



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**AVALIAÇÃO DO ÓLEO LUBRIFICANTE USADO OU CONTAMINADO (OLUC) COMO  
AGENTE REDUTOR DE VISCOSIDADE DO ASFALTO-BORRACHA**

**ALEKSEY JÚNIOR GRANDO**

Foz do Iguaçu  
2022



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**AVALIAÇÃO DO ÓLEO LUBRIFICANTE USADO OU CONTAMINADO (OLUC) COMO  
AGENTE REDUTOR DE VISCOSIDADE DO ASFALTO-BORRACHA**

**ALEKSEY JÚNIOR GRANDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Oliveira de Souza

Foz do Iguaçu  
2022

ALEKSEY JUNIOR GRANDO

**AVALIAÇÃO DO ÓLEO LUBRIFICANTE USADO OU CONTAMINADO (OLUC) COMO AGENTE REDUTOR DE VISCOSIDADE DO ASFALTO-BORRACHA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Oliveira de Souza  
UNILA

---

Prof. Dra. Edna Possan  
(UNILA)

---

Prof. Dr. João Paulo Souza Silva  
(UFG)

Foz do Iguaçu, 10 de agosto de 2022.

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação  
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

G748

Grando, Aleksey Júnior

Avaliação do Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado (OLUC) como agente redutor de viscosidade do asfalto-borracha / Aleksey Júnior Grando. - Foz do Iguaçu-PR, 2022.  
206 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Foz do Iguaçu-PR, 2022.

Orientador: Ricardo Oliveira de Souza.

1. Cimento asfáltico de petróleo. 2. Asfalto-borracha. 3. Avaliação reológica. 4. Óleo lubrificante usado ou contaminado. I. Souza, Ricardo Oliveira de. II. Título.

CDU 625.8

## RESUMO

A preocupação com os impactos ambientais causados pela indústria da construção devido ao elevado uso de recursos naturais e a necessidade de se melhorar o desempenho dos pavimentos rodoviários, resultou em diversos estudos sobre a utilização de materiais alternativos para modificação de ligantes asfálticos convencionais. A utilização de resíduos para modificação dos ligantes pode trazer benefícios ambientais, econômicos e de desempenho. O presente estudo avaliou as propriedades físicas, reológicas e de durabilidade de um ligante asfáltico produzido com elevada quantidade de borracha moída de pneus inservíveis, cuja viscosidade excessiva foi reduzida com Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado (OLUC). O OLUC e a borracha foram incorporados ao ligante de duas formas distintas. No primeiro tipo de modificação os resíduos foram adicionados diretamente ao asfalto aquecido sem nenhum tratamento prévio (modificação direta). No segundo tipo de modificação a borracha foi misturada com o OLUC e os resíduos foram aquecidos em estufa, antes de serem incorporados ao asfalto (tratamento da borracha). As amostras foram preparadas com CAP 50/70+22% de borracha e diferentes percentuais de OLUC (2,5; 5,0; 7,5 e 10%). Posteriormente, essas amostras foram submetidas aos ensaios de caracterização antes e após serem envelhecidas no curto e no longo prazo. A simulação do envelhecimento de curto prazo foi conduzida em estufa de filme fino rotativo e a simulação do envelhecimento de longo prazo em vaso de envelhecimento sob pressão. A caracterização física foi realizada por meio dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento e ponto de fulgor, para avaliar respectivamente, a consistência, susceptibilidade térmica e segurança das amostras. A trabalhabilidade, o comportamento viscoelástico, os parâmetros reológicos e o grau de desempenho foram avaliados mediante ensaios realizados com o reômetro de cisalhamento dinâmico, reômetro de fluência em viga e viscosímetro rotacional Brookfield. A análise termogravimétrica foi utilizada para avaliação da decomposição térmica das amostras. Os resultados mostraram que o OLUC foi capaz de reduzir a viscosidade excessiva do ligante asfalto-borracha e melhorar seu desempenho em temperaturas baixas e intermediárias, porém teve efeito negativo na durabilidade, na estabilidade térmica e na resistência à deformação permanente em elevadas temperaturas. O tratamento da borracha mitigou alguns desses efeitos negativos e foi mais eficiente na redução da rigidez do asfalto-borracha envelhecido em comparação com a modificação direta. Para as condições específicas definidas neste estudo, o teor de 2,5% de OLUC foi a melhor opção, para ambos os tipos de modificação, pois atendeu as especificações para ligante asfalto-borracha do tipo AB22 definidas na norma DNIT 111.

Palavras-chave: Cimento asfáltico de petróleo. Asfalto-borracha. Avaliação reológica. Óleo lubrificante usado ou contaminado.

## ABSTRACT

The concern with the environmental impacts caused by the construction industry due to the high use of natural resources and the need to improve the performance of road pavements, resulted in several studies on the use of alternative materials to modify conventional asphalt binders. The use of residues to modify asphalt binders can bring environmental, economic and performance benefits. The present study evaluated the physical, rheological and durability properties of an asphalt binder produced with a high amount of ground rubber from scrap tires, whose excessive viscosity was reduced with Waste Engine Oil (WEO). The WEO and rubber were incorporated into the binder in two different ways. In the first type of modification, the residues were added directly to the heated asphalt without any previous treatment (direct modification). In the second type of modification, the rubber was mixed with the WEO and the residues were heated in an oven, before being incorporated into the asphalt (rubber treatment). The samples were prepared with CAP 50/70+22% rubber and different percentages of WEO (2.5; 5.0; 7.5 and 10%). Subsequently, the samples were submitted to characterization tests before and after being aged in the short and long term. The short-term aging simulation was performed in the rolling thin-film oven and the long-term aging simulation in the pressure aging vessel. The physical characterization was performed through penetration, softening point and flash point tests, to evaluate, respectively, the consistency, thermal susceptibility, and safety of the samples. The workability, the viscoelastic behavior, the rheological parameters, and the performance grade were evaluated through tests performed with the dynamic shear rheometer, bending beam rheometer and Brookfield rotational viscometer. Thermogravimetric analysis was used to evaluate the thermal decomposition of the samples. The results showed that WEO was able to reduce the excessive viscosity of the asphalt-rubber binder and improve its performance at low and intermediate temperatures, but had a negative effect on durability, thermal stability and resistance to permanent deformation at high temperatures. Rubber treatment mitigated some of these negative effects and was more effective in reducing the stiffness of aged asphalt-rubber compared to direct modification. For the specific conditions defined in this study, the 2.5% WEO content was the best option, for both types of modification, as it met the specifications for type AB22 asphalt-rubber binder defined in the DNIT 111 standard.

Keywords: Asphalt binder. Asphalt-rubber. Rheological evaluation. Waste engine oil.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Etapas do envelhecimento do asfalto .....	21
Figura 2 – Composição de materiais dos pneus para veículos de passeio e caminhões ..	22
Figura 3 – Impacto ambiental causado pela queima de pneus.....	22
Figura 4 – Microtextura da superfície. Trituração ambiente (esq.) e trituração criogênica (dir.) .....	23
Figura 5 – Evolução da interação entre a borracha e o asfalto em elevadas temperaturas. (a) Alteração da viscosidade em função da temperatura. (b) Alteração do tamanho da partícula com o tempo de interação. (c) Alteração da matriz asfáltica com o tempo de interação. ....	25
Figura 6 – Incorporação da borracha no processo úmido e no processo seco.....	26
Figura 7 – Formas de incorporação da borracha .....	26
Figura 8 – Formas de incorporação do OLUC no asfalto.....	31
Figura 9 – Materiais .....	43
Figura 10 – Curva granulométrica da borracha moída .....	45
Figura 11 – Formas de modificação .....	46
Figura 12 – Fabricação das amostras de asfalto-borracha-OLUC.....	47
Figura 13 – Fluxograma dos ensaios.....	49
Figura 14 – Ensaio de penetração.....	52
Figura 15 – Ensaio de ponto de amolecimento.....	53
Figura 16 – Ensaio de ponto de fulgor .....	54
Figura 17 – Ensaio de viscosidade rotacional Brookfield.....	55
Figura 18 – Ensaio de cisalhamento dinâmico (DSR) .....	57
Figura 19 – Ensaio de fluência em viga (BBR) .....	59
Figura 20 – Ensaio de envelhecimento de curto prazo (RTFOT).....	60
Figura 21 – Ensaio de envelhecimento de longo prazo (PAV).....	61
Figura 22 – Fluxograma das análises estatísticas .....	63
Figura 23 – Viscosidade rotacional Brookfield (175 °C).....	65
Figura 24 – Viscosidade rotacional em função da temperatura .....	66
Figura 25 – Viscosidade rotacional dos ligantes modificados (175 °C) .....	67
Figura 26 – Penetração a 25 °C em função do teor de OLUC.....	69
Figura 27 – Penetração retida após envelhecimento.....	70
Figura 28 – Ponto de amolecimento em função do teor de OLUC .....	71

Figura 29 – Aumento do ponto de amolecimento em função do teor de OLUC.....	72
Figura 30 – Ponto de fulgor em função do teor de OLUC.....	74
Figura 31 – Variação da temperatura em função do tempo de ensaio .....	75
Figura 32 – Módulo complexo em função da temperatura.....	76
Figura 33 – Módulo complexo (64 °C) .....	77
Figura 34 – Ângulo de fase em função da temperatura.....	78
Figura 35 – Ângulo de fase médio (64 °C).....	79
Figura 36 – Parâmetro $G^*/\text{sen}(\delta)$ em função da temperatura de ensaio .....	80
Figura 37 – $G^*/\text{sen}(\delta)$ médio (64 °C) .....	81
Figura 38 – Temperatura de falha (°C) .....	83
Figura 39 – Módulo complexo em função da temperatura.....	84
Figura 40 – Módulo complexo (10 °C) .....	85
Figura 41 – Ângulo de fase em função da temperatura.....	86
Figura 42 – Ângulo de fase médio (10 °C).....	87
Figura 43 – $G^* \times \text{sen}(\delta)$ em função da temperatura.....	88
Figura 44 – $G^* \times \text{sen}(\delta)$ médio (10 °C) .....	89
Figura 45 – Rigidez em função da temperatura.....	91
Figura 46 – Rigidez (-24 °C) .....	91
Figura 47 – Relaxação em função da temperatura.....	93
Figura 48 – Relaxação (-24 °C) .....	93
Figura 49 – Temperaturas de falha e última temperatura que passa .....	95
Figura 50 – Variação de massa .....	96
Figura 51 – Análise termogravimétricas das amostras de ligante.....	97
Figura 52 – Termogravimetria derivada das amostras de ligante .....	98
Figura 53 – Análise termogravimétrica dos resíduos.....	99
Figura 54 – Termogravimetria derivada dos resíduos .....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Granulometria da borracha moída*	44
Tabela 2 – Propriedades do OLUC	45
Tabela 3 – Parâmetros considerados para modificação direta	47
Tabela 4 – Parâmetros considerados para modificação com o tratamento da borracha	48
Tabela 5 – Ensaio e normas de referência	50
Tabela 6 – Parâmetros do ensaio de termogravimetria	62
Tabela 7 – Viscosidade rotacional média e limites da norma DNIT 111 (175 °C)	64
Tabela 8 – Viscosidade rotacional média (cP, 175 °C)	67
Tabela 9 – Penetração média a 25 °C (0,1 mm)	69
Tabela 10 – Ponto de amolecimento médio (°C)	72
Tabela 11 – Ponto de fulgor médio (°C)	73
Tabela 12 – Módulo complexo médio (kPa, 64 °C)	76
Tabela 13 – Ângulo de fase médio (°, 64 °C)	78
Tabela 14 – Parâmetro $G^*/\sin(\delta)$ médio (kPa, 64 °C)	80
Tabela 15 – Temperatura de falha (°C)	82
Tabela 16 – Grau de desempenho (PG) em alta temperatura	83
Tabela 17 – Módulo complexo médio (kPa, 10 °C)	85
Tabela 18 – Ângulo de fase médio (°, 10 °C)	87
Tabela 19 – Parâmetro $G^* \times \sin(\delta)$ médio (kPa, 10 °C)	89
Tabela 20 – Rigidez média (MPa, -24 °C)	92
Tabela 21 – Relaxação média (-24 °C)	94
Tabela 22 – Grau de desempenho (PG) em baixa temperatura	95
Tabela 23 – Variação de massa média (%)	96
Tabela 24 – Picos de degradação máxima (T <sub>máx</sub> )	98

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estudos realizados com o emprego de OLUC como modificador de asfaltos.	35
Quadro 2 – Caracterização do CAP 50/70.....	44
Quadro 3 – Quadro de amostras .....	51
Quadro 4 – Resumo das propriedades.....	101

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>12</b>
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Objetivo geral.....	15
1.1.2	Objetivos específicos.....	15
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>17</b>
2.1	CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP).....	17
2.1.1	Envelhecimento.....	19
2.2	ASFALTO MODIFICADO COM BORRACHA.....	21
2.2.1	Borracha reciclada de pneus inservíveis.....	21
2.2.2	Interação entre o asfalto e a borracha moída.....	24
2.2.3	Formas de incorporação da borracha.....	26
2.3	ASFALTO MODIFICADO COM ÓLEO LUBRIFICANTE USADO.....	28
2.3.1	Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado (OLUC).....	28
2.3.2	Formas de incorporação do OLUC ao asfalto.....	31
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>42</b>
3.1	MATERIAIS.....	42
3.1.1	Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP).....	43
3.1.2	Borracha moída de pneus.....	43
3.1.3	Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado (OLUC).....	45
3.2	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	46
3.2.1	Modificação direta.....	47
3.2.2	Tratamento da borracha.....	48
3.3	PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	48
3.4	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA.....	51
3.4.1	Penetração.....	51
3.4.2	Ponto de amolecimento (anel e bola).....	52
3.4.3	Ponto de fulgor.....	53
3.5	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA.....	54
3.5.1	Viscosidade rotacional Brookfield.....	54
3.5.2	Cisalhamento dinâmico (DSR).....	55

3.5.3	Fluência em viga (BBR) .....	58
3.6	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA DURABILIDADE .....	59
3.6.1	Envelhecimento de curto prazo (RTFOT) .....	59
3.6.2	Envelhecimento de longo prazo (PAV) .....	61
3.6.3	Análise termogravimétrica.....	62
3.7	ANÁLISES ESTATÍSTICAS .....	63
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>64</b>
4.1	VISCOSIDADE ROTACIONAL BROOKFIELD .....	64
4.1.1	Asfalto-borracha.....	64
4.1.2	Asfalto-borracha-OLUC.....	65
4.2	PENETRAÇÃO (25 °C) .....	68
4.3	PONTO DE AMOLECIMENTO .....	71
4.4	PONTO DE FULGOR .....	73
4.5	CISALHAMENTO DINÂMICO .....	75
4.5.1	Deformação permanente .....	75
4.5.2	Trincamento por fadiga .....	84
4.6	FLUÊNCIA EM VIGA .....	90
4.6.1	Trincamento térmico .....	90
4.7	VARIAÇÃO DE MASSA .....	95
4.8	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA.....	97
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>100</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	104
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>105</b>
	<b>APÊNDICE A – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA).....</b>	<b>114</b>

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O sistema rodoviário é o principal meio de transporte de cargas e de passageiros no Brasil (CNT, 2019a). Cerca de 95% das estradas nacionais que são pavimentadas, possuem revestimento asfáltico na camada de rolamento. O revestimento asfáltico é a camada superior do pavimento e está em contato direto com os pneus dos veículos. Esse revestimento é produzido a partir da mistura do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) com agregados minerais e eventuais aditivos. O CAP, também denominado ligante asfáltico, ou simplesmente asfalto, é um produto derivado do petróleo que tem excelentes propriedades adesivas e impermeabilizantes. É usado em pavimentação, principalmente para promover a união dos agregados e impermeabilizar a via (BERNUCCI et al., 2008).

O asfalto é um material termoplástico, viscoelástico, com comportamento reológico complexo, que varia de acordo com a temperatura, tempo e intensidade dos carregamentos. Em altas temperaturas e/ou sob cargas de baixa frequência (veículos trafegando em velocidade reduzida), o comportamento reológico do ligante é majoritariamente viscoso com baixa capacidade de recuperação elástica, se comportando como um líquido que flui com relativa facilidade. Nessas condições, o pavimento se torna altamente susceptível ao acúmulo de deformações permanentes. Em baixas temperaturas e/ou quando submetido a cargas de elevada frequência (veículos trafegando em alta velocidade), seu comportamento é majoritariamente elástico, com baixa capacidade de dissipação de tensões, sendo frágil e susceptível ao trincamento térmico, mesmo com cargas moderadas. Em temperaturas intermediárias, o asfalto apresenta comportamento elástico e viscoso simultaneamente, no entanto a repetição dos carregamentos devido ao tráfego de veículos pode causar trincamento por fadiga (SUBHY, 2017).

O desempenho do pavimento depende das características do ligante asfáltico. De modo geral, os ligantes convencionais conseguem atender as especificações de desempenho, porém fatores como o aumento do volume e cargas do tráfego veicular, maior pressão de inflação dos pneus, condições climáticas desfavoráveis, envelhecimento do asfalto e falta de manutenção, acabam degradando as propriedades e reduzindo a vida útil dos pavimentos. Os três tipos principais de problemas que podem afetar o desempenho dos pavimentos asfálticos e que podem resultar em ruína estrutural são: acúmulo de deformações permanentes nas trilhas de roda, trincas por fadiga do revestimento e trincamento térmico. A deformação permanente se manifesta sob a forma de afundamentos nas trilhas de rodas dos veículos. Resulta do acúmulo gradual de deformações plásticas irreversíveis com o aumento do número de solicitações, principalmente em regiões mais

quentes, onde as altas temperaturas reduzem a viscosidade do ligante asfáltico. A fadiga ocorre em temperaturas intermediárias e o principal motivo são ciclos de tensão-relaxação devido às cargas repetidas do tráfego. A fadiga é caracterizada pela formação e propagação de trincas nas trajetórias das rodas, formando as chamadas trincas “couro de jacaré” em um estágio mais avançado de avaria. As trincas térmicas ocorrem devido a variações de temperatura em regiões de clima frio, quando o asfalto tem maior dificuldade de dissipar as tensões (BEHNOOD; GHAREHVERAN, 2019).

Os problemas apresentados justificam a necessidade de se desenvolver ligantes asfálticos modificados com propriedades superiores às dos ligantes convencionais. Além das preocupações relacionadas ao desempenho dos pavimentos asfálticos, diversos pesquisadores estão buscando novas formas de substituir os materiais tradicionais, extraídos de fontes não renováveis, por materiais alternativos, advindos da reciclagem de resíduos industriais, de forma a contribuir com o avanço sustentável da indústria da pavimentação (FERNANDES et al., 2017a; JAHANBAKSH et al., 2020). A indústria da pavimentação consome uma vasta escala de recursos naturais e não renováveis, como asfalto e agregados pétreos, além de combustíveis fósseis para produção de misturas asfálticas, sendo fonte significativa de emissões térmicas e de efeito estufa (HASAN et al., 2019).

A crescente demanda por recursos não renováveis é um problema significativo para a indústria de pavimentação, tanto do ponto de vista ambiental, como do ponto de vista econômico (ANSARI et al., 2021). O recente aumento dos preços dos ligantes asfálticos, causados pela redução das reservas de petróleo, e as crescentes preocupações ambientais, incentivam as autoridades rodoviárias a buscar alternativas para reduzir o uso de ligantes à base de petróleo. A utilização de materiais reciclados oferece a oportunidade de reduzir o consumo excessivo de recursos não renováveis, reduzindo as emissões de carbono resultantes da extração e transporte dos materiais virgens, minimizando o consumo total de energia e aumentando os benefícios econômicos e ambientais (ZAHOOR et al., 2021).

O crescimento da indústria de automóveis gerou sérios problemas ambientais. A disposição final de pneus inservíveis é uma das principais preocupações em função da sua elevada durabilidade e do grande volume que ocupam. O descarte de pneus em aterros ocupa espaço significativo e podem causar poluição atmosférica e contaminação do lençol freático em caso de incêndio. Uma solução promissora é sua aplicação como modificador de asfalto. De fato, a utilização de borracha moída reciclada de pneus inservíveis

na modificação de asfaltos é uma prática comum há muitas décadas e se justifica de várias formas, incluindo a redução de problemas ambientais, de custos, de consumo de materiais, de consumo de energia e aprimoramento do desempenho mecânico do asfalto. O ligante asfáltico modificado com borracha possui maior resistência ao trincamento por fadiga, maior durabilidade, maior resistência à deformação permanente e menor susceptibilidade térmica. No entanto, a adição de teores elevados de borracha moída afeta negativamente a trabalhabilidade do asfalto, promovendo o aumento excessivo de sua viscosidade (CHEN et al., 2019a).

Durante a fabricação do asfalto-borracha, as partículas de borracha incham devido a absorção das frações leves do asfalto e a modificação torna o ligante mais viscoso. As propriedades da borracha são transferidas ao asfalto, melhorando sua elasticidade e durabilidade. No entanto, quantidades elevadas de borracha não expandirão completamente e irão absorver teores excessivos de óleos leves do asfalto, resultando em uma mistura com elevada viscosidade e baixa trabalhabilidade. Por esse motivo, a quantidade de borracha é geralmente limitada em 20% e óleos extensores são empregados para recompor as frações leves e reduzir a viscosidade do asfalto (DONG et al., 2019; BALBO, 2007).

Outro problema relacionado com o aumento dos veículos em circulação, é a geração de Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado (OLUC), que aumenta a cada ano e, devido aos poluentes e metais pesados presentes em sua composição, seu descarte indiscriminado causa sérios danos ao meio ambiente, resultando em poluição da água e do solo, além de comprometer a saúde pública. O OLUC é rico em hidrocarbonetos aromáticos, similares aos presentes na composição do asfalto, pois ambos são produtos derivados do petróleo. Em função do potencial amolecedor e de redução da viscosidade, o óleo lubrificante usado ou contaminado poderia ser utilizado como agente rejuvenescedor de asfaltos envelhecidos (LIU et al., 2019).

A adição de OLUC reduz a viscosidade do ligante convencional e melhora seu desempenho em baixas temperaturas. No entanto, reduz a elasticidade desse asfalto e afeta negativamente suas propriedades em altas temperaturas, tornando o asfalto convencional modificado com óleo, mais susceptível às deformações permanentes (FERNANDES et al., 2018). O OLUC poderia ter elevado valor comercial para a indústria da pavimentação se os problemas de desempenho pudessem ser amenizados ou eliminados (JIA et al., 2014).

A combinação de borracha e OLUC pode ser a solução para esse problema. O óleo lubrificante usado ou contaminado tem influência positiva nas propriedades de

ligantes em baixas temperaturas, enquanto a borracha moída melhora o desempenho de ligantes em temperaturas elevadas. Além disso, o OLUC poderia resolver as limitações relacionadas à dosagem de maiores quantidades de borracha, em função da sua capacidade de reduzir a viscosidade do asfalto (DEEF-ALLAH et al., 2019).

Dessa forma, a borracha moída reciclada de pneus inservíveis e o óleo lubrificante usado ou contaminado poderiam ser considerados como materiais alternativos para a modificação e/ou substituição parcial de ligantes asfálticos, e sua utilização em conjunto poderia solucionar os problemas de desempenho dos pavimentos flexíveis, reduzir os impactos ambientais, causados pela destinação indevida desses resíduos, e minimizar a necessidade de extração e consumo de recursos naturais não renováveis.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é avaliar a incorporação do Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado (OLUC) como agente redutor de viscosidade, de um asfalto produzido com elevada quantidade de borracha moída de pneus inservíveis.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) Avaliação das propriedades físicas (penetração, ponto de amolecimento e ponto de fulgor) e reológicas (viscosidade, cisalhamento dinâmico e fluência em viga) do asfalto-borracha modificado com diferentes teores de óleo lubrificante usado;
- b) Avaliação da redução da viscosidade para duas formas diferentes de incorporação do OLUC: direta e tratamento prévio da borracha;
- c) Avaliação da durabilidade dos ligantes asfalto-borracha-óleo lubrificante envelhecidos em curto e em longo prazos.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A pesquisa foi dividida em 5 capítulos: introdução, revisão bibliográfica, metodologia, resultados e conclusões. O capítulo 1 é a introdução do trabalho, onde são apresentados os principais temas que justificam a pesquisa e seus objetivos.

O capítulo 2 trata da revisão bibliográfica sobre ligantes asfálticos convencionais e modificados com borracha e OLUC. Aborda também a importância do reaproveitamento desses resíduos como modificadores de asfalto e as principais formas de incorporação ao ligante.

O capítulo 3 apresenta a metodologia do trabalho e o programa experimental. Fazendo a descrição dos materiais, dos métodos e das normas de referência para caracterização das amostras.

O capítulo 4 mostra os resultados obtidos nos ensaios de caracterização física, reológica e de durabilidade das amostras de ligante asfalto-borracha-OLUC. Descreve também as principais conclusões obtidas a partir da análise de variância dos resultados, que é apresentada de forma mais detalhada no apêndice A.

