálticos produzidos no mundo, em seus diversos tipos (emulsões, asfaltos convencionais ou modificados, asfaltos diluídos) são usados na

construção de rodovias e outras áreas pavimentadas (ruas e avenidas, pátios de estacionamento).

O asfalto, é considerado o principal componente de revestimentos asfálticos e de camadas de ligação de pavimentos flexíveis, uma vez que proporciona forte união dos agregados, é impermeabilizante, podendo ser utilizado em amplas combinações de esqueleto mineral (Hunter; Self; Read, 2015; Bernucci et al., 2022).

2.1.1. Composição química

Quanto à constituição química, o asfalto é composto de hidrocarbonetos com algumas espécies heterocíclicas e grupos funcionais contendo átomos de enxofre, nitrogênio e oxigênio e ainda, em menor quantidade, metais (níquel, vanádio, ferro, cálcio e magnésio), conforme apresentado na Tabela 2 (Hunter; Self; Read, 2015).

Tabela 2. Composição química do asfalto

Elemento	Proporção no asfalto (%)
Carbono	82 a 88
Hidrogênio	8 a 11
Oxigênio	0 a 1,5
Enxofre	0 a 6
Nitrogênio	0 a 1

Fonte: Adaptado de Hunter, Self e Read (2015)

A composição química varia de acordo com a fonte do petróleo bruto, do processo de refino e também durante a vida em serviço devido ao processo de envelhecimento. No entanto, a composição química do asfalto demanda equipamentos especiais, é complexa, trabalhosa e de difícil correlação com as propriedades de desempenho (Hunter; Self; Read, 2015; Bernucci et al., 2022).

Neste sentido, costumam ser adotadas abordagens simplificadas. Um exemplo é o fracionamento de acordo com a solubilidade, cujos componentes se enquadram em dois grupos, maltenos (que ainda se divide em saturados, aromáticos e resinas) e asfaltenos (Cravo, 2016).

Os asfaltenos são sólidos amorfos pretos ou marrons insolúveis em n-heptano contendo, além de carbono e hidrogênio, alguns átomos de nitrogênio, enxofre e oxigênio. São materiais aromáticos altamente polares e complexos de peso molecular bastante elevado. Os asfaltenos representam 5% a 20% do asfalto em peso e tem um efeito significativo nas

suas características reológicas. O aumento do teor de asfaltenos produz um asfalto mais duro e viscoso, com menor penetração e maior ponto de amolecimento (Lesueur, 2009; Hunter; Self; Read, 2015).

Os saturados geralmente representam de 5% a 15% do asfalto em peso. Eles formam um líquido incolor ou levemente colorido à temperatura ambiente e consistem em cadeias lineares e ramificadas de hidrocarbonetos alifáticos com poucos átomos polares ou anéis aromáticos presentes (Lesueur, 2009).

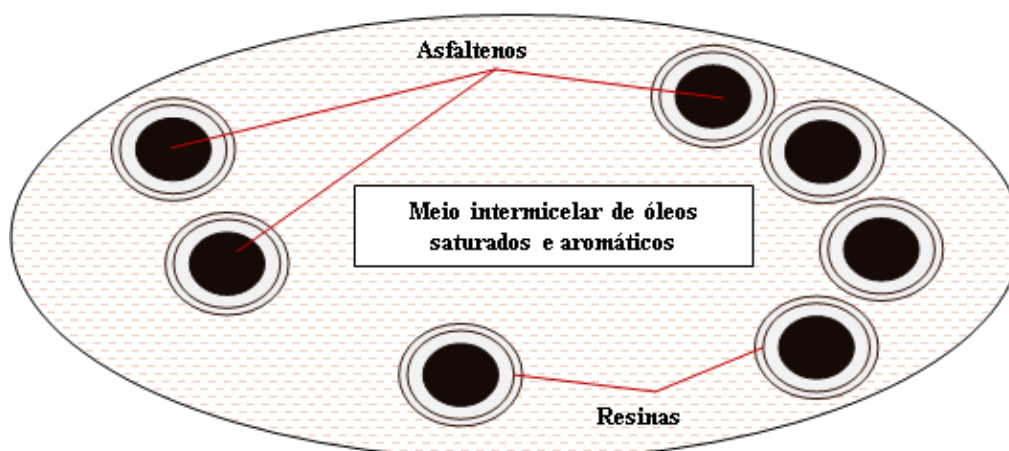
As resinas (30% a 45%), solúveis em n-heptano, são amplamente compostas de hidrogênio e carbono e contêm um pequeno número de átomos de oxigênio, enxofre e nitrogênio. Se apresentam na cor castanha escura, sólidas ou semissólidas e, sendo polares por natureza, fortemente adesivas, cuja fração no asfalto varia de em peso. A proporção de resinas em relação aos asfaltenos exerce influência, até certo ponto, no comportamento do asfalto como solução (sol) ou como gelatina (gel) (Lesueur, 2009; Hunter; Self; Read, 2015).

Os componentes aromáticos consistem em cadeias de carbono apolares ligadas a sistemas de anéis insaturados (aromáticos), sendo abundantes no asfalto, representando 40% a 65% da composição total em peso (Lesueur, 2009; Hunter; Self; Read, 2015).

2.1.2. Modelo da estrutura coloidal

O modelo de micelas ou modelo de Yen (Yen, 1991) representa as frações do asfalto em um sistema coloidal (Figura 1) no qual as micelas de asfalteno podem estar aglomeradas ou dispersas nos óleos maltenos (Özdemir, 2021).

Figura 1. Modelo de micelas da estrutura do asfalto



Fonte: Adaptado de Bernucci *et al.* (2022)

Na estrutura (Figura 1), as resinas atuam como agentes peptizadores, envolvendo os asfaltenos, permitindo a dispersão destes no meio intermicelar. O equilíbrio do sistema está relacionado às propriedades físicas e reológicas do asfalto (Cravo, 2016).

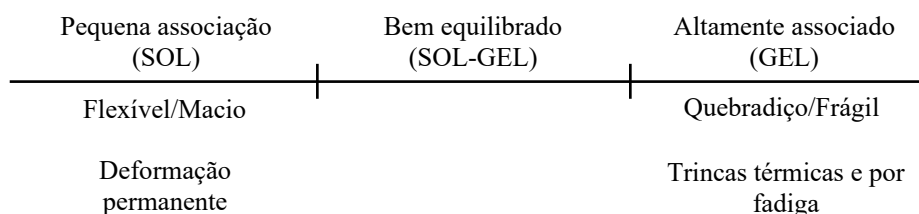
Na quantidade suficiente de resinas e aromáticos, os asfaltenos são totalmente peptizados e as micelas resultantes tem mobilidade dentro da estrutura caracterizando o sistema “sol” (Figura A.3, Anexo A). Por outro lado, se a fração resinas/aromáticos não for suficiente para peptizar os asfaltenos, os mesmos se associam, o que resulta no sistema “gel” (Figura A.4, Anexo A) (Hunter; Self; Read, 2015).

Cravo (2016) considerou que em um sistema “sol”, a estrutura apresenta a característica de um líquido newtoniano (comportamento viscoso), enquanto que em um sistema “gel”, as características são similares à de líquidos não newtonianos (comportamento elástico).

Entretanto, a maioria dos asfaltos apresentam o comportamento "sol-gel", caracterizada por aglomerados de micelas de asfaltenos dispostas em meio dispersante estruturado pelas resinas (El Beze, 2008; Lesueur, 2009).

Dependendo do caráter do sol ou gel, as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos diferem. Os asfaltos tipo sol apresentam maior suscetibilidade térmica, sendo mais moles, menos resistentes à aplicação direta das cargas, porém, mais suscetíveis ao retorno à posição original após aplicação da carga. Por outro lado, os asfaltos tipo gel são mais resistentes à ação das cargas, porém menos suscetíveis ao retorno, sendo, conseqüentemente, mais propensos à formação de trincas prematuras (Bernucci *et al.*, 2022). A Figura 2 ilustra um esquema relacionando as estruturas coloidais de asfaltos com o desempenho de pavimentos asfálticos.

Figura 2. Relação da estrutura do asfalto com o desempenho de pavimentos asfálticos



Fonte: Adaptado de Moraes (2014)

2.2. Reologia

Os conceitos de sólidos e líquidos possuem representação formal originada nas obras clássicas de Robert Hooke e Isaac Newton. Em 1676, Hooke introduziu o conceito de

elasticidade, que estabelece que na deformação de sólidos, a tensão é proporcional à deformação, e o coeficiente dessa proporcionalidade é denominado módulo de Young. Newton, em 1687, formulou uma proposta similar a respeito da viscosidade, a propriedade dos líquidos de resistir ao fluxo introduzido por cisalhamento. O pesquisador verificou que, em alguns fluidos, a taxa de deformação é proporcional à tensão e o coeficiente de proporcionalidade é a viscosidade (Malkin; Isayev, 2017).

Ambos os modelos constitutivos representam de forma adequada as propriedades de muitos materiais reais (sólidos e líquidos) e a descrição de seu comportamento. No entanto, existem muitos outros materiais que exibem, em determinadas temperaturas, comportamento de líquido e de sólido, não descritos através das leis de Newton e Hooke. A reologia contempla a avaliação de materiais não-newtonianos e não-hookeanos (Malkin; Isayev, 2017).

Reologia é o ramo da ciência que descreve a deformação e o fluxo de materiais, inter-relacionando força, deformação e tempo, através da qual é possível avaliar o comportamento de materiais líquidos perfeitamente viscosos e materiais sólidos ideais. Em especial, a avaliação reológica permite a caracterização de materiais viscoelásticos, como o asfalto, que possuem, em função da temperatura, uma combinação de propriedades viscosas e elásticas (Chandran, Sarathchandran; Thomas, 2019).

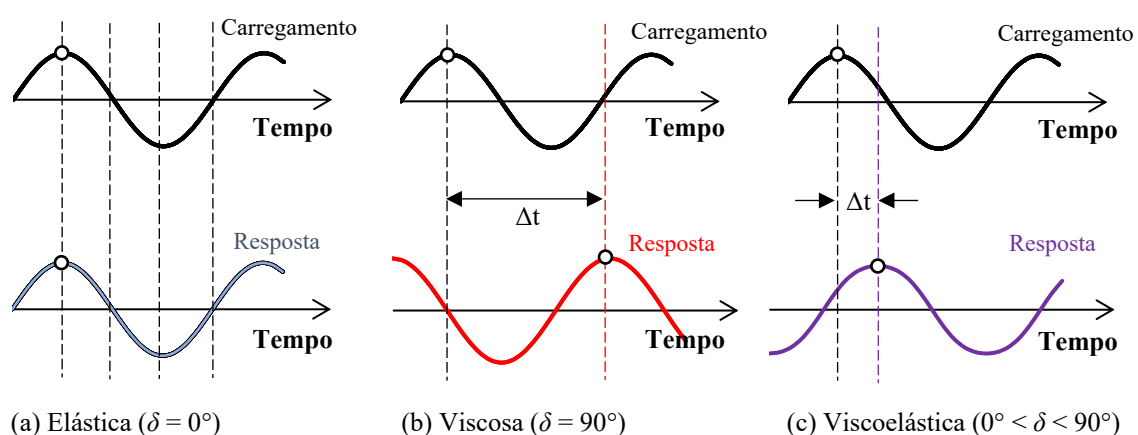
2.2.1. Comportamento reológico do asfalto

O asfalto é um material viscoelástico, pois ele não se comporta como sólido ideal e nem como líquido viscoso, mas como uma combinação entre esses dois extremos. Quando o asfalto é submetido a altas temperaturas e a carregamentos lentos (baixas frequências), seu comportamento é semelhante ao dos fluidos viscosos, enquanto que, ao ser submetido a baixas temperaturas e a carregamentos rápidos (altas frequências), o asfalto possui comportamento próximo ao dos sólidos elásticos (Faxina, 2006; Cavalcante, 2016).

A caracterização do asfalto por meio da reologia permite a previsão de desempenho por meio da avaliação das propriedades reológicas e a correlação com os defeitos das misturas asfálticas em campo, comumente avaliada em ensaios de carregamentos cíclicos senoidais (regime oscilatório). Os parâmetros obtidos são o módulo complexo de cisalhamento (G^*) e o ângulo de fase (δ). O parâmetro G^* representa a resistência total do material, definida como sendo a razão tensão/deformação, e o parâmetro δ representa o atraso da resposta ao carregamento aplicado (Cavalcante, 2016).

Em materiais perfeitamente elásticos (sólidos de Hooke), a tensão aplicada e a deformação resultante estão em fase, ou seja, δ é igual a 0° (Figura 3a). Para os fluidos que seguem a lei de Newton da viscosidade, a tensão aplicada e a deformação resultante estão fora de fase, com a resposta ao carregamento atrasada no tempo (Δt) e δ sendo igual a 90° (Figura 3b). Devido à natureza viscoelástica, o asfalto, nas temperaturas de trabalho em campo, se comporta entre esses dois extremos. Quando a tensão é aplicada, a deformação resultante não é imediata, sendo que a resposta está atrasada em relação ao carregamento e, neste caso, δ está entre 0 e 90° (Figura 3c).

Figura 3. Resposta ao carregamento aplicado

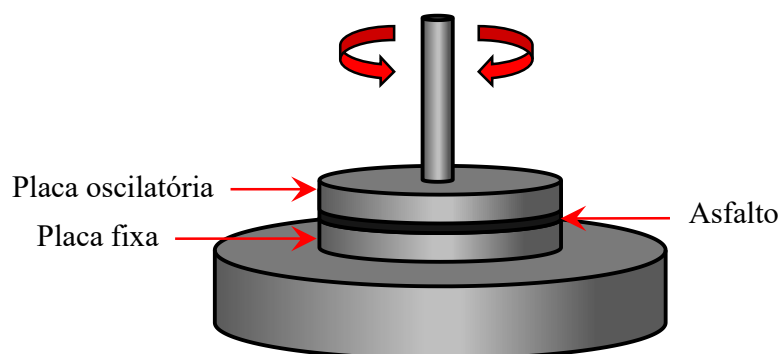


Fonte: Adaptado de *Asphalt Institute* (2011)

2.2.2. Caracterização reológica dos asfaltos

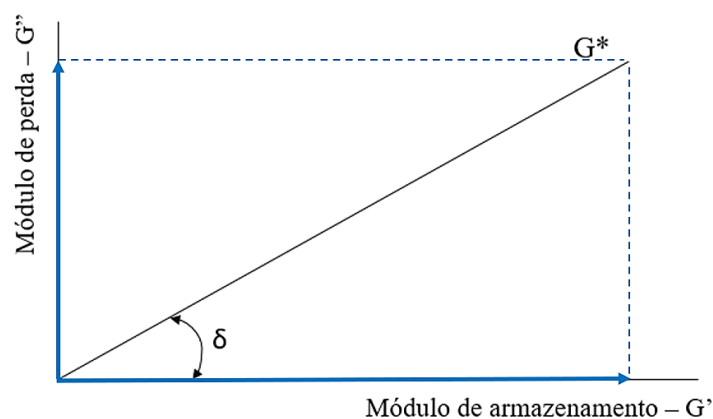
O equipamento mais utilizado para medir as propriedades reológicas do asfalto e os parâmetros G^* e δ é o reômetro de cisalhamento dinâmico (*Dynamic Shear Rheometer – DSR*), cujo ensaio pode ser realizado em dois modos, tensão ou deformação controlada, em uma dada frequência e temperatura. Em modo tensão controlada, o sistema de aplicação de carga aplica um torque à amostra, enquanto que, em deformação controlada, é aplicada uma deflexão angular na amostra (Mothé, 2009; Cravo, 2016).

A determinação dos parâmetros reológicos dos asfaltos segue a norma ASTM D7175 (ASTM, 2015). O procedimento consiste no posicionamento de uma amostra de asfalto entre duas placas paralelas, sendo que uma é fixa e a outra oscila na frequência de 10 rad/s (Figura 4), em uma dada temperatura, em amplitudes geralmente inferiores a 1° .

Figura 4. Esquema do procedimento do ensaio no DSR

Fonte: Adaptado de *Asphalt Institute* (2011)

O módulo complexo pode ser decomposto em duas componentes, o módulo de armazenamento (G') e o módulo de dissipação (G''). O módulo de armazenamento é a componente recuperável ou elástica, e representa a quantidade de energia armazenada em uma amostra a cada ciclo de carregamento. O módulo de dissipação ou dissipativo (ou de perda) é a componente não recuperável ou viscosa, e representa a energia perdida a cada ciclo de armazenamento (Roberts *et al.*, 1996). A Figura 5 apresenta a descrição gráfica das componentes de G^* .

Figura 5. Representação gráfica do módulo complexo e suas componentes

A representação matemática da relação entre o módulo dinâmico e suas componentes é descrita pelas Equações 1, 2 e 3.

$$G' = G^* \cos(\delta) \quad (1)$$

$$G'' = G^* \sin(\delta) \quad (2)$$

$$G^* = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2} \quad (3)$$

Em que: G^* é o módulo complexo; G' é o módulo de armazenamento; G'' é o módulo de perda e; δ é o ângulo de fase.

O ângulo de fase, δ , varia entre 0° e 90° e representa o atraso de tempo (Δt) entre a tensão aplicada e a deformação, resposta medida, cuja unidade é graus (Cravo, 2016). Quanto maior o seu valor, maior é a componente viscosa e menor é a componente elástica, e vice-versa. O módulo complexo pode ser escrito conforme a Equação 4. A norma do módulo complexo é denominada de módulo dinâmico.

$$G^* = G' + iG'' \quad (4)$$

Em que: i é a unidade imaginária, $\sqrt{-1}$.

2.3. Especificação do asfalto

2.3.1. Especificação brasileira

A especificação brasileira dos asfaltos empregados na pavimentação é baseada nas suas propriedades físicas, associadas à sua temperatura. Um dos critérios mais utilizados de classificação é a avaliação da sua suscetibilidade térmica, por ensaios que determinem, direta ou indiretamente, a consistência ou a viscosidade em diferentes temperaturas. Portanto, todos os ensaios realizados para medir as propriedades físicas dos asfaltos têm temperatura especificada e alguns também definem o tempo e a velocidade de carregamento, dada a sua natureza termoviscoelástica. As duas principais características utilizadas são: a “dureza”, medida através do ensaio de penetração, e a resistência ao fluxo, medida através de ensaios de viscosidade. Além destes, foram adicionados ao longo dos anos nas especificações alguns outros critérios, relacionados a ensaios empíricos, que a princípio, tentam avaliar indiretamente o desempenho futuro do asfalto nas obras de pavimentação. Tais ensaios podem ser categorizados entre ensaios de consistência, de durabilidade, de pureza e de segurança (Bernucci *et al.*, 2022).

No Brasil, o asfalto é classificado por penetração e denominado de Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). A Tabela C.1 (Anexo C) apresenta os requisitos da especificação (ANP, 2005). Apesar de constar quatro os tipos de asfalto na especificação brasileira (CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200), apenas o CAP 30/45 e o CAP 50/70 têm sido empregados na produção de misturas asfálticas. De acordo com a especificação, o indicador numérico se refere à faixa de penetração. Considerando a evolução das especificações

européias e norte-americanas, alguns ensaios foram incorporados, demonstrando uma possível tendência da migração para uma especificação baseada em ensaios de desempenho.

2.3.2. Especificação Superpave

O sistema de especificação *Superior Performing Asphalt Pavements* (Superpave) foi desenvolvido pelo *Strategic Highway Research Program* (SHRP) e é baseado em ensaios que se relacionam com o desempenho em campo. Na especificação, constam ensaios de determinação das propriedades reológicas do asfalto (NCHRP, 2017). Na especificação, os seguintes três estágios críticos do tempo de serviço do pavimento são simulados (Asphalt Institute, 2011):

- i. Primeiro estágio: transporte, manuseio e armazenamento do material;
- ii. Segundo estágio: envelhecimento durante os processos de mistura e compactação, simulado através do envelhecimento por meio do ensaio estufa de filme rotativo (*Rolling Thin-Film Oven Test – RTFO*);
- iii. Terceiro estágio: envelhecimento durante a vida em serviço, simulada no equipamento vaso de envelhecimento sob pressão (*Pressurized Aging Vessel – PAV*), cuja amostra é previamente envelhecida em curto prazo.

A Tabela 3 apresenta os equipamentos usados para realização dos ensaios constantes da especificação Superpave e a respectiva finalidade.

Tabela 3. Finalidade dos ensaios da especificação Superpave

Equipamento	Finalidade	Parâmetro de desempenho
RTFO ⁽¹⁾	Simula o envelhecimento do asfalto durante o processo de mistura e compactação	Resistência ao envelhecimento e rigidez durante a construção
PAV ⁽²⁾	Simula o envelhecimento do asfalto durante a vida em serviço	Resistência ao envelhecimento em campo
Viscosímetro Rotacional	Mede as propriedades do asfalto para temperaturas de construção altas e intermediárias	Facilidade de manuseio e bombeamento
DSR ⁽³⁾	Mede as propriedades do asfalto à temperaturas de serviço altas e intermediárias	Resistência à deformação permanente e fadiga
BBR ⁽⁴⁾	Mede as propriedades do asfalto à temperaturas de serviço baixas	Resistência à trincas térmicas

⁽¹⁾*Rolling Thin-Film Oven Test*; ⁽²⁾*Pressure Aging Vessel*; ⁽³⁾*Dynamic Shear Rheometer*; ⁽⁴⁾*Bending Beam Rheometer*

Fonte: Adaptado de NCHRP (2017)

Na especificação Superpave, os asfaltos são classificados de acordo com seu grau de desempenho (*Performance Grade* – PG) com base no clima e nas temperaturas as quais o pavimento estará submetido em serviço. Por exemplo, um PG 64 -22 significa que o grau de alta temperatura é 64°C e o grau de baixa temperatura é -22°C, e essa é a faixa de temperaturas para as quais o asfalto atende aos requisitos de desempenho (NHCRP, 2017). A determinação do grau PG do asfalto é preconizada pela ASTM D6373 (ASTM, 2021a). A Tabela A.2 do Anexo A apresenta a especificação Superpave para os asfaltos.

O programa SHRP definiu os parâmetros reológicos a serem observados na especificação Superpave que interferem no desempenho do material asfáltico no campo, os quais foram selecionados para controlar mecanismos de falência específicos do pavimento e são determinados nas temperaturas em que predominam (Faxina e Klinsky, 2017). Os principais parâmetros da especificação Superpave (ASTM D6373, 2021):

- i. Deformação permanente: material virgem com um valor mínimo de $G^*/sen(\delta)$ igual a 1,0 kPa, medido na temperatura máxima de projeto; o resíduo envelhecido (RTFO), com um valor mínimo de $G^*/sen(\delta)$ igual a 2,2 kPa, medido na temperatura máxima de projeto;
- ii. Fadiga: o Resíduo envelhecido (RTFO + PAV), com um valor máximo de $G^* \cdot sen(\delta)$ igual a 5,0 MPa, medido na temperatura intermediária de projeto;
- iii. Trincas térmicas: o Resíduo envelhecido (RTFO + PAV), com um valor máximo de rigidez igual a 300 MPa e um valor mínimo do módulo de relaxação igual a 0,30, medido na temperatura mínima de projeto acrescida de 10°C.

2.3.3. Limitação dos parâmetros reológicos da especificação Superpave

Posterior à implantação da especificação Superpave, estudos evidenciaram que os parâmetros de fadiga e deformação permanente estabelecidos apresentaram fraca correlação com o desempenho mecânico das misturas asfálticas, especialmente aquelas produzidas com asfaltos modificados. Bahia *et al.* (2001) comprovaram a fraca correlação entre o desempenho mecânico da mistura asfáltica e os parâmetros de predição de desempenho da especificação Superpave, $G^*/sen(\delta)$ para deformação permanente e $G^* \cdot sen(\delta)$ para a fadiga.

O parâmetro $G^*/sen(\delta)$ apresenta limitação na previsão da deformação permanente devido ao fato de ser obtido no ensaio com o DSR sob carregamento cíclico, ou seja, ocorre a reversão completa da deformação ou tensão aplicada, enquanto que o defeito de

deformação permanente no pavimento se dá devido ao carregamento cíclico irreversível (BAHIA *et al.*, 2001).

Quanto ao parâmetro $G^*.sen(\delta)$, Shenoy (2002) verificou que o parâmetro não é adequado para avaliar asfaltos por não se relacionar bem com o acúmulo de dano em misturas asfálticas. Segundo Faxina (2006), a ineficácia desse termo como parâmetro de fadiga se deve ao fato de ele ser determinado na região da viscosidade linear, para baixos níveis de deformação.

De modo a aferir a possível melhoria do uso de modificados e na busca por ensaios que pudessem prever o desempenho à fadiga e à deformação permanente das misturas asfálticas, de forma fidedigna a partir da avaliação dos asfaltos, novos ensaios foram desenvolvidos. Os ensaios para a previsão de desempenho, ambos realizados no DSR, são, o ensaio de Varredura de Amplitude Linear (*Linear Amplitude Sweep – LAS*) e o ensaio de Fluência e Recuperação sob Tensão Múltipla (*Multiple Stress Creep and Recovery – MSCR*).

Linear Amplitude Sweep – LAS

O ensaio *Linear Amplitude Sweep* (LAS) tem como objetivo avaliar o comportamento de fadiga do asfalto, pela aplicação de amplitudes de carga sistematicamente crescentes sob carregamento cíclico. De acordo com a norma AASHTO T 391 (AASHTO, 2020), o ensaio é realizado na temperatura intermediária de projeto (classificação Superpave), com a configuração de geometria das placas de 8 mm e *gap* de 2 mm, e com a amostra de asfalto envelhecida em curto e em longo prazo (RTFO + PAV). O procedimento é composto por duas partes, sendo as seguintes (SOUTHERN, 2015; AASHTO, 2020):

- i. Etapa 1 – Teste de varredura de frequência: consiste na realização de uma varredura de frequências de 0,2 Hz a 30 Hz, sob deformação constante de 0,1%. Esta etapa visa obter as propriedades reológicas do asfalto não danificado, representadas pelo parâmetro α .
- ii. Etapa 2 – Teste de varredura de amplitude: é realizada em cisalhamento oscilatório, no modo deformação controlada, a uma frequência de 10 Hz. A deformação é aumentada linearmente de 0,1% a 30% ao longo de 3100 ciclos de carregamento, de visando acelerar o dano na amostra. A deformação de cisalhamento de pico e a tensão de cisalhamento de pico são registradas a cada 10 ciclos de carga, juntamente com o ângulo de fase e o módulo de cisalhamento complexo.

A análise dos dados é realizada com base na teoria do Dano Contínuo Viscoelástico (*Viscoelastic Continuum Damage – VECD*), que possibilita a determinação dos parâmetros de fadiga A e B , utilizados no cálculo da vida de fadiga do material, conforme a Equação 5 (AASHTO, 2020).

$$N_f = A(\gamma_{m\acute{a}x})^B \quad (5)$$

Onde: N_f é o parâmetro de fadiga, $\gamma_{m\acute{a}x}$ é a deformação máxima esperada sofrida pelo asfalto e A e B são os parâmetros de fadiga obtidos a partir dos resultados do ensaio com o auxílio da teoria VECD. Detalhes adicionais do ensaio estão descritos no Anexo C.

Multiple Stress Creep and Recovery – MSCR

O ensaio *Multiple Stress Creep and Recovery* (MSCR) foi desenvolvido para predição do desempenho do asfalto à deformação permanente. O ensaio, normalizado pela AASHTO T 350 (AASHTO, 2019), é conduzido no DSR em amostras envelhecidas a curto prazo na configuração de 25 mm de diâmetro e *gap* de 1 mm na temperatura alta do grau PG. Durante o ensaio, é aplicada na amostra uma tensão constante de um segundo de duração, seguida de um período de repouso de nove segundos. São utilizados dois níveis de tensão (0,1 kPa durante os 20 primeiros ciclos e 3,2 kPa para os últimos 10 ciclos) (AASHTO, 2019).