O capítulo 5 trata das principais conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros, apresenta também uma tabela com um resumo de todos os resultados obtidos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo se apresenta de forma sucinta, revisão bibliográfica sobre cimento asfáltico de petróleo (CAP), sua modificação com borracha moída proveniente de pneus inservíveis, além da modificação de CAP's com óleo lubrificante usado ou contaminado.

### 2.1 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)

Os materiais betuminosos são aqueles que possuem o betume em sua composição. Se dividem em asfaltos, que são derivados do petróleo, e alcatrões, que são obtidos pela destilação destrutiva de matéria orgânica, como carvão e madeira. Como características comuns, os materiais betuminosos possuem consistência variável com a temperatura, sendo muito viscosos em temperatura ambiente, apresentando coloração preta ou marrom escuro e propriedades aglutinantes e impermeabilizantes (BALBO, 2007; PINTO; PINTO, 2019). No entanto, além da forma de obtenção, esses dois materiais diferem muito em suas propriedades químicas e físicas. O asfalto é composto quase que em sua totalidade de betume, enquanto a quantidade de betume no alcatrão é relativamente baixa. O betume é uma substância composta por uma mistura de hidrocarbonetos pesados, sendo completamente solúvel no bissulfeto de carbono (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

Atualmente, o alcatrão não é mais utilizado em pavimentação, pois é um material com pouca homogeneidade e baixa qualidade para ser empregado como ligante, devido à sua elevada susceptibilidade térmica e por ser um produto extremamente perigoso para saúde dos trabalhadores que, além de causar irritação na pele e nos olhos, tem poder cancerígeno (ROBERTS et al., 1996; BERNUCCI et al., 2008).

O asfalto é um produto derivado do petróleo, de forma natural ou por destilação em refinarias, sendo constituído essencialmente por betume (hidrocarbonetos pesados), porém apresenta outros compostos em menores proporções, como oxigênio, enxofre e nitrogênio (BALBO, 2007; BERNUCCI et al., 2008; PINTO; PINTO, 2019).

Apesar das diferentes definições, com relação à terminologia, betume e asfalto podem ser sinônimos e fazer referência ao mesmo produto a depender da região. No Brasil e nos Estados Unidos, por exemplo, o termo asfalto é utilizado para designar o ligante obtido pela destilação do petróleo, tanto aquele obtido de forma natural, como o obtido em refinarias, sendo o betume seu principal componente. Já na Europa usa-se o termo betume

para designar o material obtido pela destilação do petróleo em refinarias e asfalto aquele obtido de forma natural (LESUEUR, 2009; BRANCO et al., 2016).

Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) é o termo técnico utilizado para se referir ao asfalto produzido em refinarias a partir da destilação do petróleo, que é fabricado para apresentar propriedades específicas para aplicação em pavimentação. Os asfaltos também podem ser denominados como ligantes asfálticos, que é um termo mais genérico e que pode fazer referência a outros produtos como asfaltos modificados, emulsões asfálticas e asfaltos diluídos (PINTO; PINTO, 2019; BALBO, 2007; ODA, 2000).

O asfalto é um dos materiais de construção mais antigos utilizados pelo homem e dentre as diversas aplicações, a mais importante delas é seu uso em associação com agregados minerais e demais aditivos, para produção da mistura asfáltica e aplicação como revestimento de pavimentos. As principais características que explicam o uso do asfalto em pavimentação são: adesividade, susceptibilidade térmica (termoplasticidade), viscoelasticidade, impermeabilidade e durabilidade (ROBERTS et al., 1996; BALBO, 2007; BERNUCCI et al., 2008).

O CAP é um material aglutinante, que adere facilmente aos agregados, sendo usado como uma cola ou um ligante para manter os agregados fortemente unidos para a fabricação do concreto asfáltico (ASPHALT INSTITUTE, 1989).

Por ser um material termoplástico, sua consistência e propriedades físicas variam com a temperatura. O CAP se torna praticamente sólido em baixas temperaturas, em temperaturas intermediárias apresenta comportamento viscoelástico e em elevadas temperaturas se comporta como um líquido viscoso (BERNUCCI et al., 2008). Dessa forma, o asfalto amolece e se torna líquido ao ser aquecido, e endurece ao ser resfriado. O aquecimento reduz a sua viscosidade e permite que tenha a trabalhabilidade adequada para ser misturado com os agregados para produção da mistura asfáltica, que depois é espalhada e compactada na via. Ao resfriar, o asfalto retorna às suas características viscoelásticas originais, e a camada de revestimento ganha resistência para suportar os esforços do tráfego (ROBERTS et al., 1996; ASPHALT INSTITUTE, 1989).

A característica de viscoelasticidade do asfalto diz respeito ao seu comportamento mecânico sob carregamento. O asfalto pode desenvolver dois tipos de respostas ao ser solicitado por uma força externa: elástica e viscosa. A resposta elástica se caracteriza por deformações instantâneas, independentes do tempo, e que podem ser totalmente recuperadas após a retirada do carregamento. A resposta viscosa se caracteriza

por deformações retardadas, dependentes do tempo, e que resultam em deformações plásticas não recuperáveis (READ; WHITEOAK, 2003).

O asfalto é um material impermeável e com relativa durabilidade, sendo resistente à maior parte dos sais, ácidos e álcalis (ASPHALT INSTITUTE, 1989). No entanto, é um material que sofre alterações físicas e químicas ao longo do tempo em decorrência da sua exposição à elevadas temperaturas, radiação solar, ar e água. Como consequência, o asfalto envelhece e se torna mais rígido e quebradiço (BALBO, 2007; BERNUCCI et al., 2008).

Em função de suas características únicas, o asfalto é um material muito versátil, que pode ser usado de diversas formas em pavimentação. O CAP pode ser utilizado aquecido para produção da mistura asfáltica, pode ser utilizado de forma diluída, com a incorporação de um solvente, tendo-se nesse caso um asfalto diluído. Também pode ser utilizado emulsionado com água e um agente emulsificante, sendo denominado como emulsão asfáltica. E pode ainda ser misturado com um agente modificador, para melhorar alguma propriedade específica, sendo chamado de asfalto modificado (ROBERTS et al., 1996).

As propriedades dos ligantes asfálticos são avaliadas mediante ensaios laboratoriais padronizados, em condições controladas de temperatura, tempo e carregamento. No Brasil, as propriedades requeridas dos ligantes asfálticos são especificadas pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), por meio da resolução ANP número 19 de 2005. Tais propriedades são mencionadas nas especificações para cimentos asfálticos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), em sua norma DNIT 095/2006 a qual classifica o CAP de acordo com o grau de consistência.

### 2.1.1 Envelhecimento

O envelhecimento é um fenômeno que altera a composição química do asfalto. É causado principalmente por sua exposição à elevadas temperaturas, oxigênio e radiação solar. Como consequência, suas propriedades (físicas e reológicas) são alteradas, e o ligante se torna mais rígido e quebradiço. O aumento de rigidez melhora a resistência à deformação permanente, porém compromete a resistência do pavimento ao trincamento por fadiga e variação térmica (READ; WHITEOAK, 2003; BERNUCCI et al., 2008).

O envelhecimento envolve alguns mecanismos, tipo endurecimento físico, oxidação (reação química entre o oxigênio e o asfalto) e perda de voláteis (evaporação das frações mais leves de óleos saturados e aromáticos) (TAUSTE et al., 2018).

O endurecimento físico é um processo reversível, que altera as propriedades reológicas do asfalto sem causar alterações químicas, ocorre em temperatura ambiente devido à reorganização de suas moléculas. O reaquecimento do ligante recupera sua viscosidade original (READ; WHITEOAK, 2003; TAUSTE et al., 2018).

A oxidação é o principal mecanismo de envelhecimento e se inicia quando o ligante entra em contato com o ar ambiente. Se caracteriza pela formação de grupos polares contendo oxigênio que tendem a se combinar para formar micelas de elevado peso molecular. Grupos polares sulfóxidos e carbonilas são formados, resultando em moléculas maiores e mais complexas, que endurecem o ligante e reduzem sua flexibilidade. O grau de oxidação depende do tempo, temperatura e da espessura do filme de asfalto (READ; WHITEOAK, 2003).

O envelhecimento do asfalto pode ser dividido em duas fases: envelhecimento de curto prazo e envelhecimento de longo prazo. O envelhecimento de curto prazo é o mais agressivo, ocorre durante a usinagem, armazenamento, transporte, espalhamento e compactação da mistura asfáltica na via. A produção da mistura é a etapa mais crítica, onde ocorre a maior parte do envelhecimento. No momento da usinagem, o asfalto é misturado com os agregados em altas temperaturas (tem-se perda de voláteis). A mistura fica constantemente exposta ao oxigênio (tem-se oxidação). O ligante envolve os agregados, formando uma película muito fina com elevada área superficial (READ; WHITEOAK, 2003; PINTO; PINTO, 2019).

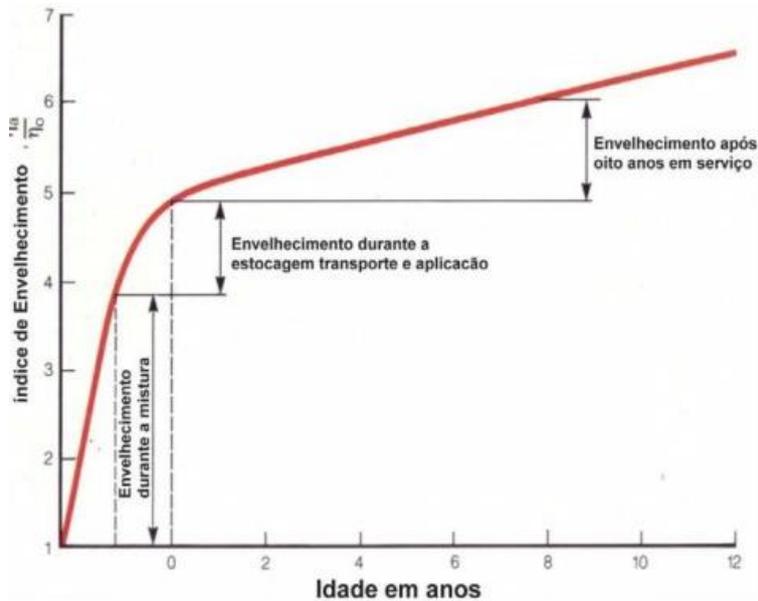
O controle da viscosidade adequada (espessura do filme de ligante), a temperatura e o tempo de produção da mistura, são fatores que podem ser controlados para reduzir os efeitos do envelhecimento (READ; WHITEOAK, 2003; PINTO; PINTO, 2019).

O envelhecimento de longo prazo ocorre durante a vida útil do revestimento. O teor de vazios da mistura exerce grande influência no envelhecimento de longo prazo. A superfície envelhece mais rápido devido a constante exposição ao oxigênio, radiação ultravioleta, variações de temperatura e umidade (READ; WHITEOAK, 2003; PINTO; PINTO, 2019).

A Figura 1 mostra o gráfico do índice de envelhecimento em função do tempo. O índice de envelhecimento relaciona a viscosidade do asfalto após seu envelhecimento com sua viscosidade original. A maior parte do envelhecimento ocorre de

forma agressiva durante a produção da mistura (severa inclinação inicial da curva) e continua de forma mais lenta ao longo da vida útil do pavimento.

Figura 1 – Etapas do envelhecimento do asfalto



Fonte: Morilha Junior (2004)

## 2.2 ASFALTO MODIFICADO COM BORRACHA

### 2.2.1 Borracha reciclada de pneus inservíveis

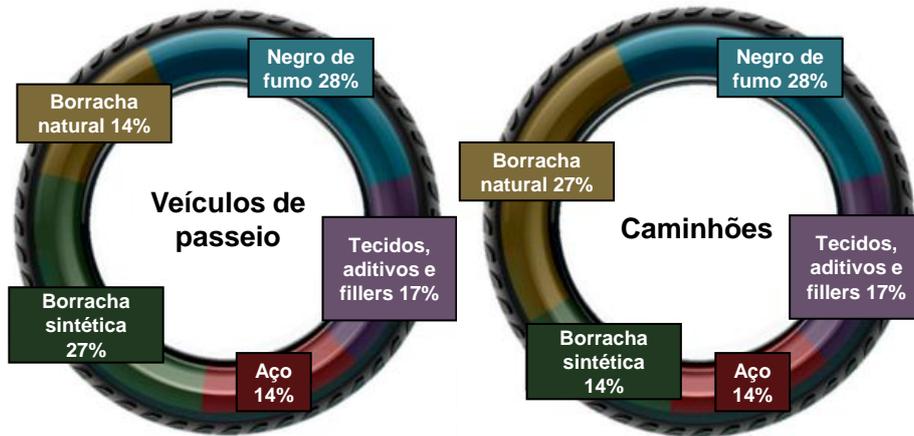
O pneu é um produto complexo e de alta tecnologia que faz parte do sistema de rodagem dos veículos. Do ponto de vista dos materiais, os principais constituintes do pneu são elastômeros (borracha natural e sintética), materiais de enchimento (negro de fumo e sílica), materiais de reforço (metais e produtos têxteis), plastificantes (óleos e resinas), agentes de reticulação polimérica (enxofre e óxido de zinco), aditivos e outras substâncias químicas (MOHAJERANI et al., 2020). A composição básica dos materiais varia de acordo com o tipo de pneu (Figura 2).

A borracha natural e a borracha sintética são os principais componentes do pneu. A borracha natural é um polímero bruto de alto peso molecular, obtido da coagulação do látex da árvore *Hévea brasiliensis* (seringueira), cujo principal constituinte é o poliisopreno. A borracha sintética butadieno-estireno (SBR, styrene-butadiene rubber) é um copolímero de estireno e butadieno (BRESSI et al., 2019; PINTO; PINTO, 2019).

O pneu é resistente ao mofo, bolor, calor, umidade, raios ultravioleta, óleos, solventes, ácidos e outros produtos químicos. No entanto, essas características, que são

desejáveis durante sua vida útil, podem se tornar um problema para a sua disposição final (LO PRESTI, 2013).

Figura 2 – Composição de materiais dos pneus para veículos de passeio e caminhões



Fonte: adaptado de Makoundou et al. (2021)

O ciclo de vida dos pneus é composto de cinco estágios: extração, produção, consumo, coleta de pneus usados e gerenciamento dos resíduos. Após a coleta, os pneus usados podem ser armazenados em aterros ou recuperados (LO PRESTI, 2013). O descarte em aterros gera sérias preocupações ambientais em função do rápido acúmulo dos pneus. Essas preocupações se relacionam com o risco constante de incêndios, lixiviação de contaminantes, formação de criadouros de pragas e mosquitos transmissores de doenças. Os pneus contêm ingredientes extremamente inflamáveis, sua queima irradia temperaturas muito altas por longos períodos. Esses incêndios são difíceis de extinguir e a fumaça é altamente tóxica (Figura 3) (MOHAJERANI et al., 2020).

Figura 3 – Impacto ambiental causado pela queima de pneus



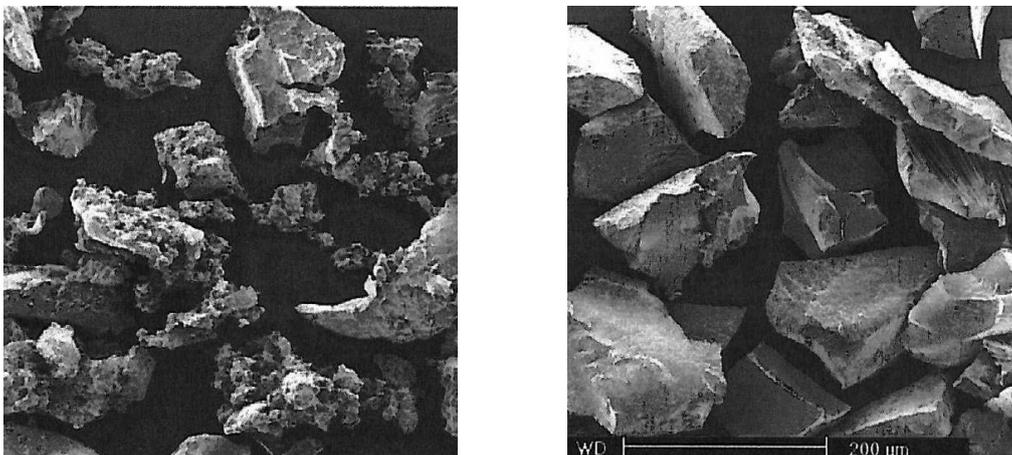
Fonte: Mohajerani et al. (2020)

Existem três formas principais de recuperar o pneu inservível: recuperação energética, processamento químico e recuperação granular. A recuperação energética, ou coprocessamento, diz respeito à utilização da capacidade calorífica do pneu inservível como fonte alternativa de energia aos combustíveis fósseis. O processamento químico pode-se referir à pirólise, que é o processo de decomposição térmica da borracha conduzida na ausência de oxigênio para não causar combustão, com geração de óleos, aço e negro de fumo. A recuperação granular envolve a trituração dos pneus em diversos tamanhos para aplicação em diferentes produtos (LO PRESTI, 2013; IBAMA, 2021b).

O método mais comum é a recuperação granular. Existem formas de reduzir o tamanho da borracha dos pneus, as principais são: trituração ambiente e trituração criogênica. A trituração ambiente é o método mais comum e com melhor custo-benefício. Os pneus são triturados mecanicamente por moinhos à temperatura ambiente. No processo de moagem criogênica, os pneus são congelados abaixo de sua temperatura de transição vítrea e quebrados com um moinho de impacto (SHU; HUANG, 2014).

A microestrutura da superfície da borracha triturada apresenta diferenças a depender do método de obtenção (Figura 4). O método de trituração ambiente produz partículas com natureza porosa, textura áspera, forma irregular, maior superfície específica e menor densidade (NANJEGOWDA; BILIGIRI, 2020). Essas características de superfície fazem as partículas de borracha absorverem facilmente o óleo e a resina do ligante asfáltico, melhorando a interação entre o asfalto e a borracha (ZHENG et al., 2021). A trituração criogênica produz partículas com formato regular, superfície lisa e menor área específica. Esse tipo de borracha apresenta reação reduzida com o ligante e afeta negativamente as propriedades elásticas da mistura (LO PRESTI, 2013).

Figura 4 – Microtextura da superfície. Trituração ambiente (esq.) e trituração criogênica (dir.)



Fonte: Lo Presti et al. (2013)

### 2.2.2 Interação entre o asfalto e a borracha moída

O mecanismo de interação entre o asfalto e a borracha moída não foi totalmente caracterizado. Tradicionalmente é reportado que a interação entre o asfalto e a borracha não é de natureza química (LO PRESTI, 2013). A borracha não altera os grupos funcionais e a estrutura molecular do ligante asfáltico (ZHENG et al., 2021). A difusão é o processo físico que explica a absorção dos óleos aromáticos do asfalto pela borracha, causando seu inchamento (NANJEGOWDA; BILIGIRI, 2020). No entanto, outros estudos afirmam que o aumento na viscosidade do asfalto não pode ser explicado apenas pela expansão da borracha (LO PRESTI, 2013).

A interação da borracha com o ligante asfáltico tem papel fundamental nas propriedades reológicas e na estabilidade ao armazenamento do asfalto modificado (SHU; HUANG, 2014). A reação ocorre por dois processos simultâneos: digestão (dissolução) parcial da borracha no ligante asfáltico e absorção dos óleos aromáticos do asfalto nas cadeias poliméricas da borracha. A absorção dos aromáticos do asfalto nas cadeias poliméricas faz com que a borracha inche e amoleça (LO PRESTI, 2013).

Quando as partículas de borracha são adicionadas ao ligante aquecido, as frações leves do asfalto (óleos aromáticos) são absorvidas nas cadeias poliméricas da borracha moída. As partículas expandem com a absorção da fase oleosa e formam um material semelhante a um gel (SHU; HUANG, 2014). O inchamento das partículas de borracha é controlado pela taxa de difusão, resultante do movimento do líquido para a matriz interna do polímero, e se inicia quando a borracha entra em contato com o ligante asfáltico (NANJEGOWDA; BILIGIRI, 2020; MAKOUNDOU et al., 2021).

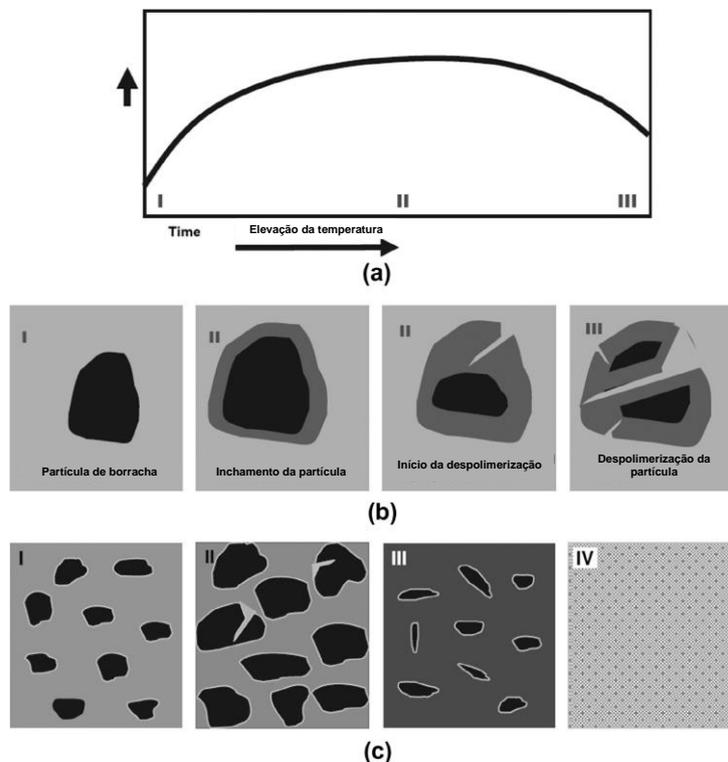
A redução da distância entre as partículas de borracha, causada pelo seu aumento de volume, e a redução da fase oleosa do ligante que foi absorvida, resultam na elevação da viscosidade do asfalto modificado, afetando negativamente sua trabalhabilidade (ZHENG et al., 2021). É comum a introdução de óleos extensores para reduzir a viscosidade e facilitar a aplicação (BALBO, 2007).

A interação asfalto-borracha é dependente do tempo e da temperatura. Se a temperatura for muito elevada ou o tempo for muito longo, ocorrerá despolimerização/desvulcanização da borracha, causando a dispersão da borracha no ligante. Esse processo reduz a viscosidade, rigidez e elasticidade do asfalto modificado (LO PRESTI, 2013).

A despolimerização se refere à decomposição química das cadeias poliméricas da borracha em pequenas moléculas, tipo monômeros. A desvulcanização é um

processo de clivagem (divisão) das ligações cruzadas dos átomos de enxofre da borracha vulcanizada. Ambos os processos quebram parte das partículas de borracha e as dissolvem na fase líquida do ligante asfáltico, causando uma redução na viscosidade do ligante (SHU; HUANG, 2014). A Figura 5 ilustra o processo de interação entre o asfalto e a borracha em temperatura elevada em função do tempo. As etapas I e II mostram o processo de absorção dos óleos e posterior inchamento da borracha, enquanto as etapas III e IV mostram o processo de dissolução da borracha no asfalto.

Figura 5 – Evolução da interação entre a borracha e o asfalto em elevadas temperaturas. (a) Alteração da viscosidade em função da temperatura. (b) Alteração do tamanho da partícula com o tempo de interação. (c) Alteração da matriz asfáltica com o tempo de interação.



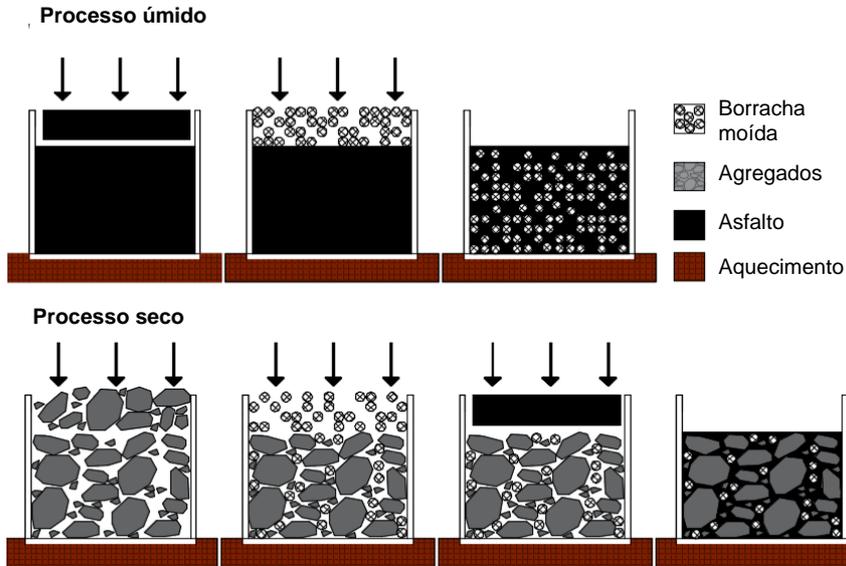
Fonte: adaptado de Shu e Huang (2014)

A interação entre o ligante asfáltico e a borracha depende de vários fatores: parâmetros de modificação (tempo, temperatura e taxa de cisalhamento), tipo de ligante (origem e eventual uso de óleos extensores) e propriedades da borracha (origem, métodos de fabricação, tamanho, composição química) (LO PRESTI, 2013).