No ensaio, determina-se a parcela de deformação não recuperável (J_{nr}) para cada nível de tensão ($J_{nr0,1}$ para o nível de tensão de 0,1 kPa e $J_{nr3,2}$ para o nível de tensão de 3,2 kPa) e ainda o valor da diferença relativa entre essas duas parcelas ($J_{nr-diff}$) (AASHTO, 2019). Detalhes adicionais do ensaio estão apresentados no Anexo D.

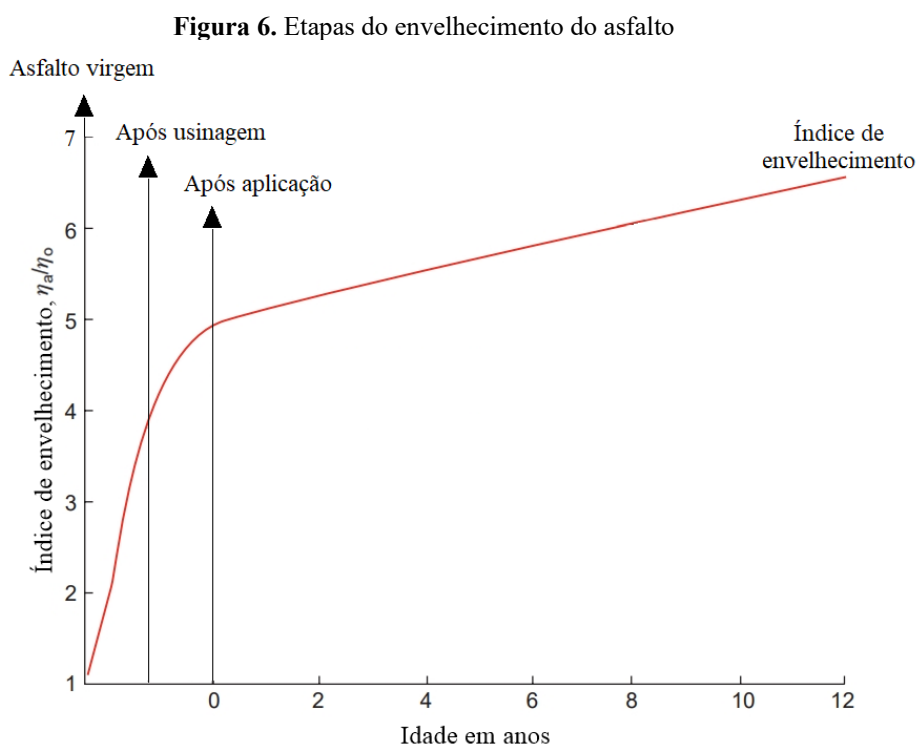
2.4. Processo de envelhecimento do asfalto

O envelhecimento do asfalto é um processo natural e complexo que pode afetar significativamente a qualidade e a durabilidade dos pavimentos asfálticos. Segundo o manual *The Shell Bitumen Handbook* (Hunter, Self; Read, 2015), o processo de envelhecimento ao qual o asfalto está submetido é comumente descrito em três etapas:

- i. Primeira etapa: ocorre durante a produção da mistura asfáltica, a qual representa aproximadamente 60% do total;

- ii. Segunda etapa: ocorre durante a estocagem, o transporte e aplicação da mistura, considerada 20% do total;
- iii. Terceira etapa: ocorre durante a vida útil da camada de revestimento em campo, relativa à exposição.

A Figura 6 ilustra as três etapas ao longo do tempo, representado através do índice de envelhecimento, dado pela razão η_a/η_0 (η_a é a viscosidade em uma dada condição de envelhecimento e η_0 é a viscosidade inicial do asfalto (Hunter, Self; Read, 2015).



Fonte: Adaptado de Hunter, Self e Read (2015)

Durante a produção de misturas asfálticas, o asfalto sofre envelhecimento devido às altas temperaturas utilizadas no processo de mistura. O envelhecimento causado pela usinagem da mistura asfáltica juntamente com a degradação do asfalto durante o armazenamento, transporte e estocagem, é comumente referido como envelhecimento de curto prazo. Os principais resultados do envelhecimento em curto prazo são a perda de voláteis e rápida oxidação do asfalto (Airey, 2007). O envelhecimento de longo prazo, por sua vez, ocorre ao longo da vida útil da estrada devido às interações do pavimento com o oxigênio na atmosfera, umidade, temperatura e radiação ultravioleta (Camargo *et al.*, 2020).

Domone e Illston (2010) acrescentaram que o envelhecimento que o asfalto está submetido durante o processo de usinagem é mais intenso em virtude das altas temperaturas

envolvidas na produção da mistura asfáltica. Isto porque, a fina película de asfalto que envolve os agregados está exposta a elevadas temperaturas. Por outro lado, durante a vida útil, o processo de envelhecimento ocorre mais lentamente porque as temperaturas são mais baixas e a disponibilidade de oxigênio é restringida pelo volume de vazios da mistura.

Vale ressaltar que a suscetibilidade de um material asfáltico ao envelhecimento depende do material de origem e do processo de usinagem. Bahia e Anderson (1995) complementam que a composição química do asfalto, as condições climáticas, o tipo de mistura, a graduação do agregado, o índice de vazios e a espessura do filme de asfalto são fatores que influenciam o envelhecimento.

São vários os mecanismos, causados por diferentes fatores ambientais, responsáveis pelo envelhecimento do asfalto, sendo os mais importantes (Mallick, Rajib, 2013):

- i. Oxidação: os componentes do ligante asfáltico oxidam e formam moléculas mais pesadas e complexas, aumentando sua rigidez e diminuindo sua flexibilidade. A taxa de oxidação é afetada pela temperatura e pela espessura do filme de ligante asfáltico, com temperatura mais alta e filmes mais finos facilitando a oxidação.
- ii. Volatilização: dependendo da temperatura e da superfície exposta, o ligante asfáltico perde componentes mais leves por volatilização (fração maltênica).
- iii. Endurecimento físico: fenômeno reversível geralmente atribuído a uma combinação de reorientação ou reestruturação de moléculas dentro do asfalto e a lenta cristalização de parafinas em temperatura ambiente.
- iv. Adsorção de óleos: resulta do movimento de componentes oleosos que são adsorvidos do asfalto para o agregado mineral, dependendo de sua natureza química, bem como da porosidade do agregado.

O processo de envelhecimento tem efeito na composição química e nas propriedades físicas no asfalto. Em relação à composição química, o que se observa é uma alteração nas frações do asfalto (SARA) após o envelhecimento. Lesueur (2009) observou esse fenômeno ao avaliar a proporção das frações químicas do asfalto, antes e após o envelhecimento. Segundo o autor, o envelhecimento resulta em uma diminuição do teor de aromáticos e subsequente aumento do teor de resinas, juntamente com um maior teor de asfaltenos. Os saturados permanecem essencialmente inalterados, devido à sua baixa reatividade química (Lesueur, 2009).

Enquanto os mecanismos de envelhecimento do asfalto do ponto de vista químico são complexos, seus impactos sobre o desempenho físico do pavimento são geralmente

compreendidos. O principal efeito observado é o enrijecimento (ou endurecimento) do asfalto e ocorre na superfície do pavimento, bem como na mistura no interior da camada de revestimento. Consequentemente, o asfalto se torna mais rígido e menos suscetível à deformações. Esse fenômeno precisa ser levado em consideração na escolha do asfalto a ser empregado, pois o endurecimento excessivo resulta em um asfalto mais quebradiço, aumentando assim o potencial de fissuração das misturas asfálticas (Airey, 2007; Mallick, Rajib, 2013).

O envelhecimento dos asfaltos, tanto em curto e longo prazo podem ser simulados em laboratório e são considerados processos essenciais para avaliar a durabilidade e desempenho desses materiais. Para simular o envelhecimento do asfalto em laboratório, os equipamentos mais utilizados são o *Rolling Thin-Film Oven Test* (RTFO) de envelhecimento de curto prazo e o *Pressure Aging Vessel* (PAV), para longo prazo.

No RTFO, o procedimento do ensaio consiste na exposição do asfalto em película fina, a altas temperaturas e sob a ação do oxigênio para representar o processo de usinagem e aplicação em campo. No PAV durante o ensaio o asfalto fica submetido a uma pressão elevada em um longo período de tempo (20 horas) para representar o envelhecimento em longo prazo, ou seja, durante sua vida útil (Raul, 2019).

As amostras dos resíduos provenientes do RTFO e RTFO + PAV são utilizadas para a realização de ensaios reológicos de desempenho. Embora sejam considerados ensaios clássicos para simulação de envelhecimento de asfalto e amplamente utilizados, algumas pesquisas mostraram que a simulação clássica (RTFO + PAV) não é capaz de simular de 8 a 10 anos de envelhecimento em serviço (Erskine; Hesp; Kaveh, 2012; Tauste et al., 2018; Osmari et al., 2019). Mouillet et al. (2016) afirmaram que o procedimento de longo prazo em laboratório normatizado pode não levar em conta a evolução real do envelhecimento sofrido em campo. Segundo Villegas-Villegas et al. (2018), a oxidação térmica simulada pelo PAV não é tão severa quanto a oxidação ambiental. O envelhecimento simulado tradicionalmente pelo método RTFO+PAV é deficiente em retratar a oxidação química do asfalto, pois não considera o efeito da radiação UV, que causa insaturação e aromaticidade no material. A radiação UV pode ser mais severa do que obtido no RTFO e PAV. Isso demonstra a ineficácia dos procedimentos térmicos na simulação do envelhecimento oxidativo que ocorre nos asfaltos sob condições ambientais (Oliveira, 2022).

Diversos pesquisadores têm procurado desenvolver ou adaptar os ensaios que possam simular adequadamente o envelhecimento de asfaltos a longo prazo. Dentre as alternativas existentes pode-se citar adaptações do procedimento do PAV com envelhecimentos de 40,

60 e 80 horas (Osmari *et al.*, 2019) ou mesmo adaptações no próprio RTFO com tempos de ensaio de 85, 170, 255 e até 340 minutos (Oliveira, 2022).

2.5. Rejuvenescimento do asfalto

O RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) é o material proveniente da fresagem de revestimentos asfálticos, constituído por agregados naturais cobertos por um filme asfalto envelhecido. O uso de RAP como material reciclado na pavimentação contribui para minimizar os impactos econômicos e ambientais, uma vez que reduz o consumo de agregados naturais e de asfalto, além de mitigar a os problemas relacionados ao transporte e destinação de resíduos (Masi *et al.*, 2022).

Historicamente, o RAP tem sido usado em misturas asfálticas novas por um processo de reciclagem de mistura a quente ou mistura a frio, após a fresagem da camada asfáltica. Porém, apesar da viabilidade técnica, econômica e ambiental, a quantidade de RAP a ser incorporada é limitada, devido à baixa qualidade de misturas asfálticas com alto teor de RAP (Thakur; Han, 2015).

Atualmente, o RAP é adicionado com sucesso na preparação de misturas asfálticas contendo até 30% de teor de RAP (Ji *et al.*, 2016; Chen *et al.*, 2021). A principal razão dessa limitação é o asfalto envelhecido contido no RAP, que torna as misturas com alto teor de RAP bastante suscetíveis à fadiga e ao trincamento prematuro, devido à elevada rigidez e fragilidade do asfalto envelhecido (Ali *et al.*, 2016).

Nos últimos anos, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de incorporar uma quantidade maior de RAP (até 100%) nas misturas asfálticas, através da adição de asfalto virgem ou de um rejuvenescedor que restaure as propriedades do asfalto envelhecido (Zaumanis *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2020a; Hugener *et al.*, 2022; Pradhan; Sahoo, 2022).

Os agentes rejuvenescedores são produtos com características químicas e/ou físicas especialmente produzidos para restaurar as propriedades dos asfaltos envelhecidos (Bernucci *et al.*, 2022). Os aditivos comercializados são, em geral, produtos que contém derivados do petróleo (Takahashi, 2020). Assim, é cada vez mais emergente a busca pela utilização de materiais oriundos de fontes renováveis que atuem como agentes rejuvenescedores.

Conforme se intensificou a reciclagem de misturas asfálticas, novos produtos vêm surgindo e, atualmente, existem diversos tipos de rejuvenescedores disponíveis no mercado provenientes de várias fontes (Tabela 4).

Tabela 4. Tipos de rejuvenescedores

Categoria	Exemplo	Descrição
Óleos parafínicos	Valero VP 165 [®] Storbit [®]	Óleos lubrificantes
Extratos aromáticos	Hydrolene [®] Reclamite [®] Cyclogen L [®] ValAro 130A [®]	Produtos petrolíferos refinados com componentes aromáticos polares
Óleos naftênicos	SonneWarmix RJ [™] Ergon HyPrene [®]	Hidrocarbonetos projetados para modificação do asfalto
Triglicerídeos e ácidos graxos	Delta S*	Derivado de óleos vegetais *Possui outros elementos importantes além de triglicerídeos e ácidos graxos
<i>Tall-oils</i>	Sylvaroad [™] RP1000 Hydrogreen [®]	Subprodutos da indústria do papel. Mesma família química de agentes adesivos líquidos e emulsionantes

Fonte: Adaptado de Willis e Tran (2015)

Os agentes rejuvenescedores atuam na restauração das propriedades dos asfaltos envelhecidos. Com o envelhecimento, os componentes aromáticos se convertem em resinas e as resinas em asfaltenos, simplificada, o que reduz a relação malteno/asfaleno do asfalto. Nesse caso, o agente rejuvenescedor atua no balanço dessa relação, através da reposição das frações maltênicas do asfalto perdidas com o envelhecimento (Bernucci *et al.*, 2022).

Como consequência, os agentes rejuvenescedores auxiliam na redução da viscosidade e da rigidez do asfalto envelhecido, e aumento da ductilidade. Por outro lado, o tipo e a quantidade e o tipo de rejuvenescedor devem ser estabelecidos de maneira adequada para que as propriedades do asfalto em temperaturas baixas e intermediárias sejam restauradas, sem afetar de forma significativa o desempenho do asfalto em altas temperaturas (Ali *et al.*, 2016; Baghaee; Moghaddam; Baaj, 2016).

Os efeitos que o rejuvenescimento do asfalto proporciona são o oposto do que ocorre no processo de envelhecimento. Em relação às frações químicas, os rejuvenescedores conduzem a uma redução do teor de asfaltenos e de resinas e a um aumento das frações aromáticas; com isso, o tamanho dos aglomerados de asfaltenos é reduzido e a mobilidade das moléculas é aumentada. O reflexo dessa mudança nas propriedades físicas, é a diminuição da viscosidade e da rigidez do asfalto, minimizando os efeitos relacionados à fadiga e ao trincamento prematuro (Zhang *et al.*, 2020b; Bernucci *et al.*, 2022). Estudos acerca dos efeitos do rejuvenescimento do asfalto são apresentados na seção a seguir.

2.6. Estudos acerca do uso de óleos vegetais como agentes rejuvenescedores

Como alternativa ao uso dos agentes rejuvenescedores convencionais, a busca por outros materiais que possam ser usados como aditivos, visando melhorar as propriedades do asfalto envelhecido se mostra necessária e importante.

Diversas pesquisas foram desenvolvidas acerca do rejuvenescimento do asfalto a partir da adição de óleos vegetais. O uso de óleos vegetais se apresenta como uma fonte limpa, sustentável e economicamente mais atrativa, que tem como finalidade primária a indústria de alimentos e o uso industrial, cuja prática foi comprovada por diversos autores no mundo (Chen et al., 2014; Zaumanis et al., 2014; Zaumanis; Mallick; Frank, 2014a; Cavalcante, 2016; Nayak; Sahoo, 2017; El-Shorbagy; El-Badawy; Gabr, 2019; Gökalp; Uz, 2019; Joni; Al-Rubae; Al-Zerkani, 2019; Li et al., 2019; Nogueira; Soares; Soares, 2019; Uz; Gökalp, 2020; Yan; Peng; You, 2020; Yuechao et al., 2022; Wang et al., 2023).

O óleo vegetal pode ser adicionado diretamente no ligante asfáltico (virgem ou envelhecido) ou após filtração das impurezas em suspensão (quando residual) ou utilizado após tratamento químico, que apresenta resultados aprimorados. O óleo vegetal é rico em ácidos graxos insaturados, que são análogos aos componentes de baixo peso molecular (maltenos) no asfalto (Azahar *et al.*, 2016, 2017).

Por meio da literatura consultada, foi observado que a penetração do asfalto envelhecido diminui após o rejuvenescimento com o óleo vegetal, enquanto que a viscosidade e o ponto de amolecimento aumentam (El-Shorbagy, El-Badawy e Gabr, 2019; Joni, Al-Rubae e Al-zerkani, 2019; Li *et al.*, 2019; Uz e Gökalp, 2020).

Isso indica que os óleos vegetais são capazes de promover a restauração das propriedades físicas de asfaltos envelhecidos, reabilitando-os parcialmente ou mesmo completamente. A Tabela 5 apresenta os efeitos da adição de óleos vegetais nas propriedades físicas dos asfaltos envelhecidos, conforme a literatura científica.

Quanto às propriedades reológicas, o óleo vegetal pode reduzir o módulo complexo (G^*) e aumentar o ângulo de fase (δ) do asfalto envelhecido para além do nível do asfalto virgem. Com a adição de óleos vegetais aos asfaltos envelhecidos, as pesquisas comprovaram que os parâmetros Superpave de desempenho de resistência à deformação permanente e de fadiga, $G^*/\sin(\delta)$ e $G^*\cdot\sin(\delta)$ respectivamente, retornaram aos valores medidos para o asfalto virgem com a adição de óleos vegetais (Chen et al., 2014; Nayak; Sahoo, 2017; Nogueira; Soares; Soares, 2019; Uz; Gökalp, 2020; Yan; Peng; You, 2020).

Tabela 5. Efeitos nas propriedades físicas do asfalto após rejuvenescimento com óleos vegetais

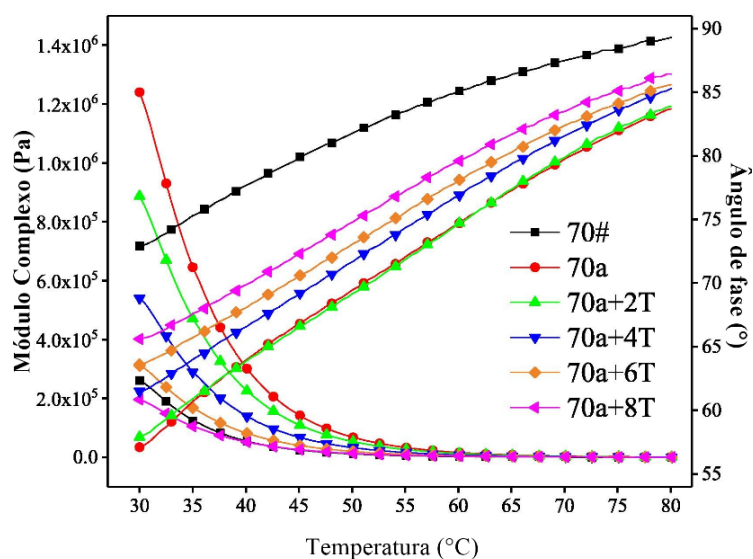
Asfalto	Óleo vegetal	% de óleo	Efeito do óleo		Visc.***	Resultado	Referência
			Pen.*	P.A.**			
CAP 50/70 e CAP SBS 55/75 Resíduo RTFO + PAV	Óleo de linhaça	4 a 6	Aumentou	Reduziu	Reduziu	O teor de 5% resultou na redução do poder oxidativo inerente ao aumento de temperatura durante a usinagem	Cavalcante (2016)
CAP 60/70 envelhecido em campo (16 anos)	Óleo de cozinha residual ¹	2 a 4	Aumentou	Reduziu	Reduziu	No asfalto extraído do RAP foi adicionado 2% e 3,5% de óleo para retornar ao valor original de penetração e ponto de amolecimento, respectivamente	El-Shorbagy, El-Badawy e Gabr (2019)
CAP 70/100 Resíduo RTFO + PAV	Óleo de cozinha residual	2 a 10	Aumentou	Reduziu	Reduziu	2% e 6% de óleo promoveram o retorno dos valores originais de penetração e ponto de amolecimento, respectivamente	Uz e Gökalp, (2020)
PEN70 convencional e modificado com SBS Resíduo RTFO + PAV	Óleo de tungue	2 a 8	Aumentou	Reduziu	Reduziu	6% a 8% de óleo de tungue para o asfalto convencional e 4% a 6% para o asfalto modificado com SBS retornarem as propriedades ao estado virgem	Yan, Peng e You (2020)

*Penetração. ** Ponto de amolecimento. *** Viscosidade aparente.

Yan, Peng e You (2020) analisaram o uso de óleo de tungue como agente rejuvenescedor. Os autores avaliaram o efeito do rejuvenescimento como o aditivo proposto em dois asfaltos envelhecidos em curto e em longo prazo em laboratório: um convencional (grau de penetração 70 dmm, denominado 70# para a condição virgem e, 70a para a condição envelhecida) e um modificado por polímero (SBS, assim denominado para a condição virgem e, SBSa para a condição envelhecida). As taxas de rejuvenescedor aplicadas foram de 2, 4, 6 e 8% em massa de asfalto (denominados pelo sufixo 2T, 4T, 6T e 8T, respectivamente). As Figuras 7 e 8 apresentam a variação do módulo complexo (G^*) e do ângulo de fase (δ) em função do teor de óleo de tungue aplicado, para o asfalto convencional e o asfalto modificado por polímero, respectivamente.

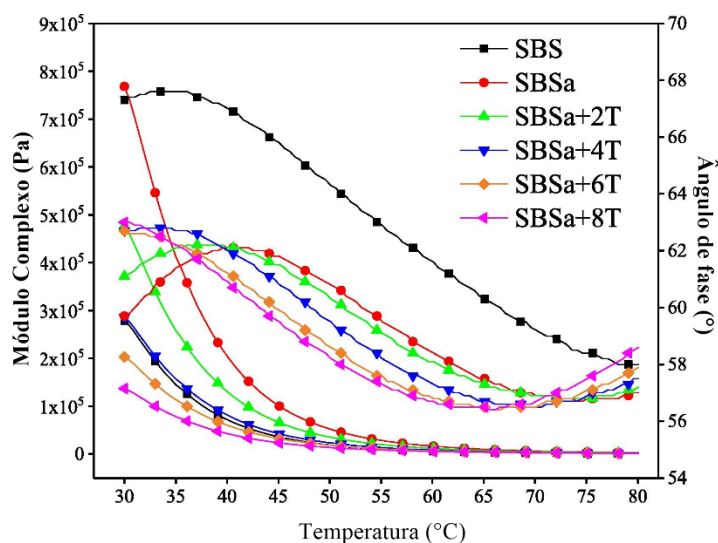
¹ Resíduo de óleo de cozinha (*Waste Cooking Oil* – WCO) proveniente de diferentes fontes de óleos de origem vegetal e/ou animal após fritura e/ou cozimento (Zahoor *et al.*, 2021).

Figura 7. Comportamento do módulo complexo e do ângulo de fase em função do teor de óleo adicionado para um asfalto convencional



Fonte: Adaptado de Yan, Peng e You (2020)

Figura 8. Comportamento do módulo complexo e do ângulo de fase em função do teor de óleo adicionado para um asfalto modificado por polímero (SBS)



Fonte: Adaptado de Yan, Peng e You (2020)

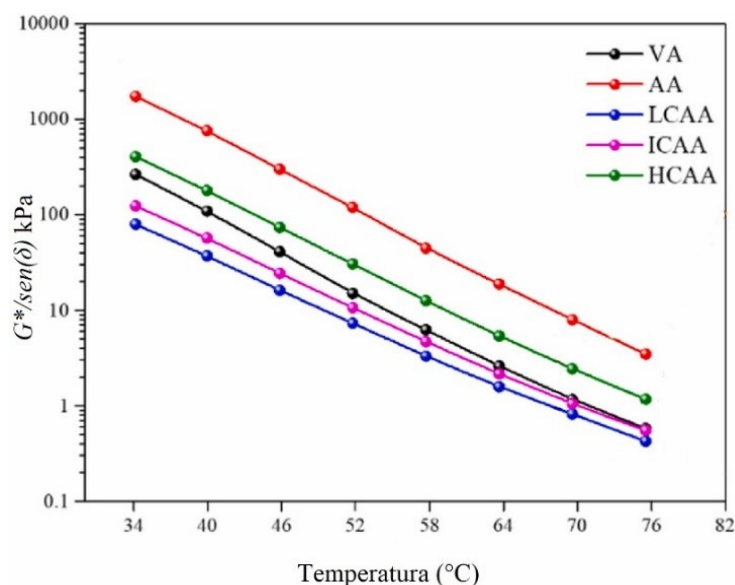
Os autores evidenciaram que tanto o ângulo de fase quanto o módulo complexo foram restaurados com a adição gradual do óleo de tungue ao asfalto envelhecido (convencional e modificado por polímero). Concluíram também que as proporções de 6% a 8% de óleo de tungue para o asfalto convencional e de 4% a 6% de óleo de tungue para o asfalto modificado por polímero (SBS) promoveram a recuperação das características em níveis semelhantes aos dos correspondentes asfaltos virgens.

Na literatura também foram encontradas pesquisas que asseveraram a contribuição dos óleos vegetais como agentes rejuvenescedores de asfaltos envelhecidos modificados quanto

ao do comportamento reológico com no que diz respeito à deformação permanente e à fadiga.

Yuechao et al. (2022) utilizaram três fontes de resíduo de óleo de cozinha como aditivos de rejuvenescimento. Os três diferiam entre si pelo peso molecular de seus componentes: componente leve, componente intermediário e componente pesado. O resíduo de óleo de cozinha é proveniente de diversos tipos de óleos de origem vegetal e/ou animal após o uso em frituras e/ou cozimento. Um asfalto convencional (grau de penetração 70 dmm) foi envelhecido em curto e em longo prazo em laboratório e, em seguida, rejuvenescido com 5% de óleo de cozinha. Os autores realizaram uma avaliação do comportamento reológico dos asfaltos rejuvenescidos. As Figuras 9 e 10 apresentam os resultados da análise dos parâmetros de desempenho Superpave quanto à deformação permanente e à fadiga dos asfaltos virgem, envelhecidos e rejuvenescidos com o resíduo do óleo de cozinha.

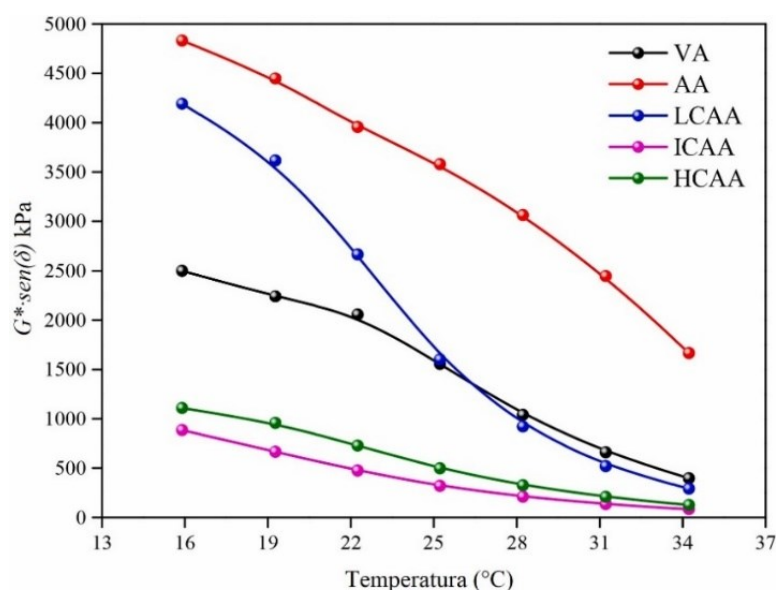
Figura 9. Valores de $G^*/\sin(\delta)$ para diferentes teores de óleo de cozinha residual



Legenda: VA - Asfalto virgem;
 AA - Asfalto envelhecido;
 LCAA - Asfalto rejuvenescido com o óleo de baixo peso molecular;
 ICAA - Asfalto rejuvenescido com o óleo de peso molecular intermediário;
 HCAA - Asfalto rejuvenescido com o óleo de alto peso molecular.

Fonte: Adaptado de Yuechao et al. (2022)

Figura 10. Valores de $G^* \cdot \sin(\delta)$ para diferentes teores de óleo de cozinha residual



Legenda: VA - Asfalto virgem;
 AA - Asfalto envelhecido;
 LCAA - Asfalto rejuvenescido com o óleo de baixo peso molecular;
 ICAA - Asfalto rejuvenescido com o óleo de peso molecular intermediário;
 HCAA - Asfalto rejuvenescido com o óleo de alto peso molecular.

Fonte: Adaptado de Yuechao et al. (2022)

A partir dos resultados, os autores verificaram que o envelhecimento do asfalto melhorou o desempenho dos asfaltos quanto à deformação permanente, mas resultou na diminuição do desempenho quanto à fadiga, o que é evidenciado pelo aumento dos valores de $G^*/\sin(\delta)$ e $G^* \cdot \sin(\delta)$, respectivamente. Foi observado que as três fontes de resíduo de óleo de cozinha foram capazes de retornar os parâmetros $G^*/\sin(\delta)$ e $G^* \cdot \sin(\delta)$ após sua incorporação no asfalto envelhecido, na proporção de 5%. Neste caso, ficou evidente que o peso molecular dos componentes do resíduo de óleo de cozinha tem influência nos resultados dos dois parâmetros, ou seja, os óleos com baixo peso molecular podem não ser desejáveis de se utilizar devido ao excesso da capacidade de amolecimento do asfalto na condição de temperaturas elevadas, reduzindo demasiadamente o desempenho à deformação permanente (Figura 9). Contudo, uma outra interpretação para esse resultado é que o óleo de baixo peso demandou uma menor quantidade para reduzir a rigidez do asfalto da mesma maneira que os óleos mais pesados.

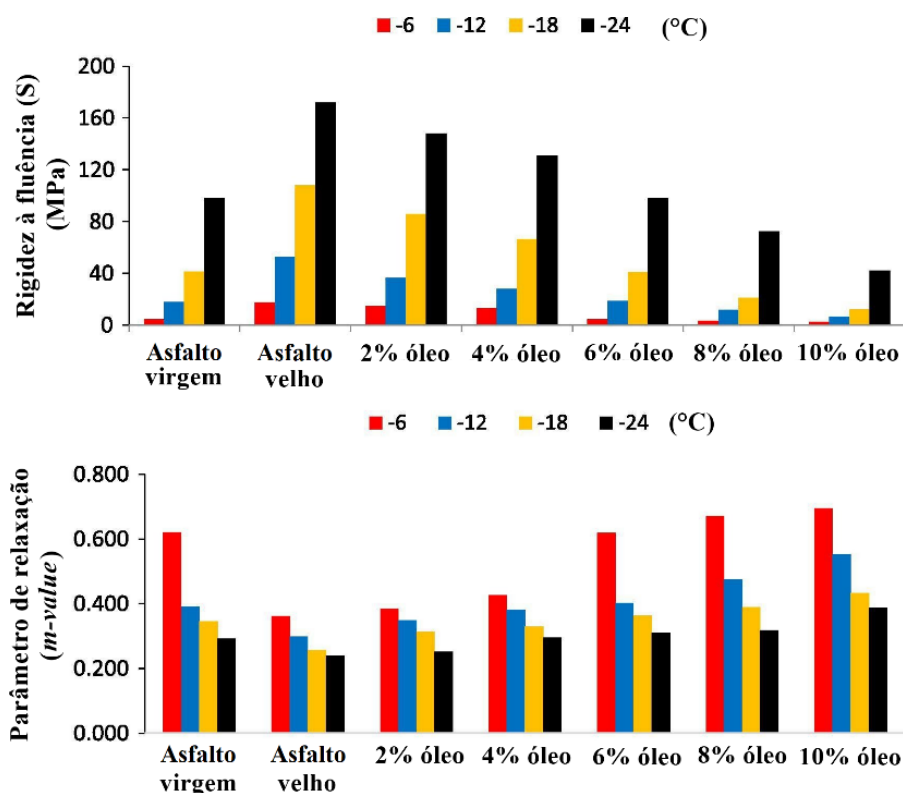
Em relação aos resultados obtidos para o parâmetro de predição do desempenho à fadiga (Figura 10), observou-se que o óleo mais leve foi o que promoveu a menor redução de rigidez do asfalto, de forma que, a restauração do parâmetro $G^* \cdot \sin(\delta)$ não foi similar ao do asfalto virgem. O resultado obtido não era o esperado, uma vez que os óleos de baixo peso molecular reduziram a rigidez do asfalto em um nível superior ao alcançado pelos óleos mais pesados, quando da análise do parâmetro de deformação permanente. Os autores

justificaram que essa contradição se deveu ao fato de que o ponto de solidificação do óleo mais leve está em torno de 25°C a 30°C, e que, portanto, abaixo dessas temperaturas, o resíduo de óleo de cozinha leve contribui para o enrijecimento do asfalto. Por este motivo que, com o aumento da temperatura, o fator de predição de fadiga, $G^* \cdot \sin(\delta)$, diminui rapidamente à medida que a temperatura do ensaio se aproxima do ponto de solidificação do óleo.

Nas condições de baixas temperaturas, o asfalto envelhecido apresenta uma maior suscetibilidade ao trincamento térmico prematuro, devido sua elevada rigidez (Bernucci *et al.*, 2022). Estudos verificaram que os óleos vegetais também promovem uma melhoria no comportamento do asfalto em baixas temperaturas, prolongando sua vida útil (Gökalp; Uz, 2019; Wang *et al.*, 2023; Yuechao *et al.*, 2022; Zaumanis *et al.*, 2014).

Gökalp e Uz (2019) utilizaram o resíduo do óleo de cozinha como agente rejuvenescedor de um asfalto convencional com grau de penetração 70/100, envelhecido em curto e em longo prazo em laboratório, em teores de 2, 4, 6, 8 e 10%. Os autores analisaram o comportamento dos asfaltos rejuvenescidos em baixas temperaturas através de ensaios conduzidos no reômetro de viga à flexão (*Bendig Beam Rheometer* – BBR). A Figura 11 apresenta os resultados obtidos em função do teor de óleo e da temperatura do ensaio.

Figura 11. Resultados do ensaio BBR conduzido para diferentes amostras de asfalto rejuvenescidas com resíduo de óleo de cozinha



Fonte: Adaptado de Gökalp e Uz (2019)

Os autores observaram que, com o incremento de resíduo de óleo de cozinha no asfalto envelhecido, houve um aumento no parâmetro de relaxação (*m-value*) e uma diminuição no módulo de rigidez à fluência (*S*), o que indicou haver uma melhoria da resistência à fissuração térmica com o aumento do teor do aditivo. Quanto maior a rigidez *S*, menor a capacidade do asfalto de absorver tensões, o que reduz a resistência ao trincamento e; quanto maior o valor de *m*, que mede a sensibilidade do asfalto à variação de temperatura, mais eficiente ele será na dissipação das tensões geradas durante a sua contração com a queda brusca da temperatura (Gökalp; Uz, 2019).

Através da revisão da literatura, verifica-se que os asfaltos envelhecidos melhoram seu desempenho em altas temperaturas, mas em temperaturas baixas e intermediárias sofre uma queda. Por isso que as misturas que contém RAP são mais resistentes à deformação permanente, porém mais suscetíveis à fadiga e à fissuração (Zaumanis; Mallick; Frank, 2014a). A adição dos óleos vegetais como agentes de rejuvenescimento, tende a melhorar o desempenho do asfalto envelhecido a temperaturas baixas e intermediárias, porém diminui a performance a altas temperaturas. Por esse motivo, a dosagem de rejuvenescedor deve ser adotada com cautela, observando os parâmetros de desempenho do asfalto.

2.7. Óleo de palma

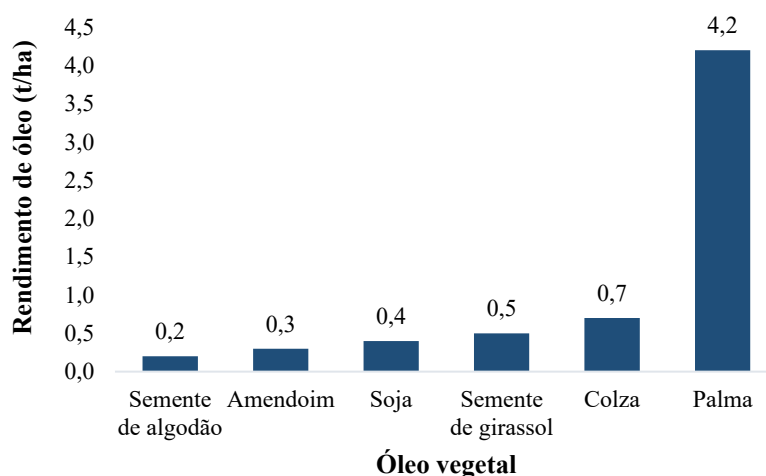
O óleo de palma é extraído da palmeira *Elaeis guineenses*, nativa da África e conhecida no Brasil como dendezeiro, sendo amplamente cultivada no continente de origem e no sudeste asiático, e totalmente adaptada nas regiões tropicais do planeta, como o Brasil. Este é o óleo vegetal de maior consumo no mundo, sendo também, o que tem o custo mais baixo em termos de produção por tonelada em comparação com outros óleos vegetais amplamente comercializados e importantes, como soja e colza, pois o rendimento na produção de óleo por área plantada é superior às demais culturas agrícolas (Dey *et al.*, 2021; Durango-Giraldo *et al.*, 2022). A Tabela 6 apresenta os óleos vegetais de maior produção mundial e a Figura 12 o rendimento por hectare do óleo de palma em comparação com outras culturas agrícolas.

Tabela 6. Principais óleos vegetais: produção mundial e custo médio

Óleo vegetal	Produção mundial (em milhões de toneladas)	Participação na produção mundial (%)
Palma	77,56	35,9%
Soja	59,27	27,4%
Colza	32,36	15,0%
Semente de girassol	20,58	9,5%
Amendoim	6,39	3,0%
Semente de algodão	4,95	2,2%
Outros*	15,16	7,0%
Total	216,27	

*Palmiste, Oliva, Coco

Fonte: Dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2023)

Figura 12. Rendimento da produção de diferentes oleaginosas

Fonte: Adaptado de Dey et al. (2021)

A produção de óleo de palma representa 35,9% da produção mundial, o que corresponde a cerca de 77,6 milhões de toneladas produzidas (Tabela 6). Isto se deve, principalmente, ao seu alto rendimento na produção de óleo por área cultivada, de aproximadamente 4,2 toneladas por hectare (Figura 12). O rendimento do óleo de palma é de 22% do peso dos cachos, ou seja, do peso total do fruto da palma, obtém-se 22% de óleo (Brasil, 2018).

Em relação aos custos de produção, o óleo de palma é o de menor custo. Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, o custo de produção do óleo de palma é até 22% menor que o óleo de soja, seu principal concorrente no mercado (USDA, 2023). Além do alto rendimento, outro fator que contribui para os menores custos de produção, é que o cultivo da palma requer menor quantidade de fertilizantes, água e pesticidas na plantação e cultivo (Dey et al., 2021).

Atualmente, os maiores produtores de óleo de palma são a Indonésia e a Malásia (USDA, 2023). No Brasil, o óleo de palma não possui grande relevância na cadeia produtiva em comparação com outros óleos vegetais, tais como o óleo de soja e de algodão, ocupando apenas a 10ª posição dentre os principais produtores, com uma média de 570 mil toneladas por ano (USDA, 2023). Contudo, a produção nacional aumentou ao longo dos últimos anos devido ao apoio governamental desde 2010, com o lançamento do Programa de Produção Sustentável da Palma de Óleo (PPSPO) disposto no Projeto de Lei 7.236/2010 (BRASIL, 2010), que estabeleceu diretrizes para o zoneamento agroecológico nacional para esta cultura. O PPSPO é um dos pilares que tem apoiado o desenvolvimento desta cultura no bioma amazônico de forma sustentável (Geraque, 2021).

A partir da palma, podem ser obtidos dois tipos de óleo: o óleo de palma bruto, extraído da polpa do fruto; e o óleo de palmiste, extraído da sua semente. Ambos são ricos em ácidos graxos, mas diferem entre si na proporção de ácidos graxos saturados e insaturados. No óleo de palmiste, os ácidos graxos saturados representam uma porção maior da fração total, sendo compostos de ácido láurico (50%), ácido mirístico (16%) e ácido palmítico (8%); o ácido oleico (15%) e o ácido linoleico (3%) compõem a fração insaturada. No óleo de palma, a proporção entre os ácidos graxos saturados e insaturados é aproximadamente igual, sendo o ácido palmítico (45%) e o ácido esteárico (5%) os componentes da fração saturada; e o ácido oleico (40%) e o ácido linoleico (10%) os componentes da porção insaturada (Daud; Kaur; Khosla, 2012).

As propriedades físico-químicas variam de acordo com a procedência do óleo e do processo de extração. A Tabela 7 apresenta valores típicos das propriedades físico-químicas do óleo de palma em comparação com outros óleos vegetais.

Tabela 7. Propriedades físico-químicas de alguns óleos vegetais

Propriedade	Nduka et al. (2021)				Awogbemi et al. (2019)	
	Óleo de palma	Óleo de soja	Óleo de amendoim	Óleo de palmiste	Óleo de palma	Óleo de girassol
Viscosidade, 40°C (mm ² /s)	N/A	N/A	N/A	N/A	27,962	28,744
Densidade, 20°C (g/ml)	0,911	0,918	0,911	0,916	0,919	0,919
Índice de peróxido (meq/kg)	0,014	0,005	18,000	29,000	N/A	N/A
pH	N/A	N/A	N/A	N/A	6,34	7,38
Peso molecular (g/mol)	N/A	N/A	N/A	N/A	535,08	670,82

Nota: N/A – Não aplicável

Cerca de 72% do óleo de palma produzido no mundo é usado no ramo da alimentação, sendo que no Brasil, o percentual é de 97%. Contudo, o óleo de palma também possui aplicações industriais, como em higiene e limpeza, lubrificantes e na produção de biocombustíveis (Brasil, 2018).

Neste contexto, considerando a disponibilidade do óleo de palma no país e a possibilidade de uso como agente rejuvenescedor de RAP de uma forma sustentável e de baixo custo, estes foram os principais fatores que motivaram o desenvolvimento deste estudo.

3. MATERIAIS E MÉTODO

Este capítulo apresenta os materiais utilizados e descreve o procedimento experimental adotado. Este estudo consiste na proposição de um aditivo biológico, o óleo de palma, como agente rejuvenecedor de asfaltos envelhecidos. Para isso, foram realizados diversos ensaios físicos e reológicos com amostras de um asfalto virgens, envelhecidas (em laboratório e em serviço) e rejuvenescidas.

3.1. Materiais

3.1.1. Asfalto convencional

Foi utilizado neste estudo um asfalto convencional CAP 50/70 como referência, classificado por penetração de acordo com a norma DNIT 095 (DNIT, 2006), cujas propriedades físicas são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Propriedades do asfalto convencional (CAP 50/70) utilizado neste estudo

Propriedade física	Unidade	Resultado	Método	Especificação**
Penetração, 100 g, 5 s, 25 °C	0,1 mm	59	ASTM D5	50 a 70
Ponto de amolecimento	°C	53	ASTM D36	≥ 46
Índice de Suscetibilidade Térmica	-	-0,07	-	-1,5 a 0,7
Viscosidade aparente*				
a 135°C, SP 21, 20 rpm	cP	322,5	ASTM D4402	≥ 274
a 150°C, SP 21, 50 rpm	cP	164	ASTM D4402	≥ 112
a 177°C, SP 21, 100 rpm	cP	62,5	ASTM D4402	57 a 285
Efeito do calor e do ar a 163 °C, 85 min (RTFO)				
Varição em massa	% massa	0,13	ASTM D2872	≤ 0,5
Aumento do ponto de amolecimento	°C	7,5	ASTM D36	≤ 8
Penetração retida	%	61	ASTM D5	≥ 55

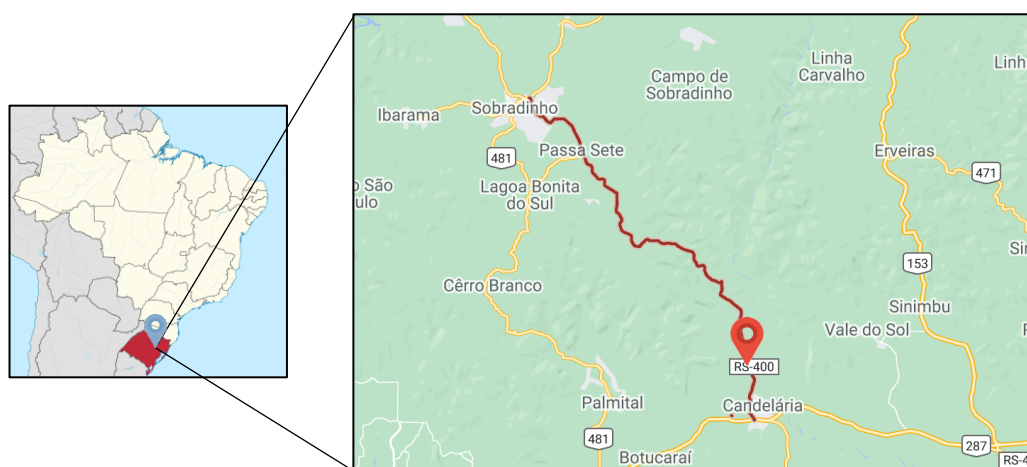
*Viscosímetro Brookfield; ** ANP (2005)

3.1.2. Asfalto envelhecido

O asfalto envelhecido, CAP 50/70, foi extraído de uma amostra de RAP, cujo revestimento esteve em serviço por 14 anos. O RAP é proveniente de um trecho da rodovia RS-400, km 8, no Rio Grande do Sul (Figura 13), extraído conforme a especificação europeia

EN 12697-3 (BSI, 2018) e cedido pelo Grupo de Pesquisas em Pavimentação e Segurança Viária (GEPPASV) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Figura 13. Local de origem do material fresado utilizado neste estudo



Fonte: Google Maps (2022)

A Tabela 9 apresenta as propriedades físicas do asfalto extraído do material fresado.

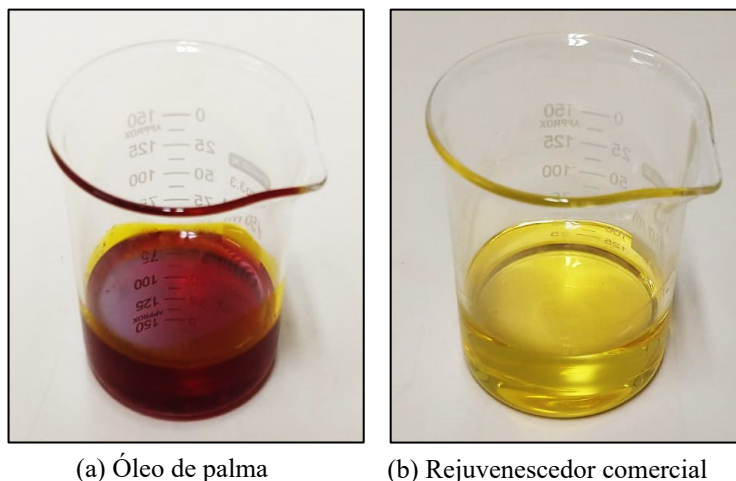
Tabela 9. Propriedades físicas do asfalto envelhecido extraído do material fresado utilizado neste estudo

Propriedade física	Unidade	Resultado	Método
Penetração, 100 g, 5 s, 25 °C	0,1 mm	7	ASTM D5
Ponto de amolecimento	°C	73	ASTM D36
Índice de Suscetibilidade Térmica	-	-1,2	-
Viscosidade aparente			
a 135°C, SP 21, 20 rpm	cP	757	ASTM D4402
a 150°C, SP 21, 50 rpm	cP	349	ASTM D4402
a 177°C, SP 21, 100 rpm	cP	103	ASTM D4402

3.1.3. Rejuvenescedores

Dois rejuvenescedores foram utilizados neste estudo, sendo o óleo de palma (Figura 14a) e um comercial (éster de poliálcool) (Figura 14b):

Figura 14. Rejuvenecedores utilizados. (a) Óleo de palma; (b) Éster de poliálcool



Quanto à obtenção dos agentes rejuvenecedores, tem-se o seguinte:

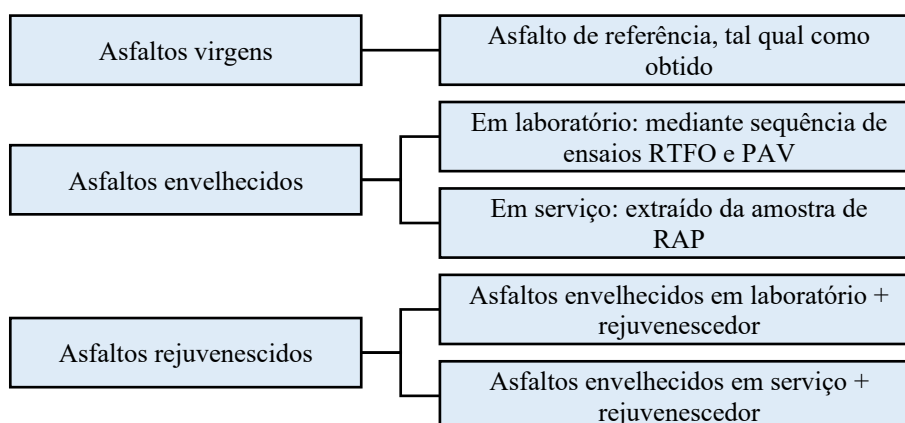
- Óleo de palma: no Brasil, seu principal uso é voltado à indústria alimentícia e produção de biocombustíveis. À temperatura ambiente se apresenta no estado líquido, possuindo uma cor avermelhada (Figura 14a). A amostra foi obtida no comércio local da cidade de Florianópolis, Santa Catarina.
- Rejuvenecedor comercial: é um aditivo comercializado especificamente para o rejuvenescimento de ligantes asfálticos. Trata-se de um aditivo de base biológica e feito de matérias-primas renováveis, sendo um líquido amarelo à temperatura ambiente (Figura 14b). O material foi fornecido por uma empresa que atua na produção de produtos químicos especializados. A Tabela 10 apresenta algumas das propriedades do rejuvenecedor comercial, fornecidas pelo fabricante.

Tabela 10. Propriedades do agente rejuvenecedor comercial

Propriedade	Valor	Método
Ponto de fulgor	> 200	ASTM D92
Viscosidade cinemática	23	ASTM D445
Viscosidade dinâmica	55	ASTM D2196
Densidade	0,92	ASTM D1475

3.2. Método

O método consistiu em realizar uma série de ensaios físicos e reológicos com amostras de asfalto virgens, envelhecidas e rejuvenescidas. O intuito foi obter as propriedades do

Figura 16. Amostras de asfalto analisadas

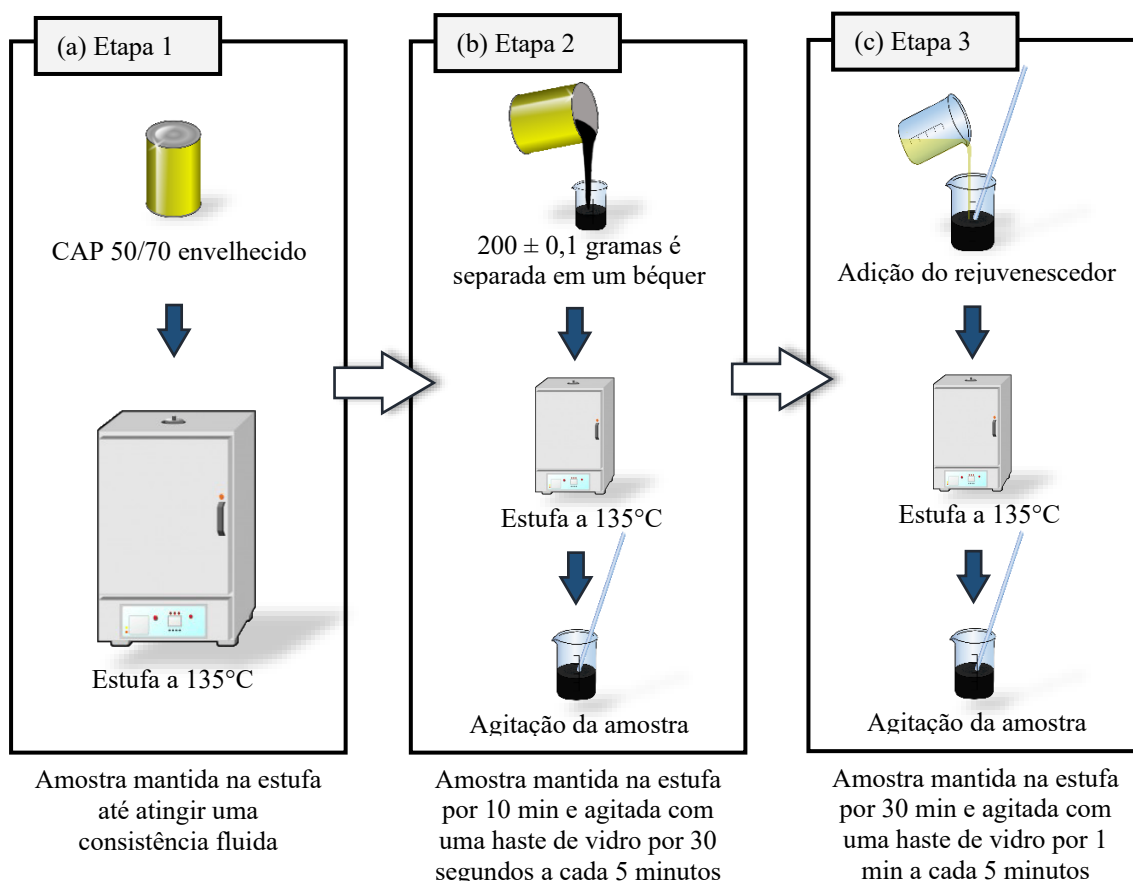
a) *Asfalto envelhecido em laboratório*

Em laboratório, o envelhecimento em curto prazo do asfalto virgem (CAP 50/70) foi simulado no equipamento *Rolling Thin-Film Oven Test* (RTFO), de acordo com a norma ASTM D2872 (ASTM, 2021b). Em seguida, o resíduo RTFO foi submetido à simulação do envelhecimento em longo prazo no equipamento *Pressure Aging Vessel* (PAV), conforme as especificações da norma ASTM D6521 (ASTM, 2019).

b) *Rejuvenescimento dos asfaltos envelhecidos*

A adição dos rejuvenescedores ocorreu manualmente de acordo com a ASTM D4887 (ASTM, 2016), que trata do procedimento de preparação de misturas asfálticas recicladas a quente para testes em laboratório. O procedimento adotado para o rejuvenescimento das amostras de asfalto é descrito a seguir:

- i. Etapa 1: A amostra envelhecida foi aquecida até que a sua consistência fosse completamente fluida, porém, não superior a 135°C (Figura 17a);
- ii. Etapa 2: Uma amostra, com massa entre $200 \pm 0,1\text{g}$ foi depositada em um béquer e condicionada em estufa em uma temperatura de 135°C por 10 min, sendo agitada com uma haste de vidro por 30 segundos a cada intervalo de 5 minutos (Figura 17b);
- iii. Etapa 3: O rejuvenescedor foi adicionado à amostra e a mistura foi mantida em estufa a 135°C por 30 minutos, sendo agitada com uma haste de vidro por 1 minuto a cada intervalo de 5 minutos (Figura 17c).