### 2.2.3 Formas de incorporação da borracha

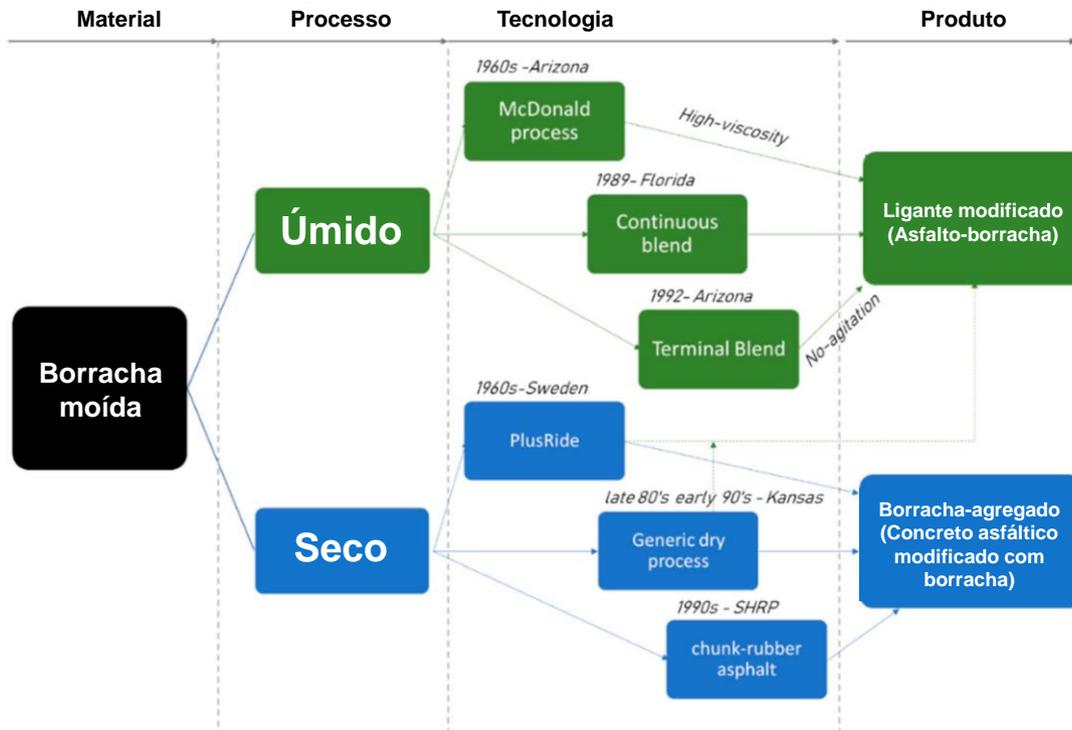
A incorporação da borracha pode ser realizada por dois processos diferentes: processo seco e processo úmido (Figura 6 e Figura 7) (ALFAYEZ et al., 2020).

Figura 6 – Incorporação da borracha no processo úmido e no processo seco.



Fonte: adaptado de Alfayez et al. (2020)

Figura 7 – Formas de incorporação da borracha



Fonte: adaptado de Bressi et al. (2019)

No processo seco, a borracha moída é adicionada aos agregados aquecidos antes do ligante asfáltico ser incorporado à mistura (MAKOUNDOU et al., 2021). As partículas de borracha são mais grossas e são consideradas como parte da granulometria dos agregados, sendo chamadas de “agregado-borracha” (SHU; HUANG, 2014). Após a inclusão do ligante asfáltico e outros aditivos à mistura, o produto resultante é chamado de concreto asfáltico modificado com borracha. As tecnologias mais comuns do processo seco, são plusride, chunk-rubber e generic dry (BRESSI et al., 2019).

No processo úmido, a borracha moída é adicionada diretamente ao ligante asfáltico, em elevadas temperaturas e condições específicas de mistura, para modificar as propriedades físicas e químicas do asfalto (ALFAYEZ et al., 2020). As partículas de borracha são mais finas e interagem com asfalto. O produto resultante é um ligante asfáltico modificado chamado de “asfalto-borracha” (SHU; HUANG, 2014).

O processo úmido se divide em diferentes tecnologias de produção: McDonald process (wet process-high viscosity), continuous blending e terminal blending (wet process-no-agitation) (BRESSI et al., 2019; LO PRESTI, 2013).

No processo úmido de alta viscosidade (wet process-high viscosity), inventado por Charles McDonald, o asfalto e a borracha moída são misturados previamente em grandes tanques por um curto período, a mistura é então transferida para tanques de armazenamento que promovem a interação entre o asfalto e a borracha sob agitação constante por 45 a 60 minutos. Os tanques podem ser estacionários ou instalados em unidades móveis. O asfalto-borracha produzido por esse processo possui elevada viscosidade, elasticidade e bom desempenho em altas temperaturas, porém como não ocorre despolimerização nem desvulcanização, a separação de fases é um grande problema. Portanto, precisam ser produzidos diretamente no local de trabalho ou transportados em tanques equipados com brocas que promovam constante circulação da borracha (BRESSI et al., 2019; LO PRESTI, 2013).

O processo continuous blending é semelhante ao processo de mistura McDonald, a principal diferença é que a borracha e o ligante são misturados continuamente em uma unidade única durante a produção do asfalto-borracha (BRESSI et al., 2019; LO PRESTI, 2013).

O processo terminal blending (wet process-no-agitation) é uma forma de processo úmido na qual o asfalto-borracha é produzido em uma refinaria ou em um terminal de armazenamento e distribuição, sendo posteriormente transportado para a usina de asfalto/canteiro de obra para uso. O processamento do asfalto-borracha é conduzido em

elevadas temperaturas e em alto cisalhamento. O processo de inchamento da borracha pela absorção das frações leves do asfalto dá lugar à despolimerização e desvulcanização das partículas de borracha, que se dissolvem no asfalto, resultando em menor viscosidade e melhora na estabilidade ao armazenamento (BRESSI et al., 2019; LO PRESTI, 2013).

## 2.3 ASFALTO MODIFICADO COM ÓLEO LUBRIFICANTE USADO

### 2.3.1 Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado (OLUC)

O óleo lubrificante é um produto que tem como principal função reduzir o atrito entre os componentes móveis de um objeto. Este produto forma uma película entre as superfícies de peças metálicas com movimento relativo, impedindo seu contato direto, reduzindo o desgaste e facilitando o deslizamento (PETROBRAS, 2019; ANP, 2020a).

Além da redução do atrito, o óleo lubrificante desempenha outras funções como refrigeração, impedindo superaquecimento, limpeza de impurezas geradas na combustão, evitando formação de depósitos, transmissão de força mecânica, vedação, isolamento, redução de ruídos e proteção dos componentes contra corrosão (CNT, 2019b; SENAI, 2006).

Com relação à terminologia, o óleo lubrificante também é denominado como óleo de motor, óleo de cárter ou óleo de transmissão. A aplicação em sistemas de veículos automotores (cárter do motor, direção hidráulica, caixa de câmbio) representa 60% do consumo nacional de óleo lubrificante. Também são usados na indústria de sistemas hidráulicos, turbinas, motores estacionários e equipamentos diversos que permitam a troca de óleo (IBAMA, 2008).

A Resolução 362 de 2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) estabelece algumas definições para óleos lubrificantes: (i) Óleo lubrificante básico é o principal constituinte do óleo lubrificante acabado; (ii) Óleo lubrificante acabado é formulado a partir de óleos lubrificantes básicos, que podem conter aditivos; e (iii) Óleo lubrificante usado ou contaminado é o óleo lubrificante acabado, que se torna inadequado à sua finalidade original, em função de seu uso ou de contaminação.

O óleo lubrificante básico é usado na fabricação do óleo lubrificante acabado e representa de 80 a 90% do volume do produto pronto. Pode ser de origem animal ou vegetal (óleos graxos), derivado do petróleo (óleos minerais) ou produzido em laboratório (óleos sintéticos). O óleo básico de origem mineral é produzido a partir do refino do petróleo e é o de maior utilização na confecção dos óleos lubrificantes acabados. O óleo básico de

origem sintética, é produzido em laboratório mediante reações químicas, geralmente a partir de produtos derivados do petróleo. O óleo básico de origem vegetal é extraído de plantas e/ou sementes (CNT, 2019b; IBAMA, 2008).

O óleo lubrificante acabado é aquele que está pronto para ser utilizado segundo sua finalidade. É composto pelo óleo básico misturado com aditivos, que são compostos químicos usados para adicionar, reforçar ou eliminar alguma característica dos óleos básicos. Diversos tipos de óleos lubrificantes podem ser produzidos em combinação com diferentes aditivos. Os principais tipos de aditivos incorporados ao óleo básico são: antioxidantes, detergentes, antiespumantes e anticorrosivos (CNT, 2019b; SOHN, 2011).

Durante o uso, o óleo lubrificante sofre degradação devido à oxidação causada pelas elevadas temperaturas de trabalho, as quais promovem a queima de parte do óleo no próprio motor, resultando em acúmulo de contaminantes e alteração das suas propriedades ótimas, sendo necessária sua substituição (ELEYEDATH; SWAMY, 2020; VAZQUEZ-DUHALT, 1989). Após ser removido do motor ou equipamento, o óleo deteriorado passa a ser chamado de Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado (OLUC), sendo classificado como um resíduo perigoso pela NBR 10004/2004 por apresentar elevada toxicidade.

O OLUC possui em sua composição, moléculas inalteradas do óleo lubrificante acabado, produtos resultantes da deterioração parcial do óleo em uso, como compostos oxigenados (ácidos orgânicos e cetonas), compostos aromáticos polinucleares de viscosidade elevada (HPA), resinas e lacas. Além dos produtos da degradação do óleo básico, estão presentes restos de aditivos que não foram consumidos (fenóis, compostos de zinco, de cloro, de enxofre ou de fósforo), metais de desgaste das peças em movimento (chumbo, cromo, bário e cádmio) e contaminantes diversos, como água originária da câmara de combustão dos motores, combustível não-queimado, poeira e outras impurezas (IBAMA, 2008; SENAI, 2006).

Os compostos químicos presentes no OLUC podem causar problemas graves ao meio ambiente e à saúde das pessoas. Quando manuseado incorretamente, o contato direto pode provocar intoxicação aguda, danos ao sistema nervoso e câncer. Se for despejado diretamente em rios, lagos ou córregos, o óleo forma um filme fino na superfície, dificultando trocas gasosas, podendo comprometer a vida no ambiente aquático. Se jogado no sistema de esgoto, pode interromper o funcionamento das estações de tratamentos, causando a proliferação de organismos transmissores de doenças e contaminação da água (CNT, 2019b).

O OLUC não é biodegradável e leva dezenas de anos para desaparecer do ambiente. Se jogado diretamente no solo, inutiliza o mesmo, tanto para agricultura como para construção, matando a vegetação e microrganismos. Além disso, pode atingir o lençol freático e contaminar a água e poços da região. Quando queimado de forma ilegal, causa forte concentração de poluentes e gera grande quantidade de fuligem, podendo afetar o sistema respiratório das pessoas (SOHN, 2011).

Apesar de ser um resíduo e representar um risco ao meio ambiente, o óleo lubrificante usado ou contaminado não pode ser considerado lixo, grande parte do seu volume (80 a 85%) corresponde ao óleo lubrificante básico, matéria-prima fundamental para a formulação do óleo lubrificante acabado. O conjunto de processos para reciclar, remover os contaminantes e transformar o OLUC em óleo básico, é chamado de rerrefino (SINDIRREFINO, 2018).

A Resolução 362/05 do CONAMA dispõe sobre o recolhimento, coleta e destinação final de óleo lubrificante usado ou contaminado. Em função da capacidade de recuperar o óleo lubrificante básico e reduzir a geração de resíduos, o processo de rerrefino foi escolhido pela Resolução como a destinação ambientalmente correta dos óleos lubrificantes usados ou contaminados, sendo de responsabilidade dos produtores e importadores garantir a coleta e a destinação final do OLUC. No entanto, a Resolução permite a reciclagem do OLUC por outros processos tecnológicos, desde que exista eficácia ambiental equivalente ou superior ao do rerrefino.

O Ministério do Meio Ambiente (MMA) é responsável por coordenar o Grupo de Monitoramento Permanente (GMP), que tem por objetivo, acompanhar a aplicação e a implementação da Resolução CONAMA 362/05. O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) é responsável pela fiscalização do cumprimento das obrigações previstas na Resolução CONAMA 362/2005 e pela aplicação das sanções cabíveis, em conjunto com o órgão estadual e municipal do meio ambiente. A ANP, o IBAMA e os órgãos estaduais do meio ambiente são responsáveis pelo controle e verificação do cumprimento dos percentuais mínimos de coleta de OLUC fixados pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) e pelo Ministério de Minas e Energia (MME).

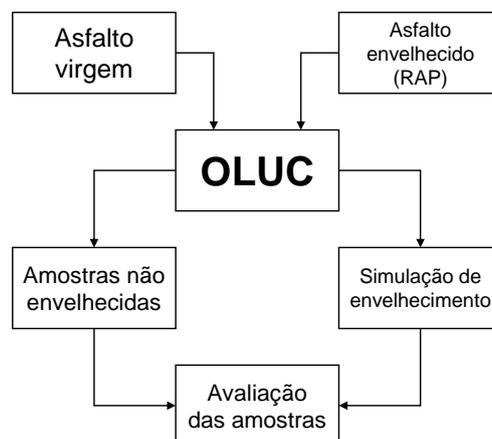
Os percentuais mínimos de coleta são definidos por meio de metas progressivas, atualizadas a cada quatro anos, por meio de portarias interministeriais do MMA e do MME. O Painel Dinâmico do Mercado Brasileiro de Lubrificantes da ANP (ANP, 2020c), mostra que de 2008 a 2019 o percentual médio de OLUC coletado foi de 38,45% em relação ao total de óleos lubrificantes comercializados. Nesse período as metas não foram

alcançadas apenas em 2011 e em 2014. Apesar dos esforços do MMA, MME, IBAMA e ANP para aumentar o percentual efetivo de coleta e atender as metas pré-estabelecidas, grande parte do OLUC ainda não tem destinação adequada.

### 2.3.2 Formas de incorporação do OLUC ao asfalto

A modificação do asfalto com óleo lubrificante usado pode ser uma boa alternativa, visto que os compostos são quimicamente similares/compatíveis (FERNANDES et al., 2017b). Devido a essa similaridade, o resíduo de óleo de motor e o asfalto podem ser facilmente misturados sem que ocorram reações químicas (LIU et al., 2018b). Existem algumas formas de incorporar o OLUC ao ligante asfáltico: (i) como agente rejuvenescedor ou de amolecimento, para reciclar e recuperar as propriedades de asfaltos envelhecidos provenientes de RAP (Reclaimed Asphalt Pavement); (ii) como extensor ou substituto parcial do ligante asfáltico convencional, podendo haver combinação com outros modificadores (Figura 8); ou iii) como agente de ativação da borracha antes da modificação com o asfalto (LI et al., 2021).

Figura 8 – Formas de incorporação do OLUC no asfalto



Fonte: Adaptado de Eleyedath e Swamy (2020)

Uma das principais formas de incorporação do óleo lubrificante usado ou contaminado é como agente rejuvenescedor. Agentes rejuvenescedores também são chamados de agentes de reciclagem, agentes de recuperação ou amolecedores. São produtos cujas características químicas e físicas, possibilitam restaurar as propriedades reológicas de asfaltos envelhecidos, recompondo a fração de maltenos que foi perdida durante o envelhecimento (BEHNOOD, 2019).

El-Shorbagy et al. (2019) avaliaram a possibilidade de usar óleos residuais (óleo lubrificante usado e óleo de cozinha usado) como rejuvenescedores das propriedades reológicas de ligantes envelhecidos extraídos de RAP. Os óleos usados conseguiram rejuvenescer os ligantes envelhecidos e restaurar as suas propriedades ao nível do ligante de controle. Neste estudo, foram empregados respectivamente, 4 a 5% de óleo de cozinha e 5 a 6% de óleo de motor, ambos usados. Os autores concluíram que a aplicação dos óleos usados como agentes rejuvenescedores foi bem-sucedida e ambos constituem uma alternativa ambiental e econômica para reciclagem de asfaltos envelhecidos.

Zaumanis et al. (2014a) estudaram a influência de seis rejuvenescedores diferentes no desempenho de ligantes envelhecidos, objetivando produzir uma mistura asfáltica com 100% de RAP reciclado. O óleo de motor usado alterou o grau de desempenho (PG, Performance Grade) em baixa e alta temperaturas, porém não conseguiu recuperar totalmente o PG do RAP ao nível do ligante de referência. Segundo os autores, o teor adição de 12% utilizado na modificação foi insuficiente. Em outro estudo, Zaumanis et al. (2014b) desenvolveram uma metodologia para selecionar a dosagem ideal de rejuvenescedor a fim de reciclar asfaltos envelhecidos com base no grau de desempenho (PG) e atender a especificação SUPERPAVE. Na metodologia proposta, os autores recomendam um teor que varie de 16 a 25% de óleo lubrificante usado.

Silva et al. (2012) investigaram a possibilidade de produzir misturas asfálticas com 100% de RAP. Também compararam o desempenho de um rejuvenescedor comercial com o óleo de motor usado para reciclar o asfalto envelhecido. Os autores concluíram que a produção de misturas recicladas com 100% de RAP, é uma solução viável e o óleo de motor usado pode ser aplicado como rejuvenescedor de asfaltos envelhecidos. O grau de penetração 20/30 foi alcançado com um teor de 5% de óleo lubrificante usado.

Outra forma de utilização do óleo de motor usado é como modificador ou substituto parcial do ligante asfáltico convencional em seu estado virgem, visando prover alguma alteração nas suas propriedades físicas, químicas ou reológicas.

Shoukat e Yoo (2018) avaliaram o desempenho de um asfalto convencional (PG64-22) modificado com óleo de motor (novo, usado, filtrado e não filtrado). O óleo lubrificante usado e filtrado apresenta uma ligeira superioridade ao usado e não filtrado na redução das temperaturas de usinagem e compactação. Essa diferença pode ter sido causada pela presença de metais no óleo usado e não filtrado.

Wu e Muhunthan (2018) estudaram a possibilidade de usar óleo lubrificante usado como substituto parcial do asfalto O grau de desempenho em baixa temperatura foi

melhorado com a modificação e a maior flexibilidade se traduziu em maior resistência à fadiga. Porém, a modificação reduziu o grau de desempenho do ligante em temperaturas mais altas. O óleo teve um efeito amolecedor e reduziu a resistência à deformação permanente.

Jia et al. (2014) analisaram a estrutura molecular e as propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com óleo lubrificante usado. Foram avaliados dois ligantes convencionais e dois ligantes envelhecidos em laboratório. A incorporação do óleo comprometeu a resistência à deformação permanente em temperaturas mais altas. Os autores deste estudo mencionam que o teor de óleo de motor usado deve ser limitado devido aos efeitos negativos no desempenho dos ligantes.

Em função da degradação das propriedades do asfalto em altas temperaturas, pesquisadores começaram a buscar novas formas de viabilizar a utilização desse resíduo. A composição com outros modificadores, como os polímeros, também se mostra uma alternativa para utilização dos óleos usados.

Fernandes et al. (2017a) estudaram a incorporação de diferentes resíduos no asfalto, e compararam com o desempenho de um ligante comercial modificado com SBS. Os ligantes foram produzidos combinando diferentes polímeros (borracha moída de pneus, polietileno de alta densidade e SBS) com óleo lubrificante usado. Os autores concluíram que os ligantes modificados com resíduos apresentaram desempenho similar ao ligante comercial.

Ren et al. (2021) avaliaram o efeito do óleo de motor usado e do óleo de cozinha usado em combinação com o polímero SBR na restauração do desempenho de asfaltos envelhecidos. A incorporação do SBR reestabeleceu a elasticidade e resistência à deformação permanente do asfalto rejuvenescido com óleo usado, resultando em um ligante com desempenho superior em uma ampla faixa de temperaturas. O teor ideal de óleo de motor e SBR foi de 10 e 3%, respectivamente.

Jahanbakhsh et al. (2020) estudaram a possibilidade de produzir misturas sustentáveis com RAP, borracha moída de pneus e resíduo de óleo de motor. A combinação de borracha, óleo de motor e RAP produziu misturas com desempenho mecânico similar ou superior às misturas produzidas com ligantes virgens. As amostras recicladas reduziram as emissões de poluentes, a necessidade de espaço para aterros, a energia e os custos de produção de misturas asfálticas. Todas as misturas com incorporação de óleo e borracha apresentaram melhor custo-benefício.

Deef-Allah et al. (2019) analisaram ligantes asfálticos modificados pela combinação de óleo de motor e borracha de pneus em termos de desempenho e de preocupações ambientais decorrentes do uso do OLUC. Essas preocupações se relacionam com a presença de hidrocarbonetos aromáticos polinucleares (PAH) e níveis elevados de metais pesados como chumbo (Pb), zinco (Zn), cobre (Cu), cromo (Cr), níquel (Ni) e cádmio (Cd), que se acumulam no óleo lubrificante durante a operação do motor. As amostras modificadas por borracha e óleo diminuíram as emissões, possivelmente porque a borracha absorve o óleo e retarda a liberação dos contaminantes. As amostras com óleo lubrificante apresentaram um percentual elevado de enxofre em comparação com as misturas sem óleo. Porém, todos os componentes lixiviados atenderam os valores-limite das especificações. Os autores concluíram que a combinação de borracha e óleo lubrificante usado controla o desempenho reológico de ligantes asfálticos e não causa danos ao meio ambiente.

Outra forma de aplicação do óleo lubrificante usado é como um agente de tratamento prévio da borracha, com o objetivo de promover seu inchamento antes da modificação do asfalto.

Dong et al. (2019) investigaram a possibilidade de ativar as partículas de borracha com óleo de motor usado e outros aditivos, para produzir um asfalto modificado com elevada quantidade de borracha. Os autores realizaram a mistura dos resíduos antes da incorporação com asfalto. O tratamento prévio da borracha com o óleo de motor, permite que a digestão da borracha inicie antes da mistura com o asfalto. Assim, esse processo ajuda a acelerar as reações de dessulfurização e degradação na superfície da borracha. Os resultados da pesquisa mostraram que a dosagem do óleo de motor usado tem impacto significativo no desempenho do asfalto modificado, e a seleção da dosagem ideal precisa garantir a digestão da borracha, sem que haja excesso de óleo para diluir o asfalto e diminuir o seu desempenho após a modificação.

Xu et al. (2021) realizaram estudo destinado a produzir um asfalto-borracha altamente dissolvido. Para isso realizaram o tratamento prévio da borracha usando um composto de óleo lubrificante usado e dessulfurização por micro-ondas. A solubilidade da borracha no asfalto melhorou significativamente com a dessulfurização por micro-ondas e com a adição do óleo de motor usado. Um resumo com diversos estudos sobre a influência do OLUC nas propriedades de ligantes asfálticos é apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Estudos realizados com o emprego de OLUC como modificador de asfaltos

Ensaio	Tipo de ligante	Teor de OLUC	Mistura	Comentários	Referência
Penetração	Pen. 60/70 Pen. 30/40 (RAP)	4%	20 min 150 °C 1500 rpm	A penetração aumentou após a modificação com óleo lubrificante de motor (novo e usado). Apesar do efeito ter sido inferior ao obtido por outros rejuvenescedores, o óleo de motor conseguiu recuperar a penetração do ligante envelhecido a níveis similares ao do ligante virgem	Bilema et al. (2021)
	Pen. 10/20 (RAP)	3, 6 e 12%	n.i.	A alteração nas propriedades do ligante asfáltico pela inclusão de OLUC foi superior nas temperaturas intermediárias, quando comparado com as propriedades em altas temperaturas, visto que o incremento da penetração foi maior do que a redução do ponto de amolecimento.	Silva et al. (2012)
	RAP (30, 60 e 100%) Pen. 85/100 (PG 58-22) + Borracha (10%)	2, 4, 6, 8, 10 e 12%	1h/160 °C (borracha) 6h/140 °C (óleo) 5000 rpm	Os autores apontam que a penetração aumenta gradativamente conforme se adicionam maiores quantidades de OLUC. A utilização de 10% de resíduo de óleo de motor foi suficiente para recuperar a penetração do ligante envelhecido, ficando muito parecida com o ligante virgem.	Jahanbakhsh et al. (2020)
	Pen. 30/40 (RAP) Pen. 60/70	2; 3; 4; 5; 5,5; e 6%	n.i.	O incremento da penetração com a incorporação de OLUC's elevou o grau de penetração do asfalto para 60/70. A penetração aumentou em função da redução da relação entre asfaltenos e maltenos. A incorporação de OLUC's diminuiu a proporção de asfaltenos com elevado peso molecular, levando a um asfalto mais mole. Foi determinado que a dosagem para recuperar as propriedades físicas do asfalto envelhecido ao nível do ligante de controle foi de 5,5 a 6%	El-Shorbagy et al. (2019)
	Pen. 40/50 +PEAD	2, 5, 7 e 10%	15 min, 170 °C e 300 rpm (óleo) 60 min, 170°C e 600 rpm (PEAD)	A incorporação de OLUC enriqueceu a matriz de maltenos e amoleceu o ligante, aumentando sua penetração. Esse efeito permitiu a adição de maiores quantidades de plástico na modificação do asfalto.	Nouali et al. (2021)
Ponto de amolecimento	RAP (25%) VG-30 (Pen. 61)	2, 4, 6 e 8%	30 min 160 °C Velocidade n.i.	Os resultados mostraram que a adição de OLUC diminuiu drasticamente o ponto de amolecimento em dosagens mais baixas, a redução foi menos significativa com dosagens mais altas.	Qurashi e swamy (2018)

Ponto de amolecimento	Pen. 70 TFOT (5, 7, 9, 11, 13 e 15h)	1, 2, 3, 4 e 5%	15 min 135 °C 2000 rpm"	O ponto de amolecimento reduziu com o incremento do teor de OLUC. Foi possível recuperar o ponto de amolecimento das amostras envelhecidas no TFOT.	Li et al. (2019)
	RAP (30, 60 e 100%) Pen. 85/100 (PG 58-22) + Borracha (10%)	2, 4, 6, 8, 10 e 12%	1h/160 °C (borracha) 6h/140 °C (óleo) 5000 rpm	O ponto de amolecimento do ligante RAP diminuiu consideravelmente, sendo necessário menores teores de OLUC para recuperar essa propriedade do asfalto envelhecido.	Jahanbakhsh et al. (2020)
	Pen. 60/70 Pen. 30/40 (RAP)	4%	20 min 150 °C 1500 rpm	Os resultados mostraram que o OLUC reduziu o ponto de amolecimento, porém não foi tão eficiente quanto outros rejuvenescedores. Conseqüentemente, a quantidade de resíduo precisou ser aumentada para obter-se o mesmo resultado.	Bilema et al. (2021)
Viscosidade	PG 64-22	2,5%	30 min 150 °C 2000 rpm	A incorporação de OLUC reduziu a viscosidade do asfalto e as temperaturas de produção e compactação da mistura asfáltica. As amostras modificadas com OLUC não filtrado apresentaram um incremento nas temperaturas de fabricação e compactação (aproximadamente 1°C), provavelmente devido à presença de metais no OLUC.	Shoukat e Yoo (2018)
	RAP (25%) VG-30 (Pen. 61)	2, 4, 6 e 8%	30 min 160 °C Velocidade n.i.	O OLUC reduziu a viscosidade de um asfalto preparado com 25% de RAP. As inclinações das curvas de regressão para a viscosidade das amostras modificadas diminuíram com o aumento da quantidade de óleo, indicando que o óleo reduziu a susceptibilidade térmica do asfalto. O teor de 2% de óleo lubrificante foi suficiente para recuperar viscosidade do asfalto envelhecido.	Qurashi e Swamy (2018)
	Pen. 10/20 (RAP)	3, 6 e 12%	n.i.	Houve redução significativa da viscosidade de asfaltos envelhecidos modificados com OLUC. Comparado com um rejuvenescedor comercial, o OLUC foi mais eficiente.	Silva et al. (2012)
	Pen. 80/100 +Borracha (5, 15, 25, 35%) +3% Polietileno	25% (do peso da borracha) Tratamento: 100°C e 2h	90 min 185 °C 4000 rpm	O tratamento da borracha com OLUC e dessulfurização por micro-ondas, reduziu significativamente a viscosidade do asfalto-borracha, melhorando a trabalhabilidade da mistura asfáltica.	Xu et al. (2021)
	RAP +SBR (1, 2 e 3%)	5, 10 e 15%	15 min 150 °C 1000 rpm	O OLUC diminuiu a viscosidade devido à recomposição das frações leves do asfalto envelhecido e recuperou a sua trabalhabilidade.	Ren et al. (2021)

Viscosidade	B35/50 (Pen. 35/50) PMB45-80/60 (Ref.) Borracha (20%); SBS (5%); PEAD (6%);	7,5; 10; 12,5 e 15%	20 min (em cada) 150 °C (óleo) 180 °C (Polímeros)	O OLUC promoveu a redução da viscosidade em diferentes tipos de asfaltos, melhorando a trabalhabilidade com a redução das temperaturas de produção e compactação da mistura asfáltica, porém podendo apresentar deformações elevadas em temperaturas mais altas. A combinação com polímeros pode solucionar o problema, melhorando o desempenho reológico do asfalto, principalmente em altas temperaturas, apresentando maior resistência ao afundamento de trilha de roda e maior capacidade de recuperação elástica.	Fernandes et al. (2018)
	PG 64-22	12% (borracha tratada com óleo de motor e estearato de zinco)	30 min 177 °C 700 rpm	O tratamento da borracha com OLUC reduziu a viscosidade do asfalto-borracha. Esse resultado pode ser explicado pela desvulcanização da borracha que resultou em uma melhora da trabalhabilidade do ligante.	Chen et al. (2019a)
	AH-50 (Pen. 48) +Borracha (20, 30 e 40%)	25, 35 e 45% (peso da borracha) Tratamento: 100 °C e 1h	50 min 170 °C 3000 rpm	A adição de OLUC levou à queda da viscosidade devido ao aumento de frações leves no asfalto.	Li et al. (2019)
	RAP (30, 60 e 100%) Pen. 85/100 (PG 58-22) + Borracha (10%)	2, 4, 6, 8, 10 e 12%	1h/160 °C (borracha) 6h/140 °C (óleo) 5000 rpm	O OLUC como agente rejuvenescedor melhorou consideravelmente a viscosidade do ligante asfáltico envelhecido, tendo potencial para ser usado na produção de uma mistura asfáltica contendo uma alta porcentagem de RAP. 10 a 12% de OLUC é suficiente para recuperar a viscosidade ao nível do ligante virgem.	Jahanbakhsh et al. (2020)
	RAP +SBR (1, 2 e 3%)	5, 10 e 15%	15 min 150 °C 1000 rpm	A viscosidade do RAP foi reduzida consideravelmente pela adição de OLUC. Esse resultado está associado com a recomposição das frações leves, que reduzem significativamente a interação molecular e a resistência ao atrito no ligante envelhecido. O OLUC promoveu a recuperação da viscosidade e da trabalhabilidade do ligante, no entanto, o torna mais sensível a variação de temperatura. A inclusão do polímero SBS contribuiu para reduzir a sensibilidade à variação de temperatura e resistência ao fluxo.	Ren et al. (2021)

Viscosidade	Pen. 60/70 Pen. 30/40 (RAP)	4%	20 min 150 °C 1500 rpm	O OLUC reduziu a viscosidade do asfalto envelhecido, no entanto, teve desempenho inferior a outros rejuvenescedores. Provavelmente devido a maior perda de voláteis após o envelhecimento.	Bilema et al. (2021)
Deformação permanente	PG 64-22 PG 76-22 (+SBS)	2,5; 5; 7,5 e 10%	n.i.	Os resultados do estudo mostraram que a modificação com OLUC reduziu significativamente o parâmetro de resistência à deformação permanente ( $G^*/\text{sen}\delta$ ), e como consequência, o grau de desempenho (PG) em altas temperaturas. O ensaio de MSCR (Multiple Stress Creep Recovery) revelou que houve um incremento da Compliância complexa, indicando que a incorporação de OLUC aumentou a deformação não recuperável do ligante. A recuperação elástica também foi comprometida.	Jia et al. (2014)
	PG 64-22 +Borracha (10%)	2 e 2,5%	60 min 160, 190 e 220 °C 10 e 50 Hz	A incorporação de OLUC reduziu o módulo complexo e aumentou o ângulo de fase do asfalto-borracha. Como consequência, o parâmetro de resistência à deformação permanente diminuiu com a adição do óleo. No entanto, os valores observados ainda foram maiores do que a resistência ao afundamento do asfalto convencional, sem borracha e sem OLUC. Esse resultado evidenciou que a combinação de borracha e OLUC conseguiram promover um balanço entre rigidez e amolecimento, que são requisitos para um bom desempenho em alta e baixa temperatura.	Deef-Allah et al. (2021)
	RAP +SBR (1, 2 e 3%)	5, 10 e 15%	15 min 150 °C 1000 rpm	As amostras rejuvenescidas com OLUC apresentaram módulo complexo inferior e redução dos parâmetros $G^*/\text{sen}(\delta)$ e $G^*\text{sen}(\delta)$ , especialmente para o teor de 15%, comprometendo a resistência ao afundamento de trilha de roda, porém, melhorando o desempenho à fadiga. A Compliância não-recuperável aumentou e a resposta elástica diminuiu após o rejuvenescimento, indicando que o óleo afetou negativamente a resistência à deformação permanente.	Ren et al. (2021)

Deformação permanente	RAP (25%) VG-30 (Pen. 61)	2, 4, 6 e 8%	30 min 160 °C Velocidade n.i.	O módulo complexo diminuiu com a incorporação de OLUC e o ângulo de fase aumentou. O asfalto rejuvenescido se tornou mais mole. 2% de óleo foi suficiente para diminuir a rigidez elevada do RAP. Dosagens elevadas de óleo podem ser prejudiciais, devido à redução excessiva de rigidez.	Qurashi e Swamy (2018)
	Pen. 70/100 Pen. 160/220 Petróleo de xisto +Polímeros	5, 8, 10 e 11%	30 min 150 °C 5000 rpm	A modificação com óleo reduziu a rigidez e a resistência ao afundamento de trilha de roda. A degradação da performance em alta temperatura foi contornada com a adição de polímeros. A classificação por penetração não foi capaz de caracterizar o comportamento mecânico das amostras, visto que ligantes com mesmo grau de penetração apresentaram desempenho reológico diferentes.	Teymourpour et al. (2015)
	B35/50 (Pen. 35/50) PMB45-80/60 Borracha (20%); SBS (5%); PEAD (6%);	7,5; 10; 12,5 e 15%	20 min 150 °C (óleo) 180 °C (Polímeros)	Os ligantes modificados com polímeros e OLUC apresentaram desempenho mecânico superior ao de ligantes asfálticos comerciais em uma ampla faixa de temperaturas, tendo melhor resistência à deformação permanente e menor susceptibilidade térmica.	Fernandes et al. (2018)
	Pen. 70 TFOT (5, 7, 9, 11, 13 e 15h)	1, 2, 3, 4 e 5%	15 min 135 °C 2000 rpm"	Os autores observaram que o ângulo de fase aumentou e o módulo complexo diminuiu com o incremento do teor de OLUC. Como consequência, o parâmetro de resistência à deformação permanente também foi afetado negativamente.	Li et al. (2019)
Fadiga	Pen. 60/80 PMB-A (SBS) PMB-B (SBS)	4 e 8%	30 min 150 °C (óleo) 160 °C (SBS) 4000 rpm	O parâmetro $G^* \sin(\delta)$ foi reduzido com a utilização de OLUC e contribuiu para a melhora da resistência ao trincamento por fadiga.	Liu et al. (2018b)
	PG 64-22 +10% borracha	2 e 2,5%	60 min 160, 190 e 220 °C 10 e 50 Hz	A resistência ao trincamento por fadiga foi melhorada pela incorporação de borracha e OLUC. Esse resultado se deve ao amolecimento causado pela adição de óleo ao asfalto-borracha, que compensou a absorção das frações leves pela borracha durante o processo de digestão.	Deef-Allah et al. (2019)

Fadiga	Pen. 70/100 Pen. 160/220 Petróleo de xisto +Polímeros	5, 8, 10 e 11%	30 min 150 °C 5000 rpm	A modificação com óleo reduziu o parâmetro de fadiga, indicando que o ligante se tornou mais mole. Esse efeito pode contribuir para a resistência do ligante quando submetido à carregamentos cíclicos. Os resultados do LAS (Linear Amplitude Sweep Test) confirmaram que os ligantes modificados com OLUC apresentaram maior vida de fadiga do que o ligante original.	Teymourpour et al. (2015)
	PG64-22 +Borracha (10 e 20%)	3 e 9%	120 min 160 e 190 °C 30 Hz	O melhor desempenho contra a fadiga foi obtido pelas amostras com combinação de borracha e OLUC. A borracha absorveu o óleo que, após o envelhecimento de longo prazo, continuou a liberar e repor frações leves para o asfalto. Além disso, a ausência de OLUC nas amostras de asfalto-borracha levou a absorção de frações leves do ligante pela borracha, resultando no seu enrijecimento.	Ragab e Abdelrahman (2015)
	PG 64-22	2,5%	30 min 150 °C 2000 rpm	A redução do módulo de rigidez das amostras modificadas com óleo pode ser um indicativo de melhor desempenho em relação ao trincamento térmico ou por fadiga.	Shoukat e Yoo (2018)
Trincamento térmico	RAP +SBR (1, 2 e 3%)	5, 10 e 15%	15 min 150 °C 1000 rpm	Em baixas temperaturas, o OLUC reduziu a rigidez (S) e aumentou a relaxação (valor-m) do RAP, melhorando a resistência ao trincamento térmico.	Ren et al. (2021)
	PG 64-22 +10% borracha	2 e 2,5%	60 min 160, 190 e 220 °C 10 e 50 Hz	As amostras modificadas com borracha e óleo apresentaram maior resistência ao trincamento térmico devido a redução da rigidez (S) e incremento da relaxação (valor-m). O OLUC melhorou o desempenho do asfalto-borracha em baixa temperatura.	Deef-Allah et al. (2019)
	Pen. 60/80 +SBS	4 e 8%	30 min 160 °C 4000 rpm	O ligante modificado com OLUC apresentou menor rigidez à fluência (S) e maior relaxação (valor-m) do que o asfalto puro. Estes resultados sugerem que a mistura de OLUC aumenta a resistência ao trincamento em baixa temperatura. O óleo amolece o asfalto, o tornando mais elástico e aliviando as tensões devido à variação de temperatura.	Liu et al. (2019)
	PG64-22 +Borracha (10 e 20%)	3 e 9%	120 min 160 e 190 °C 30 Hz	O OLUC contribuiu para melhorar o desempenho em baixas temperaturas, elevando o grau de desempenho em relação ao ligante convencional.	Ragab e Abdelrahman (2015)

Trincamento térmico	Pen. 70/100 Pen. 160/220 Petróleo de xisto +Polímeros	5, 8, 10 e 11%	30 min 150 °C 5000 rpm	A incorporação de OLUC foi benéfica para a performance do ligante em baixas temperaturas. Houve redução da rigidez e elevação do valor-m. Esses resultados indicam que o ligante modificado com óleo pode apresentar maior resistência ao trincamento térmico.	Teymourpour et al. (2015)
Perda de massa	PG 64-22 (RAP)	12%	n.i.	Os autores relataram elevada perda de massa do RAP rejuvenescido com OLUC após envelhecimento na estufa RTFOT, podendo ser um indicativo de maior susceptibilidade ao envelhecimento.	Zaumanis et al. (2014)
	PG 64-22 PG 76-22	0, 5 e 10%	120 °C Tempo e velocidade n.i.	O estudo mostrou aumento da perda de massa após o envelhecimento RTFOT com o incremento da quantidade de OLUC devido à maior quantidade de componentes voláteis de baixo peso molecular. No entanto, os valores ficaram dentro dos valores máximos especificados, mostrando que o ligante modificado com OLUC manteve uma boa estabilidade térmica.	Wu e Muhunthan (2018)
	Pen. 60/70 Pen. 30/40 (RAP)	4%	20 min 150 °C 1500 rpm	Observou-se que o asfalto com OLUC teve maior perda de massa após ensaio de envelhecimento, em comparação com outros tipos de asfalto+óleo, provavelmente devido à alta quantidade de pequenas partículas metálicas presentes no OLUC. Ainda assim, os resultados obtidos foram inferiores aos valores limites especificados.	Bilema et al. (2021)

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo traz a descrição dos materiais, dos métodos e das normas de referência que foram utilizados para caracterização física, reológica e de durabilidade do asfalto-borracha-OLUC durante a execução do programa experimental. Os trabalhos laboratoriais foram divididos da seguinte forma:

- (i) Determinação dos teores de borracha e OLUC;
- (ii) Fabricação das amostras de asfalto-borracha-OLUC; e
- (iii) Execução dos ensaios de caracterização.

O teor de borracha foi escolhido de forma similar ao procedimento descrito nos trabalhos de Guimarães (2019) e Reis (2020). Ensaio de viscosidade rotacional Brookfield foram realizados em ligantes modificados com diferentes percentuais de borracha moída, com o objetivo de produzir um asfalto-borracha com viscosidade excessiva. Considerou-se como viscosidade excessiva, o resultado do ensaio que superasse o valor de 4000 cP na temperatura de 175 °C, que é definido pela norma DNIT 111/2009 como o limite máximo recomendado para a viscosidade do asfalto-borracha do tipo AB22. O teor de 22% de borracha foi suficiente para superar o valor especificado.

O óleo de motor usado ou contaminado (OLUC) foi empregado com o objetivo de reduzir a viscosidade excessiva do asfalto-borracha. Para isso, foram escolhidos quatro teores com base nos resultados da revisão bibliográfica: 2,5; 5,0; 7,5 e 10%.

As amostras foram preparadas de duas formas diferentes. O primeiro grupo de amostras foi fabricado pela mistura direta do asfalto com a borracha e com o OLUC. O segundo grupo de amostras foi produzido realizando-se um tratamento prévio da borracha com o OLUC. Nesse tratamento, os resíduos foram misturados e colocados numa estufa a 100 °C por 1 hora, de modo que a borracha moída pudesse absorver parte do OLUC e iniciar a reação de inchamento antes da modificação com o asfalto. Em seguida, a borracha tratada foi incorporada ao asfalto.

#### 3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para fabricação das amostras foram o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 (grau de penetração), a borracha moída reciclada de pneus inservíveis e o OLUC (Figura 9).

Figura 9 – Materiais



a) CAP 50/70; b) Borracha moída; c) OLUC

### 3.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)

O CAP 50/70 foi utilizado como ligante base para fabricação das amostras de asfalto-borracha-OLUC. O Quadro 2 apresenta um resumo dos resultados de caracterização das propriedades desse CAP. O ligante atendeu todos os limites recomendados pela norma DNIT 095, com exceção da sensibilidade térmica, que apresentou um valor abaixo do recomendado (-1,7). Com relação a especificação SUPERPAVE, o ligante foi classificado com grau de desempenho PG 64-22.

### 3.1.2 Borracha moída de pneus

A borracha moída utilizada neste trabalho foi obtida por trituração ambiente de pneus de veículos de passeio. A granulometria da borracha é apresentada na Tabela 1 e a curva granulométrica pode ser visualizada na Figura 10.

Quadro 2 – Caracterização do CAP 50/70

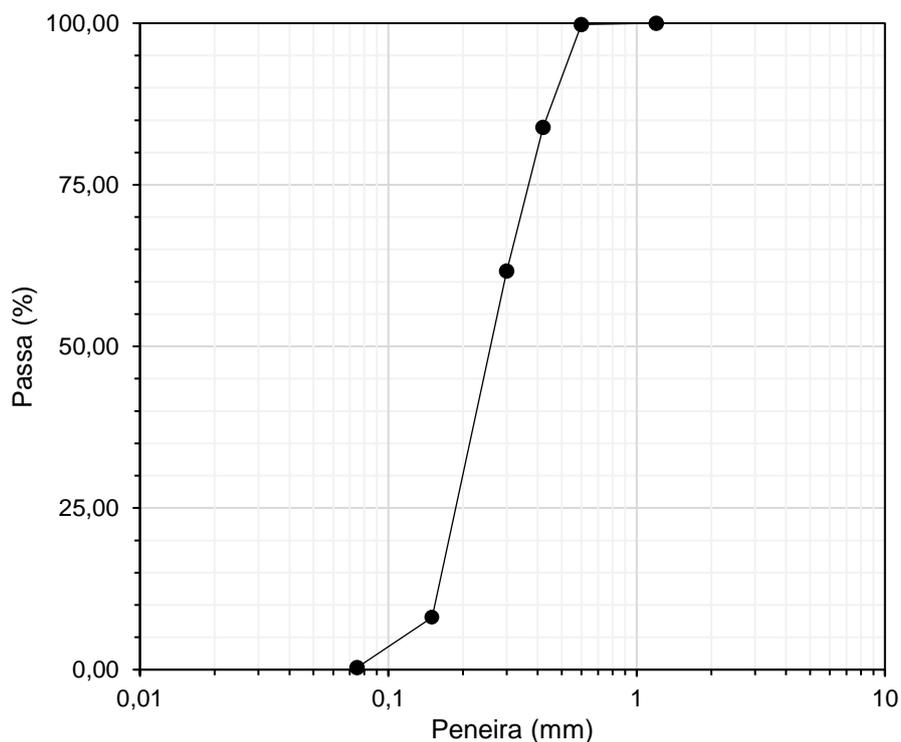
Propriedade		Unidade	Resultado		Limites especificados		Referência
Penetração		0,1 mm	56		50-70		DNIT 095
Ponto de amolecimento		°C	47		≥ 46		DNIT 095
Ponto de fulgor		°C	259		≥ 235		DNIT 095
Viscosidade rotacional Brookfield	135 °C	cP	332		≥ 274		DNIT 095
	150 °C		174		≥ 112		DNIT 095
	177 °C		63		57-285		DNIT 095
Índice de susceptibilidade térmica		-	-1,7		(-1,5) a (+0,7)		DNIT 095
Penetração retida		%	59		≥ 55		DNIT 095
Aumento do ponto de amolecimento		°C	4,5		≤ 8		DNIT 095
Variação de massa		%	0,06		≤ 0,5		DNIT 095
G*/sen(δ)	64 °C	kPa	NE:	RTFOT:	NE	RTFOT	AASHTO M320 ASTM D6373
			1,6	3,9	≥ 1,0	≥ 2,2	
G*×sen(δ)	16 °C	kPa	5356 δ=44,5		≤ 5000, ou ≤ 6000 se δ ≥ 42°		AASHTO M320 ASTM D6373
S	-12 °C	MPa	227		≤ 300		AASHTO M320 ASTM D6373
Valor-m	-12 °C	-	0,320		≥ 0,300		AASHTO M320 ASTM D6373
Grau de desempenho (PG)		PG 64-22					

Tabela 1 – Granulometria da borracha moída\*

Peneira (abertura em mm)	Porcentagem que passa (%)
1,2	100,00
0,6	99,80
0,42	83,91
0,3	61,64
0,15	8,10
0,075	0,34
Fundo	0,00

\*Granulometria original, sem modificação, da borracha moída disponível no estado do Paraná.

Figura 10 – Curva granulométrica da borracha moída



### 3.1.3 Óleo Lubrificante Usado ou Contaminado (OLUC)

O OLUC foi fornecido por uma concessionária de veículos em Foz do Iguaçu. Na concessionária, durante as atividades de revisão periódica dos veículos, os óleos retirados dos motores dos veículos são armazenados coletivamente, sem diferenciação dos veículos de origem desses óleos. Não foi utilizado nenhum tratamento ou processo de filtragem do óleo antes da sua incorporação ao asfalto-borracha. A viscosidade e o ponto de fulgor do óleo são apresentados na Tabela 2.

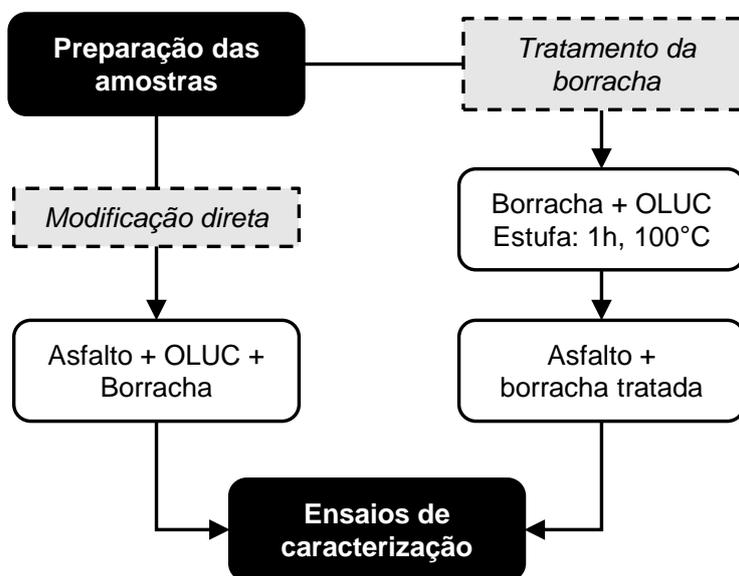
Tabela 2 – Propriedades do OLUC

Propriedade	Resultado
Viscosidade (40 °C)	69 cP
Viscosidade (60 °C)	62 cP
Viscosidade (80 °C)	51 cP
Ponto de fulgor	220 °C

### 3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

As amostras foram fabricadas de duas formas distintas (Figura 11).