Figura 17. Procedimento adotado para o rejuvenescimento dos asfaltos envelhecidos

Foram selecionados cinco teores de óleo de palma, sendo, 2%, 4%, 6%, 8% e 10% de óleo de palma em relação à massa de asfalto. Essas porcentagens foram escolhidas com base na revisão de literatura. O objetivo foi analisar as propriedades de interesse dessas amostras para a determinação do teor ótimo de óleo de palma a ser incorporado para rejuvenescimento. A Tabela 11 apresenta a nomenclatura adotada neste estudo para as amostras de asfalto analisadas e a respectiva descrição.

Tabela 11. Nomenclatura adotada para os asfaltos produzidos em laboratório

Nomenclatura adotada	Descrição
AV	Asfalto virgem (referência)
AE	AV envelhecido mediante RTFO + PAV
AE2OP	AE + 2% de óleo de palma em massa
AE4OP	AE + 4% de óleo de palma em massa
AE6OP	AE + 6% de óleo de palma em massa
AE8OP	AE + 8% de óleo de palma em massa
AE10OP	AE + 10% de óleo de palma em massa

3.2.2. Caracterização das amostras de asfalto

Nesta etapa, foi realizada uma série de ensaios físicos e reológicos com as amostras de asfalto produzidas. A partir dos resultados dos ensaios obtidos nesta etapa foi possível estabelecer o teor ótimo de óleo de palma a ser incorporado no asfalto envelhecido.

a) Ensaios de caracterização física

Foram realizados os ensaios físicos de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade aparente, conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12. Ensaios de caracterização física

Ensaio	Método	Número de amostras ensaiadas
Penetração	ASTM D5	3
Ponto de amolecimento*	ASTM D36	3
Viscosidade aparente**	ASTM D4402	3

*Método anel e bola; **Viscosímetro Brookfield

b) Ensaios de caracterização reológica

A previsão de desempenho à fadiga e à deformação permanente dos asfaltos estudados (virgem, envelhecidos e rejuvenescidos) foi avaliada através de ensaios reológicos. Os ensaios foram realizados no reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) do laboratório de pavimentação da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), marca *TA Instruments*, modelo Discovery HR-2. Foram medidos os parâmetros G^* e δ , o grau de desempenho (PG) de alta temperatura, e determinados o desempenho quanto à fadiga e à deformação permanente pelos testes LAS e MSCR. No DSR, o controle do equipamento e o processamento dos dados de saída dos ensaios foram realizados através do *software* “Trios”. A Tabela 13 apresenta os ensaios reológicos realizados, as normas seguidas e a condição de cada ensaio (temperatura, geometria das placas e gap). Em seguida, foi apresentada uma breve descrição do procedimento empregado em cada um dos ensaios.

Tabela 13. Resumo dos ensaios reológicos no DSR

Ensaio	Norma	Temperatura (°C)	Diâmetro das placas (mm)	Gap (mm)	Nº de amostras de asfalto
PG	ASTM D6373 (2021)	52-76* e	25* e	1* e	3
		16-37**	8**	2**	
MSCR	AASHTO T 350 (2019)	58***	25	1	3
LAS	AASHTO T 391 (2020)	19****	8	2	3

*Temperaturas altas; **Temperaturas intermediárias; ***Temperatura alta do grau PG; ****Temperatura intermediária do grau PG

Performance Grade (PG)

O grau de desempenho PG foi determinado conforme as diretrizes da norma ASTM D6373 (ASTM, 2021). A configuração do ensaio foi com *gap* de 1 mm e placas de 25 mm de diâmetro. A frequência do carregamento foi de 10 rad/s (aproximadamente 1,59 Hz) e o intervalo de temperaturas adotado foi de 52°C a 76°C para as temperaturas altas e de 16°C a 37°C para temperaturas intermediárias. O desempenho de baixa temperatura não foi avaliado, considerando o clima do Brasil.

A partir deste ensaio obteve-se, em função da temperatura, o módulo complexo (G^*) e o ângulo de fase (δ), além dos parâmetros da especificação Superpave de deformação permanente e fadiga, $G^*/sen(\delta)$ e $G^* \cdot sen(\delta)$, respectivamente.

Linear Amplitude Sweep (LAS)

O ensaio LAS seguiu as diretrizes da norma AASHTO T 391 (AASHTO, 2020), visando avaliar a predição do desempenho à fadiga das amostras de asfalto. Nos ensaios, foram usadas placas de 8 mm de diâmetro com *gap* de 1 mm. A temperatura de execução do ensaio foi a intermediária do asfalto virgem (referência), definida com base no parâmetro $G^* \cdot sen(\delta)$ da especificação Superpave ($G^* \cdot sen(\delta) \leq 5,0$ MPa para amostras de asfalto envelhecidas em curto e em longo prazo).

O procedimento consiste em aplicar uma deformação que aumenta linearmente ao longo do ensaio (0,1% a 30%) para acelerar o dano na amostra de asfalto. O parâmetro utilizado para avaliar o comportamento quanto à fadiga dos asfaltos foi o número de ciclos até a falha (N_f).

Detalhes adicionais do método do ensaio conforme a norma AASHTO T 391 (AASHTO, 2020), são apresentados no Anexo C.

Multiple Stress and Creep Recovery (MSCR)

Os ensaios MSCR foram realizados segundo a norma AASHTO T 350 (AASHTO, 2019). O objetivo desse ensaio é avaliar a predição de desempenho dos asfaltos quanto à deformação permanente. A configuração do ensaio no DSR foi um *gap* de 1 mm e placas com 25 mm de diâmetro. A temperatura do ensaio foi a alta temperatura do grau PG do asfalto virgem (referência), definida com base no parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ da especificação Superpave ($G^*/\sin(\delta) \geq 1,0$ kPa para as amostras de asfalto na condição virgem e $G^*/\sin(\delta) \geq 2,2$ kPa na condição pós RTFO).

O ensaio consistiu em submeter amostras de asfalto em ciclos de deformação por 1 segundo de carga seguidos de 9 segundos de recuperação. Foram realizados 20 ciclos no nível de tensão de 0,1 kPa seguidos de 10 ciclos de 3,2 kPa.

A partir dos ensaios, foram obtidos os valores de compliância não recuperável (J_{nr}) para os dois níveis de tensão (0,1 kPa e 3,2 kPa), $J_{nr0,1}$ e $J_{nr3,2}$, respectivamente, além da diferença percentual entre eles ($J_{nr,diff}$). Além disso, os resultados dos ensaios MSCR possibilitaram a classificação dos asfaltos quanto ao nível de tráfego de acordo com a norma AASHTO M332 (AASHTO, 2020): extremamente pesado ($J_{nr3,2} < 0,5$ kPa⁻¹), muito pesado ($0,5$ kPa⁻¹ < $J_{nr3,2}$ < $1,0$ kPa⁻¹), pesado ($1,0$ kPa⁻¹ < $J_{nr3,2}$ < $2,0$ kPa⁻¹) e padrão ($2,0$ kPa⁻¹ < $J_{nr3,2}$ < $4,5$ kPa⁻¹).

O método do ensaio, conforme a norma AASHTO T350 (AASHTO, 2019) está apresentado com detalhes no Anexo D.

3.2.3. Determinação do teor ótimo de óleo de palma

O critério para determinação do teor ótimo de óleo de palma ($X_{\acute{o}tm}$) foi baseado nas propriedades reológicas das amostras de asfalto. Sendo assim, nesta etapa, determinou-se um modelo matemático para cada resposta de interesse em função do teor de óleo de palma: o PG verdadeiro (alto) obtido no ensaio de varredura de temperaturas a 10 Hz; os parâmetros de desempenho da especificação Superpave, $G^*/\sin(\delta)$ e $G^*\cdot\sin(\delta)$; o número de ciclos N_f obtido pelo ensaio LAS, a 1,25%, 2,5% e 5% de deformação; o fator de fadiga do ligante (FFL) obtido pelo ensaio LAS e; a compliância não recuperável J_{nr} obtido pelo ensaio MSCR, a 3,2 kPa.

A dosagem ótima de óleo de palma foi definida como sendo o teor de óleo adicionado capaz de retornar as propriedades das amostras envelhecidas ao nível do asfalto virgem

(referência) ou além dele. Dessa forma, os critérios de seleção estabelecidos foram os seguintes:

- i. teor máximo de óleo de palma que pode ser aplicado sem que a amostra rejuvenescida tenha suas propriedades a altas temperaturas diminuídas para valores inferiores às do asfalto virgem.
- ii. teor mínimo de óleo de palma para o qual a amostra rejuvenescida possua suas propriedades a temperaturas intermediárias superiores às do asfalto virgem.

Para a análise da dosagem do óleo de palma, foram utilizados *Blending Charts*. Os *Blendig Charts* são comumente utilizados para dosagem de RAP em misturas recicladas; podem ser descritos, de maneira simplificada, como uma relação entre os valores de alguns parâmetros (grau PG, penetração, viscosidade, etc.) em função das porcentagens de RAP ou agente rejuvenescedor (Shirodkar *et al.*, 2013). Os *Blendig Charts* foram construídos a partir de cada um dos resultados dos parâmetros reológicos obtidos, resumidos da Tabela 14.

Tabela 14. Critérios de seleção do teor ótimo de óleo de palma

Resposta – $Y_i(x)$ ⁽¹⁾	Parâmetro reológico	Ensaio	Critério
$Y_1(x)$	PG verdadeiro (alto)	PG	\geq PG verdadeiro (AV) ⁽²⁾
$Y_2(x)$	$J_{nr3,2}$	MSCR	$\leq J_{nr3,2}$ (AV) ⁽²⁾
$Y_3(x)$	$G^*/sen(\delta)$	PG	$\geq G^*/sen(\delta)$ (AV) ⁽²⁾
$Y_4(x)$	$G^* \cdot sen(\delta)$	PG	$\leq G^* \cdot sen(\delta)$ (AV) ⁽²⁾
$Y_5(x)$	$N_{f-1,25}$	LAS	$\geq N_{f-1,25}$ (AV) ⁽²⁾
$Y_6(x)$	$N_{f-2,5}$	LAS	$\geq N_{f-2,5}$ (AV) ⁽²⁾
$Y_7(x)$	N_{f-5}	LAS	$\geq N_{f-5}$ (AV) ⁽²⁾
$Y_8(x)$	FFL	LAS	$\leq FFL$ (AV) ⁽²⁾

⁽¹⁾ Teor de óleo de palma; ⁽²⁾ Asfalto virgem

3.2.4. Comparação do óleo de palma com o agente rejuvenescedor comercial

Nesta última etapa, o asfalto extraído do RAP foi rejuvenescido com o óleo de palma e o com o agente rejuvenescedor comercial (AR). Em ambos os casos, o teor de rejuvenescedor aplicado foi o teor recomendado pelo fabricante², calculado com base nas

² O fabricante do AR fornece uma ferramenta, em formato .xlsx (Excel), em que são fornecidas as temperaturas altas, baixas e intermediárias do asfalto envelhecido e de um asfalto de referência e, o cálculo da dosagem é feito automaticamente, para cada uma das três temperaturas.

propriedades de temperatura intermediária do asfalto de referência, um CAP 50/70 (asfalto extraído do RAP quando virgem), através da Equação 6:

$$X(\%) = \frac{T_{crit,RAP} - T_{crit,Ref}}{2} \quad (6)$$

Onde: $T_{crit,RAP}$ é a temperatura crítica do RAP (alta, baixa ou intermediária) e $T_{crit,Ref}$ é a temperatura crítica do asfalto de referência (alta, baixa ou intermediária).

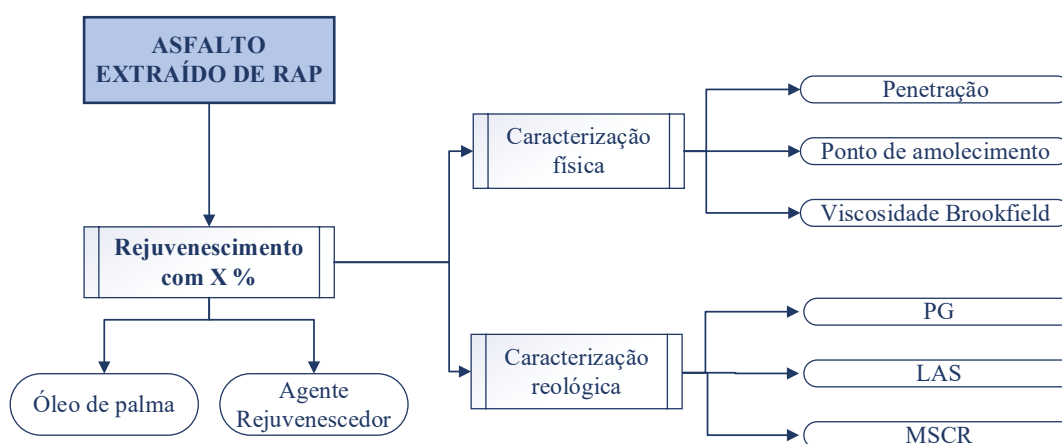
A Tabela 15 apresenta a nomenclatura das amostras de asfalto rejuvenescidas com os dois aditivos.

Tabela 15. Nomenclatura das amostras de asfalto envelhecida e rejuvenescida com o óleo de palma e o agente rejuvenescedor

Nomenclatura adotada	Descrição
A_{RAP}	Asfalto recuperado do RAP
$A_{RAP} + X\% \text{ OP}$	Asfalto recuperado + X% de óleo de palma
$A_{RAP} + X\% \text{ AR}$	Asfalto recuperado + X% de agente rejuvenescedor

Os efeitos da modificação com os dois aditivos nas propriedades do asfalto extraído do RAP foram analisados através dos ensaios descritos na seção 3.2.2 (Tabelas 12 e 13) e esquematizados no fluxograma da Figura 18.

Figura 18. Procedimento adotado para comparação entre o óleo de palma e o agente rejuvenescedor



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir do procedimento experimental adotado. Inicialmente, foram discutidos os efeitos do envelhecimento e do rejuvenescimento com óleo de palma nas propriedades físicas do asfalto. Em seguida, foram discutidos e avaliados os resultados obtidos com foco nas propriedades reológicas. Na sequência, foram abordados os critérios estabelecidos para escolha do teor ótimo de óleo de palma, a partir dos parâmetros reológicos das amostras de asfalto analisadas. Por fim, foi feita a comparação do óleo de palma com o agente rejuvenescedor (Éster de poliálcool), ambos atuando em um asfalto envelhecido em serviço.

4.1. Efeito nas propriedades físicas

As propriedades físicas analisadas foram a penetração, ponto de amolecimento e viscosidade aparente. As propriedades físicas do asfalto após o envelhecimento (curto e em longo prazo) em laboratório são apresentadas na Tabela 16, comparativamente às propriedades no estado virgem.

Tabela 16. Propriedades físicas do asfalto envelhecido em curto e em longo prazo e do asfalto virgem

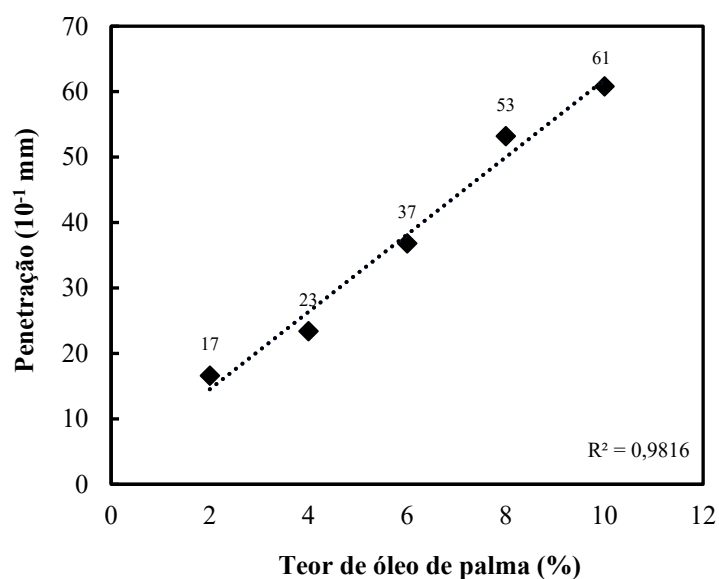
Propriedade física	Unidade	Asfalto virgem	Asfalto envelhecido*	Variação	Método de ensaio
Penetração, 100 g, 5 s, 25 °C	0,1 mm	59	10	- 83%	ASTM D5
Ponto de amolecimento	°C	53	60	+ 13%	ASTM D36
Viscosidade aparente					
a135°C, SP 21, 20 rpm	cP	322,5	780	+ 142%	ASTM D4402
a 150°C, SP 21, 50 rpm	cP	164	351	+ 114%	ASTM D4402
a 177°C, SP 21, 100 rpm	cP	62,5	116	+ 86%	ASTM D4402

* Resíduo RTFO + PAV

A partir dos resultados, observou-se que o envelhecimento resultou no endurecimento físico do asfalto, verificado pela diminuição da penetração (-83%) e o aumento do ponto de amolecimento (+13%) e da viscosidade, em todas as temperaturas analisadas (+114%, em média).

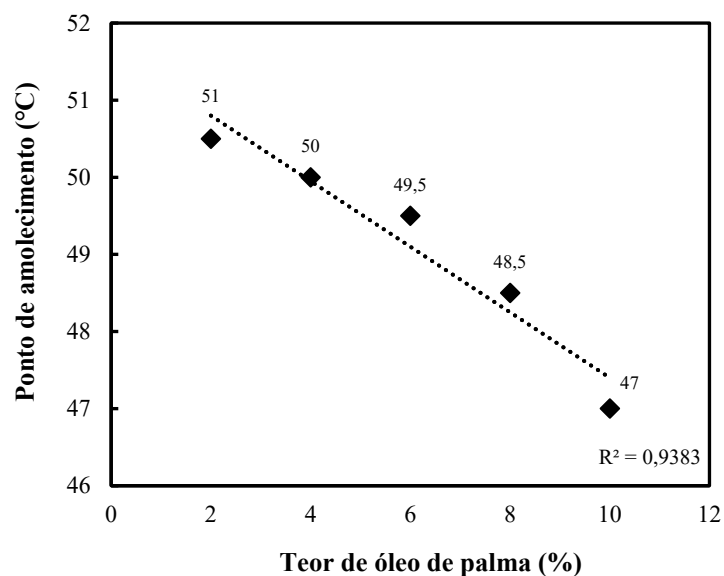
No asfalto envelhecido, foram incorporados os percentuais de óleo de palma de 2%, 4%, 6%, 8% e 10%. As figuras 19, 20 e 21 mostram a variação da penetração, do ponto de amolecimento e da viscosidade aparente, respectivamente, em função do teor de óleo de palma.

Figura 19. Penetração dos asfaltos rejuvenescidos com óleo de palma



Relativamente à penetração, o asfalto referência resultou em 59 (0,1 mm) (Tabela 16) e o acréscimo sucessivo de óleo de palma promoveu o retorno gradual desse parâmetro desse parâmetro até o valor de 61 (0,1 mm), valor bastante similar à referência, obtido com 10% de óleo de palma (Figura 19).

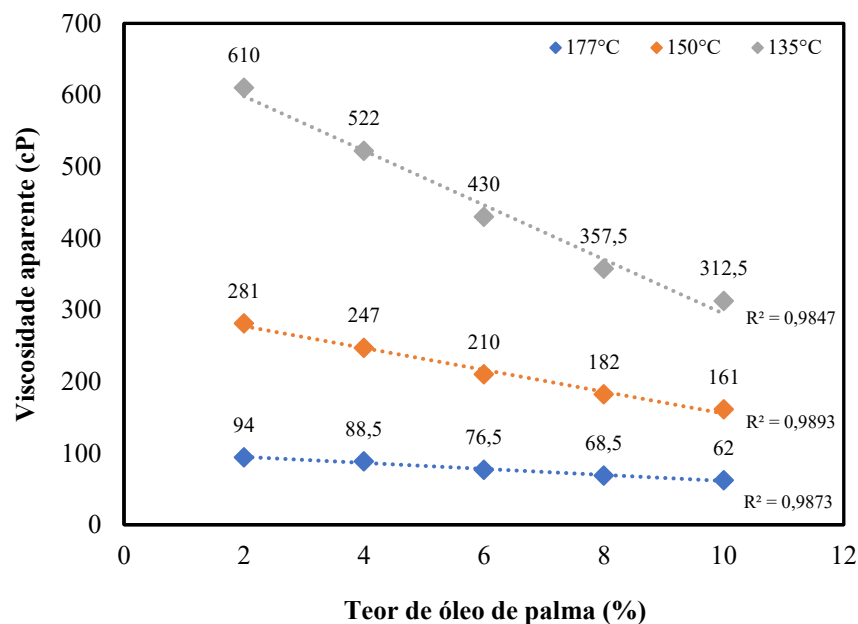
Figura 20. Ponto de amolecimentos dos asfaltos rejuvenescidos com óleo de palma



Em relação ao ponto de amolecimento, o valor medido foi de 53°C para o asfalto referência e 60°C para o asfalto envelhecido (Tabela 16). Com o acréscimo de óleo de palma de 2%, verificou-se a redução imediata dessa propriedade para 51%, bastante próximo ao

asfalto virgem. Essa redução é gradativa com incremento de óleo de palma, observando-se até 47°C de ponto de amolecimento com 10% de óleo de palma (Figura 20).

Figura 21. Viscosidade aparente dos asfaltos rejuvenescidos com óleo de palma



Quanto à viscosidade aparente, os valores apresentados pelo asfalto referência foram de 322,5 cP, 164 cP e 62,5 cP para as temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C, respectivamente (Tabela 16). A adição de teores sucessivos de óleo de palma ao asfalto envelhecido ocasionou na redução gradual da viscosidade até os valores de 312,5 cP, 161 cP e 62 cP para as temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C, respectivamente, muito próximos ao do asfalto virgem, obtidos com o incremento de 10% de óleo de palma.

A partir dos resultados apresentados nas Figuras 19, 20 e 21, ficou evidente que a consistência do asfalto pôde ser fortemente correlacionada com o seu grau de envelhecimento ($R^2 \geq 0,93$). À medida que se acrescentou o óleo de palma, o asfalto se tornou menos consistente; a penetração aumentou, enquanto o ponto de amolecimento e a viscosidade diminuíram. Ou seja, a rigidez do asfalto diminuiu gradativamente, indicando que o óleo de palma foi capaz reverter o endurecimento físico do asfalto provocado pelo envelhecimento.

Baseando-se apenas nos resultados de ensaios físicos, estes não são suficientes para estabelecer o teor de óleo de palma mais adequado ou assegurar que as propriedades do asfalto sejam reestabelecidas. Desta forma, ensaios reológicos são necessários para uma avaliação mais fidedigna do processo de rejuvenescimento com este material.

4.2. Efeito nas propriedades reológicas

Os parâmetros reológicos (G^* e δ) foram medidos para estabelecer PG, bem como a predição de desempenho quanto à deformação permanente e quanto à fadiga, pelos ensaios MSCR e LAS, respectivamente. Nesta seção são apresentados os resultados dos asfaltos na condição virgem (AV), envelhecida em curto e longo prazo (AE), e rejuvenescida com 2% (AE2OP), 4% (AE4OP), 6% (AE6OP), 8% (AE8OP) e 10% (AE10OP) de óleo de palma.

4.2.1. Performance Grade (PG)

O ensaio de varredura de temperaturas em temperaturas altas e intermediárias foi realizado para obter o módulo complexo (G^*) e o ângulo de fase (δ), e como esses parâmetros variam em função do grau de rejuvenescimento (ou de envelhecimento) dos asfaltos analisados. As Figuras 22 e 23 apresentam as curvas de módulo complexo e ângulo de fase em altas temperaturas (52°C a 76°C) e em função do teor de óleo de palma inserido.

Figura 22. Módulo complexo (G^*) em altas temperaturas dos asfaltos rejuvenescidos com óleo de palma

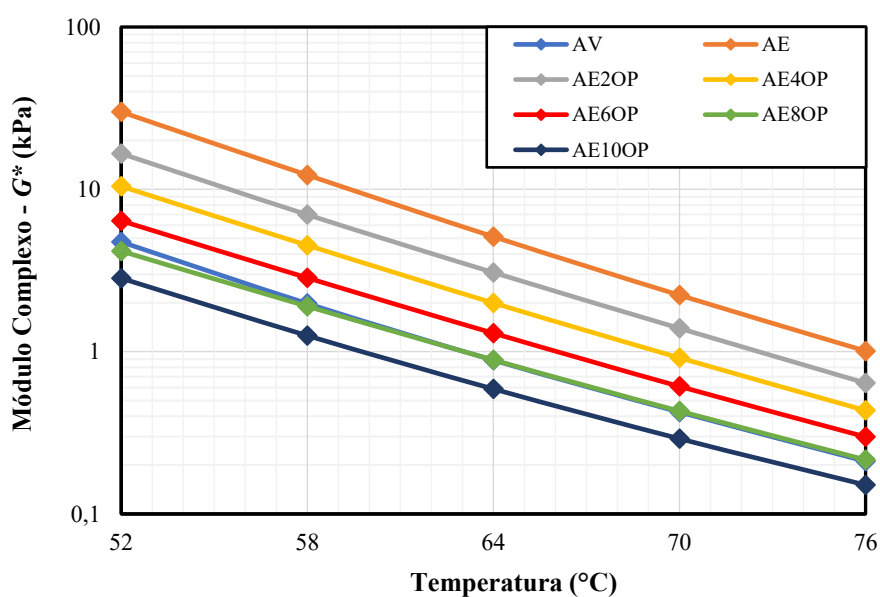
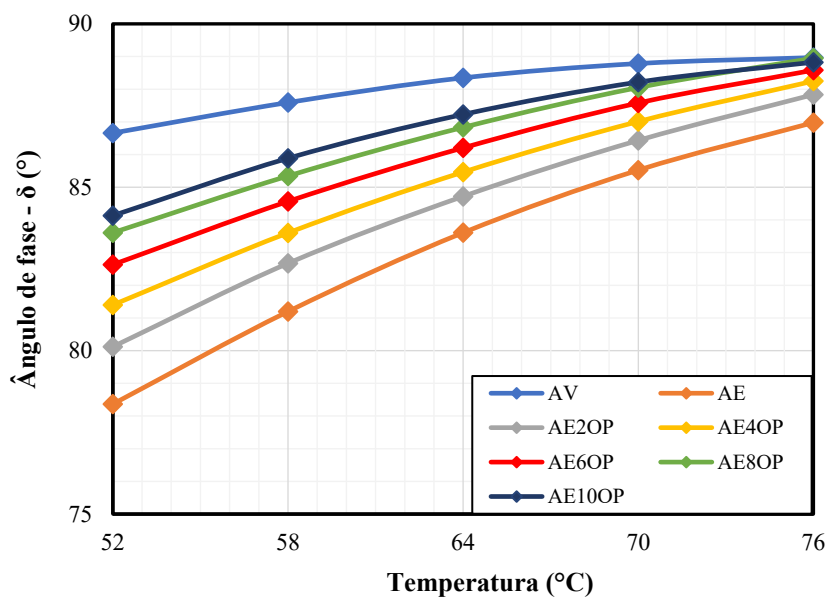


Figura 23. Ângulo de fase (δ) em altas temperaturas dos asfaltos rejuvenescidos com óleo de palma



A partir dos resultados mostrados na Figura 22 e na Figura 23, observou-se que:

- Após o envelhecimento em laboratório, através da sequência de ensaios RTFO e PAV, respectivamente, observou-se que o asfalto envelhecido (AV) apresentou módulo complexo (G^*) mais elevado e o ângulo de fase (δ) menor, o que era esperado, pois com o envelhecimento, o asfalto se torna mais rígido;
- O acréscimo óleo de palma promoveu o retorno do módulo complexo e do ângulo de fase gradativamente;
- O módulo complexo foi restaurado para valores além da referência (AE10OP); o ângulo de fase, por sua vez, não teve o retorno completo, cujos valores são todos abaixo da referência.