Figura 11 – Formas de modificação

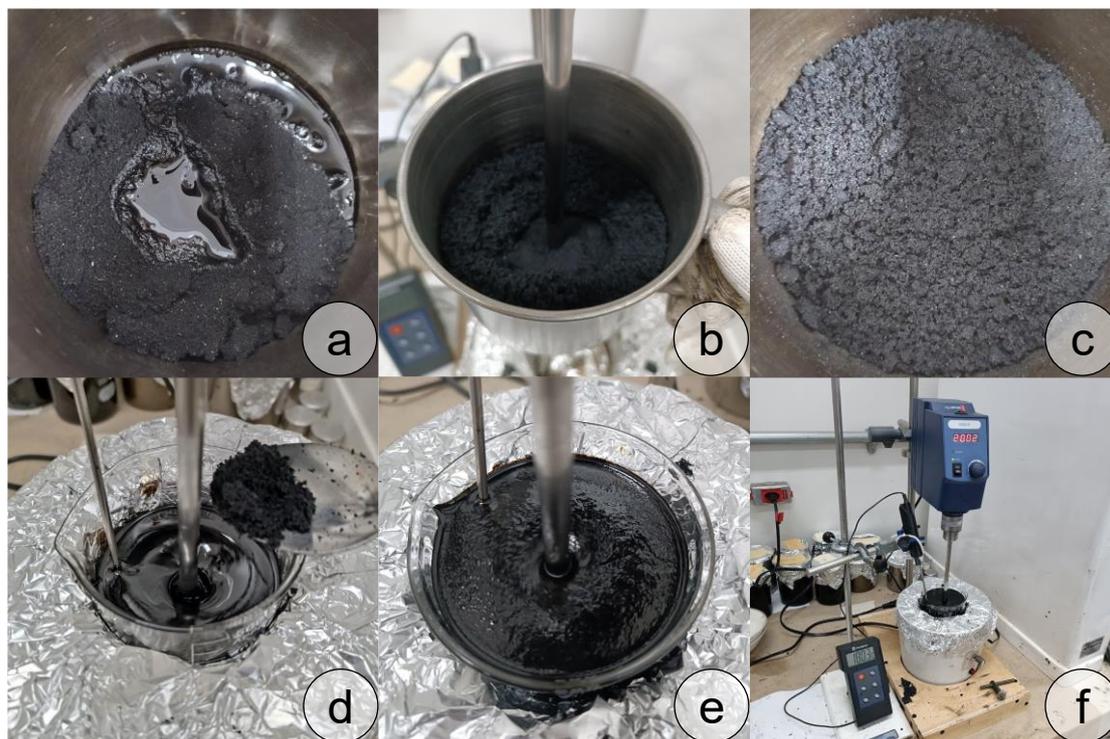


Primeiro, o OLUC foi utilizado como agente extensor para recompor os óleos do asfalto que são absorvidos pela borracha durante a interação entre ambos. A modificação direta foi realizada mediante incorporação dos resíduos (borracha e óleo) ao ligante asfáltico. A adição dos resíduos ao CAP 50/70 foi efetuada de forma intercalada.

Na segunda forma de modificação, o OLUC foi utilizado como substituto parcial do asfalto para promover o inchamento da borracha antes da modificação do CAP 50/70. Neste processo, os resíduos foram misturados previamente e submetidos a aquecimento em estufa. Após a reação, a borracha tratada com o OLUC foi usada para modificar o asfalto.

A escolha das variáveis para modificação das amostras foi realizada com auxílio da revisão bibliográfica (Quadro 1), levando-se em consideração os equipamentos disponíveis e as limitações encontradas durante a execução de testes em laboratório. As amostras de asfalto-borracha-OLUC foram preparadas com um misturador mecânico (Figura 12-f). As quantidades de borracha moída foram calculadas em relação ao peso do CAP50/70, enquanto as quantidades de OLUC foram calculadas em relação ao peso do ligante asfalto-borracha.

Figura 12 – Fabricação das amostras de asfalto-borracha-OLUC



a) Pesagem; b) Mistura mecânica da borracha com OLUC; c) Resultado do tratamento; d) Adição da borracha moída; e) Homogeneização; f) Misturador mecânico.

### 3.2.1 Modificação direta

Nesta etapa, os resíduos foram misturados diretamente com o ligante asfáltico sem nenhum tratamento prévio. O OLUC e a borracha foram adicionados de forma intercalada, como forma de controlar a variação da viscosidade. Ao se adicionar todo o OLUC antes da borracha, se observou redução excessiva da viscosidade, ocorrendo respingos devido à elevada rotação do misturador. Adicionando-se a borracha antes do OLUC, a viscosidade acabava aumentando de forma excessiva, dificultando o processo de adição. Os parâmetros da modificação estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros considerados para modificação direta

Parâmetro	Valor
Teor de borracha	22%
Teor de OLUC	2,5; 5,0; 7,5 e 10%
Temperatura durante a modificação do CAP	180 °C
Tempo para adição dos modificadores	15 – 30 min
Velocidade de rotação durante adição	1000 rpm
Tempo de homogeneização	30 min
Velocidade de rotação durante homogeneização	2000 rpm

### 3.2.2 Tratamento da borracha

Nesta modificação, a borracha moída foi previamente misturada ao OLUC antes da incorporação ao CAP 50/70. A mistura dos resíduos foi colocada em estufa para ser aquecida na temperatura de 100 °C durante uma hora. Após esse tratamento, o produto resultante foi adicionado ao CAP e a modificação seguiu da mesma forma que no processo de modificação direta. Os parâmetros escolhidos são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros considerados para modificação com o tratamento da borracha

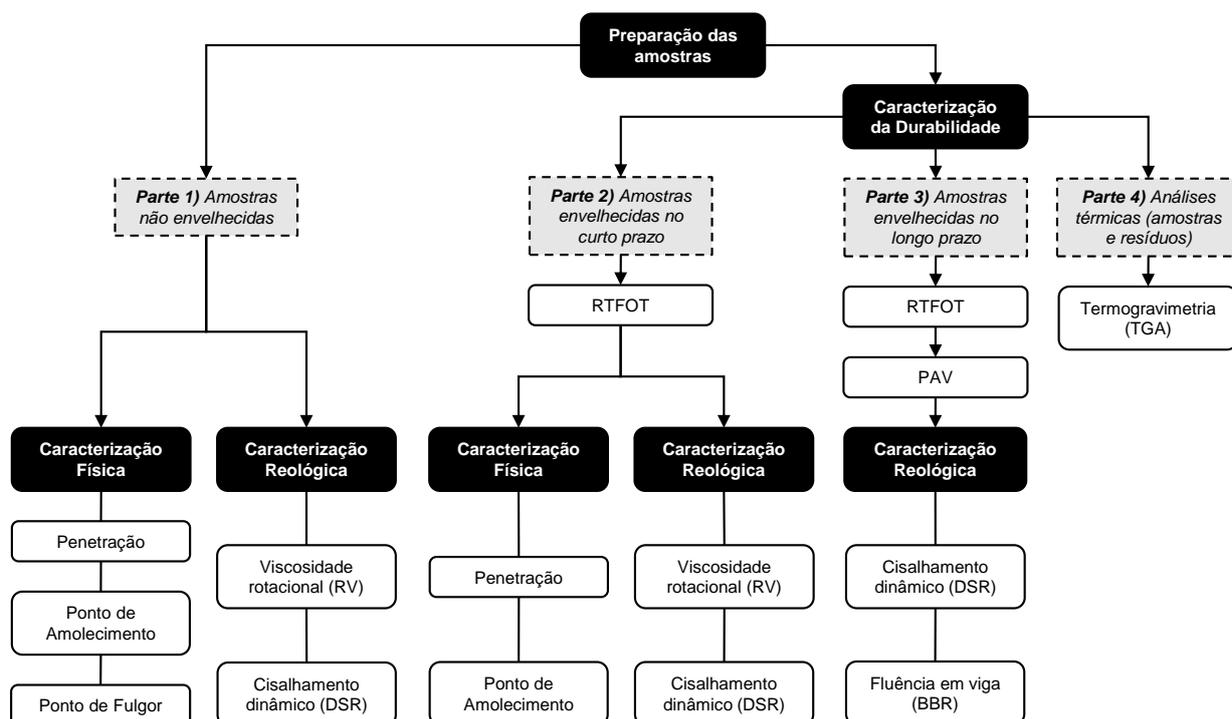
<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Teor de borracha	22%
Teor de OLUC	2,5; 5,0; 7,5 e 10%
Tempo de tratamento	1 h
Temperatura do tratamento	100 °C
Temperatura durante a modificação do CAP	180 °C
Tempo para adição dos modificadores	15 – 30 min
Velocidade de rotação durante adição	1000 rpm
Tempo de homogeneização	30 min
Velocidade de rotação durante homogeneização	2000 rpm

### 3.3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O plano experimental foi dividido em quatro partes (Figura 13). Na primeira parte, foram avaliadas a consistência (penetração, ponto de amolecimento), a segurança (ponto de fulgor), a trabalhabilidade (viscosidade rotacional ou viscosidade Brookfield), o comportamento viscoelástico e a resistência à deformação permanente em altas temperaturas (cisalhamento dinâmico) das amostras não envelhecidas.

Na segunda parte, as amostras foram submetidas ao ensaio de envelhecimento de curto prazo (RTFOT), para verificação das variações dos índices físicos, índices reológicos e avaliação da perda de massa. Os resultados foram utilizados para avaliar o grau de envelhecimento sofrido pelas amostras e concluir a determinação do grau de desempenho em altas temperaturas (cisalhamento dinâmico).

Figura 13 – Fluxograma dos ensaios



Na terceira parte, as amostras foram submetidas ao envelhecimento de curto prazo (RTFOT), seguido pelo envelhecimento de longo prazo (PAV), para avaliação da resistência ao trincamento por fadiga em temperaturas intermediárias (cisalhamento dinâmico) e da resistência ao trincamento térmico em baixas temperaturas (fluência em viga). O grau de desempenho em baixas temperaturas também foi determinado nesta etapa.

Na quarta parte, os resíduos e as amostras de ligante foram submetidos à análise termogravimétrica para avaliação da estabilidade térmica, com objetivo de verificar o efeito do aquecimento na degradação dos materiais e garantir a adequada integridade das amostras nas elevadas temperaturas de produção da mistura asfáltica.

Os ensaios e normas de referência para execução do programa experimental proposto são apresentados na Tabela 5. O Quadro 3 apresenta a lista de amostras que serão avaliadas.

Tabela 5 – Ensaio e normas de referência

<b>Ensaio/Propriedade</b>	<b>Norma</b>	<b>Avaliação</b>
Penetração	DNIT 135 ASTM D5	Profundidade de penetração da agulha; Consistência; Dureza.
Ponto de amolecimento	DNIT 131 ASTM D36	Temperatura de amolecimento; Consistência; Susceptibilidade térmica; Resistência à deformação em altas temperaturas.
Ponto de fulgor	NBR 11341 ASTM D92	Temperatura de ignição dos gases; Indicativo da perda de voláteis; Segurança contra incêndio e explosões.
Viscosidade Rotacional (Brookfield)	ASTM D4402 AASHTO T316	Viscosidade aparente; Consistência; Trabalhabilidade; Temperaturas de usinagem e compactação.
Cisalhamento dinâmico	ASTM D7175 AASHTO T315	Módulo complexo e ângulo de fase; Percentual de recuperação elástica; Complância complexa; Caracterização do comportamento viscoelástico Resistência à deformação permanente em altas temperaturas (amostras não envelhecidas e envelhecidas no curto prazo); Resistência ao trincamento por fadiga em temperaturas intermediárias (amostras envelhecidas no longo prazo); Grau de desempenho em alta temperatura.
Fluência em viga	ASTM D6648 AASHTO T313	Rigidez e módulo de relaxação; Resistência ao trincamento térmico (amostras envelhecidas no longo prazo); Grau de desempenho em baixa temperatura.
Envelhecimento de curto prazo	ASTM D2872 AASHTO T240	Durabilidade; Perda de massa; Simulação do envelhecimento de curto prazo.
Envelhecimento de longo prazo	ASTM D6525 AASHTO R28	Durabilidade; Simulação do envelhecimento de longo prazo.
Análise termogravimétrica	ASTM E2550	Estabilidade térmica; Durabilidade; Degradação dos materiais.
Especificações para Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP)	DNIT 095	Classificação e caracterização do CAP.
Especificações para asfalto-borracha (AB)	DNIT 111	Classificação e caracterização do asfalto-borracha.
Especificação SUPERPAVE	AASHTO M320 ASTM D6373	Classificação e determinação do grau de desempenho de ligantes asfálticos.

Quadro 3 – Quadro de amostras

Ligante	Tipo de modificação	Condição da amostra	Teor de OLUC (%)	Denominação
CAP 50/70	Ligante convencional	Não envelhecida	0	NECAP5070
		Envelhecida no curto prazo	0	RTFOTCAP5070
		Envelhecida no longo prazo	0	PAVCAP5070
CAP 50/70 + 22% Borracha	Asfalto-borracha	Não envelhecida	0	NE22B
		Envelhecida no curto prazo	0	RTFOT22B
		Envelhecida no longo prazo	0	PAV22B
CAP 50/70 + 22% Borracha + OLUC	Modificação Direta (MD)	Não envelhecida	2,5	NE22B2,5OLUCMD
			5,0	NE22B5OLUCMD
			7,5	NE22B7,5OLUCMD
			10,0	NE22B10OLUCMD
		Envelhecida no curto prazo	2,5	RTFOT22B2,5OLUCMD
			5,0	RTFOT22B5OLUCMD
			7,5	RTFOT22B7,5OLUCMD
			10,0	RTFOT22B10OLUCMD
		Envelhecida no longo prazo	2,5	PAV22B2,5OLUCMD
			5,0	PAV22B5OLUCMD
			7,5	PAV22B7,5OLUCMD
			10,0	PAV22B10OLUCMD
	Tratamento da Borracha (TB)	Não envelhecida	2,5	NE22B2,5OLUCTB100
			5,0	NE22B5OLUCTB100
			7,5	NE22B7,5OLUCTB100
			10,0	NE22B10OLUCTB100
		Envelhecida no curto prazo	2,5	RTFOT22B2,5OLUCTB100
			5,0	RTFOT22B5OLUCTB100
			7,5	RTFOT22B7,5OLUCTB100
			10,0	RTFOT22B10OLUCTB100
		Envelhecida no longo prazo	2,5	PAV22B2,5OLUCTB100
			5,0	PAV22B5OLUCTB100
			7,5	PAV22B7,5OLUCTB100
			10,0	PAV22B10OLUCTB100

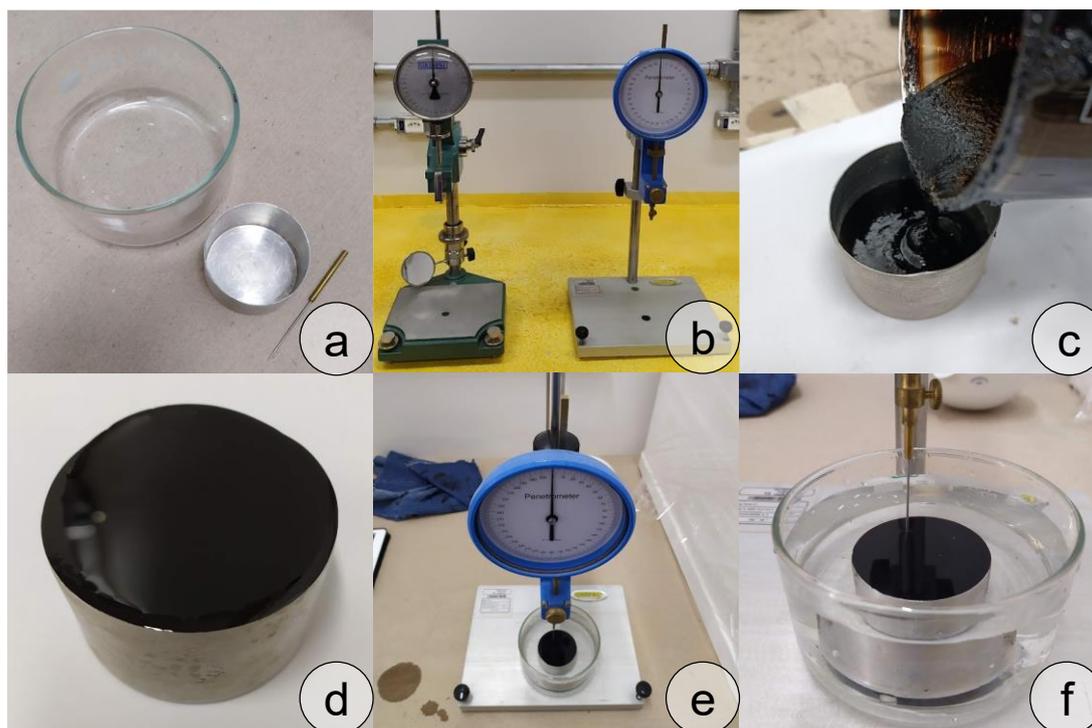
### 3.4 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

#### 3.4.1 Penetração

O ensaio de penetração tem por objetivo avaliar a consistência do asfalto e classificá-lo quanto a sua dureza. A penetração pode ser determinada segundo o método

descrito na norma DNIT 155. O ensaio consiste em realizar a penetração de uma agulha padronizada em uma amostra de ligante asfáltico e medir a profundidade, em décimos de milímetros, que a agulha penetra verticalmente no material, em condições controladas de temperatura, tempo e carregamento. Quanto menor for a leitura de penetração, maior será a consistência do cimento asfáltico (DNIT, 2010b; ASTM, 2020a).

Figura 14 – Ensaio de penetração



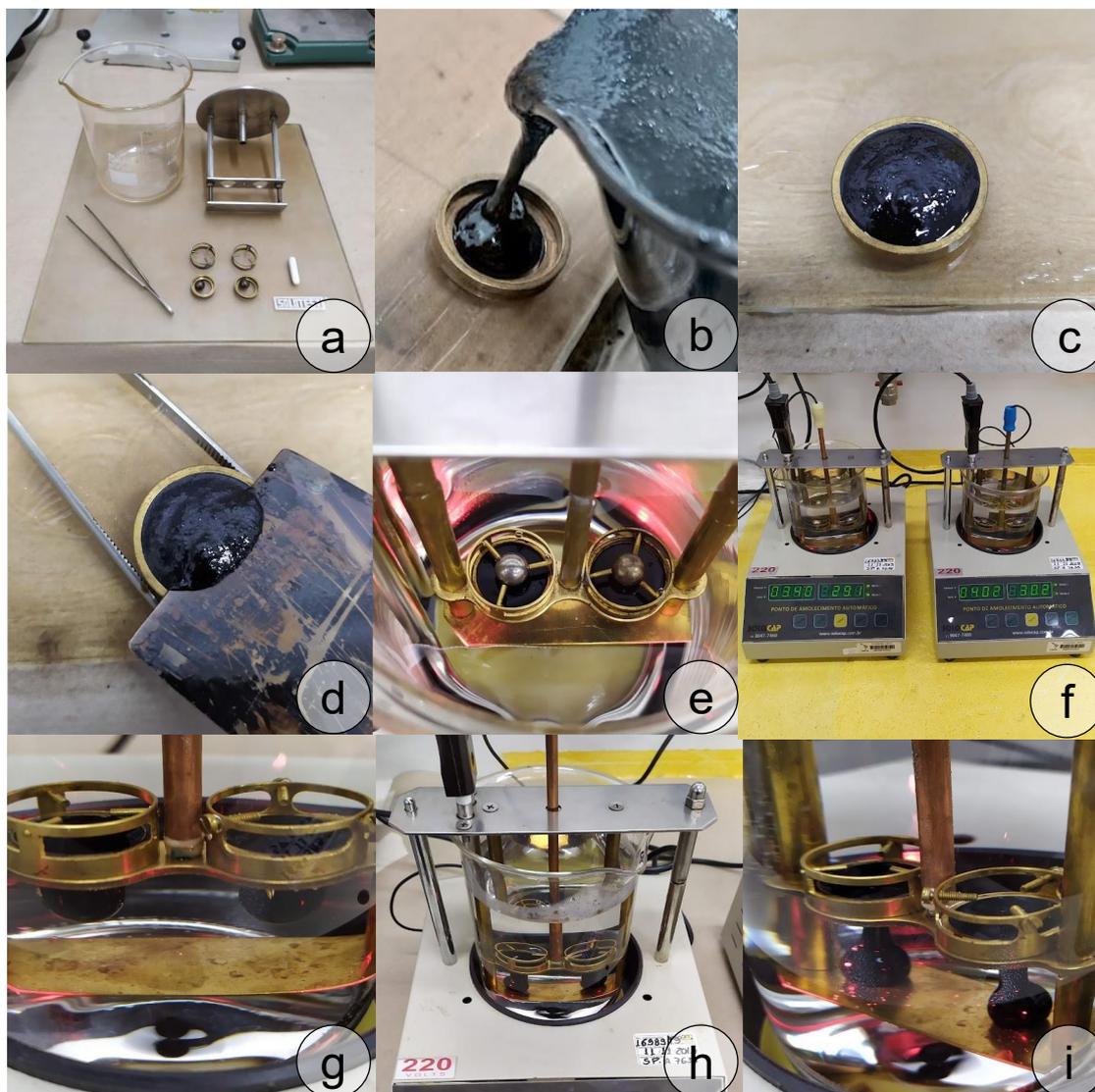
a) Cápsula e agulha; b) Penetrômetros; c) Preparação da amostra; d) amostra resfriando; e) Posicionamento da cápsula; f) Posicionamento da agulha.

### 3.4.2 Ponto de amolecimento (anel e bola)

O asfalto é um material viscoelástico sem ponto de fusão bem definido, que amolece e perde resistência ao escoamento quando aquecido. O ensaio de ponto de amolecimento (também chamado de método do anel e bola) tem por objetivo, determinar de forma empírica a temperatura que o ligante passa de um estado viscoelástico para um estado de escoamento viscoso. O ensaio pode ser realizado seguindo o procedimento descrito na norma DNIT 131. Duas esferas de aço são posicionadas cada uma sobre um disco de ligante asfáltico confinado dentro de um anel metálico. O conjunto é inserido em um béquer com água, que é aquecido a uma taxa controlada até o asfalto amolecer e não conseguir suportar o peso de cada esfera em cada amostra. O ponto de amolecimento é

relatado como a média da temperatura para que cada esfera envolvida com asfalto amolecido, percorra verticalmente 2,54 cm, até tocar em uma placa no fundo do conjunto (DNIT, 2010a; ASTM, 2020b).

Figura 15 – Ensaio de ponto de amolecimento



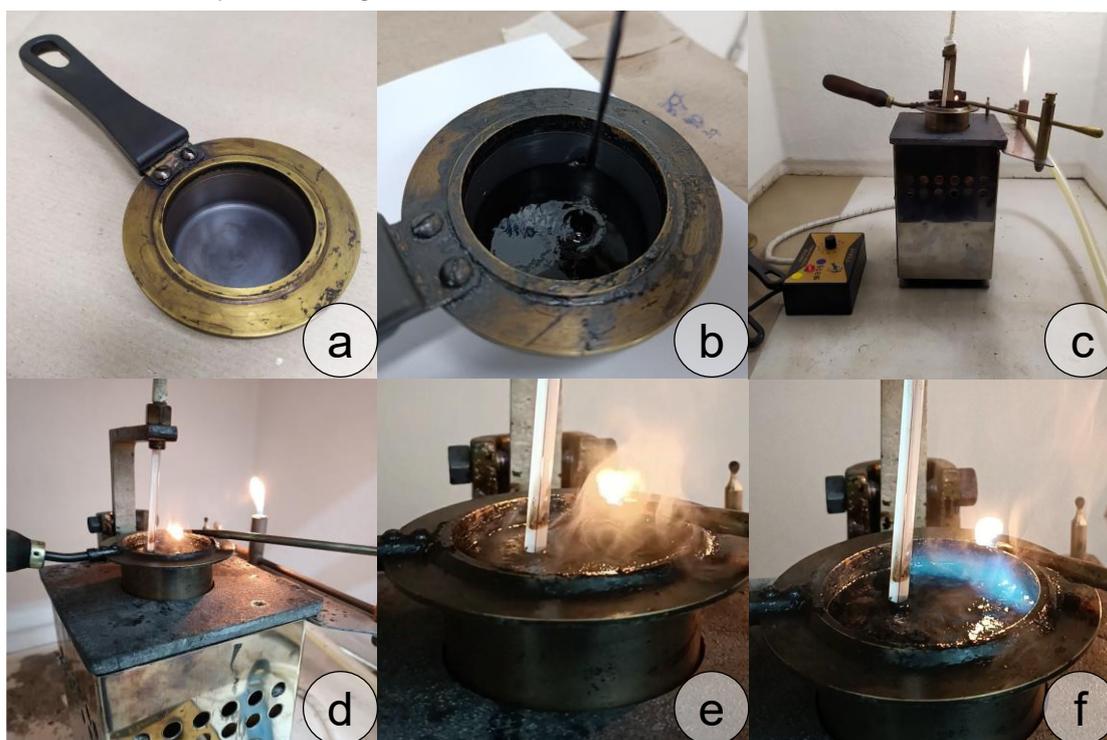
a) Aparelhagem; b) Preparação da amostra; c) Amostra resfriando em temperatura ambiente; d) Raspagem do excesso; e) Esferas posicionadas; f) Execução do ensaio; g) Início do escoamento; h) Final do ensaio; i) Esferas envolvidas por ligante no fundo do conjunto após a finalização do ensaio.

### 3.4.3 Ponto de fulgor

O ponto de fulgor é a menor temperatura na qual ocorre a inflamação dos gases emanados pelo asfalto ao entrar em contato com uma centelha durante aquecimento, e relaciona-se com a segurança no manuseio do asfalto durante o transporte, estocagem e

usinagem. O procedimento para determinação do ponto de fulgor é descrito na NBR 11341. O ligante é aquecido a uma taxa controlada e realiza-se a passagem de uma chama padronizada sobre a superfície da amostra até a identificação da ignição dos vapores provenientes do aquecimento (ASTM, 2018; ABNT, 2014).

Figura 16 – Ensaio de ponto de fulgor



a) Cuba de ensaio; b) Preparação da amostra; c) Execução do ensaio; d) Passagem da chama; e) Emissão de fumos; f) Identificação do ponto de fulgor e registro da temperatura correspondente.

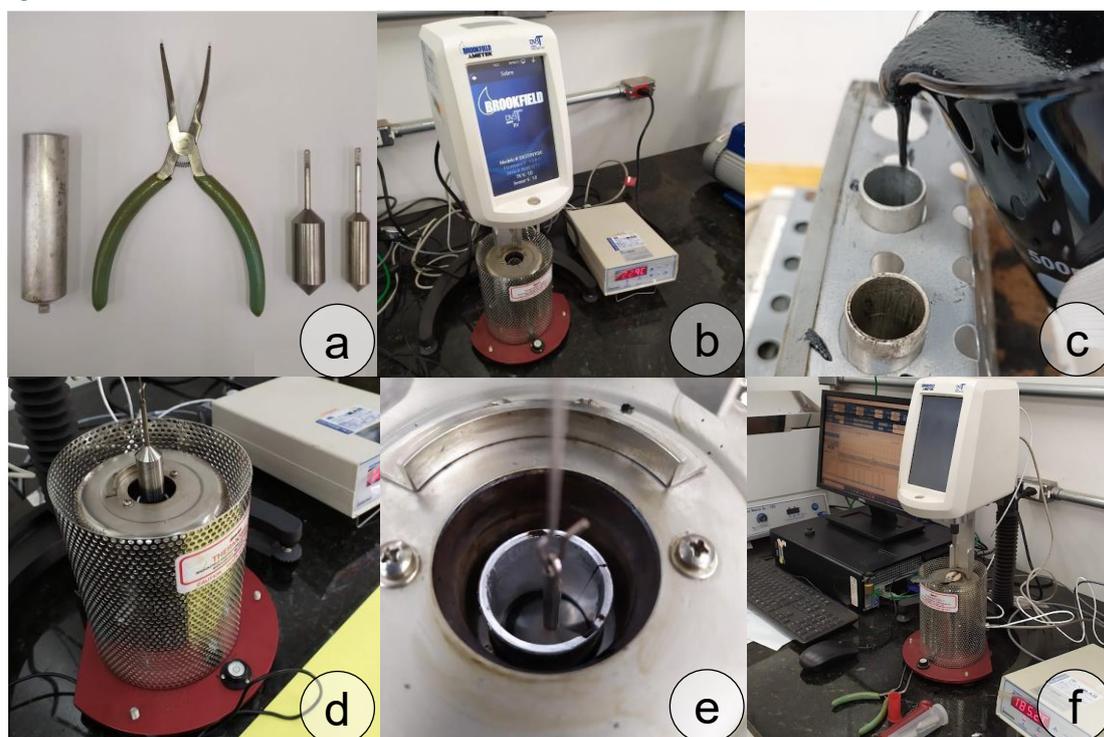
## 3.5 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

### 3.5.1 Viscosidade rotacional Brookfield

O ensaio no viscosímetro rotacional Brookfield (RV, Rotational Viscometer) tem por objetivo avaliar a viscosidade aparente do asfalto em temperaturas elevadas. O resultado do ensaio é utilizado para avaliar a trabalhabilidade do ligante asfáltico durante o bombeamento, mistura com os agregados e compactação da mistura asfáltica na via. O viscosímetro mede o torque requerido para manter constante a velocidade de rotação de uma haste (spindle) imersa em uma amostra de ligante asfáltico aquecido, em temperatura constante. O torque é convertido em viscosidade pela razão entre a tensão aplicada e a taxa de cisalhamento do fluido. O procedimento de ensaio para avaliar a viscosidade de ligantes asfálticos é descrito na ASTM D4402 e na AASHTO T316 (ASTM, 2015a; AASHTO,

2019b). O ligante convencional CAP 50/70 foi testado com a spindle no. 21 nas temperaturas de 135, 150 e 177 °C, de acordo com as especificações da norma DNIT 095. O asfalto-borracha foi avaliado com a spindle no. 27 nas temperaturas de 135, 145, 155, 165, 175 e 185 °C.

Figura 17 – Ensaio de viscosidade rotacional Brookfield



a) Cápsula e spindles; b) Viscosímetro Brookfield; c) Pesagem da amostra; d) Posicionamento da spindle dentro da cápsula; e) Spindle submersa na amostra de asfalto; f) Execução do ensaio.

### 3.5.2 Cisalhamento dinâmico (DSR)

O reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR, Dynamic Shear Rheometer) é utilizado para caracterizar o comportamento viscoelástico do ligante asfáltico, por meio da medição do módulo complexo ( $G^*$ ) e do ângulo de fase ( $\delta$ ). O módulo complexo é uma medida de rigidez e resistência total do ligante à deformação, quando submetido a pulsos cíclicos de cisalhamento. É obtido pela relação entre a tensão cisalhante e a deformação resultante. Quanto maior o módulo complexo, menor é a deformabilidade do asfalto. O ângulo de fase representa a relação entre a resposta elástica e resposta viscosa da deformação. É o produto da frequência de oscilação pelo tempo, sendo a defasagem entre a tensão aplicada e a deformação resultante. É usado como um indicador de elasticidade

do asfalto. Quanto menor o ângulo de fase, maior é a proporção da deformação recuperável (ROBERTS et al., 1996; BERNUCCI et al., 2008).

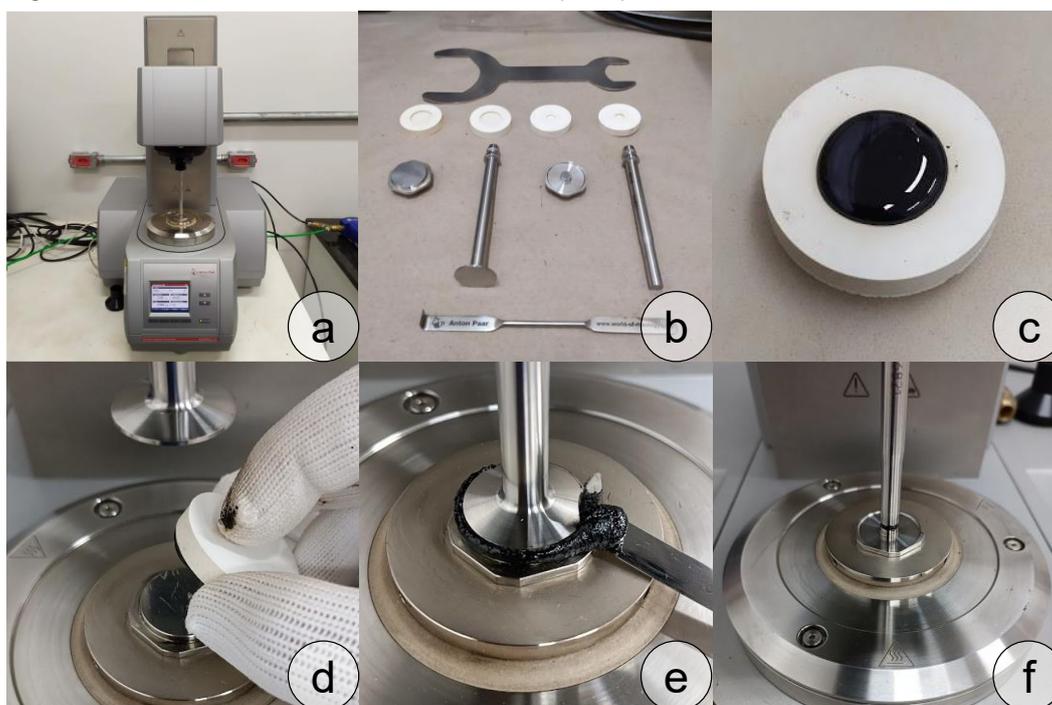
As normas AASTHO T315 e ASTM D7175O servem como referência para realização do ensaio. O asfalto é colocado entre duas placas paralelas, uma fixa e outra giratória. O equipamento realiza o ensaio automaticamente em uma ampla faixa de temperaturas (de 4 até 88 °C), aplicando tensões cíclicas de cisalhamento na frequência de 10 rad/s, a cada 10 minutos de estabilização das temperaturas. É possível avaliar a resistência do ligante às deformações permanentes em temperaturas elevadas, e o trincamento por fadiga em temperaturas intermediárias. Os resultados também são utilizados para determinar o grau de desempenho (PG, Performance Grade) do asfalto (ASTM, 2015b; AASHTO, 2020).

A deformação permanente ocorre devido ao acúmulo de deformações plásticas irreversíveis. Esse tipo de patologia acontece com maior frequência em pavimentos novos quando submetidos às elevadas temperaturas e ao tráfego de veículos pesados. Portanto, para avaliar a resistência do ligante à deformação permanente, o ensaio deve ser realizado em temperaturas elevadas com as amostras em seu estado não envelhecido (NE) e envelhecido no curto prazo (RTFOT), que são as condições de maior susceptibilidade do asfalto ao surgimento de afundamentos nas trilhas das rodas dos veículos. A relação entre o módulo complexo e o seno do ângulo de fase [ $G^*/\sin(\delta)$ ], é utilizado com um parâmetro de resistência à deformação permanente. Quanto maior for a rigidez do asfalto, maior será o valor do numerador ( $G^*$ ) na equação e, como consequência, maior será a resistência à deformação permanente. Da mesma forma, quanto maior a elasticidade, menor será o valor do denominador [ $\sin(\delta)$ ], resultando, também, em maior a resistência à deformação permanente. A especificação SUPERPAVE menciona que o valor mínimo do [ $G^*/\sin(\delta)$ ] deve ser 1,0 kPa para asfaltos virgens e 2,2 kPa para ligantes envelhecidos no curto prazo (AASHTO, 2021; ASTM, 2021). Para realização do ensaio são utilizadas placas metálicas paralelas de 25 mm de diâmetro, separadas por 1 mm entre si. A resistência à deformação permanente foi avaliada em temperaturas que variaram em intervalos crescentes de 6 °C, iniciando em 40 °C até a ocorrência de falha ( $[G^*/\sin(\delta)] < 1,0$  kPa para asfalto virgem ou  $[G^*/\sin(\delta)] < 2,2$  kPa para asfalto envelhecido no curto prazo), caso contrário, até a temperatura de 88 °C.

As trincas por fadiga surgem devido à repetição de carregamentos e geralmente ocorrem em temperaturas intermediárias e em pavimentos envelhecidos,

quando o ligante asfáltico possui elevada rigidez e baixa capacidade de dissipação das tensões em forma de deformação. Por esse motivo, a avaliação da resistência à fadiga deve ser realizada no ligante envelhecido no longo prazo (PAV), para simular as condições propícias ao surgimento de trincas por fadiga. O produto entre o módulo complexo e o seno do ângulo de fase é utilizado como um parâmetro de resistência ao trincamento por fadiga  $[G^* \times \text{sen}(\delta)]$ . Ligantes asfálticos com elevada rigidez ( $G^*$ ) são mais susceptíveis ao trincamento por terem reduzida capacidade de dissipação das tensões em forma de deformação. Por outro lado, ligantes com elevada elasticidade (menor ângulo de fase) são capazes de se deformar sem acumular tensões elevadas, recuperando seu estado original após a retirada do carregamento. Assim, quanto menores o módulo complexo e o ângulo de fase, menor será o valor do parâmetro  $[G^* \times \text{sen}(\delta)]$  e, como consequência, maior será a resistência do asfalto ao trincamento por fadiga. As especificações limitam o valor máximo do parâmetro de fadiga em 5000 kPa, ou 6000 kPa caso o ângulo de fase seja superior a  $42^\circ$  (AASHTO, 2021; ASTM, 2021). Para avaliação da fadiga utilizou-se placas metálicas paralelas de 8 mm de diâmetro, separadas por 2 mm entre si. As temperaturas variaram em intervalos decrescentes de  $3^\circ\text{C}$ , iniciando em  $28^\circ\text{C}$  até a falha ( $[G^* \times \text{sen}(\delta)] > 5000 \text{ kPa}$  ou  $[G^* \times \text{sen}(\delta)] > 6000 \text{ kPa}$  se  $\delta > 42^\circ$ ), caso contrário, até a temperatura de  $4^\circ\text{C}$ .

Figura 18 – Ensaio de cisalhamento dinâmico (DSR)



a) Reômetro de cisalhamento dinâmico; b) Aparelhagem; c) Amostra resfriando em temperatura ambiente; d) Posicionamento da amostra entre as placas de 25 mm; e) Raspagem do excesso de material; f) Ensaio com a placa de 8 mm de diâmetro.

### 3.5.3 Fluência em viga (BBR)

O ensaio de fluência em viga permite caracterizar o desempenho do asfalto em baixas temperaturas e determinar a sua resistência ao trincamento térmico, por meio da medição da rigidez estática ( $S$ ) e do módulo de relaxação (valor- $m$ ).

O procedimento de ensaio é descrito nas normas AASHTO T313 e ASTM D6648. Uma carga constante é aplicada no centro de uma vigota de ligante asfáltico simplesmente apoiada dentro de um banho à temperatura constante. O equipamento registra automaticamente a carga e a deflexão no centro da viga ao longo do ensaio. Os gráficos de carga versus tempo, e deflexão versus tempo, são utilizados para determinar a rigidez e o módulo de relaxação. A rigidez estática representa a resistência à deformação devido a um carregamento constante (rigidez à fluência) e o módulo de relaxação é a taxa de variação da rigidez ao longo do tempo (inclinação da curva de rigidez) (ASTM, 2016b; AASHTO, 2019a).

O trincamento térmico ocorre devido à retração do pavimento ocasionada por quedas bruscas de temperatura em clima frio, que acabam induzindo tensões internas de tração. Se a contração do pavimento ocorrer a uma taxa maior que a sua capacidade de relaxação, trincas e fissuras acabam surgindo para aliviar as tensões. Portanto, a resistência do asfalto ao trincamento por contração térmica depende da rigidez à fluência e da sua capacidade de relaxação. Assim como no caso da fadiga, pavimentos envelhecidos são mais susceptíveis a esse tipo de problema, por serem mais rígidos e quebradiços. Por esse motivo, o ensaio de fluência em viga deve ser realizado com as amostras envelhecidas no longo prazo (PAV).

Neste estudo, as amostras foram avaliadas em intervalos de temperatura de 6 °C, desde zero até -36 °C. No entanto, para temperaturas de ensaio mais próximas de zero, as amostras com maior quantidade de OLUC acabaram sendo muito flexíveis, razão pela qual nesses casos, os ensaios foram automaticamente interrompidos pelo equipamento, devido a deflexão excessiva das vigotas. Assim, para essas amostras os ensaios foram concluídos apenas nas temperaturas mais afastadas de 0 °C.

A especificação Superpave recomenda que o valor máximo da rigidez ( $S$ ), aos 60 segundos, seja inferior a 300 MPa. Da mesma forma, para garantir a dissipação das tensões, o módulo de relaxação (valor- $m$ ) aos 60 segundos deve ser superior a 0,300 (AASHTO, 2021; ASTM, 2021).

Figura 19 – Ensaio de fluência em viga (BBR)



a) Reômetro de fluência em viga; b) Componentes dos moldes metálicos; c) Moldes das vigas montados; d) Preenchimento do molde com asfalto; e) Resfriamento em temperatura ambiente; f) Raspagem do excesso para posterior imersão em banho resfriado; g) Viga de ligante após desmolde; h) Calibração do equipamento; i) Execução do ensaio.

### 3.6 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA DURABILIDADE

#### 3.6.1 Envelhecimento de curto prazo (RTFOT)

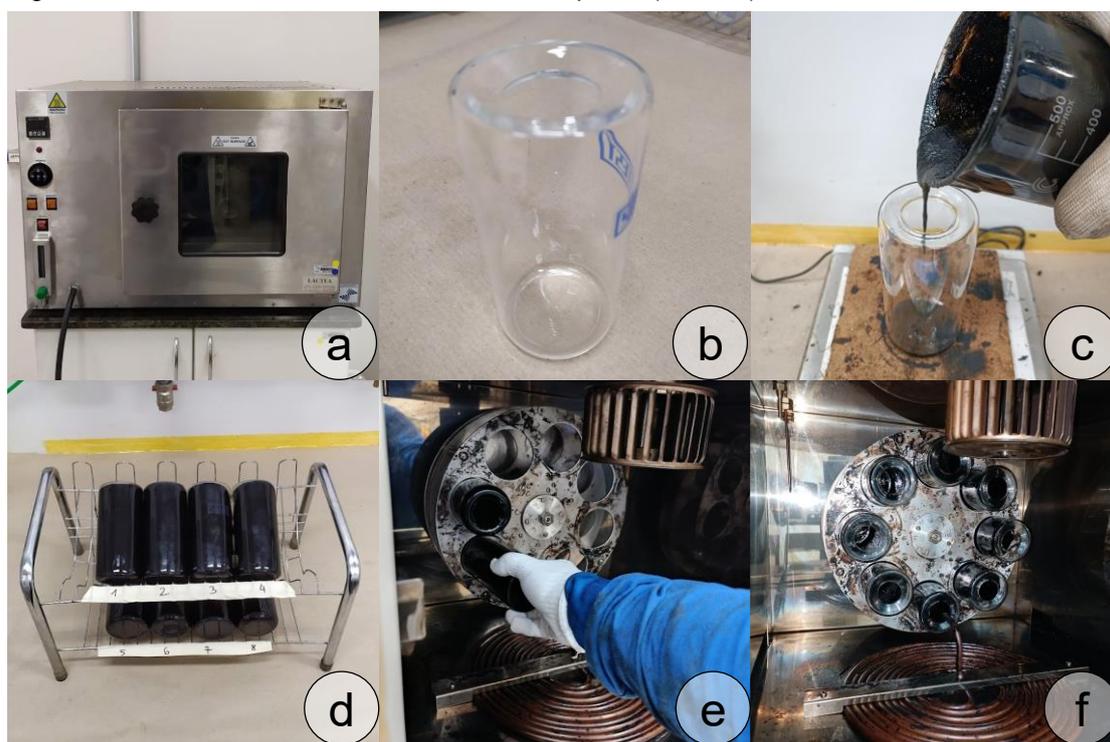
O ensaio de envelhecimento de curto prazo é realizado na estufa de filme rotativo (RTFOT, Rolling Thin-Film Oven Test) e é usado para avaliar os efeitos combinados do calor e do ar em uma fina película de ligante que fica em constante movimento. Os efeitos do envelhecimento são determinados a partir de medições das propriedades físicas e reológicas do ligante asfáltico antes e depois do ensaio. O ensaio simula o envelhecimento que o ligante sofre durante os processos de fabricação, transporte,

espalhamento e compactação da mistura asfáltica na via. É usado também para determinar a variação de massa do material durante o processo, que é uma medida de volatilidade do ligante asfáltico e das mudanças de massa resultantes da oxidação.

As normas de referência são a AASHTO T240 e a ASTM D2872. Durante o ensaio, o ligante asfáltico é aquecido e continuamente rotacionado dentro de uma estufa na temperatura de 163 °C, por 85 minutos, com um suprimento constante de ar de 4000 ml/min. São utilizados oito recipientes de vidro, com 35 g de ligante cada um, durante a realização do ensaio (ASTM, 2019a; AASHTO, 2017b).

O ligante pode perder material devido à evaporação das frações mais leves ou pode ganhar peso devido à reação com o oxigênio atmosférico. Ligantes altamente modificados com polímeros podem apresentar problemas de vazamento de material durante o ensaio, onde o asfalto modificado acaba saindo dos frascos de vidro devido a rotação constante (SOUTHERN, 2015).

Figura 20 – Ensaio de envelhecimento de curto prazo (RTFOT)



a) Estufa RTFOT; b) Frasco de ensaio; c) Pesagem da amostra; d) Resfriamento em temperatura ambiente; e) Posicionamento dos frascos no equipamento; f) execução do ensaio.

### 3.6.2 Envelhecimento de longo prazo (PAV)

O vaso aberto sob pressão (PAV, Pressure Aging Vessel) é um equipamento utilizado para promover o envelhecimento acelerado do ligante asfáltico, por meio de ar pressurizado e temperatura elevada. Tem como objetivo, simular o envelhecimento oxidativo de longo prazo do asfalto durante sua vida em serviço (aproximadamente 5 a 10 anos).

Figura 21 – Ensaio de envelhecimento de longo prazo (PAV)



a) Equipamento PAV; b) Bandeja de ensaio; c) Posicionamento da estante com as bandejas no equipamento; d) Execução do ensaio; e) Estado do ligante após envelhecimento; f) Transferência para outro recipiente; g) Amostras prontas para remoção das bolhas de ar; h) Aplicação de vácuo.

O método de ensaio pode ser encontrado nas normas ASTM D6521 e AASHTO R28. Primeiro, o ligante deve ser envelhecido no curto prazo (RTFOT), para

simular os efeitos da produção da mistura asfáltica. Depois, esse ligante é submetido ao envelhecimento de longo prazo no PAV, por 20 h em um recipiente com ar pressurizado a 2,10 MPa. A temperatura de ensaio deve ser selecionada de acordo com o grau de desempenho do ligante asfáltico. Para este trabalho optou-se por submeter todas as amostras à mesma temperatura de 100 °C (ASTM, 2019b; AASHTO, 2016). Após o envelhecimento no PAV, as amostras são submetidas à avaliação da resistência ao trincamento por fadiga no DSR e trincamento térmico no BBR.

### 3.6.3 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TGA, Thermogravimetric Analysis) é uma técnica termoanalítica que avalia a decomposição e/ou reação térmica do material por meio da medição da variação de massa em função da elevação da temperatura. Uma pequena quantidade de material é inserida em um recipiente inerte e aquecida a uma taxa controlada. A massa da amostra é continuamente registrada em função do tempo e da temperatura, possibilitando a identificação das temperaturas que ocorrem os eventos térmicos. A termogravimetria derivada (DTG, Derivative Thermogravimetry) representa a taxa de variação da massa em função do tempo ou da temperatura. A DTG complementa a TGA, permitindo determinar a quantidade e velocidade dos eventos térmicos que ocorrem durante o ensaio (ASTM, 2021).

Os ensaios foram realizados com um analisador termogravimétrico PerkinElmer STA 800. Os parâmetros de ensaio e as amostras que foram avaliadas são apresentados na Tabela 6.

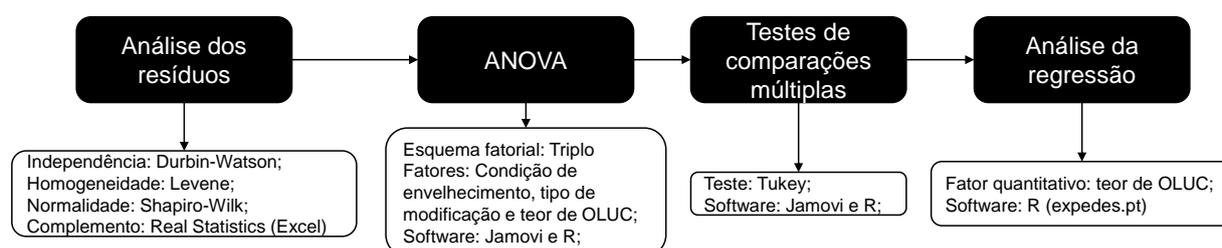
Tabela 6 – Parâmetros do ensaio de termogravimetria

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Faixa de temperatura	35-700 °C
Taxa de aquecimento	20 °C/min
Atmosfera	Nitrogênio
Fluxo	20 ml/min
Peso inicial das amostras	Aproximadamente 15g
Amostras	OLUC
	Borracha
	NECAP5070
	NE22B
	NE22B10OLUCMD NE22B10OLUCTB100

### 3.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA), a fim de determinar-se a existência de diferenças estatísticas significativas entre as variáveis consideradas no estudo. Além dos teores de OLUC e dos tipos de modificação, considerou-se também como um fator de interesse o envelhecimento do ligante asfáltico. A Figura 22 mostra um fluxograma com as etapas da análise.