Os resultados dos ensaios nas temperaturas intermediárias são apresentados nas Figuras 24 e 25.

Figura 24. Módulo complexo (G^*) em temperaturas intermediárias dos asfaltos rejuvenescidos com óleo de palma

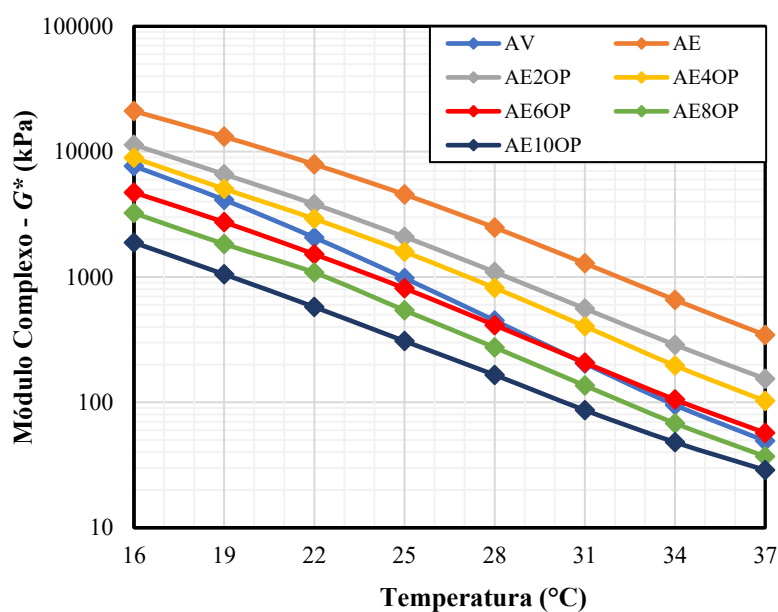
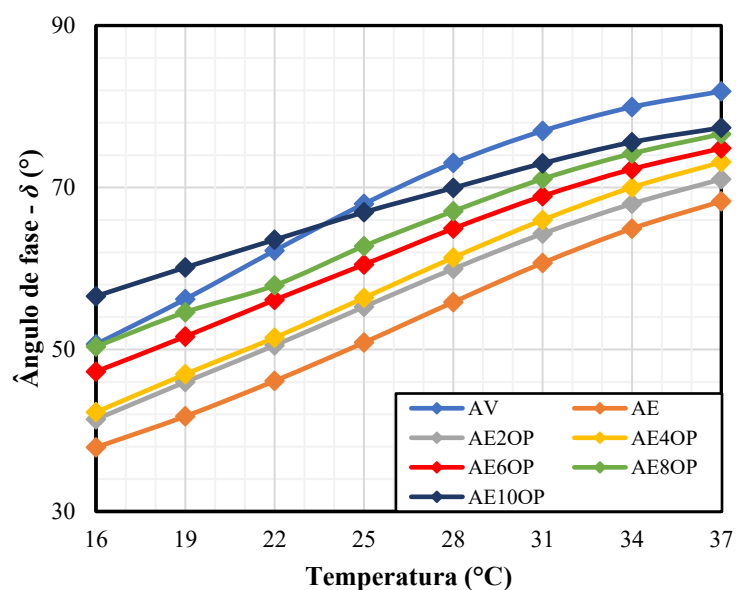


Figura 25. Ângulo de fase (δ) em temperaturas intermediárias dos asfaltos rejuvenescidos com óleo de palma



Por meio das figuras 24 e 25, observou-se que a amostra de asfalto com maior valor de módulo complexo foi a envelhecida (AE). Contudo, enquanto que em altas temperaturas, os valores de referência só foram alcançados com a adição de 8% de óleo de palma, nas temperaturas intermediárias, cerca de 4% a 6% de óleo de palma já foi capaz de alcançar os valores de módulo do asfalto virgem.

Em relação ao ângulo de fase, diferentemente do observado em altas temperaturas, o asfalto virgem não apresentou os maiores valores em todas as temperaturas. O asfalto rejuvenescido com 10% de óleo de palma (AE10OP) resultou em valores de ângulo de fase

maiores que os valores de referência nas temperaturas de 16°C, 19°C e 22°C, indicando possuir um comportamento mais viscoso nas temperaturas mais baixas. Isso condiz com o aspecto físico dessa amostra de asfalto, que se apresentou bastante “adesiva” nessas temperaturas.

A partir dos valores de G^* e de δ obtidos na varredura de temperaturas, foram calculados os parâmetros de predição de desempenho Superpave $G^*/sen(\delta)$ e $G^* \cdot sen(\delta)$, apresentados nas Figuras 26 e 27.

Figura 26. Parâmetro $G^*/sen(\delta)$ dos asfaltos

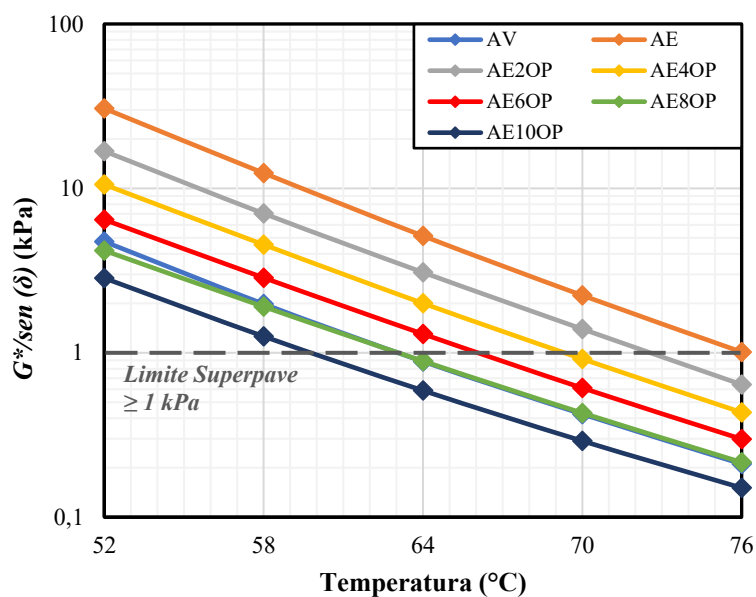
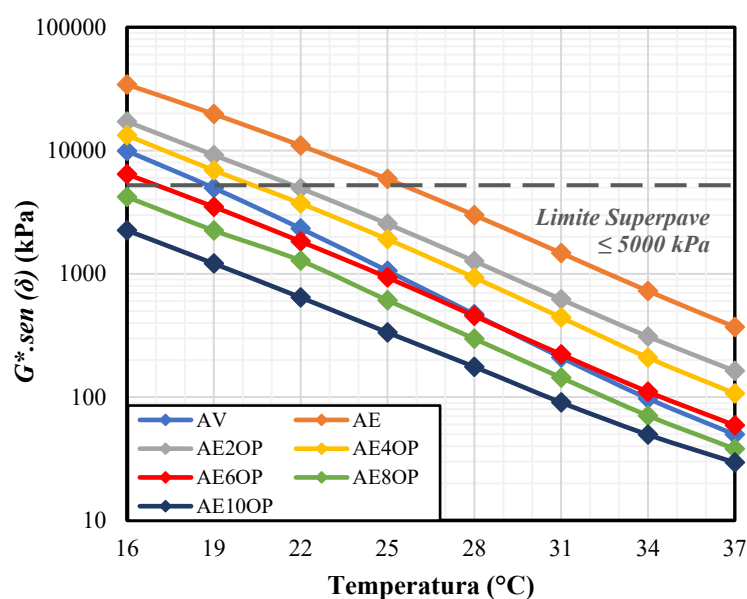


Figura 27. Parâmetro $G^* \cdot sen(\delta)$ dos asfaltos



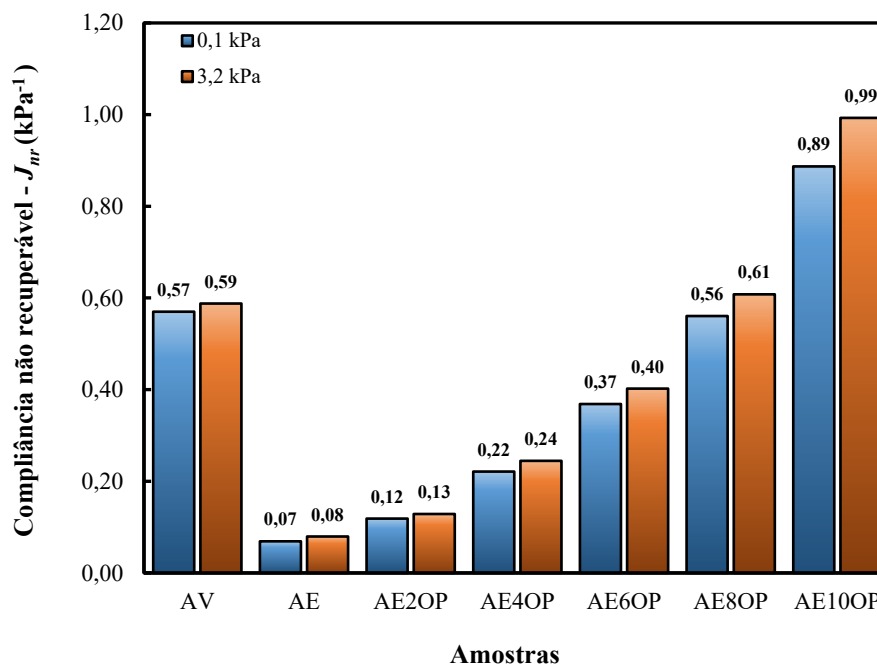
A partir dos resultados apresentados nas Figuras 26 e 27, verificou-se que o asfalto virgem apresentou um ganho no parâmetro $G^*/sen(\delta)$ após o envelhecimento em laboratório, que por um lado é benéfico, pois pode indicar ganho no desempenho à deformação permanente. Porém, também apresentou ganho no parâmetro $G^*.sen(\delta)$, que pode ser prejudicial, uma vez que indica o comprometimento do desempenho à fadiga.

Com o incremento das dosagens de óleo de palma, o asfalto envelhecido tende a ficar cada vez mais próximo do seu estado virgem. O desafio enfrentado foi estabelecer uma proporção de modo a adicionar o rejuvenescedor em quantidade suficiente e necessária para melhorar o desempenho do asfalto em temperaturas baixas e intermediárias, sem comprometer o desempenho em temperaturas altas. Sendo assim, a partir da análise do gráfico da Figura 27, verifica-se que, a adição de uma quantidade de 6% ou mais de óleo de palma (AE6OP, AE8OP e AE10OP), restaurou o parâmetro de fadiga do asfalto; contudo, se o teor do óleo de palma for 8% ou mais (AE8OP e AE10OP), o asfalto se torna muito “macio”, resultando em valores do parâmetro de deformação permanente abaixo da sua condição virgem.

Considerando que os requisitos de desempenho da especificação Superpave, $G^*/sen(\delta)$ e $G^*.sen(\delta)$ respectivamente, podem não predizer de forma satisfatória o desempenho, uma vez que a especificação não contempla asfaltos rejuvenescidos, por meio dos testes MSCR e LAS, uma discussão mais abrangente poderá ser conduzida.

4.2.2. *Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)*

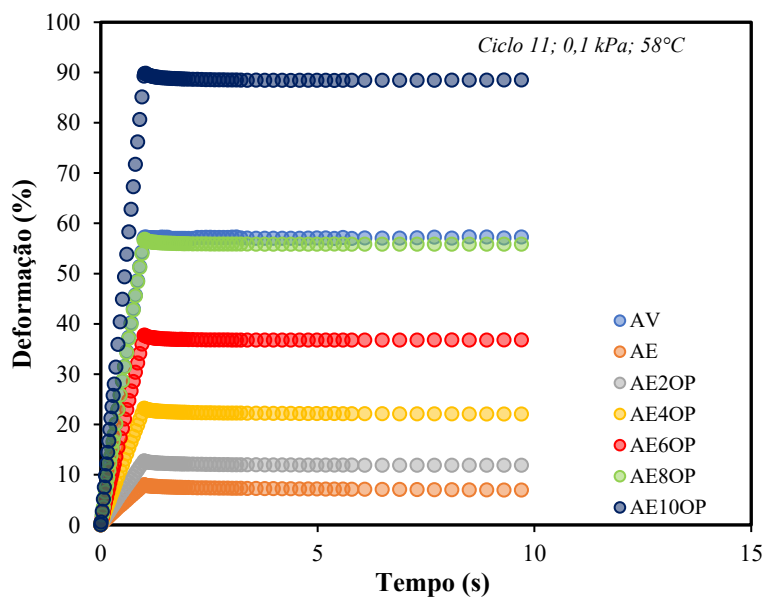
O asfalto convencional CAP 50/70 (referência) foi classificado como PG 58-XX e assim, os ensaios MSCR foram conduzidos na temperatura de 58°C. A Figura 28 apresenta os resultados de compliância não recuperável (J_{nr}) nos dois níveis de tensão (0,1 kPa e 3,2 kPa).

Figura 28. Compliância não recuperável dos asfaltos

Quanto mais elevado o valor de J_{nr} , há um indicativo de maior suscetibilidade do asfalto à ocorrência de deformação permanente. Desta forma, diante dos resultados da Figura 28, verificou-se que o asfalto envelhecido (AE) teria um melhor desempenho à deformação permanente, uma vez que o J_{nr} foi menor para ambos os níveis de tensão. O fato pode ser entendido pelo aumento da rigidez proporcionada pelo envelhecimento.

Neste estudo, buscou-se o reestabelecimento das propriedades obtidas em cada ensaio relativas ao asfalto de referência (AV) e a adição dos percentuais de óleo de palma. Neste sentido, constatou-se na Figura 30 que a adição do óleo de palma promoveu um aumento do valor de J_{nr} . O percentual de óleo de palma de 8% (AE8OP) obteve resultados similares ao de referência (AV).

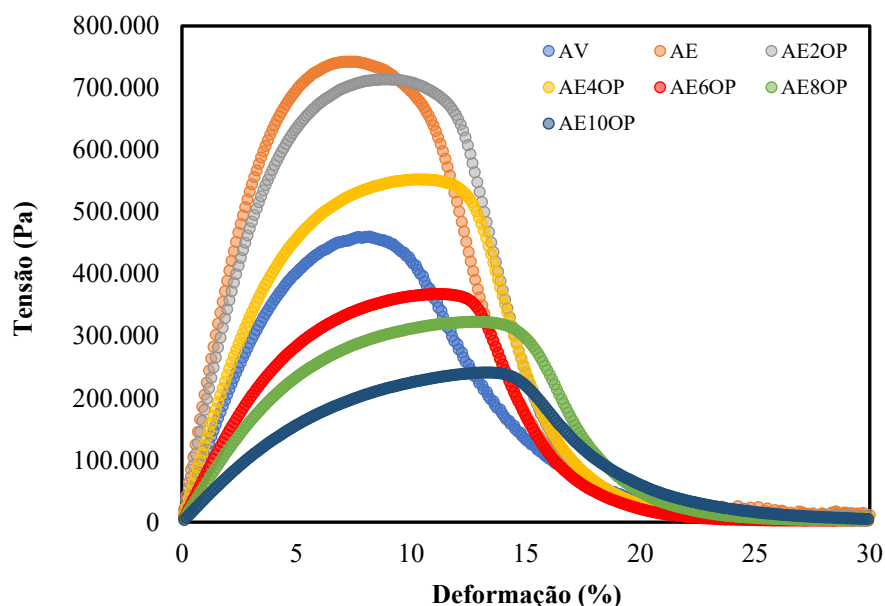
No ensaio MSCR, o outro parâmetro avaliado é a recuperação, que indica o grau de retorno do material após cessado o carregamento. A Figura 29 ilustra um dos ciclos de deformação e recuperação obtidos no ensaio MSCR para cada asfalto.

Figura 29. Deformação e recuperação durante um ciclo do ensaio

A partir da Figura 29, verificou-se que a recuperação dos asfaltos submetidos ao ensaio MSCR foi mínima no estágio de tensão de 0,1 kPa. O percentual de recuperação observado nos asfaltos AV, AE6OP, AE8OP e AE10OP resultou negativa (-5,1, -2,2%, -3,8% e -4,2%, respectivamente) indicando que a amostra de cada asfalto ensaiada continuou se deformando, mesmo durante a etapa de repouso (9 segundos finais do ensaio). Segundo Xiaohu, Talon e Redelius, 2008), esse fenômeno pode ser explicado pela incapacidade de o asfalto reagir à inércia do equipamento, apresentando uma pequena deformação, ainda que perante à inexistência de uma carga aplicada. Os asfaltos AE, AE2OP e AE4OP, entretanto, obtiveram uma recuperação positiva (9,6%, 2,5% e 0,3%, respectivamente). Além disso, observou-se menores picos de deformação para estes asfaltos. Logo, conclui-se que a deformação máxima ocorrida no ensaio é menor quanto maior for o grau de envelhecimento do asfalto, ou seja, o asfalto resiste mais à ação do carregamento do ensaio nessa condição. Além do mais, o percentual de recuperação, apesar de ser muito baixo, também é maior tanto quanto for o nível de envelhecimento do asfalto.

4.2.3. Linear Amplitude Sweep (LAS)

O ensaio LAS foi realizado na temperatura de 19°C e os resultados foram analisados com base no modelo do dano contínuo viscoelástico (*Viscoelastic Continuum Damage – VECD*), considerando a tensão de pico como critério de ruptura. Na Figura 30, estão apresentadas as curvas de tensão-deformação obtidas no ensaio.

Figura 30. Curvas tensão-deformação do ensaio LAS

A partir das curvas, pôde-se observar que os asfaltos exibiram picos de tensão diferentes à medida que a deformação cisalhante variou. Após o pico, as tensões caíram drasticamente, indicando que danos significativos ocorreram nas amostras de asfalto analisadas e assim, que o material perdeu a capacidade de resistir ao carregamento aplicado. A Tabela 17 apresenta os picos de tensão a partir do ensaio LAS de cada asfalto.

Tabela 17. Pico de tensão dos asfaltos a partir do ensaio LAS

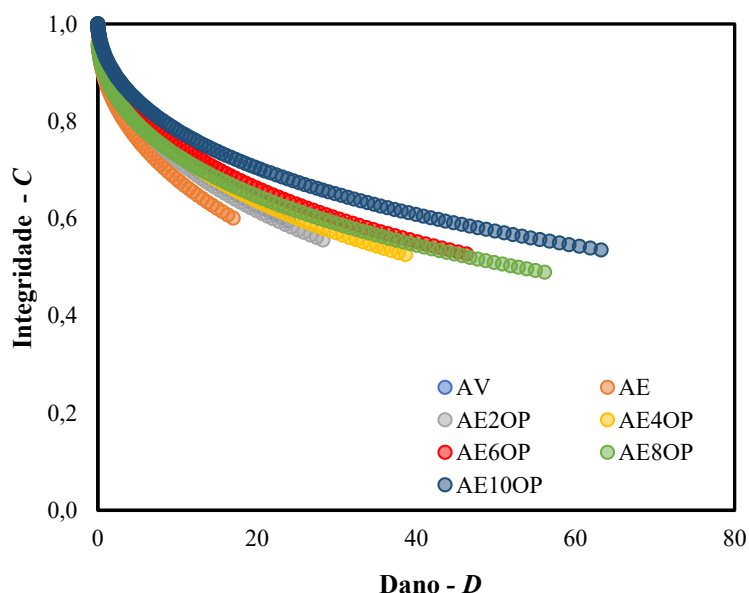
Asfalto	Tensão de Pico (kPa)	Deformação no pico de tensão (%)
AV	$4,61 \cdot 10^5$	8,2
AE	$7,43 \cdot 10^5$	7,2
AE2OP	$7,14 \cdot 10^5$	8,8
AE4OP	$5,53 \cdot 10^5$	10,2
AE6OP	$3,68 \cdot 10^5$	11,2
AE8OP	$3,23 \cdot 10^5$	12,7
AE10OP	$2,41 \cdot 10^5$	13,4

Observou-se na Tabela 17 que o asfalto envelhecido (AV) apresentou o maior pico de tensão, ao passo que, com o rejuvenescimento, verificou-se uma redução gradual da tensão máxima. Outro ponto a ser destacado refere-se que o pico de tensão foi atingido para maiores níveis de deformação, conforme aumentou o grau de rejuvenescimento do asfalto. Isso significa que, ao aplicar deformações, o asfalto envelhecido, apesar de ser mais rígido se rompe sem experimentar elevada deformação, uma vez que com o processo de envelhecimento, o mesmo perdeu flexibilidade e elasticidade. Por outro lado, nos asfaltos

rejuvenescidos houve uma tendência de se deformarem mais acentuadamente antes da ruptura, representada pela perda drástica de resistência após o pico de tensão. Este comportamento pode indicar que o rejuvenescimento com óleo de palma provocou o “amolecimento” do asfalto, o que o permitiu “trabalhar” sob o carregamento, em uma faixa maior de deformação sem que ocorra a ruptura, ocasionada pelo dano submetido às amostras de asfalto ensaiadas.

A partir do ensaio LAS, em conjunto com a teoria do dano contínuo viscoelástico, foram obtidas as curvas de dano-integridade dos asfaltos. Estas curvas permitem representar a queda de integridade do material (C) à medida que o dano (D) aumenta, ambos calculados conforme as Equações C.3 e C.4 do Anexo C. As curvas de integridade versus dano dos asfaltos analisados são apresentadas na Figura 31 até o ponto de ruptura.

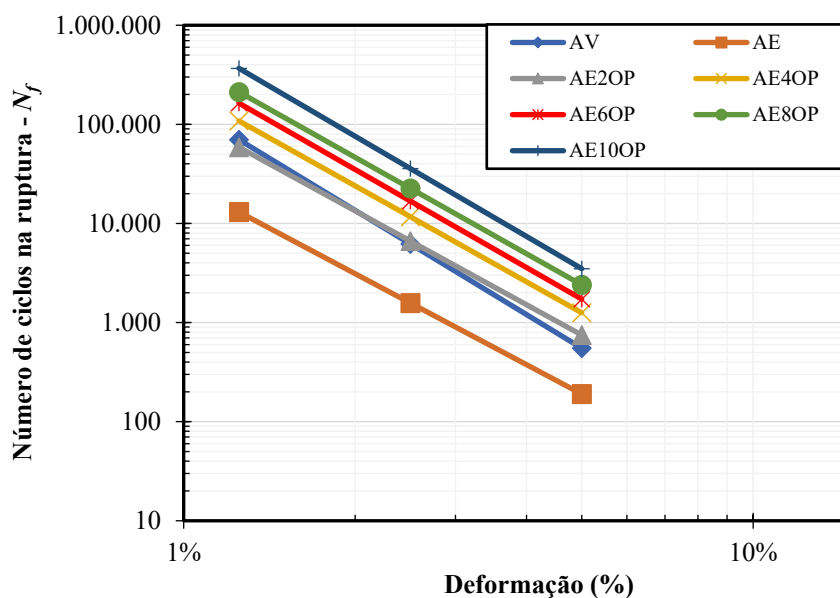
Figura 31. Integridade dos asfaltos em função do dano causado



Conforme esperado, a integridade de todos os asfaltos descaiu com o aumento do dano sofrido. O asfalto envelhecido (AE) foi o que apresentou a queda mais brusca, quando comparado com os demais, ao passo que a curva do asfalto contendo 10% de óleo de palma (AE10OP) mostrou que essa redução ocorreu de forma mais suave, o que pode evidenciar o benefício do aditivo testado. Os demais asfaltos, AE2OP, AE4OP, AE6OP e AE8OP, apresentaram um comportamento intermediário entre o AV e o AE10OP, tendo a “suavização” da curva mais acentuada à medida que o teor de óleo de palma aumentou. Vale ressaltar também o acúmulo de dano na ruptura, que foi maior quanto maior com o teor de rejuvenescedor, evidenciando a capacidade do óleo de palma em promover o aumento da resistência ao dano por fadiga.

Na Figura 32 estão apresentadas as curvas de fadiga dos asfaltos, obtidas a partir do LAS, de acordo com a lei de fadiga descrita na Equação C.10 (Anexo C). Observou-se que o AE (envelhecido) obteve uma vida à fadiga (N_f) significativamente menor que os demais asfaltos, em todos os níveis de deformação. O incremento gradual da dosagem de óleo de palma promoveu o aumento da vida de fadiga do asfalto, em todos os níveis de deformação considerados, sendo que, a partir de 2% de óleo de palma (AE2OP), observou-se a recuperação da vida de fadiga em nível igual ou superior ao asfalto virgem (AV).

Figura 32. Curvas de fadigas dos asfaltos obtidas através do LAS



Outro aspecto a ser observado se refere às inclinações das curvas dos asfaltos rejuvenescidos, inferiores à do asfalto virgem. Isso significa que o aumento do nível de deformação aplicado no material tende a reduzir menos a vida de fadiga nos asfaltos rejuvenescidos, ou seja, a vida de fadiga dos asfaltos rejuvenescidos reduz menos com o acréscimo da deformação, quando comparados com o AV. Isso é decorrente dos parâmetros do modelo de fadiga, obtidos a partir do ensaio. A Tabela 18 apresenta os valores dos parâmetros de fadiga, obtidos a partir das Equações C.2, C.6, C.7 e C.8 (Anexo C).

Tabela 18. Parâmetros de fadiga do ensaio LAS obtidos

Asfalto	α	A	B	D_f
AV	1,747	1,53E+05	-3,494	32
AE	1,525	2,57E+04	-3,050	19
AE2OP	1,574	1,19E+05	-3,147	38
AE4OP	1,608	2,22E+05	-3,216	48
AE6OP	1,643	3,41E+05	-3,285	54
AE8OP	1,616	4,36E+05	-3,232	57
AE10OP	1,679	7,78E+05	-3,358	67

Valores de D_f (dano na falha) mais altos e valores de α mais baixos se apresentam como um cenário desejável no que diz respeito ao desempenho à fadiga. O dano na falha (D_f), representa a capacidade do material de acumular dano antes da falha; e o parâmetro α está relacionado com a taxa de evolução do dano (Asadi, Tabatabaee e Hajj, 2021). Em relação aos coeficientes A e B , utilizados para o cálculo de N_f , verificou-se que elevados valores de A e baixos de B tendem a indicar um melhor desempenho à fadiga. No entanto, é importante observar que, o coeficiente A é mais significativo no valor de N_f na condição de baixas deformações e, B , sendo diretamente proporcional ao parâmetro α (Equação C.2, Anexo C), tem maior influência em deformações mais elevadas.

Conforme Raul (2019), em níveis de deformação muito baixos, a tendência é que a fadiga não seja atingida, uma vez que o dano acumulado é desprezível. Em contrapartida, em deformações muito altas, a ruptura por fadiga ocorre com poucos ciclos de carga, devido ao dano elevado provocado no material. Isso pode ser verificado se forem considerados asfaltos com mesmo grau de envelhecimento. Para asfaltos envelhecidos, a resistência ao dano é ainda menor tanto quanto maior for o grau envelhecimento, diminuindo ainda mais o valor de N_f , conforme observado na Tabela 18. Por isso, para comparação entre os asfaltos é importante considerar o nível de deformação a ser analisado.

Para considerar a inclinação da curva de fadiga, foi determinado o Fator de Fadiga do Ligante (FFL), obtido por meio da abordagem da teoria VECD, que leva em conta duas deformações que compreendem valores tipicamente encontrados nas camadas de revestimento asfáltico. Desta forma, o FFL , calculado conforme a Equação C.11 (Anexo C), é definido com base nas deformações de 1,25% e 2,5%. A Tabela 19 apresenta os valores do número de ciclos na falha a 1,25% e 2,5% de deformação, $N_{f-1,25}$ e $N_{f-2,5}$, respectivamente, além do fator FFL para cada asfalto.

Tabela 19. Valores de $N_{f-1,25}$, $N_{f-2,5}$ e FFL dos asfaltos

Asfalto	$N_{f-1,25}$	$N_{f-2,5}$	FFL
AV	70.052	6.218	1,30
AE	13.023	1.572	1,10
AE2OP	58.806	6.638	1,29
AE4OP	108.454	11.669	1,37
AE6OP	163.836	16.804	1,42
AE8OP	212.194	22.586	1,46
AE10OP	367.853	35.867	1,52

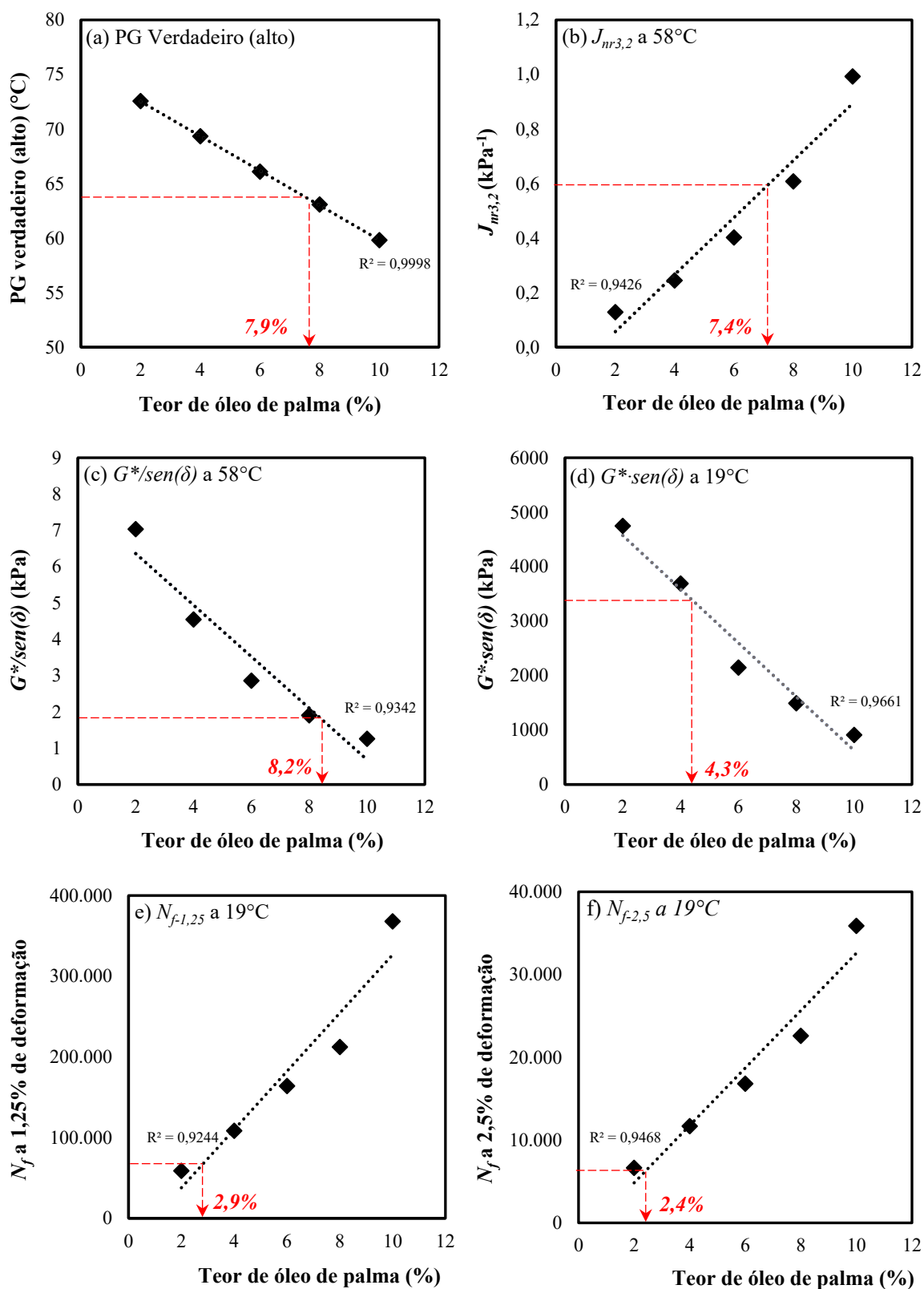
O parâmetro FFL é diretamente ligado à tolerância ao dano do asfalto. Desta maneira conforme esperado, observou-se uma diminuição do valor do FFL com o envelhecimento do asfalto e o aumento gradual do seu valor com os acréscimos sucessivos de óleo de palma. Os valores de referência do parâmetro FFL a 19°C para asfaltos CAP 50/70 convencionais comumente encontrados variam de 1,2 a 1,5 (Martins, 2014; Nascimento, 2015; Osmari *et al.*, 2019; Vestana, 2021). Desta forma, observa-se que os valores encontrados para o asfalto virgem e os asfaltos rejuvenescidos estão dentro da faixa de valores esperada.

4.3. Avaliação da dosagem de óleo de palma

4.3.1. Definição da dosagem ótima de óleo de palma

A partir dos resultados apresentados obtidos nos ensaios realizados, verificou-se que o óleo de palma foi capaz de restaurar as propriedades físicas e reológicas de asfaltos envelhecidos. Contudo, apesar de haver uma melhora no comportamento quanto à fadiga, verificou-se também uma queda de desempenho quanto à deformação permanente. Desta maneira, a dosagem ótima de óleo de palma foi realizada a partir de modelos construídos com base nos parâmetros reológicos dos ensaios relacionados com os parâmetros de predição de desempenho dos asfaltos. Os resultados são apresentados na Figura 33 e Tabela 20.

Figura 33. Blending Charts dos parâmetros reológicos analisados em função do teor de óleo de palma. Parâmetros: (a) PG Verdadeiro (alto); (b) $J_{nr3,2}$ a 58°C; (c) $G^*/sen(\delta)$ a 58°C; (d) $G^*.sen(\delta)$ a 19°C; (e) $N_{f-1,25}$ a 19°C; (f) $N_{f-2,5}$ a 19°C; (g) $N_{f-5,0}$; (h) FFL a 19°C



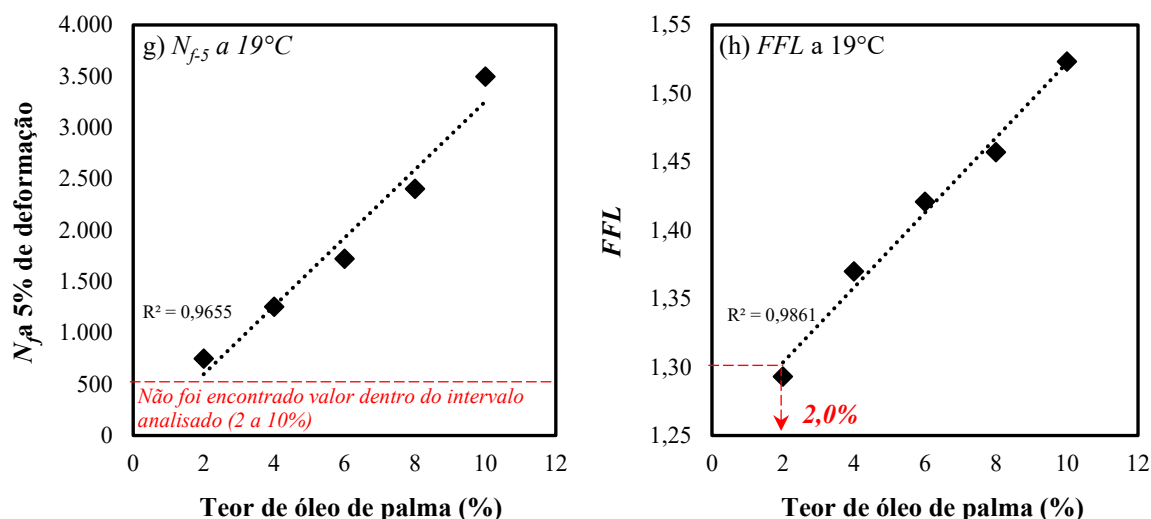


Tabela 20. Escolha do teor ótimo de óleo de palma

Critério	Modelo matemático		Valores de Referência	Teor máximo	Teor mínimo
PG Verdadeiro (alto)	$y_1 = -1,59x + 75,71$	(7)	$63,09^{\circ}\text{C}$	7,9%	-
$J_{nr3,2}$	$y_2 = 0,1x - 0,15$	(8)	$0,59 \text{ kPa}^{-1}$	7,4%	-
$G^*/\text{sen}(\delta)$	$y_3 = -0,71x + 7,78$	(9)	1,98 kPa	8,2%	-
$G^*\cdot\text{sen}(\delta)$	$y_4 = -493,67x + 5.560,5$	(10)	3.430,70 kPa	-	4,3%
$N_{f,1,25}$	$y_5 = 36.091,7x - 34.322,1$	(11)	70.052 ciclos	-	2,9%
$N_{f,2,5}$	$y_6 = 3.468,8x - 2.099,6$	(12)	6.218 ciclos	-	2,4%
$N_{f,5}$	$y_7 = 332,21x - 67,34$	(13)	552 ciclos	-	-
FFL	$y_8 = 0,03x + 1,25$	(14)	1,30	-	2,0%
Intervalo de aplicação				7,4%	4,3%

OBS: y é cada resposta de interesse e x é o teor de óleo de palma. Os valores de referência são os parâmetros encontrados para o asfalto virgem.

Para cada resposta de interesse, foi determinado um modelo linear em função do teor de óleo de palma aplicado. As propriedades reológicas analisadas mostraram ser fortemente correlacionadas com a dosagem do rejuvenescedor ($R^2 \geq 0,92$).

Os parâmetros relacionados ao desempenho do asfalto em altas temperaturas, PG Verdadeiro (alto), $J_{nr3,2}$ e $G^*/\text{sen}(\delta)$ estão relacionados à quantidade máxima de óleo de palma que pode ser adicionada, acima da qual o asfalto amolece demasiadamente e passa a possuir um desempenho quanto à deformação permanente inferior ao desempenho do asfalto virgem. Conforme os resultados apresentados na Tabela 20, esses valores variam de 7,4% a 8,2% de óleo de palma. Visando atender os três parâmetros simultaneamente, determinou-se o teor máximo de óleo de palma como sendo de 7,4%.

Em relação aos parâmetros de desempenho em temperaturas intermediárias, $G^*\cdot\text{sen}(\delta)$, $N_{f,1,25}$, $N_{f,2,5}$, $N_{f,5}$ e FFL , estes são determinantes na quantidade mínima de óleo de palma que

pode ser adicionada de forma a garantir que o asfalto possua desempenho quanto à fadiga superior ao desempenho do asfalto virgem. Conforme os resultados apresentados na Tabela 20, esses valores variam de 1,9% a 4,3%. O valor que atende aos três parâmetros simultaneamente é, portanto, de 4,3% de óleo de palma.

Logo, o intervalo de aplicação de óleo de palma no asfalto envelhecido é de 4,3% a 7,4%. Tendo em vista que o envelhecimento do asfalto possui efeito benéfico nas propriedades de altas temperaturas, porém com redução de desempenho em temperaturas baixas e intermediárias, a escolha do teor ótimo foi baseada apenas na quantidade de óleo de palma necessária para reestabelecer o desempenho quanto à fadiga do asfalto ao seu estado virgem. Desta forma, o teor ótimo de óleo de palma foi de 4,3%; quantidade necessária para o retorno dos parâmetros de fadiga do asfalto, sem que a rigidez seja severamente afetada.

4.3.2. Validação do teor ótimo de óleo de palma

Visando a validação do método para determinação do teor ótimo de óleo de palma, foi produzida uma mistura adicional contendo 4,3% de óleo de palma (AEOP_{ót}), e foram determinadas as suas propriedades reológicas e comparadas com os valores do asfalto virgem e os valores calculados a partir dos modelos matemáticos obtidos. Os resultados são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21. Parâmetros reológicos do asfalto rejuvenescido com óleo de palma na dosagem ótima

Parâmetro reológico	Unidade	AV	AEOP _{ót} (ensaio)*	AEOP _{ót} (modelo)**	Varição (%)
PG (alto)	°C	58	64	64	-
PG Verdadeiro (alto)	°C	63,09	68,52	68,87	-0,51
$J_{nr3,2}$ a 58°C	kPa ⁻¹	0,59	0,27	0,28	-3,57
$G^*/sen(\delta)$ a 58°C	kPa	1,98	4,45	4,73	-5,92
$G^*.sen(\delta)$ a 19°C	kPa	3.430,70	3.701,01	3.437,67	7,66
$N_{f-1,25}$ a 19°C	Ciclos	70.052	115.625	120.872	-4,34
$N_{f-2,5}$ a 19°C	Ciclos	6.218	12.165	12.816	-5,08
N_{f-5} a 19°C	Ciclos	552	1.280	1.361	-5,95
FFL a 19°C	-	1,30	1,38	1,37	0,73

*Valores obtidos nos ensaios; **Valores calculados pelos modelos matemáticos obtidos (Equações 7 a 14)

A partir dos resultados apresentados na Tabela 21, verificou-se que o asfalto rejuvenescido com 4,3% de óleo de palma tem todas as suas propriedades reológicas superiores ao asfalto virgem. O asfalto rejuvenescido (AEOP_{ót}) possui 1 grau PG a mais que o asfalto de referência e, o valor de $J_{nr3,2}$, inferior. O que indicou que o seu desempenho

em altas temperaturas foi superior ao asfalto virgem. Enquanto que nas temperaturas intermediárias, o asfalto AEOP_{ót}m possui maior vida de fadiga em todos os níveis de deformação, além de apresentar valores de *FFL* mais altos também.

4.4. Comparação do óleo de palma com um rejuvenescedor comercial

Para analisar a eficiência do aditivo proposto em comparação com um aditivo comercial, buscou-se rejuvenescer um asfalto envelhecido em serviço com o óleo de palma e com um agente rejuvenescedor (AR), disponível há anos no mercado para essa finalidade. O teor de rejuvenescedor adotado foi o mesmo em ambos os casos, calculados conforme a Equação 6 (seção 3.2.4). A Tabela 22 apresenta o teor de rejuvenescedor calculado de acordo com as temperaturas alta e intermediária do asfalto de referência e do asfalto extraído do RAP, conforme as recomendações do fornecedor do AR.

Tabela 22. Teor de rejuvenescedor calculado de acordo com o fornecedor do AR

Parâmetro	Unidade	Asfalto de referência	Asfalto extraído do RAP	Teor de rejuvenescedor calculado (%)
$T_{PG\ alto}$	°C	58	88	15
$T_{PG\ Intermediário}$	°C	19	34	7,5

Conforme discutido anteriormente, a quantidade de rejuvenescedor a ser adicionada deve ser a menor possível de forma a restaurar as propriedades do asfalto nas temperaturas baixas e intermediárias, sem comprometer o desempenho em altas temperaturas. Sendo assim, o teor escolhido para esta etapa do trabalho foi de 7,5%.

A Tabela 23 apresenta o resultado da modificação com os dois aditivos nas propriedades físicas do asfalto extraído do RAP.

Tabela 23. Efeito do rejuvenescimento do asfalto extraído do RAP com óleo de palma e um agente rejuvenescedor nas suas propriedades físicas

Propriedade física	Unidade	Referência (CAP 50/70)	ARAP*	ARAP + X% OP**	ARAP + X% AR***
Penetração, 100 g, 5 s, 25 °C	0,1 mm	59	7	22	20
Ponto de amolecimento	°C	53	73	58	59
Viscosidade Brookfield					
a 135°C, SP 21, 20 rpm	cP	322,5	757	594	612
a 150°C, SP 21, 50 rpm	cP	164	349	277	289
a 177°C, SP 21, 100 rpm	cP	62,5	103	95	97

*Asfalto recuperado do RAP; **Asfalto recuperado + 7,5% de óleo de palma; ***Asfalto recuperado + 7,5% de agente rejuvenescedor

Os resultados mostraram que os dois aditivos podem ser utilizados para promover o rejuvenescimento dos asfaltos. A penetração aumentou ao passo que o ponto de amolecimento e a viscosidade dos dois asfaltos rejuvenescidos diminuíram. Contudo, verifica-se que, para o teor de 7,5% aplicado, esse efeito não ocorre até o nível de referência (CAP 50/70), indicando que, tanto para o óleo de palma quanto para o agente de rejuvenescedor, a dosagem capaz de reestabelecer completamente as propriedades físicas do asfalto devem ser maiores que a adotada de 7,5%. Apesar disso, o nível de recuperação promovido pelos dois aditivos é bastante próximo, de forma que, é possível afirmar que os agentes promovem efeitos similares quanto à penetração, ponto de amolecimento e viscosidade do asfalto.

A Figuras 34 e 35 apresentam os resultados das modificações no módulo complexo e ângulo de fase do asfalto em temperaturas altas e intermediárias, respectivamente.

Figura 34. (a) Módulo complexo e (b) ângulo de fase dos asfaltos em altas temperaturas

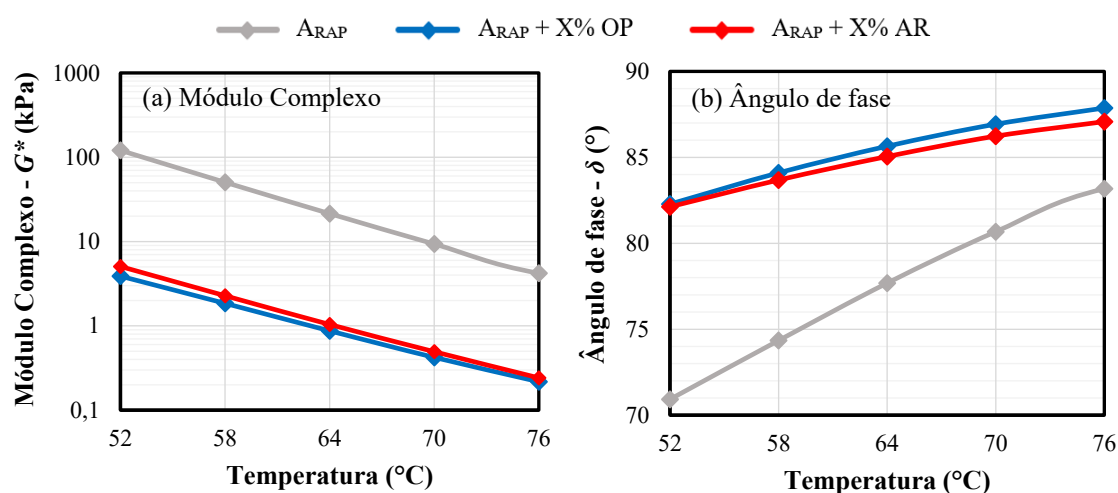
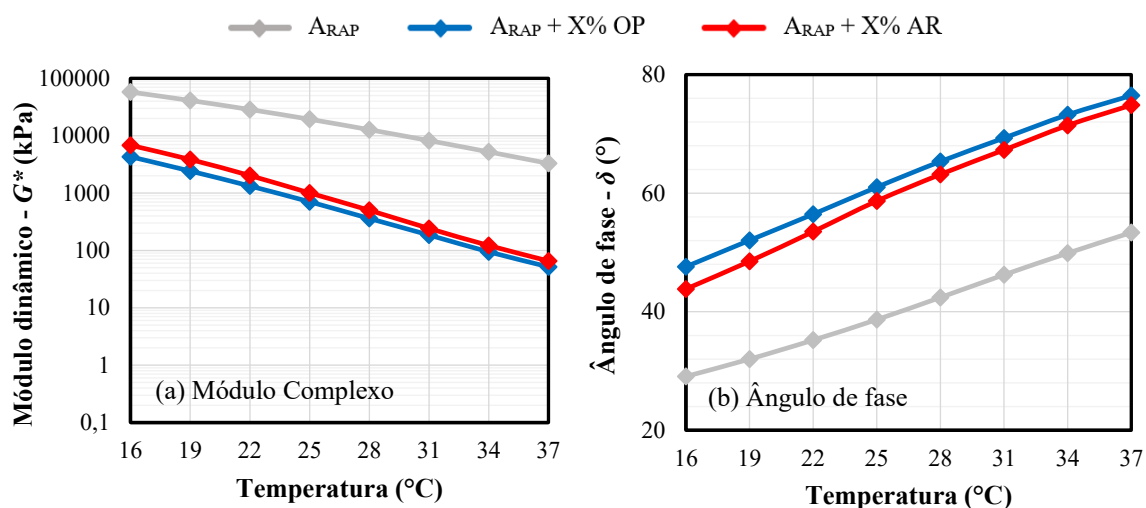


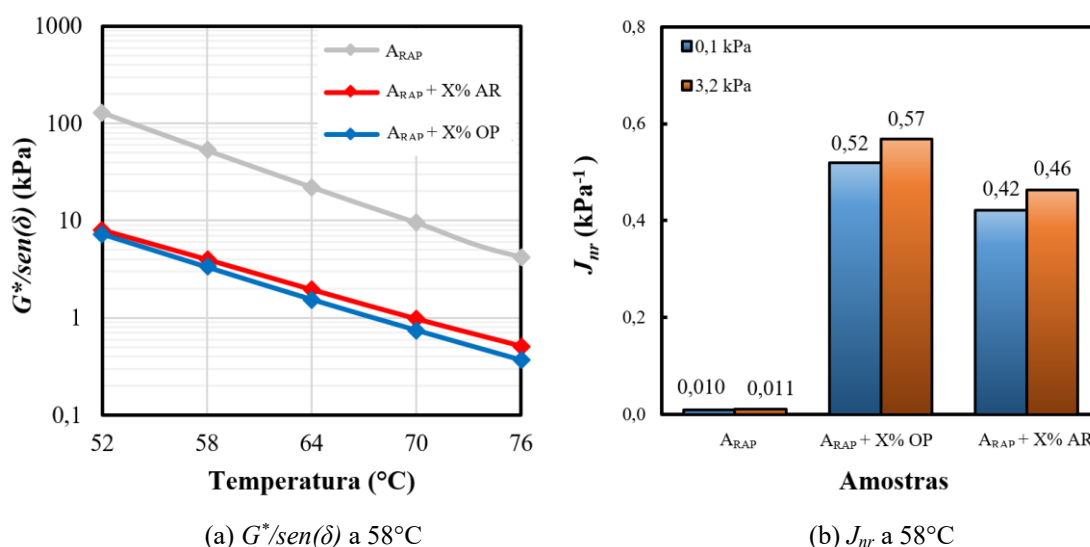
Figura 35. (a) Módulo complexo e (b) ângulo de fase em temperaturas intermediárias



A partir dos resultados das Figuras 34 e 35, observa-se que os dois rejuvenescedores promoveram a restauração das propriedades reológicas de módulo complexo e ângulo de fase do asfalto recuperado do RAP. O grau de restauração observado foi bastante similar entre os dois aditivos. Os valores de módulo complexo do asfalto rejuvenescido com óleo de palma são ligeiramente menores que os valores obtidos com o rejuvenescimento com o agente rejuvenescedor. Isso significa que o amolecimento provocado pela adição de 7,5% de rejuvenescedor é mais acentuado com o óleo de palma. Em relação ao ângulo de fase, verifica-se que o grau restauração alcançado foi superior para o rejuvenescimento com óleo de palma. No entanto, em altas temperaturas, observou-se que o ângulo de fase da amostra $A_{RAP} X\% OP$ decresce de maneira mais acentuada com a diminuição da temperatura. Assim, sendo o ângulo de fase um indicador da relação sólido/líquido de materiais viscoelásticos, pode-se afirmar que a consistência do asfalto, quando rejuvenescido com o óleo de palma, varia de forma mais acentuada com a variação da temperatura, em comparação com o agente rejuvenescedor.

As Figuras 36 e 37 apresentam os resultados obtidos no desempenho das amostras de asfalto quanto à deformação permanente, através dos parâmetros $G^*/sen(\delta)$ e J_{nr} , obtidos nos ensaios de PG e MSCR, a 58°C.

Figura 36. Parâmetros de deformação permanente (a) $G^*/sen(\delta)$ e (b) J_{nr} dos asfaltos a 58°C



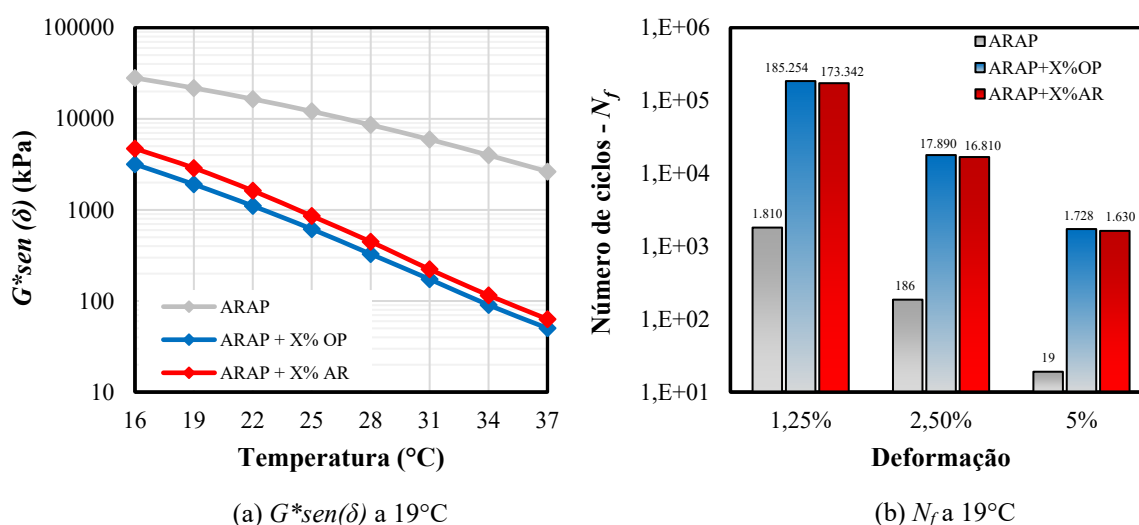
Os resultados mostraram que ambos os rejuvenescedores promoveram uma diminuição dos valores do parâmetro de deformação permanente, $G^*/sen(\delta)$, e um aumento nos valores de compliância não recuperável, J_{nr} , ou seja, os dois asfaltos rejuvenescidos tiveram a sua capacidade de retornar ao estado original quando submetidos a uma

deformação diminuída (aumentaram as deformações não recuperáveis), indicando que ambos perderam tolerância à deformação permanente.

A partir de então, a eficiência dos rejuvenescedores pôde ser avaliada verificando qual dos dois aditivos resultou na menor perda de desempenho à deformação permanente. Sendo assim, verificou-se que o asfalto aditivado com o agente rejuvenescedor possui um comportamento em relação à deformação permanente superior ao asfalto rejuvenescido com óleo de palma. Porém, apesar de ambos os asfaltos possuírem os valores dos parâmetros de $G^*/sen(\delta)$ e J_{nr} aproximadamente semelhantes entre si, a classificação quanto ao nível de tráfego, segundo a AASHTO M332, é diferente, sendo o asfalto rejuvenescido com óleo de palma recomendado para tráfegos muito pesados ($0,5 \text{ kPa}^{-1} < J_{nr3,2} < 1,0 \text{ kPa}^{-1}$) e o rejuvenescido com o agente rejuvenescedor para tráfegos extremamente pesados ($J_{nr3,2} < 0,5 \text{ kPa}^{-1}$)

Em relação à fadiga, os asfaltos foram analisados através dos parâmetros $G^* \cdot sen(\delta)$ e N_f , obtidos pelos ensaios de varredura de temperaturas e LAS (Figura 37).