Figura 22 – Fluxograma das análises estatísticas



Os resíduos foram analisados segundo sua independência, homogeneidade de variâncias e normalidade, de acordo com os testes de Durbin-Watson, Levene e Shapiro-Wilk, respectivamente. Os testes estatísticos foram realizados com os programas computacionais Jamovi e R (pacote estatístico expedes.pt) e com o complemento para Excel Real Statistics, considerando um nível de significância de 5%.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios laboratoriais realizados e as conclusões das análises estatísticas efetuadas, considerando em todos os casos, 5% de significância. Os resultados das Análises de Variância (ANOVA) foram precedidas pelos testes para verificação da normalidade dos resíduos, homoscedasticidade das variâncias e independência dos resíduos. O Apêndice A apresenta em detalhes os resultados com todos os procedimentos realizados para avaliação estatística.

### 4.1 VISCOSIDADE ROTACIONAL BROOKFIELD

O ensaio de viscosidade rotacional Brookfield tem por objetivo fornecer informações sobre a trabalhabilidade do ligante asfáltico em temperaturas elevadas para produção, bombeamento e compactação da mistura asfáltica em campo.

#### 4.1.1 Asfalto-borracha

Os testes foram realizados com o objetivo de produzir um asfalto-borracha com elevada viscosidade. A fim de se definir qual seria essa viscosidade elevada, levou-se em consideração os limites estabelecidos pela norma DNIT 111 (Tabela 7).

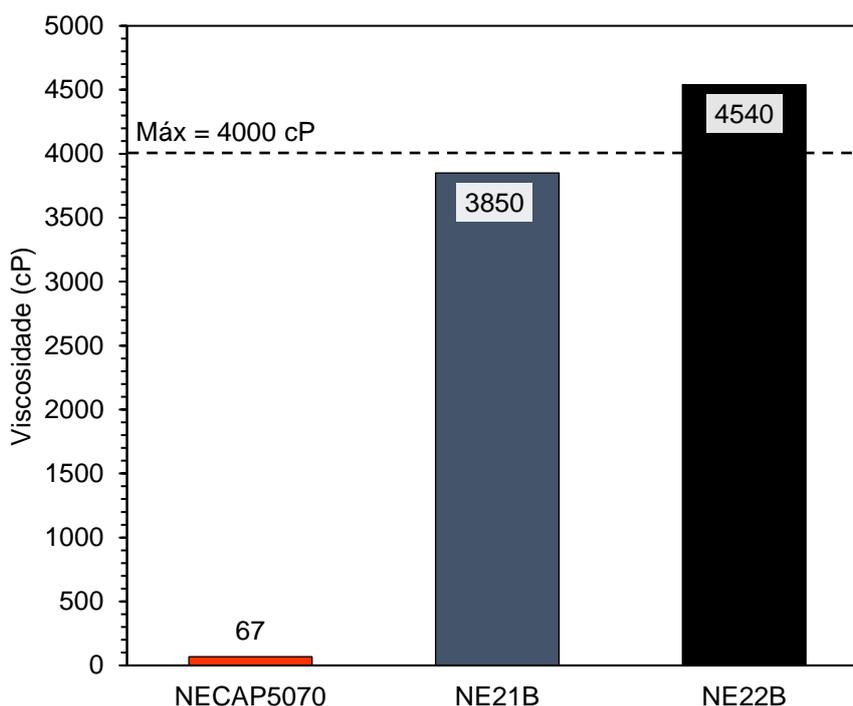
Tabela 7 – Viscosidade rotacional média e limites da norma DNIT 111 (175 °C)

Amostra	Viscosidade rotacional (cP)	Limites (cP)	
		AB8	AB22
NE21B	3850		
NE22B	4540	800-2000	2200-4000
CAP 50/70	67		

*NE21B: CAP 50/70 modificado com 21% de borracha; NE22B: CAP 50/70 modificado com 22% de borracha; AB8 e AB22: tipos de asfalto-borracha.*

Os resultados apresentados na Tabela 7 representam os valores médios de três amostras ensaiadas. A Figura 23 apresenta esses resultados de forma gráfica. A viscosidade rotacional do CAP 50/70, na temperatura de 175 °C, foi de 67 cP. Após a modificação com 21% de borracha (considerando a massa do CAP como referência), a viscosidade rotacional atingiu o valor de 3850 cP. Com 22% de borracha, a viscosidade rotacional chegou a 4540 cP, superando os limites máximos de viscosidade na norma DNIT111, para os dois tipos de asfalto-borracha especificados (AB8 e AB22).

Figura 23 – Viscosidade rotacional Brookfield (175 °C)

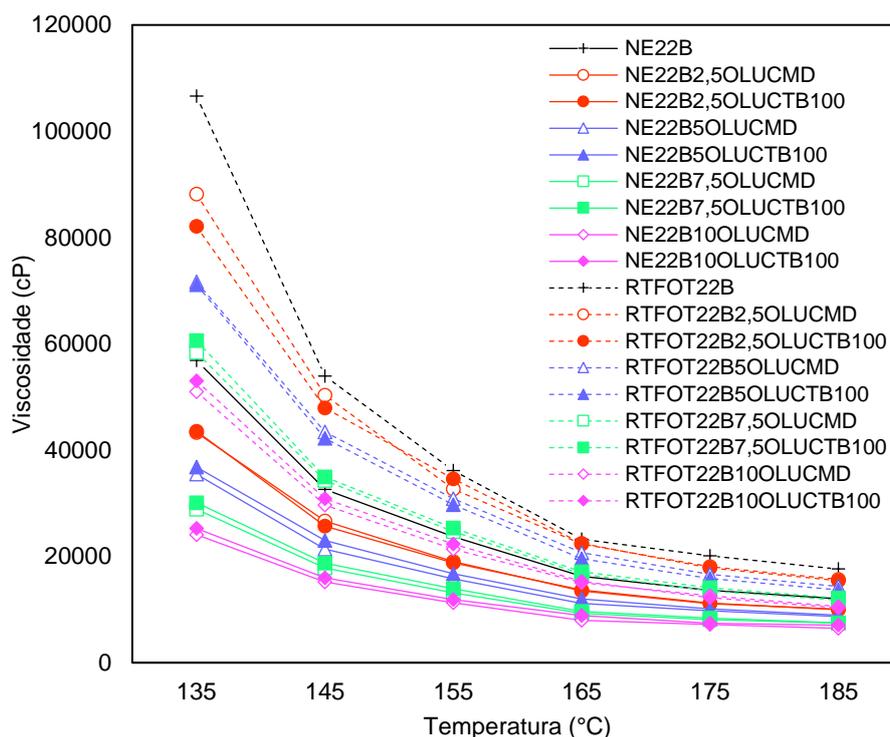


Comparando o CAP 50/70 com aqueles modificados com borracha, se observou diferença estatística significativa entre as viscosidades rotacionais (valor- $p < 0,05$ , Tabela A - 128). As análises Post Hoc mostraram diferença significativa entre todas as combinações avaliadas (valores- $p_{\text{tukey}} < 0,05$ , Tabela A - 129). Pelo exposto, o teor de 22% foi definido como a quantidade percentual de borracha a ser utilizada nesta pesquisa.

#### 4.1.2 Asfalto-borracha-OLUC

O óleo lubrificante usado ou contaminado (OLUC) foi avaliado como agente redutor da viscosidade excessiva do ligante asfalto-borracha. Foram utilizados quatro teores (2,5; 5,0; 7,5 e 10%) e duas formas diferentes de incorporação (MD: modificação direta; TB100: modificação com tratamento da borracha). A viscosidade rotacional média foi calculada a partir dos resultados de três repetições de cada uma das amostras nas temperaturas de 135, 145, 155, 165, 175 e 185 °C. As curvas de viscosidade rotacional para as amostras não envelhecidas (NE) e envelhecidas no curto prazo (RTFOT), em função da temperatura de ensaio, são mostradas na Figura 24.

Figura 24 – Viscosidade rotacional em função da temperatura



Como esperado, todas as amostras seguiram o mesmo padrão de comportamento, com redução da viscosidade rotacional em função do aumento da temperatura de ensaio.

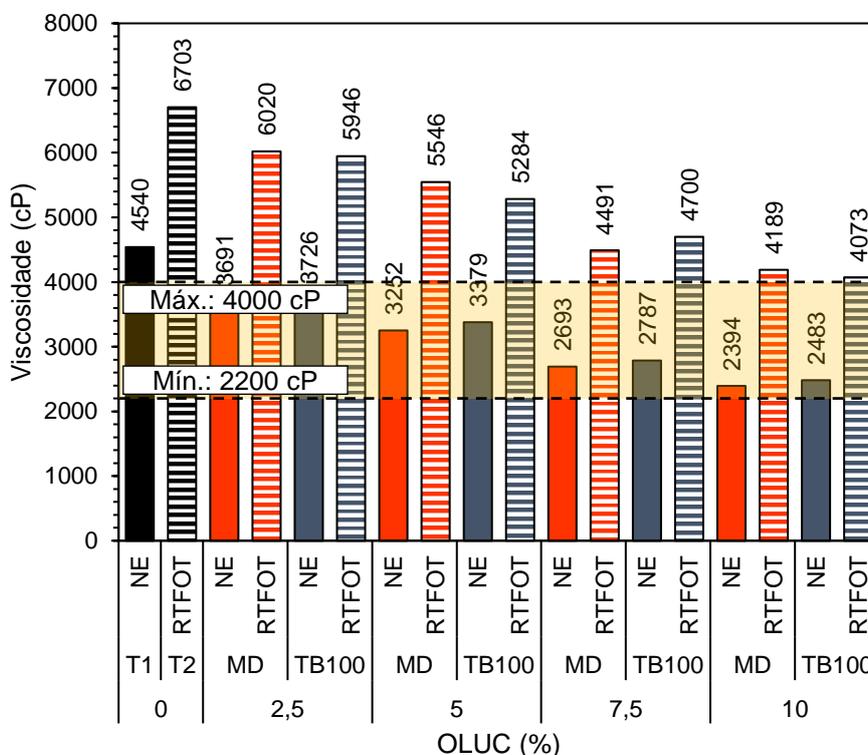
A Tabela 8 mostra os resultados de viscosidade rotacional média das amostras na temperatura de 175 °C. A tabela também fornece informações a respeito da variação da viscosidade para cada teor de OLUC em relação à amostra testemunha de asfalto-borracha na mesma condição de envelhecimento, e a variação da viscosidade após o envelhecimento para cada teor de OLUC e tipo de modificação. Se observa que a redução percentual da viscosidade com o acréscimo de OLUC foi maior para as amostras não envelhecidas (NE), chegando a 47% de redução para o asfalto-borracha-OLUC modificado com 10% de óleo de motor pela modificação direta (MD). Por outro lado, o óleo de motor é menos eficiente em reduzir a viscosidade nas amostras envelhecidas (RTFOT) devido a perda de compostos leves por evaporação durante o processo de envelhecimento. Como consequência, a variação da viscosidade após envelhecimento em relação à amostra não envelhecida ( $\Delta\%_{NE}$ ) aumenta para maiores quantidades de OLUC, principalmente nas amostras da modificação direta, indicando redução da durabilidade. Com relação às especificações, todas as amostras não envelhecidas (NE) apresentaram viscosidades médias dentro do intervalo [2200, 4000] cP.

Tabela 8 – Viscosidade rotacional média (cP, 175 °C)

OLUC (%)	NE				RTFOT					
	MD	$\Delta\%_{T1}$	TB100	$\Delta\%_{T1}$	MD	$\Delta\%_{T2}$	$\Delta\%_{NE}$	TB100	$\Delta\%_{T2}$	$\Delta\%_{NE}$
2,5	3691	19%	3726	18%	6020	10%	63%	5946	11%	60%
5,0	3252	28%	3379	26%	5546	17%	71%	5284	21%	56%
7,5	2693	41%	2787	39%	4491	33%	67%	4700	30%	69%
10,0	2394	47%	2483	45%	4189	38%	75%	4073	39%	64%
<b>Testemunha</b>	4540				6703					

Testemunha: asfalto-borracha sem adição de OLU (NE e RTFOT); NE: amostras não envelhecidas; RTFOT: amostras envelhecidas no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: tratamento da borracha (100 °C, 1 h);  $\Delta\%_{T1}$ : Variação percentual em relação à testemunha 1 (NE);  $\Delta\%_{T2}$ : Variação percentual em relação à testemunha 2 (RTFOT);  $\Delta\%_{NE}$ : Variação percentual após envelhecimento.

Figura 25 – Viscosidade rotacional dos ligantes modificados (175 °C)



A ANOVA realizada para a viscosidade rotacional mostrou que o teor de OLU e a condição de envelhecimento alteraram de forma significativa a viscosidade média do asfalto-borracha (valores-p<0,05, Tabela A - 5), enquanto o tipo de modificação do ligante não se mostrou significativo (valor-p=0,721, Tabela A - 5). Verificou-se também a existência de interação significativa entre os fatores teor de OLU × condição de envelhecimento e tipo de modificação × condição de envelhecimento (valores-p<0,05, Tabela A - 5). Do ponto de vista prático, a interação indica que o efeito de um fator é influenciado por outro fator. Ou seja, nos casos avaliados o efeito da adição de OLU é

diferente para cada condição de envelhecimento, assim como o tipo de modificação também tem seu efeito alterado pela condição de envelhecimento.

As análises Post Hoc efetuadas para avaliar as interações entre os fatores mostraram existência de diferença significativa nos valores de viscosidade considerando todos os teores de OLUC estudados frente às duas condições de envelhecimento. Portanto, aumentar a quantidade de OLUC reduz a viscosidade do asfalto-borracha. Verificou-se também que o envelhecimento produz diferença estatística significativa nos valores de viscosidade para todos os teores avaliados, aumentando a viscosidade das amostras. (valores- $p_{tukey} < 0,05$ , Tabela A - 7; Figura A - 6 e Figura A - 7). No entanto, apesar da interação, o tipo de modificação não produziu efeito significativo em nenhuma condição de envelhecimento (valores- $p_{tukey} > 0,05$ , Tabela A - 6; Figura A - 4 e Figura A - 5). Para as amostras não envelhecidas a redução da viscosidade se correlacionou com a elevação da quantidade de OLUC por meio de um modelo de regressão linear (Tabela A - 8 e Tabela A - 9).

#### 4.2 PENETRAÇÃO (25 °C)

O ensaio de penetração tem por objetivo avaliar a consistência do ligante asfáltico e classificá-lo de acordo com a sua dureza. A profundidade de penetração é inversamente proporcional à rigidez do asfalto e pode ser usada como uma indicação da resistência à fadiga em temperaturas intermediárias.

O gráfico com as curvas de penetração em função da quantidade percentual de OLUC é apresentado na Figura 26. A Tabela 9 mostra um resumo com os valores médios de penetração e a variação percentual causada pela adição de OLUC e pelo envelhecimento. Todos os teores avaliados aumentaram a penetração média do asfalto-borracha antes e após o envelhecimento para os dois tipos de modificação, resultando em um amolecimento do asfalto-borracha e como consequência melhor desempenho quanto à fadiga. O envelhecimento diminuiu a penetração das amostras, tornando o ligante mais rígido, e a magnitude dessa variação aumentou para maiores quantidades de OLUC.

Figura 26 – Penetração a 25 °C em função do teor de OLC

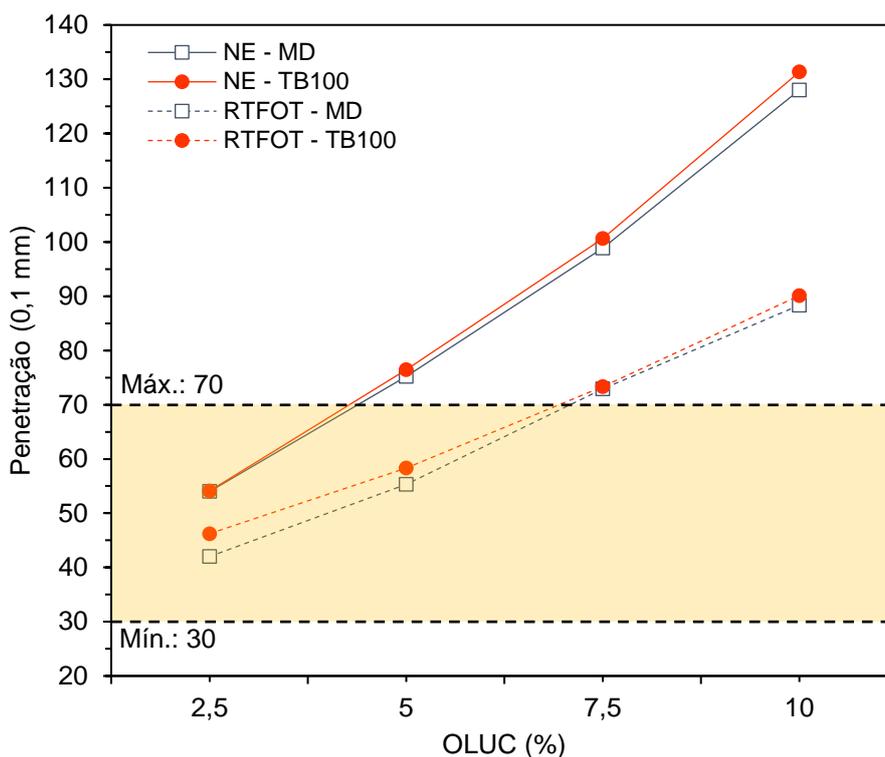


Tabela 9 – Penetração média a 25 °C (0,1 mm)

OLUC (%)	NE				RTFOT					
	MD	$\Delta\%_{T1}$	TB100	$\Delta\%_{T1}$	MD	$\Delta\%_{T2}$	$\Delta\%_{NE}$	TB100	$\Delta\%_{T2}$	$\Delta\%_{NE}$
2,5	54	37%	54	37%	42	26%	22%	46	39%	15%
5,0	75	91%	76	94%	55	67%	26%	58	76%	24%
7,5	99	151%	101	155%	73	119%	26%	73	121%	27%
10,0	128	225%	131	233%	88	166%	31%	90	171%	31%
<b>Testemunha</b>	39				33					

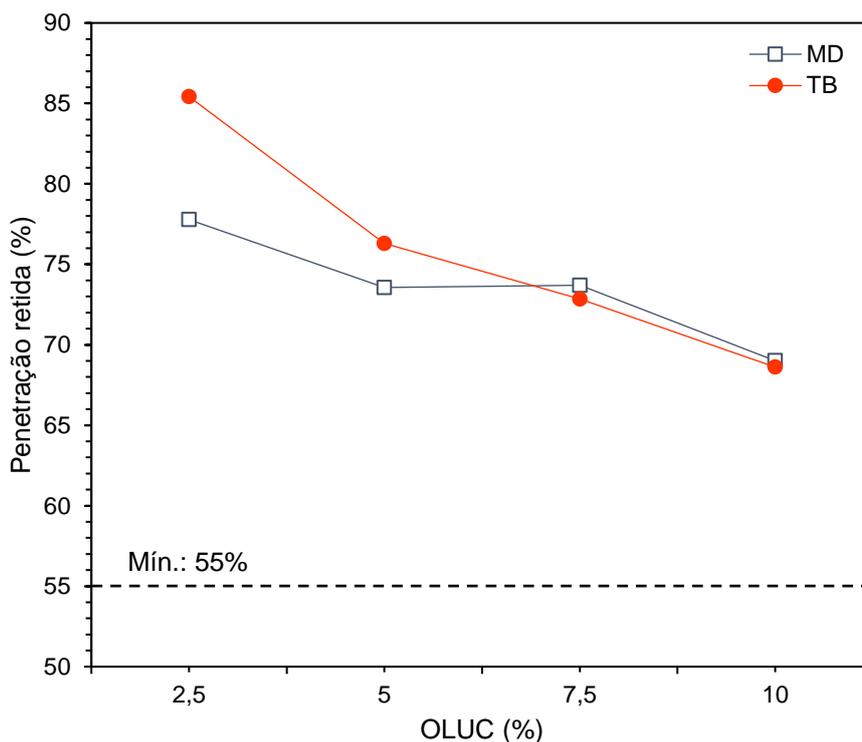
*Testemunha: asfalto-borracha sem adição de OLC (NE e RTFOT); NE: amostras não envelhecidas; RTFOT: amostras envelhecidas no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: tratamento da borracha (100 °C, 1 h);  $\Delta\%_{T1}$ : Variação percentual em relação à testemunha 1 (NE);  $\Delta\%_{T2}$ : Variação percentual em relação à testemunha 2 (RTFOT);  $\Delta\%_{NE}$ : Variação percentual após envelhecimento.*

Comparando os resultados ilustrados na Tabela 9 com os limites estabelecidos na norma DNIT 111, verifica-se que antes do envelhecimento apenas as amostras modificadas com 2,5% de OLC atenderam os requisitos, ficando dentro do intervalo de penetração [30, 70] 0,1 mm. Portanto, quantidades elevadas de OLC amolecem o ligante asfalto-borracha de forma excessiva.

A partir dos resultados obtidos no ensaio de penetração, também se avaliou a penetração retida após o envelhecimento RTFOT. Segundo a norma DNIT 111 a porcentagem de penetração original mínima, após o envelhecimento, deve ser superior a 55% para os dois tipos de asfalto-borracha (AB8 e AB22). Valores muito abaixo do definido

indicariam ganho de rigidez excessivo devido ao envelhecimento. A Figura 27 apresenta a variação da penetração retida em função do teor de OLUC. Os valores encontrados para todos os teores avaliados são maiores que o mínimo estabelecido pela norma, no entanto, a redução gradual da penetração retida indica que o OLUC compromete a durabilidade do asfalto-borracha.

Figura 27 – Penetração retida após envelhecimento



A ANOVA para os valores de penetração identificou diferença estatística significativa quando variou o teor de OLUC, o tipo de modificação e a condição de envelhecimento, com interação entre os fatores teor de OLUC × condição de envelhecimento (valores- $p < 0,05$ ; Tabela A - 14).

As análises Post Hoc para o tipo de modificação indicaram que o tratamento da borracha aumenta a penetração em comparação com a modificação direta (valor- $p_{\text{tukey}} < 0,05$ , Tabela A - 15; Figura A - 11). Esse resultado indica que o tratamento da borracha é mais eficiente para reduzir a rigidez das amostras de asfalto-borracha-OLUC.

Do ponto de vista das interações, os testes Post Hoc mostraram que todos os teores de OLUC avaliados produziram valores de penetração estatisticamente diferentes, tanto antes como após o envelhecimento, e aumentar o teor de óleo resulta em maior penetração. O envelhecimento também foi significativo nos resultados de penetração

para todos os teores avaliados, reduzindo a penetração das amostras (valores- $p_{tukey} < 0,05$ , Tabela A - 16; Figura A - 12 e Figura A - 13). A elevação da penetração com incorporação de maiores quantidades de OLUC foi explicada por um modelo de regressão quadrático para as duas condições de envelhecimento (NE: Tabela A - 17 e Tabela A - 18; RTFOT: Tabela A - 19 e Tabela A - 20).

### 4.3 PONTO DE AMOLECIMENTO

O ensaio de ponto de amolecimento fornece a temperatura na qual o ligante passa de um estado viscoelástico para um estado de escoamento viscoso. É uma medida empírica do ponto de fusão do asfalto, que não é bem definido. Pode ser usado como um indicativo da resistência à deformação em temperaturas mais altas. Os resultados do ponto de amolecimento, assim como a variação desse parâmetro com a adição de OLUC e com o envelhecimento, são resumidos na Tabela 10 e na Figura 28. O aumento na quantidade de OLUC adicionado resultou na redução gradual do ponto de amolecimento, portanto o OLUC amoleceu o asfalto-borracha e reduziu sua resistência à deformação permanente em temperaturas mais altas.