Figura 37. Parâmetros de fadiga (a) $G^* \cdot sen(\delta)$ e (b) N_f dos asfaltos a 19°C



Verificou-se que o rejuvenescimento com ambos os rejuvenescedores resultaram no ganho de vida de fadiga do asfalto, indicado pela diminuição dos valores do parâmetro $G^* \cdot sen(\delta)$ e aumento dos valores do parâmetro N_f . Ao comparar os dois aditivos, observou-se que o óleo de palma promoveu o maior ganho na vida de fadiga, o que foi verificado pelos maiores valores de N_f e o menores valores de $G^* \cdot sen(\delta)$. No entanto, pode-se afirmar que ambos os rejuvenescedores possuem o mesmo efeito no desempenho à fadiga, dada à similaridade dos resultados alcançados.

5. CONCLUSÃO

Neste estudo foi analisado em laboratório o óleo de palma como agente rejuvenescedor de asfaltos envelhecidos. Para isso, o programa experimental proposto consistiu em, inicialmente, analisar o nível de recuperação das propriedades de um asfalto envelhecido em laboratório promovido através da adição de óleo de palma, em vários teores para determinar uma dosagem ótima de óleo de palma. Em um segundo momento, buscou-se comparar o aditivo proposto com um agente rejuvenescedor já disponível no mercado. As conclusões obtidas são apresentadas neste capítulo.

A adição gradual do óleo de palma no asfalto envelhecido em laboratório promoveu a restauração gradativa das propriedades do asfalto para além do asfalto virgem, um CAP 50/70, dependendo da dosagem de óleo palma adotada. Em quaisquer teores, foi possível identificar uma mudança nas propriedades físicas e reológicas do asfalto envelhecido. Nas propriedades físicas, o que se observou foi uma diminuição da viscosidade e um aumento da penetração e ponto de amolecimento. Nas propriedades reológicas, uma diminuição do módulo complexo e aumento do módulo de fase. Essas mudanças ficaram mais acentuadas à medida que se aumentava o teor de óleo de palma no asfalto. Como resultado, o asfalto, altamente rígido e oxidado devido ao envelhecimento, passou a ser cada vez menos frágil e quebradiço.

Conseqüentemente, as propriedades de desempenho do asfalto também foram afetadas. O desempenho analisado foi em relação à deformação permanente, pelos ensaios de varredura de temperaturas em altas temperaturas e o MSCR; e em relação à fadiga pelos ensaios de varredura de temperaturas em temperaturas intermediárias e o LAS. Observou-se que o enrijecimento excessivo provocado pelo envelhecimento, resulta em uma boa performance do asfalto em relação à deformação permanente em altas temperaturas, porém com baixo desempenho à fadiga em temperaturas intermediárias. E esse cenário foi completamente revertido após o rejuvenescimento com óleo de palma.

Os teores analisados foram de 2, 4, 6, 8 e 10% de óleo em peso de asfalto. A cada incremento de óleo de palma, o asfalto se torna mais “mole”, o que melhora o comportamento quanto à fadiga, mas resulta em um baixo desempenho à deformação permanente. Por esse motivo, conclui-se que a dosagem deve ser o suficiente para aumentar a vida de fadiga do asfalto, mas sem amolece-lo demasiadamente de forma a comprometer o seu desempenho quanto a deformação permanente.

Diante disso, os teores de óleo de palma que satisfazem essa condição estão compreendidos entre 4,3% e 7,4%. Isto é, 4,3% é o mínimo necessário para reverter

completamente os efeitos do envelhecimento no comportamento de fadiga do asfalto e; 7,4% o teor máximo que se pode aplicar sem que o asfalto rejuvenescido apresente desempenho quanto à deformação permanente menor que quando no seu estado virgem. Dito isso, pode-se concluir que o rejuvenescimento de asfaltos envelhecidos deve ter como foco a restauração de propriedades de desempenho baseados em mecanismos de temperaturas baixas e intermediárias, pois em altas temperaturas, o desempenho do asfalto é afetado negativamente com o acréscimo do rejuvenescedor. Portanto, o teor ótimo de óleo de palma adotado foi de 4,3%, definido com base nas propriedades de desempenho do asfalto.

É essencial ressaltar que um dos pontos destacados neste estudo é a robustez do método empregado para determinar o teor de rejuvenescedor de asfalto. A abordagem consistiu na adição de diversos teores de óleo de palma, permitindo a identificação de um teor ótimo para as condições específicas do experimento. É crucial salientar que esse teor ideal não é uma constante fixa, mas sim uma variável sensível, influenciada pelo tipo de rejuvenescedor utilizado, pelas características do asfalto empregado e pelas condições particulares de envelhecimento e serviço ao qual o asfalto esteve sujeito.

Dessa forma, a contribuição fundamental deste estudo não se restringe à descoberta de um teor ótimo único, mas concentra-se na concepção de um método sistemático e adaptável. Esse método não só atende às exigências do presente procedimento experimental, mas também se revela como uma ferramenta versátil, aplicável em diferentes cenários para determinar o teor mais apropriado em cada situação. Essa abordagem não apenas valida os resultados positivos alcançados, mas também destaca a relevância prática do método empregado, consolidando-o como uma valiosa contribuição para futuras investigações e aplicações no campo da pavimentação asfáltica reciclada.

Em comparação com o agente rejuvenescedor, produzido para esta finalidade, a partir dos resultados obtidos, pode-se afirmar que o óleo de palma provoca as mesmas mudanças no asfalto envelhecido. A diferença nas propriedades dos asfaltos rejuvenescidos com o óleo de palma e o aditivo rejuvenescedor é pequena, com ligeira vantagem para este último pois, para o teor aplicado (7,5%) o agente rejuvenescedor e o óleo de palma tiveram o mesmo resultado (em ordem de grandeza) no que diz respeito à fadiga, mas em relação à deformação permanente, o asfalto modificado com o agente rejuvenescedor apresentou resultados melhores, ainda que bem próximos dos resultados apresentados pelo asfalto rejuvenescido com óleo de palma (o suficiente para caracterizá-lo como adequado ao tráfego extremamente pesado, enquanto o outro foi classificado como adequado ao tráfego muito pesado).

No entanto, uma outra conclusão pode ser obtida através desses resultados: sendo que o asfalto rejuvenescido com o agente comercial ligeiramente mais rígido que o asfalto

rejuvenescido com o óleo de palma, pode-se induzir que o óleo de palma necessita de menores teores que o agente rejuvenescedor para resultar na restauração do desempenho do asfalto.

Além do mais, há de se considerar que o óleo de palma é um produto natural, de fonte renovável e facilmente encontrado na rede de supermercados brasileira. Sendo o óleo de maior produção e consumo no mundo e que cresce cada vez mais no Brasil, além dos excelentes resultados obtidos nessa pesquisa, fica evidente que o óleo de palma possui grande potencial para ser utilizado como agente rejuvenescedor de asfaltos envelhecidos na produção de misturas asfálticas recicladas.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados obtidos através do desenvolvimento deste trabalho podem ser ampliados em trabalhos futuros. Com o intuito de complementar o potencial não explorado nesta pesquisa são propostos:

- i. Realizar uma análise química complementar através de cromatografia ou análise similar, visando determinar as mudanças das frações do asfalto (Maltenos e asfaltenos) para uma avaliação do envelhecimento e do rejuvenescimento dos asfaltos;
- ii. Realizar ensaios no BBR, visando analisar as propriedades reológicas dos asfaltos em baixas temperaturas;
- iii. Utilizar outros asfaltos de referência, como o asfalto borracha e/ou o asfalto modificado por polímero, que tendem a apresentar melhores resultados que o CAP 50/70 convencional;
- iv. Validar os resultados obtidos com os asfaltos ampliando o estudo para uma análise de desempenho de misturas asfálticas produzidas com os mesmos asfaltos;
- v. Utilizar segmentos de campo experimentais, sujeitos ao tráfego, produzidos com misturas recicladas produzidas com o óleo de palma como agente rejuvenescedor e realizar uma análise técnica e financeira.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, G. N. E B. (ANP). Resolução ANP nº 19, de 11 de julho de 2005. 11 jul. 2005, p. 6.

AIREY, G. D. State of the Art Report on Ageing Test Methods for Bituminous Pavement Materials. <http://dx.doi.org/10.1080/1029843042000198568>, v. 4, n. 3, p. 165–176, set. 2007.

ALI, A. W.; MEHTA, Y. A.; NOLAN, A.; PURDY, C.; BENNERT, T. Investigation of the impacts of aging and RAP percentages on effectiveness of asphalt binder rejuvenators. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 211–217, 1 maio 2016.

AL-MANSOORI, T.; MICAELLO, R.; ARTAMENDI, I.; NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; GARCIA, A. Microcapsules for self-healing of asphalt mixture without compromising mechanical performance. **Construction and Building Materials**, v. 155, p. 1091–1100, 30 nov. 2017.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). **T 350-19 (2019): Standard method of test for multiple stress creep recovery (MSCR) test of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR)**. 2019.

_____. **T 391-20 (2020): Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep**. 2020.

_____. **M 332: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder Using Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) Test**, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **D4124-09: Standard Test Method for Separation of Asphalt into Four Fractions**, 2009.

_____. **D7175-15: Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)**. 2015.

_____. **D4887-11: Standard Practice for Preparation of Viscosity Blends for Hot Recycled Asphalt Materials**. 2016.

_____. **D6521-19: Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)**. 2019.

_____. **D6373-21: Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder**. 2021 a.

____. **D2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt.** 2021b.

ASADI, B.; TABATABAEE, N.; HAJJ, R. Use of linear amplitude sweep test as a damage tolerance or fracture test to determine the optimum content of asphalt rejuvenator. **Construction and Building Materials**, v. 300, p. 123983, 20 set. 2021.

ASPHALT INSTITUTE. **The asphalt binder handbook - MS-26.** 1st. ed. Kentucky.

AWOGBEMI, O.; ONUH, E. I.; INAMBAO, F. L. Comparative study of properties and fatty acid composition of some neat vegetable oils and waste cooking oils. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, v. 14, n. 3, p. 417–425, 30 set. 2019.

AZAHAR, W. N. A. W.; BUJANG, M.; JAYA, R. P.; HAININ, M. R.; NGADI, N.; ABDULLAH, M. E.; MOHAMED, A. A. A review on application of waste cooking oil as rejuvenator in porous asphalt mixture. **Jurnal Teknologi**, v. 78, n. 4, p. 105–109, 28 mar. 2016.

AZAHAR, W. N. A. W.; JAYA, R. P.; HAININ, M. R.; BUJANG, M.; NGADI, N. Mechanical performance of asphaltic concrete incorporating untreated and treated waste cooking oil. **Construction and Building Materials**, v. 150, p. 653–663, 30 set. 2017.

BAGHAEE MOGHADDAM, T.; BAAJ, H. The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 805–816, 1 jul. 2016.

BAHIA, H. U.; ANDERSON, D. A. Pressure aging vessel (PAV): A test to simulate rheological changes due to field aging. **ASTM Special Technical Publication**, n. 1241, p. 67–88, 1995.

BAHIA, H. U.; HANSON, D. I.; ZENG, M.; ZHAI, H.; KHATRI, M. A.; ANDERSON, R. M. **Characterization of Modified Asphalt Binders in Superpave Mix Design; COOPERATIVE HIGHWAY PROGRAM** (Transportation Research Board, Ed.) **NCHRP Report 459**. Disponível em: <<https://trid.trb.org/view/692511>>. Acesso em: 19 nov. 2021.

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

BEZE, L. EL. **Recyclage à chaud des agregats d' enrobes bitumineux: Identification de traceurs d' homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d' apport** **Faculté des Sciences et Techniques**. Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, 2008.

BRASIL. Projeto de Lei 7326/2010. 13 maio 2010.

BRASIL. **Frota de Veículos - 2022**. 2022.

BRASIL, M. DA A. P. E A. **Diagnóstico da produção sustentável da palma de óleo**. 2018.

BRITISH STANDARD INSTITUTION (BSI). **EN 12697-3:2013+A1:2018 - Bituminous mixtures - Test methods, Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator**, 2018.

BROWN, T. L.; LEMAY JR, H. E.; BURSTEN, B. E.; MURPHY, C. J.; WOODWARD, P. M.; STOLTZFUS, M. W. **Química: a ciência central**. 13th. ed. São Paulo. 2016.

CAMARGO, I. G. D. N.; HOFKO, B.; MIRWALD, J.; GROTHE, H. Effect of thermal and oxidative aging on asphalt binders rheology and chemical composition. **Materials**, v. 13, n. 19, p. 1–21, 2020.

CAO, XINXIN; WANG, H.; CAO, XUEJUAN; SUN, W.; ZHU, H.; TANG, B. Investigation of rheological and chemical properties asphalt binder rejuvenated with waste vegetable oil. **Construction and Building Materials**, v. 180, p. 455–463, 20 ago. 2018.

CAVALCANTE, F. P. **Efeito da adição dos óleos de Ricinus Communis e Linus Usitatissimum nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo puro e modificado**. Campina Grande. Universidade Federal de Campina Grande, 2016.

CHANDRAN, N.; SARATHCHANDRAN, C.; THOMAS, S. Introduction to rheology. *Em: Rheology of Polymer Blends and Nanocomposites: Theory, Modelling and Applications*. Elsevier, 2019. p. 1–17.

CHEN, M.; XIAO, F.; PUTMAN, B.; LENG, B.; WU, S. High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils. **Construction and Building Materials**, v. 59, p. 10–16, 30 maio 2014.

CHEN, Y.; CHEN, Z.; XIANG, Q.; QIN, W.; YI, J. Research on the influence of RAP and aged asphalt on the performance of plant-mixed hot recycled asphalt mixture and blended asphalt. **Case Studies in Construction Materials**, v. 15, p. e00722, 1 dez. 2021.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias**. Brasília. 2022.

CORBETT, L. W. Composition of Asphalt Based on Generic Fractionation, Using Solvent Deasphalting, Elution-Adsorption Chromatography, and Densimetric Characterization. **Analytical Chemistry**, v. 41, n. 4, p. 576–579, 1969.

CRAVO, M. C. C. **Efeitos Do Envelhecimento Térmico E Fotoquímico Em Ligantes Asfálticos, Mástique E Matriz De Agregados Finos**. Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

DAUD, Z. A. M.; KAUR, D.; KHOSLA, P. Health and Nutritional Properties of Palm Oil and Its Components. *Em: Palm Oil: Production, Processing, Characterization, and Uses*. AOCS Press, 2012. p. 545–560.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES (DNIT). **Plano Nacional de Viação e Sistema Nacional de Viação**. 2022.

_____. **Cimentos asfálticos de petróleo - Especificação de material** Rio de Janeiro Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006. Disponível em: <www.200.179.25.133/>. Acesso em: 27 abr. 2023

_____. **Manual de Pavimentação**. 3rd. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2006.

_____. **Terminologias rodoviárias usualmente utilizadas**, 2007. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/download/rodovias/rodovias-federais/terminologias-rodoviarias/terminologias-rodoviarias-versao-11.1.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2023

DEY, S.; REANG, N. M.; DAS, P. K.; DEB, M. A comprehensive study on prospects of economy, environment, and efficiency of palm oil biodiesel as a renewable fuel. **Journal of Cleaner Production**, v. 286, p. 124981, 1 mar. 2021.

DOMONE, P.; ILLSTON, J. **Construction materials: their nature and behaviour**. 4th. ed. v. 4. 2010.

DURANGO-GIRALDO, G.; ZAPATA-HERNANDEZ, C.; SANTA, J. F.; BUITRAGO-SIERRA, R. Palm oil as a biolubricant: Literature review of processing parameters and tribological performance. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 107, p. 31–44, 25 mar. 2022.

EL-SHORBAGY, A. M.; EL-BADAWY, S. M.; GABR, A. R. Investigation of waste oils as rejuvenators of aged bitumen for sustainable pavement. **Construction and Building Materials**, v. 220, p. 228–237, 30 set. 2019.

ERSKINE, J. A.; HESP, S. A.; KAVEH, F. Another Look At Accelerated Aging of Asphalt Cements in the Pressure Aging Vessel. **Eurasphalt & Eurobitume Congress**, n. June 2012, p. 13–15, 2012.

FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade do uso do resíduo fosfogesso como material de construção**. São Carlos. Escola de Engenharia da Universidade de São Carlos, 2006.

FAXINA, A. L.; KLINSKY, L. M. G. **Caracterização reológica de ligantes asfálticos com vistas à seleção de materiais e ao controle de qualidade**. 2017.

GABRIEL, K. C. P. **Produção de biodiesel a partir de óleo de palma**. malliInstituto Superior Técnico, 2015.

GERAQUE, E. **Dendê busca se fortalecer como uma das vocações amazônicas - InfoAmazonia**. Disponível em: <<https://infoamazonia.org/2021/01/26/dende-busca-se-fortalecer-como-uma-das-vocacoes-amazonicas/>>. Acesso em: 16 jan. 2022.

GÖKALP, İ.; UZ, V. E. Utilizing of Waste Vegetable Cooking Oil in bitumen: Zero tolerance aging approach. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 116695, 10 dez. 2019.

HETTIARACHCHI, C.; HOU, X.; WANG, J.; XIAO, F. A comprehensive review on the utilization of reclaimed asphalt material with warm mix asphalt technology. **Construction and Building Materials**, v. 227, p. 117096, 10 dez. 2019.

HU, W.; SHU, X.; HUANG, B. Sustainability innovations in transportation infrastructure: An overview of the special volume on sustainable road paving. **Journal of Cleaner Production**, v. 235, p. 369–377, 20 out. 2019.

HUGENER, M. *et al.* Recommendation of RILEM TC 264 RAP on the evaluation of asphalt recycling agents for hot mix asphalt. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, v. 55, n. 2, p. 1–9, 1 mar. 2022.

HUNTER, R. N.; SELF, A.; READ, J. **The Shell Bitumen Handbook**. 6th editio ed. [s.l.] ICE Publishing, 2015.

JI, J.; YAO, H.; SUO, Z.; YOU, Z.; ASCE, M.; LI, H.; XU, S.; SUN, L. Effectiveness of Vegetable Oils as Rejuvenators for Aged Asphalt Binders. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 3, p. D4016003, 27 out. 2016.

JONI, H. H.; AL-RUBAEE, R. H. A.; AL-ZERKANI, M. A. Rejuvenation of aged asphalt binder extracted from reclaimed asphalt pavement using waste vegetable and engine oils. **Case Studies in Construction Materials**, v. 11, p. e00279, 1 dez. 2019.

LENG, B.; CHEN, M.; WU, S. Effect of Waste Edible Vegetable Oil on High Temperature Properties of Different Aged Asphalts. **Key Engineering Materials**, v. 599, p. 135–140, 2014.

LESUEUR, D. The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 145, n. 1–2, p. 42–82, 30 jan. 2009.

LI, H.; DONG, B.; WANG, W.; ZHAO, G.; GUO, P.; MA, Q. Effect of Waste Engine Oil and Waste Cooking Oil on Performance Improvement of Aged Asphalt. **Applied Sciences** **2019**, Vol. 9, Page 1767, v. 9, n. 9, p. 1767, 28 abr. 2019.

LI, Y. *et al.* Review of ultraviolet ageing mechanisms and anti-ageing methods for asphalt binders. **Journal of Road Engineering**, v. 2, n. 2, p. 137–155, 1 jun. 2022.

MALKIN, A. YA.; ISAYEV, A. **Rheology: Concepts, Methods, and Applications**. 3rd Editio ed. [s.l.] ChemTec Publishing, 2017.

MALLICK, RAJIB B., T. E.-K. **Pavement Engineering: Principles and Practice**. 2013.

MARTINS, A. T. **Contribuição Para a Validação Do Ensaio De Resistência Ao Dano Por Fadiga Para Ligantes Asfálticos**. Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

MASI, G.; MICHELACCI, A.; MANZI, S.; BIGNOZZI, M. C. Assessment of reclaimed asphalt pavement (RAP) as recycled aggregate for concrete. **Construction and Building Materials**, v. 341, p. 127745, 25 jul. 2022.

MORAES, R. **Investigation of Mineral Filler Effects on the Aging Process of Asphalt Mastics**. Wiscosin. University of Wiscosin, 2014.

MOTHÉ, M. G. Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, p. 182, 2009.

MOUILLET, V.; FARCAS, F.; SAUGER, J.; CHAILLEUX, E. **Study of UV rays effects on the evolution of bituminous mix behaviour** 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. **Anais...Prague: E&E Congress 2016**, jun. 2016. Acesso em: 1 abr. 2023

NASCIMENTO, L. A. H. DO. **Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil**. Raleigh, North Carolina: Faculty of North Carolina State University, 2015.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **Relationship Between Chemical Makeup of Binders and Engineering Performance** (and M. National Academies of Sciences, Engineering, Ed.)**Relationship Between Chemical Makeup of Binders and Engineering Performance**. Washington: The National Academies Press, 2017. Disponível em: <<http://nap.edu/24850>>.

NAYAK, P.; SAHOO, U. C. A rheological study on aged binder rejuvenated with Pongamia oil and Composite castor oil. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 18, n. 7, p. 595–607, 3 jul. 2017.

NDUKA, J. K. C.; OMOZUWA, P. O.; IMANAH, O. E. Effect of heating time on the physicochemical properties of selected vegetable oils. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 14, n. 4, p. 103063, 1 abr. 2021.

NOGUEIRA, R. L.; SOARES, J. B.; SOARES, S. DE A. Rheological evaluation of cotton seed oil fatty amides as a rejuvenating agent for RAP oxidized asphalts. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 1145–1153, 30 out. 2019.

NORAMBUENA-CONTRERAS, J.; YALCIN, E.; GARCIA, A.; AL-MANSOORI, T.; YILMAZ, M.; HUDSON-GRIFFITHS, R. Effect of mixing and ageing on the mechanical and self-healing properties of asphalt mixtures containing polymeric capsules. **Construction and Building Materials**, v. 175, p. 254–266, 30 jun. 2018.

NOSETTI, A.; PÉREZ-MADRIGAL, D.; PÉREZ-JIMÉNEZ, F.; MARTÍNEZ, A. H. Effect of the recycling process and binder type on bituminous mixtures with 100% reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 440–448, 10 abr. 2018.

OCAMPO BATLLE, E. A.; CASTILLO SANTIAGO, Y.; VENTURINI, O. J.; ESCOBAR PALACIO, J. C.; SILVA LORA, E. E.; YEPES MAYA, D. M.; ALBIS ARRIETA, A. R. Thermodynamic and environmental assessment of different scenarios for the insertion of pyrolysis technology in palm oil biorefineries. **Journal of Cleaner Production**, v. 250, p. 119544, 20 mar. 2020.

OLIVEIRA, Y. M. M. **Reologia de Ligantes asfálticos e suas variações frente à incorporação de polímeros e ao envelhecimento simplificado com RTFOT**. Florianópolis. Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.

OSMARI, P. H.; LEITE, L. F. M.; ARAGÃO, F. T. S.; CRAVO, M. C. C.; DANTAS, L. N.; MACEDO, T. F. Cracking resistance evaluation of asphalt binders subjected to different laboratory and field aging conditions. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1618530>, v. 20, n. sup2, p. S663–S677, 31 jul. 2019.

ÖZDEMİR, D. K. High and low temperature rheological characteristics of linear alkyl benzene sulfonic acid modified bitumen. **Construction and Building Materials**, v. 301, p. 124041, 27 set. 2021.

Palm Oil Explorer. Disponível em: <<https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=4243000>>. Acesso em: 27 abr. 2023.

PORTUGAL, A. C. X. **Avaliação reológica de cimentos asfálticos de petróleo modificados com óleo de soja e de milho**. Campina Grande. Universidade Federal de Campina Grande, 2016.

PRADHAN, S. K.; SAHOO, U. C. Influence of softer binder and rejuvenator on bituminous mixtures containing reclaimed asphalt pavement (RAP) material. **International Journal of Transportation Science and Technology**, v. 11, n. 1, p. 46–59, 1 mar. 2022.

RAUL, C. M. **Avaliação a nível de ligantes da aplicabilidade de material fresado na execução de misturas asfálticas antirreflexão de trincas**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2019.

ROBERTS, F. L.; KANDHAL, P. S.; BROWN, E. R.; LEE, D.-Y.; KENNEDY, T. W. **HOT MIX ASPHALT MATERIALS, MIXTURE DESIGN AND CONSTRUCTION. SECOND EDITION**. 2nd edition ed. 1996.

SHENOY, A. Fatigue Testing and Evaluation of Asphalt Binders Using the Dynamic Shear Rheometer. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 30, n. 4, p. 303, 2002.

SHIRODKAR, P.; MEHTA, Y.; NOLAN, A.; DUBOIS, E.; REGER, D.; MCCARTHY, L. Development of blending chart for different degrees of blending of RAP binder and virgin binder. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 73, p. 156–161, 2013.

SOBREIRO, F. P. **Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS**. São Carlos: Universidade de São Carlos, 2014.

SOUTHERN, M. A perspective of bituminous binder specifications. *Em*: **Advances in Asphalt Materials: Road and Pavement Construction**. Woodhead Publishing, 2015. p. 1–27.

SOUZA, L. J. S. **Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com cimento asfáltico de petróleo modificado com óleo de mamona**. Campina Grande. Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

SUN, G.; ZHANG, J.; TAN, X.; GUO, D.; ZHOU, Y.; GUAN, Y. Evaluation of conventional technical properties and self-healing ability of bitumen-based sealants containing sunflower-oil microcapsules for pavement cracks. **Construction and Building Materials**, v. 254, p. 119299, 10 set. 2020.

TAKAHASHI, M. M. **Avaliação do envelhecimento e rejuvenescimento de ligantes asfálticos**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2020.

TAUSTE, R.; MORENO-NAVARRO, F.; SOL-SÁNCHEZ, M.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 593–609, 2018.

THAKUR, J. K.; HAN, J. Recent Development of Recycled Asphalt Pavement (RAP) Bases Treated for Roadway Applications. **Transportation Infrastructure Geotechnology**, v. 2, n. 2, p. 68–86, 1 jun. 2015.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Oilseeds: World Markets and Trade**. Disponível em: <<https://public.govdelivery.com/accounts/USDAFAS/subscriber/new>>. 2023

UZ, V. E.; GÖKALP, İ. Sustainable recovery of waste vegetable cooking oil and aged bitumen: Optimized modification for short and long term aging cases. **Waste Management**, v. 110, p. 1–9, 1 jun. 2020.

VESTANA, P. M. **Segmentos experimentais na BR116/RS empregando TLAflex, HiMA e 55/75-E (sbs): Caracterização Avançada e Monitoramento**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2021.

VILLEGAS-VILLEGAS, R. E.; BALDI-SEVILLA, A.; AGUIAR-MOYA, J. P.; LORIA-SALAZAR, L. Analysis of asphalt oxidation by means of accelerated testing and environmental conditions. **Transportation Research Record**, v. 2672, n. 28, p. 244–255, 1 jun. 2018.

WANG, J.; LV, S.; LIU, J.; PENG, X.; LU, W.; WANG, Z.; XIE, N. Performance evaluation of aged asphalt rejuvenated with various bio-oils based on rheological property index. **Journal of Cleaner Production**, v. 385, p. 135593, 20 jan. 2023.

WILLIS, R.; TRAN, N. H. Bring Life Back to Aging. **Asphalt Pavement Magazine**, v. 20, n. 4, p. 36–41, 2015.

XIAOHU, L. U.; TALON, Y.; REDELIUS, P. Ageing of bituminous binders - laboratory tests and field data. **PROCEEDINGS OF THE 4TH EURASPHALT AND EUROBITUME CONGRESS HELD MAY 2008, COPENHAGEN, DENMARK, 2008.**

YAN, K.; LAN, H.; DUAN, Z.; LIU, W.; YOU, L.; WU, S.; MILJKOVIĆ, M. Mechanical performance of asphalt rejuvenated with various vegetable oils. **Construction and Building Materials**, v. 293, p. 123485, 26 jul. 2021.

YAN, K.; PENG, Y.; YOU, L. Use of tung oil as a rejuvenating agent in aged asphalt: Laboratory evaluations. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 117783, 10 abr. 2020.

YEN, T. **Asphaltene/resin plus oil interconvention: an investigation into colloidal model of asphaltene** Workshop on the chemical components and structure of asphalt materials. **Anais...**1991

YUECHAO, Z.; MEIZHU, C.; SHAOPENG, W.; QI, J. Rheological properties and microscopic characteristics of rejuvenated asphalt using different components from waste cooking oil. **Journal of Cleaner Production**, v. 370, p. 133556, 10 out. 2022.

ZAHOOR, M.; NIZAMUDDIN, S.; MADAPUSI, S.; GIUSTOZZI, F. Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 278, p. 123304, 1 jan. 2021.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; FRANK, R. Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on Superpave performance grade specifications. **Construction and Building Materials**, v. 69, p. 159–166, 30 out. 2014a.

_____. 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 92, p. 230–245, 1 nov. 2014b.

ZAUMANIS, M.; MALLICK, R. B.; POULIKAKOS, L.; FRANK, R. Influence of six rejuvenators on the performance properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 71, p. 538–550, 30 nov. 2014.

ZENG, M.; LI, J.; ZHU, W.; XIA, Y. Laboratory evaluation on residue in castor oil production as rejuvenator for aged paving asphalt binder. **Construction and Building Materials**, v. 193, p. 276–285, 30 dez. 2018.

ZHANG, D.; CHEN, M.; WU, S.; LIU, J.; AMIRKHANIAN, S. Analysis of the Relationships between Waste Cooking Oil Qualities and Rejuvenated Asphalt Properties. **Materials** **2017, Vol. 10, Page 508**, v. 10, n. 5, p. 508, 6 maio 2017.

ZHANG, J.; SUN, C.; LI, P.; JIANG, H.; LIANG, M.; YAO, Z.; ZHANG, X.; AIREY, G. Effect of different viscous rejuvenators on chemical and mechanical behavior of aged and recovered bitumen from RAP. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 117755, 10 abr. 2020.

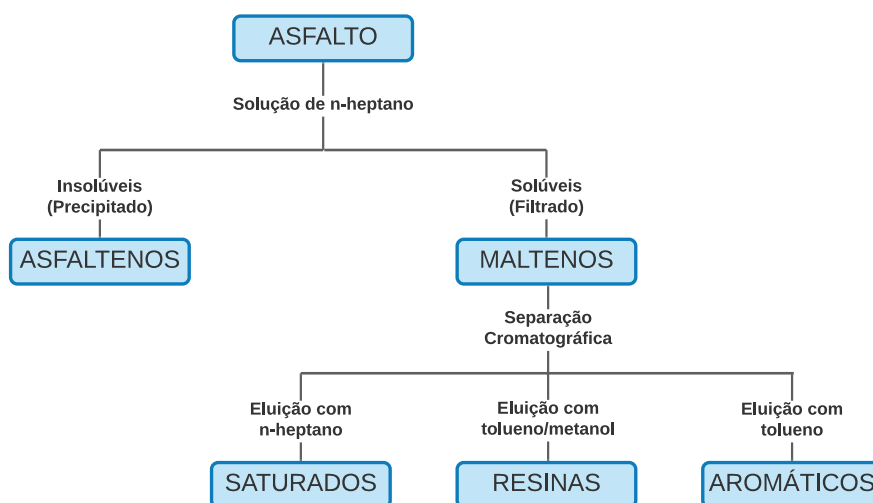
ZHANG, J.; ZHANG, X.; LIANG, M.; JIANG, H.; WEI, J.; YAO, Z. Influence of different rejuvenating agents on rheological behavior and dynamic response of recycled asphalt mixtures incorporating 60% RAP dosage. **Construction and Building Materials**, v. 238, p. 117778, 30 mar. 2020.

ANEXO A – ESTRUTURA QUÍMICA DO ASFALTO

A.1. Fracionamento do asfalto

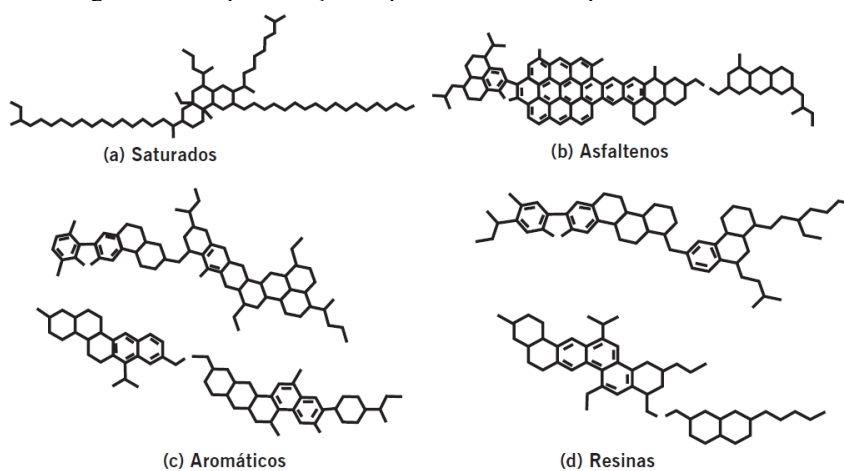
O procedimento do fracionamento do asfalto, ilustrado na Figura A.1, é realizado através do procedimento normalizado pela norma ASTM D4124 (ASTM, 2009). Primeiramente, os asfaltenos são separados por precipitação com adição de n-heptano. Em seguida, as frações maltênicas, solúveis no n-heptano, são separadas por cromatografia de adsorção. A representação esquemática das frações do asfalto está representada na Figura A.2.

Figura A.1. Frações químicas do asfalto



Fonte: Adaptado de (Corbett, 1969)

Figura A.2. Representação esquemática dos componentes do asfalto

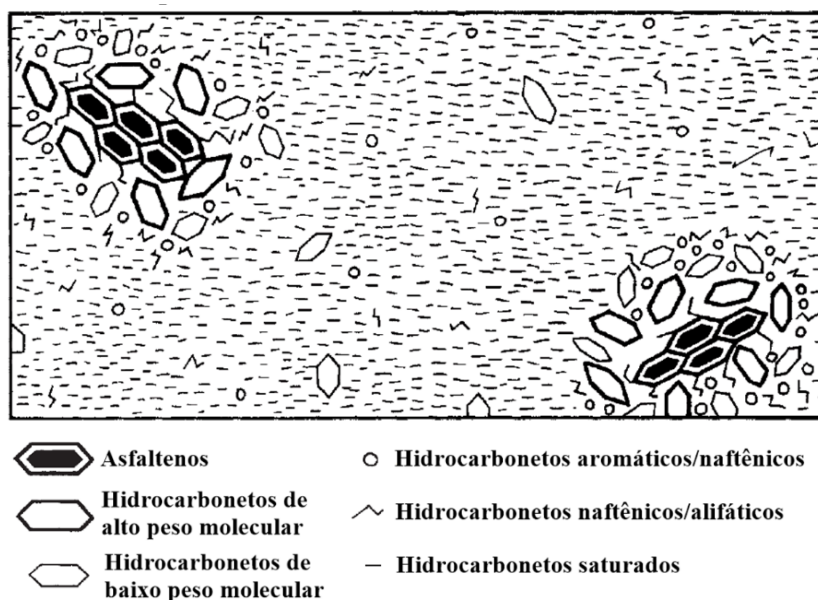


Fonte: Bernucci *et al.* (2006)

A.2. Comportamento “sol-gel” do asfalto

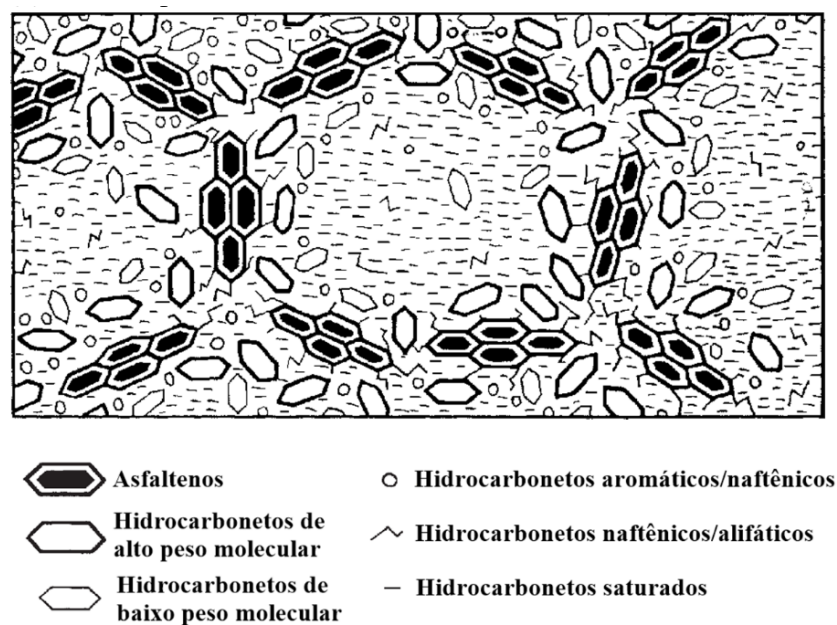
As Figuras A.3 e A.4 representam a estrutura de asfaltos com comportamento tipo “sol” e tipo “gel”, respectivamente.

Figura A.3. Representação esquemática do comportamento “sol” do asfalto



Fonte: Adaptado de Hunter; Self e Read (2015)

Figura A.4. Representação esquemática do comportamento “gel” do asfalto



Fonte: Adaptado de Hunter; Self e Read (2015)

ANEXO B – ESPECIFICAÇÃO DO ASFALTO

Tabela B.1. Especificação brasileira do asfalto segundo a ANP (ANP, 2005)

Características	Unidade	Limites				Métodos		
		CAP 30/45	CAP 50/70	CAP 85/100	CAP 150/200	ABNT	ASTM	DNER
Penetração 100 g, 5 s, 25 °C	0,1 mm	30-45	50-70	85-100	150-200	NBR 6576	D5	ME 003/99
Ponto de amolecimento, mín.	°C	52	46	43	37	NBR 6560	D36	–
Viscosidade Saybolt-Furol								
a 135 °C, mín.		192	141	110	80			
a 150 °C, mín.	s	90	50	43	36	NBR 14950	E102	ME 004/94
a 177 °C		40-150	300- 150	15-60	15-60			
Viscosidade Brookfield								
a 135 °C, mín. SP 21, 20 rpm		374	274	214	155			
a 150 °C, mín. SP 21, 50 rpm	cP	203	112	97	81	NBR 15184	D4402	–
a 177 °C, mín. SP 21, 100 rpm		76-285	57-285	28-114	28-114			
Índice de Suscetibilidade Térmica	–	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	(-1,5) a (+0,7)	–	–	–
Ponto de fulgor, mín.	°C	235	235	235	235	NBR 11341	D92	ME 149/49
Solubilidade em tricloroetileno, mín.	% massa	99,5	99,5	99,5	99,5	NBR 14855	D2042	ME 153/94
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	60	60	100	100	NBR 6293	D113	ME 163/98
Efeito do calor e do ar a 163 °C, 85 min								
Variação em massa, máx.	% massa	0,5	0,5	0,5	0,5	–	D 2872	–
Ductilidade a 25°C, mín.	cm	10	20	50	50	NBR 6293	D113	ME 163/98
Aumento do ponto de amolecimento, máx.	°C	8	8	8	8	NBR 6560	D36	–
Penetração retida, mín.	%	60	55	55	50	NBR 6576	D5	ME 003/99

Tabela B. 2. Especificação Superpave do asfalto segundo a ASTM (ASTM, 2021)

Performance Grade (PG)	PG 46	PG 52	PG 58	PG 64	PG 70	PG 76	PG 82
		-34 -40 -46	-10 -16 -22 -28 -34 -40 -46	-16 -22 -28 -34 -40	-10 -16 -22 -28 -34 -40	-10 -16 -22 -28 -34 -40	-10 -16 -22 -28 -34
Temperatura máx. de projeto, °C	< 46	< 52	< 58	< 64	< 70	< 76	< 82
Temperatura mín. de projeto, °C	> -34 > -40 > -46	> -10 > -16 > -22 > -28 > -34 > -40 > -46	> -16 > -22 > -28 > -34 > -40	> -16 > -22 > -28 > -34 > -40	> -16 > -22 > -28 > -34 > -40	> -16 > -22 > -28 > -34	> -16 > -22 > -28 > -34
Ligante Original							
Ponto de fulgor, ASTM D92, mín. °C	230	230	230	230	230	230	230
Viscosidade, ASTM D4402, máx. 3 Pa.s,	135	135	135	135	135	135	135
Temperatura do ensaio °C							
DSR, ASTM D7175: $G^*/sen(\delta)$, mín. 1kPa, placa 25 mm, <i>gap</i> 1 mm, Temperatura do ensaio a 10 rad/s, °C	46	52	58	64	70	76	82
Rolling Thin Film Oven Test (RTFO), ASTM D2872							
Varição em massa, máx., %	1	1	1	1	1	1	1
DSR, ASTM D7175, $G^*/sen(\delta)$, mín. 2,2 kPa, placa 25 mm, <i>gap</i> 1 mm, Temperatura do ensaio a 10 rad/s, °C	46	52	58	64	70	76	82
Pressure Aging Vessel (PAV) ASTM D6521							
Temperatura máxima do PAV, °C	90 (100,110)	90 (100,110)	100 (110)	100 (110)	100 (110)	100 (110)	100 (110)
DSR, ASTM D7175, $G^*.sen(\delta)$, máx. 5000 kPa, placa 8 mm, <i>gap</i> 2 mm, Temperatura do ensaio a 10 rad/s, °C	10 7 4	25 22 19 16 13 10 7	25 22 19 16 13	31 28 25 22 19 16	34 31 28 25 22 19	37 34 31 28 35	40 37 34 32 28
BBR ASTM D6648, máx. 300 Mpa, m-valor; mín. 0,3, Temperatura do ensaio aos 60 s, °C	-24 -30 -36	0 -6 -12 -18 -24 -30 -36	-6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24	0 -6 -12 -18 -24
Tensão direta ASTM D6723, falha na deformação, mín. 1 % temperatura do teste a 1 mm/min, °C	-24 -30 -36	0 -6 -12 -18 -24 -30 -36	-6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24 -30	0 -6 -12 -18 -24	0 -6 -12 -18 -24	0 -6 -12 -18 -24

ANEXO C – *LINEAR AMPLITUDE SWEEP (LAS)*

Adaptado de AASHTO T 391 (2020)

C.1. Varredura de Frequências

A amostra do ensaio é inicialmente envelhecida em curto e em longo prazo e depois levada ao DSR, onde será realizado o procedimento, na configuração de 2 cm de *gap* entre as placas e 8 mm de diâmetro da amostra.

Esta primeira etapa consiste em aplicar um carregamento oscilatório no asfalto, à temperatura constante (temperatura intermediária do asfalto) e deformação de 0,1%, variando as frequências de 0,2 a 30 Hz. Em cada uma das frequências são determinados o módulo de armazenamento (componente elástica do módulo complexo) e o ângulo de fase.

Para a determinação do parâmetro α , é inicialmente calculada a inclinação m do ajuste da curva cuja forma é dada pela Equação C.1.

$$\log G' = m \cdot \log \omega + b \quad (\text{C. 1})$$

Onde: G' é o módulo de armazenamento, ω é a frequência e m é a inclinação da curva de ajuste e b é o parâmetro de interceptação da função linear.

O parâmetro α é então calculado conforme a Equação C.2:

$$\alpha = \frac{1}{m} \quad (\text{C. 2})$$

C.2. Varredura de amplitudes

Esta segunda etapa é realizada na sequência da etapa de varredura de frequências na mesma temperatura, mas agora sob frequência de carregamento constante, igual a 10 Hz. A deformação do carregamento é aumentada linearmente de 0,1 a 30%, de forma a acelerar o dano na amostra de asfalto. A tensão cisalhante de pico e a respectiva deformação são registradas a cada 10 ciclos (1 s), juntamente com o ângulo de fase e o módulo complexo.

A análise dos dados é feita com base na teoria VECD e, inicialmente, determina-se o dano acumulado na amostra do ensaio conforme a Equação C.3:

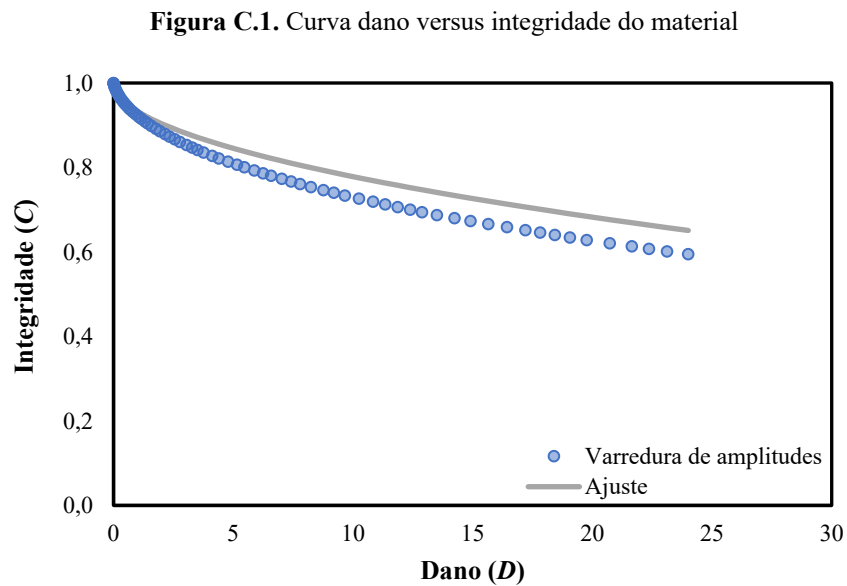
$$D(t) = \sum_{i=1}^N [\pi\gamma_0^2 \cdot (C_{i-1} - C_i)]^{\frac{\alpha}{1+\alpha}} \cdot (t_i - t_{i-1})^{\frac{1}{1+\alpha}} \quad (\text{C. 3})$$

Onde: D é o dano acumulado ao longo do ensaio; α é o parâmetro calculado na etapa de varredura de frequências; t é o tempo do ensaio; γ_0 é a deformação em um determinado ponto e; C é a integridade do material, calculada conforme a Equação C.4.

$$C(t) = \frac{G^*(t)}{G_{inicial}^*} \quad (\text{C. 4})$$

Sendo: $G^*(t)$ o módulo complexo em um determinado instante do ensaio t e; $G_{inicial}^*$ o valor inicial do módulo complexo.

A cada instante do ensaio são registrados os valores de $C(t)$ e $D(t)$ (é assumido que $C(0) = 1$ e $D(0) = 0$) e é plotada a curva dano versus integridade do material (Figura C.1) cuja equação de ajuste é determinada para obter os coeficientes C_1 e C_2 (Equação C.5).



$$C(t) = C_0 - C_1(D)^{C_2} \quad (\text{C. 5})$$

Onde: C_0 é a integridade inicial do material, igual a 1; C_1 e C_2 são os coeficientes de ajuste da curva.

O valor do dano na falha (D_f) é definido como sendo o dano acumulado que corresponde à integridade do material no pico da tensão cisalhante (após a qual ocorre a ruptura da amostra). É calculado conforme a Equação C.6.

$$D_f = \left(\frac{C_0 - C_{\text{pico de tensão}}}{C_1} \right)^{\frac{1}{C_2}} \quad (\text{C. 6})$$

Os parâmetros do modelo de fadiga podem então ser determinados conforme as Equações C.7 e C.8.

$$A = \frac{f(D_f)^k}{k(\pi \cdot C_1 \cdot C_2)^\alpha} \quad (\text{C. 7})$$

$$B = -2\alpha \quad (\text{C. 8})$$

Onde: f é a frequência da etapa de varredura de amplitudes, igual a 10 Hz e k calculado conforme a Equação C.9.

$$k = 1 + (1 + C_1) \cdot \alpha \quad (\text{C. 9})$$

O parâmetro de fadiga N_f pode então ser calculado conforme a Equação C.10, apresentada a seguir:

$$N_f = A(\gamma_{\text{máx}})^B \quad (\text{C. 10})$$

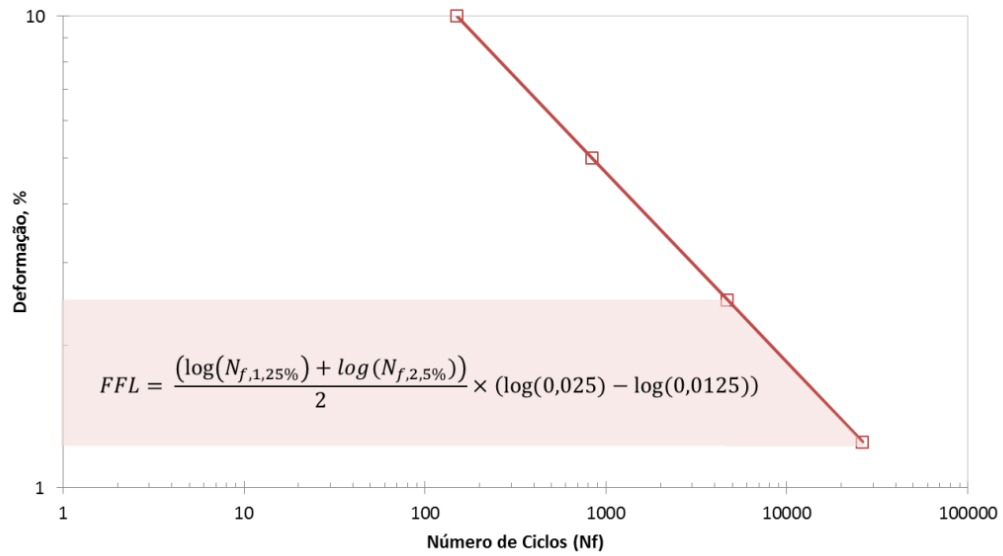
Onde: N_f é o parâmetro de fadiga, $\gamma_{\text{máx}}$ é a deformação máxima esperada sofrida pelo asfalto e A e B são os parâmetros de fadiga.

A partir de então, pode-se calcular o Fator de Fadiga do Ligante, proposto por Martins (2014), conforme a Equação C.11 e ilustrado na Figura C.2:

$$FFL = \frac{\log(N_{f-1,25}) + \log(N_{f-2,5})}{2} \times [\log(0,025) - \log(0,0125)] \quad (\text{C. 11})$$

Em que: $N_{f-1,25}$ é o número de ciclos na ruptura sob a deformação de 1,25% e $N_{f-2,5}$ é o número de ciclos na ruptura sob a deformação de 2,5%.

Figura C.2. Cálculo do *FFL* a partir da curva de fadiga



Fonte: Martins (2014)

ANEXO D – *MULTIPLE STRESS CREEP AND RECOVERY (MSCR)*

Adaptado de AASHTO T 350 (AASHTO, 201)

O ensaio MSCR é conduzido no DSR com amostras de asfalto envelhecidas em curto prazo (RTFO) na configuração de 1 mm de *gap* entre as placas e diâmetro de 25 mm. O procedimento consiste em manter uma tensão constante atuante na amostra de asfalto por 1 s de duração (*creep*) e, logo em seguida, retirar o carregamento e manter a amostra em repouso por 9 s (*recovery*), totalizando 1 ciclo de 10 s de duração. Todo o ensaio ocorre na temperatura alta do asfalto.

Os níveis de tensão empregados são 0,1 kPa, para os 20 primeiros ciclos do ensaio, e 3,2 kPa para os 10 ciclos restantes. Portanto, o tempo e o número total de ciclos são de 300 s e 30 ciclos, respectivamente, sendo que os 10 primeiros ciclos são para o condicionamento da amostra do ensaio.

A cada ciclo é registrada a deformação no fim da etapa de carregamento (ao final do período de 1 s de ensaio) e a deformação recuperada no fim da etapa de recuperação (o final do período de 10 s do ensaio).

Para cada um dos 10 últimos ciclos de 0,1 kPa e os 10 ciclos de 3,2 kPa são calculados:

- i. Valor ajustado da deformação ao fim da etapa de carregamento (ε_1), conforme a Equação D.1:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_c - \varepsilon_0 \quad (\text{D. 1})$$

Onde: ε_0 é o valor da deformação no início da etapa de carregamento e ε_c o valor da deformação no fim da etapa de carregamento.

- ii. Valor ajustado da deformação no fim da etapa de recuperação (ε_{10}), conforme a Equação D.2:

$$\varepsilon_{10} = \varepsilon_r - \varepsilon_0 \quad (\text{D. 2})$$

Onde: ε_r é o valor da deformação no fim da etapa de recuperação.

- iii. Percentual de deformação recuperada (ε_r), conforme a Equação D.3:

$$\epsilon_r = \frac{(\epsilon_1 - \epsilon_{10})}{\epsilon_1} \times 100 \quad (\text{D. 3})$$

iv. Valor da compliância não recuperável (J_{nr}), conforme as Equações D.4 e D.5:

$$J_{nr} = \frac{\epsilon_{10}}{0,1} \quad (\text{D. 4})$$

para o nível de tensão de 0,1 ou:

$$J_{nr} = \frac{\epsilon_{10}}{3,2} \quad (\text{D. 5})$$

para o nível de tensão de 3,2 kPa.

A partir dos resultados obtidos, determina-se a média do percentual de deformação recuperada (Equações D.6 e D.7) e a média da compliância não recuperável (Equações D.8 e D.9), para cada um dos níveis de tensão.

$$R_{0,1} = \frac{\sum \epsilon_r(0,1; N)}{10} \quad (\text{D. 6})$$

$$R_{3,2} = \frac{\sum \epsilon_r(3,2; N)}{10} \quad (\text{D. 7})$$

$$J_{nr0,1} = \frac{\sum J_{nr}(0,1; N)}{10} \quad (\text{D. 8})$$

$$J_{nr3,2} = \frac{\sum J_{nr}(3,2; N)}{10} \quad (\text{D. 9})$$

Onde: N é o número dos ciclos ($N = 11$ a 20 para o nível de tensão de $0,1$ kPa e $N = 1$ a 10 para o nível de tensão de $3,2$ kPa); $R_{0,1}$ e $R_{3,2}$ são a média percentual da deformação recuperada para os níveis de tensão de $0,1$ kPa e $3,2$ kPa, respectivamente, em percentagem; $\epsilon_r(0,1; N)$ e $\epsilon_r(3,2; N)$, o percentual de deformação recuperada para os níveis de tensão de $0,1$ kPa e $3,2$ kPa, respectivamente, em percentagem e; $J_{nr0,1}$ e $J_{nr3,2}$ os valores médios de

compliância não recuperável para os níveis de tensão de 0,1 kPa e 3,2 kPa, respectivamente, em kPa^{-1} .

Por fim, determina-se a diferença percentual entre $J_{nr0,1}$ e $J_{nr3,2}$ ($J_{nr\text{diff}}$), conforme a Equação D.10:

$$J_{nr\text{diff}} = \frac{J_{nr3,2} - J_{nr0,1}}{J_{nr0,1}} \times 100$$