Figura 28 – Ponto de amolecimento em função do teor de OLUC

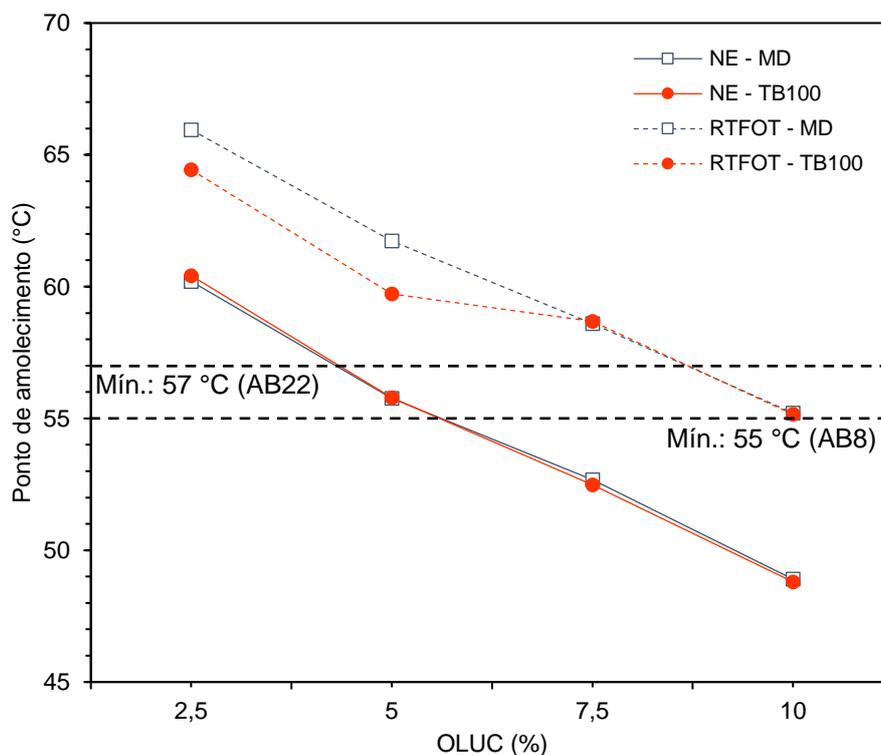


Tabela 10 – Ponto de amolecimento médio (°C)

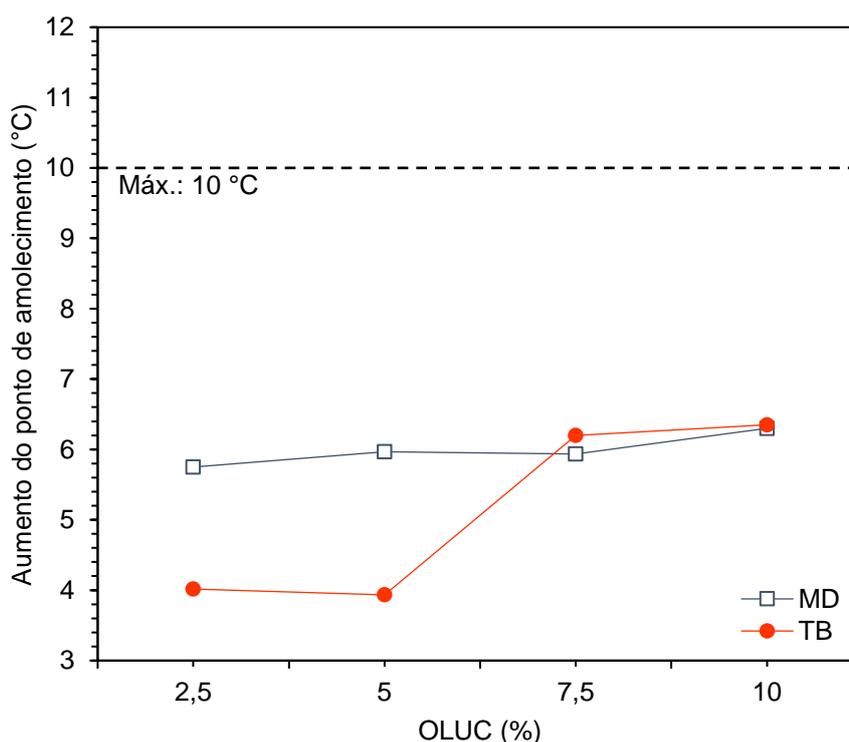
OLUC (%)	NE				RTFOT					
	MD	$\Delta_{T1}$	TB100	$\Delta\%_{T1}$	MD	$\Delta\%_{T2}$	$\Delta\%_{NE}$	TB100	$\Delta\%_{T2}$	$\Delta\%_{NE}$
2,5	60,2	6%	60,4	6%	66,0	7%	10%	64,4	9%	7%
5,0	55,8	13%	55,8	13%	61,7	13%	11%	59,7	15%	7%
7,5	52,7	18%	52,5	18%	58,6	17%	11%	58,7	17%	12%
10,0	48,9	24%	48,8	24%	55,2	22%	13%	55,2	22%	13%
<b>Testemunha</b>	64,0				70,6					

*Testemunha: asfalto-borracha sem adição de OLUC (NE e RTFOT); NE: amostras não envelhecidas; RTFOT: amostras envelhecidas no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: tratamento da borracha (100 °C, 1 h);  $\Delta\%_{T1}$ : Variação percentual em relação à testemunha 1 (NE);  $\Delta\%_{T2}$ : Variação percentual em relação à testemunha 2 (RTFOT);  $\Delta\%_{NE}$ : Variação percentual após envelhecimento.*

A norma DNIT 111 determina que o valor mínimo para o ponto de amolecimento do asfalto-borracha do tipo AB8 seja de 55 °C e para o asfalto-borracha do tipo AB22 seja de 57 °C. Apenas as amostras modificadas com 2,5 e 5,0% de OLUC apresentaram ponto de amolecimento superior ao especificado.

Essa norma também recomenda que o aumento do ponto de amolecimento após o envelhecimento seja inferior a 10 °C. A variação do ponto de amolecimento devido ao envelhecimento, em função do teor de OLUC, é mostrado na Figura 29. Todas as amostras avaliadas atenderam esse requisito.

Figura 29 – Aumento do ponto de amolecimento em função do teor de OLUC



A ANOVA desenvolvida para o ponto de amolecimento mostrou diferença estatística significativa na temperatura de amolecimento apenas para o fator teor de OLUC e para o fator condição de envelhecimento (valores- $p < 0,05$ , Tabela A - 25). As análises Post Hoc mostraram que as temperaturas de amolecimento são estatisticamente diferentes para todos os teores de OLUC avaliados (valores- $p_{\text{tukey}} < 0,05$ , Tabela A - 27), no qual o ponto de amolecimento diminui para maiores quantidades de OLUC (Figura A - 18). O envelhecimento também produziu efeito significativo (valor- $p_{\text{tukey}} < 0,05$ , Tabela A - 26) e aumentou o ponto de amolecimento das amostras (Figura A - 17).

#### 4.4 PONTO DE FULGOR

O ensaio de ponto de fulgor busca identificar a menor temperatura na qual ocorre a inflamação dos gases emanados por um ligante asfáltico ao entrar em contato com uma centelha durante aquecimento. Os resultados obtidos neste estudo estão resumidos na Tabela 11. A norma DNIT 111 determina que a temperatura mínima do ponto de fulgor não pode ser inferior a 235 °C. Apenas as amostras com 2,5% de OLUC (MD e TB100) e com 5% (TB100) atenderam a especificação. Assim, a adição de OLUC deve ser restrita aos teores e condições mencionadas.

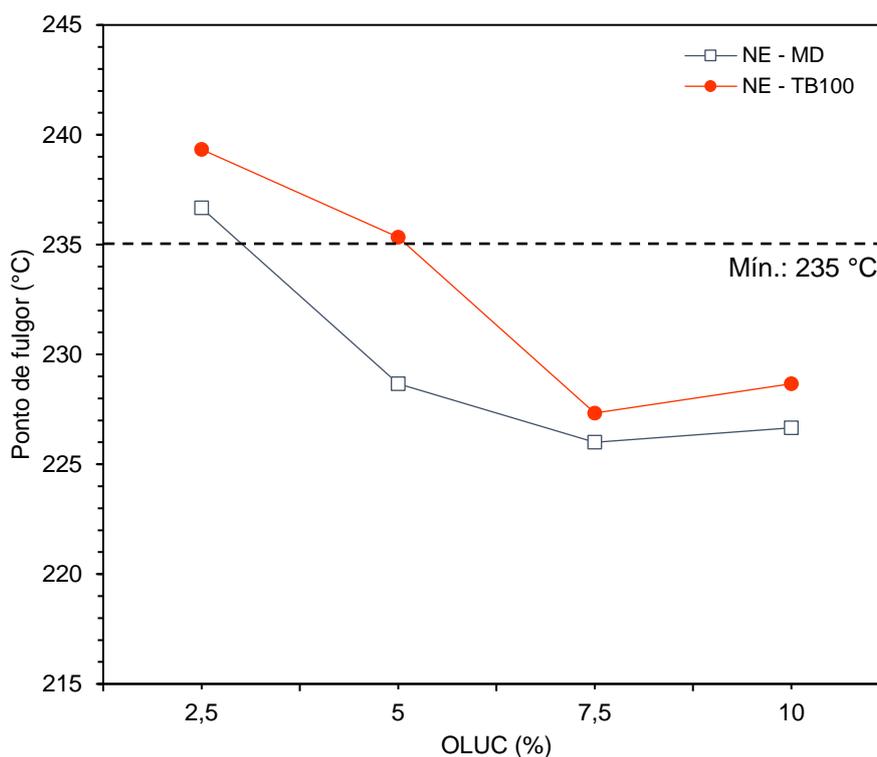
Tabela 11 – Ponto de fulgor médio (°C)

<b>OLUC (%)</b>	<b>MD</b>	<b><math>\Delta\%_{T1}</math></b>	<b>TB100</b>	<b><math>\Delta\%_{T1}</math></b>
<b>2,5</b>	237	5%	239	3%
<b>5,0</b>	229	8%	235	5%
<b>7,5</b>	226	9%	227	8%
<b>10,0</b>	227	9%	229	8%
<b>Testemunha</b>	248			

*Testemunha: asfalto-borracha sem adição de OLUC; MD: modificação direta; TB100: tratamento da borracha (100 °C, 1 h);  $\Delta\%_{T1}$ : Variação percentual em relação à testemunha 1.*

A Figura 30 mostra o ponto de fulgor em função do teor de OLUC. Nela se observa que o ponto de fulgor é menor nas amostras submetidas a modificação direta (MD), e o ponto de fulgor reduz com o incremento da quantidade de OLUC.

Figura 30 – Ponto de fulgor em função do teor de OLUC

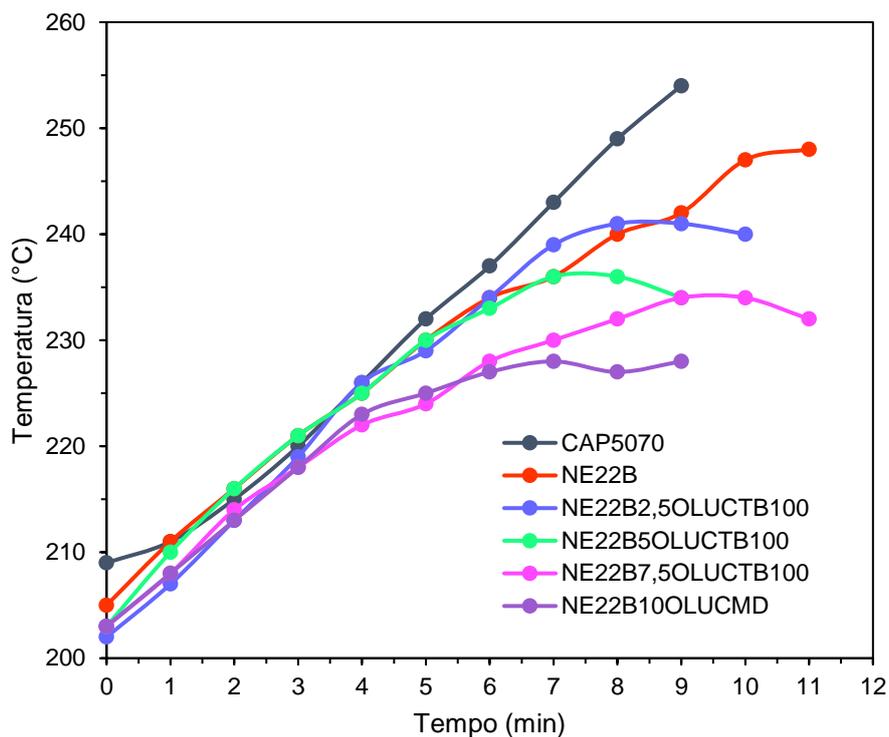


A ANOVA para as temperaturas de fulgor mostrou diferença estatística entre esses valores quando se considerou o teor de OLUC (valor- $p < 0,05$ , Tabela A - 32). Os testes Post Hoc encontraram diferença significativa entre as doses de 2,5 e 7,5% de OLUC. Foi possível estabelecer uma correlação entre a temperatura de fulgor e o percentual de OLUC por um modelo de regressão linear, no qual o ponto de fulgor diminui com o incremento da quantidade de óleo (Tabela A - 34 e Tabela A - 35).

Durante a execução dos ensaios foi observado um comportamento peculiar das amostras modificadas com OLUC, principalmente aquelas modificadas com borracha tratada. A temperatura de ensaio acabava estabilizando por alguns minutos antes de ocorrer o ponto de fulgor. Em alguns casos a temperatura atingia um pico, voltando a cair gradualmente até ocorrer a ignição dos gases em temperatura inferior (Figura 31).

Esse fato poderia ser resultante da aceleração da dissolução da borracha devido a elevação da temperatura e à presença de OLUC. Dessa forma, a redução do ponto de fulgor poderia ser explicada pela presença do próprio óleo de motor, que é mais volátil que o asfalto, mas também pode ser decorrente dos gases emanados pelo processo de desvulcanização da borracha.

Figura 31 – Variação da temperatura em função do tempo de ensaio



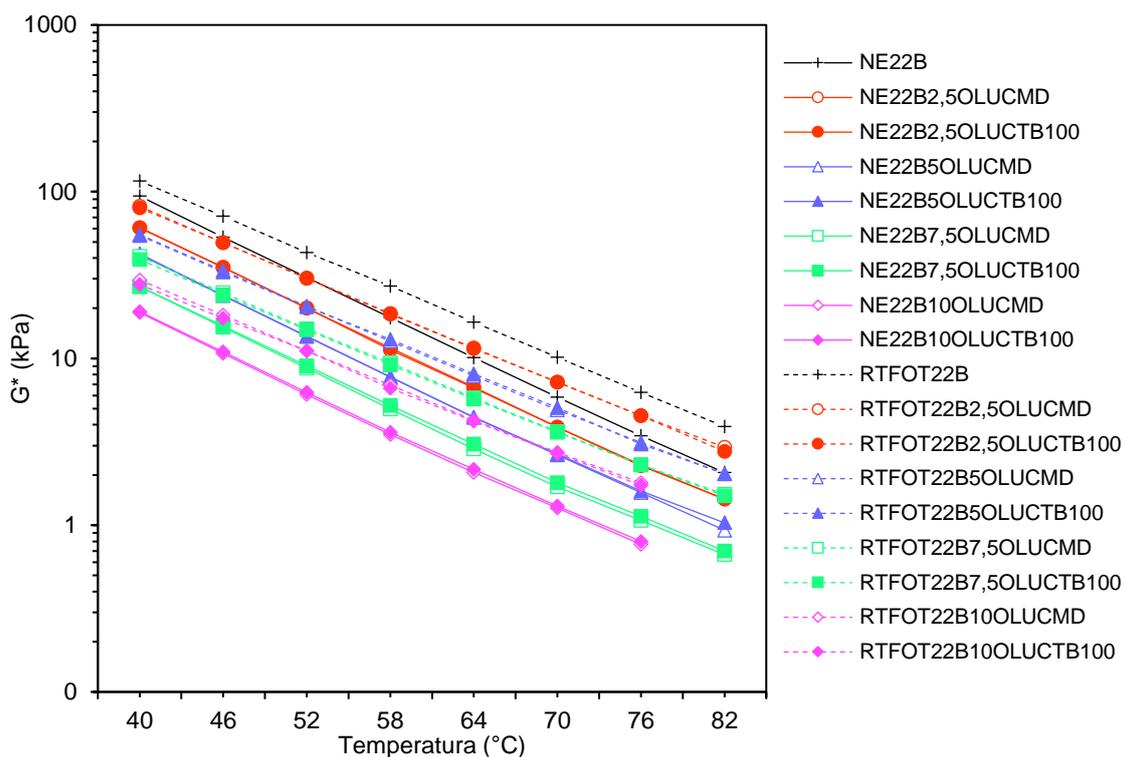
## 4.5 CISALHAMENTO DINÂMICO

### 4.5.1 Deformação permanente

#### 4.5.1.1 Módulo complexo ( $G^*$ ) em altas temperaturas

O módulo complexo é calculado pela relação entre a tensão cisalhante máxima aplicada e a deformação máxima resultante. É uma medida de rigidez e representa a resistência total à deformação do ligante asfáltico quando submetido a pulsos cisalhantes. O efeito da temperatura no módulo complexo é ilustrado na Figura 32. Como o ligante asfáltico é um material sensível à variação de temperatura, o valor de  $G^*$  diminui gradativamente com o incremento da temperatura de ensaio. Como consequência, há uma redução gradual da rigidez do asfalto e de sua capacidade de suportar carregamentos em temperaturas elevadas.

Figura 32 – Módulo complexo em função da temperatura



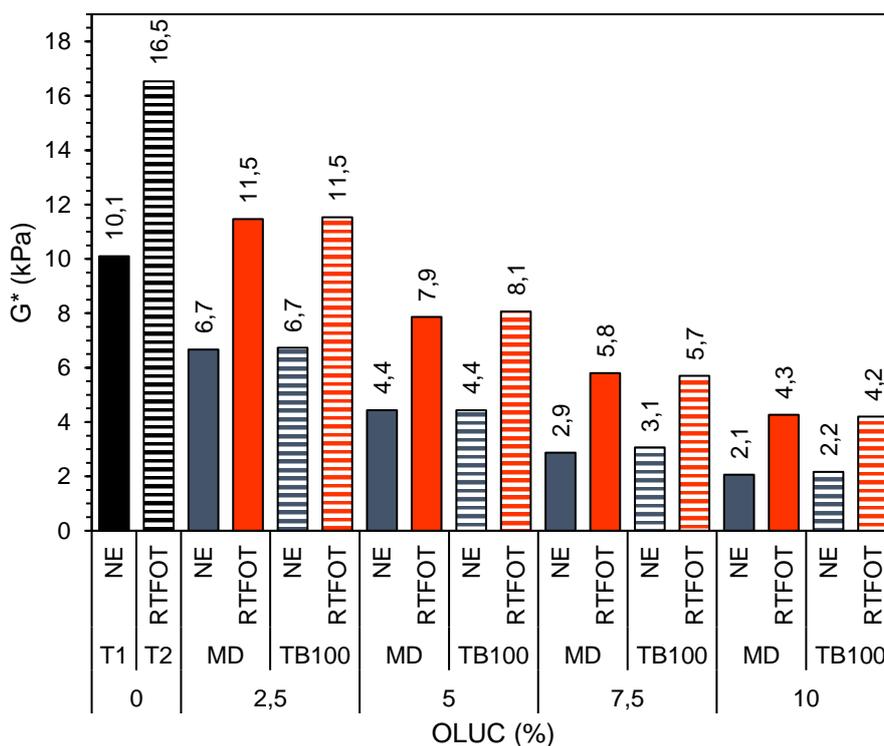
Para estudar a influência dos fatores nas propriedades mecânicas do asfalto-borracha, selecionou-se a temperatura de 64 °C, a qual pode ser considerada uma temperatura elevada representativa nos revestimentos asfálticos no sul do Brasil. A Tabela 12 e a Figura 33 apresentam os valores do módulo complexo obtidos para duas condições de envelhecimento, duas condições de tratamento da borracha e quatro teores de OLU. Os resultados mostram que o aumento na quantidade de óleo lubrificante reduz cada vez mais os valores do módulo complexo ( $G^*$ ).

Tabela 12 – Módulo complexo médio (kPa, 64 °C)

OLUC (%)	NE				RTFOT					
	MD	$\Delta\%_{T1}$	TB100	$\Delta\%_{T1}$	MD	$\Delta\%_{T2}$	$\Delta\%_{NE}$	TB100	$\Delta\%_{T2}$	$\Delta\%_{NE}$
2,5	6,7	34%	6,7	33%	11,5	31%	72%	11,5	30%	71%
5,0	4,4	56%	4,4	56%	7,9	52%	77%	8,1	51%	82%
7,5	2,9	72%	3,1	70%	5,8	65%	102%	5,7	66%	86%
10,0	2,1	80%	2,2	79%	4,3	74%	106%	4,2	75%	94%
<b>Testemunha</b>	10,1				16,5					

Testemunha: asfalto-borracha sem adição de OLU (NE e RTFOT); NE: amostras não envelhecidas; RTFOT: amostras envelhecidas no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: tratamento da borracha (100 °C, 1 h);  $\Delta\%_{T1}$ : Variação percentual em relação à testemunha 1 (NE);  $\Delta\%_{T2}$ : Variação percentual em relação à testemunha 2 (RTFOT);  $\Delta\%_{NE}$ : Variação percentual após envelhecimento.

Figura 33 – Módulo complexo (64 °C)

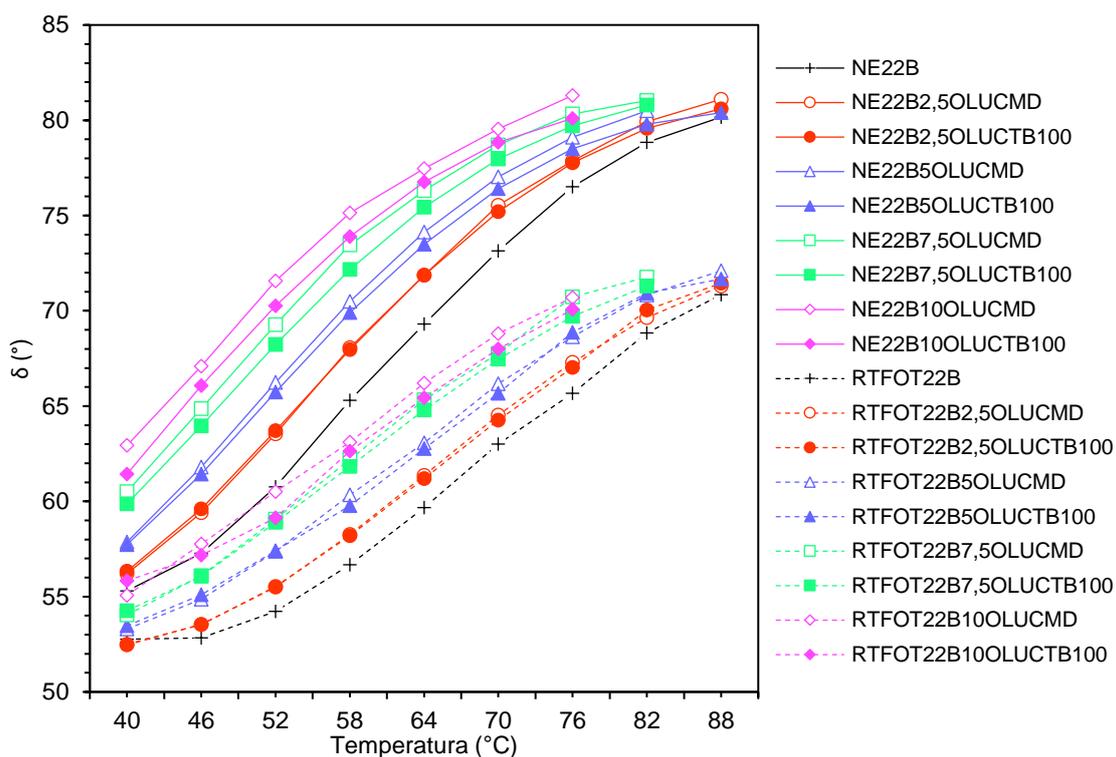


Segundo a ANOVA, os valores dos módulos complexos apresentam diferença estatística do ponto de vista do teor de OLUc e da condição de envelhecimento, existindo interação significativa entre esses fatores (valores- $p < 0,05$ , Tabela A - 40). A partir das análises Post Hoc da interação, foi constatado que as diferenças citadas ocorreram em todas as doses de OLUc avaliadas, nas duas condições de envelhecimento, além disso o envelhecimento é significativo para todos os teores de OLUc (valores- $p_{tukey} < 0,05$ , Tabela A - 41). O efeito do OLUc é de redução do módulo complexo (Figura A - 27), e essa correlação foi explicada por um modelo de regressão quadrático para as duas condições de envelhecimento (NE: Tabela A - 42 e Tabela A - 43; RTFOT: Tabela A - 44 e Tabela A - 45). O envelhecimento tende a aumentar os valores de  $G^*$  (Figura A - 26).

#### 4.5.1.2 Ângulo de fase ( $\delta$ ) em altas temperaturas

O ângulo de fase é uma medida de elasticidade do ligante asfáltico, sendo a defasagem entre a tensão de cisalhamento aplicada e a deformação viscosa resultante. As componentes elásticas e viscosas do módulo complexo se relacionam por meio do ângulo de fase e quanto menor esse ângulo, maior é a elasticidade do ligante asfáltico. O efeito da temperatura no ângulo de fase das amostras é apresentado na Figura 34.

Figura 34 – Ângulo de fase em função da temperatura



O ângulo de fase aumenta com a elevação de temperatura. Esse resultado indica uma redução da capacidade elástica do ligante, com predomínio de deformações viscosas em temperaturas mais altas. Além disso, o envelhecimento parece alterar a sensibilidade do ângulo de fase à variação da temperatura, tornando os ligantes modificados com OLUC mais elásticos, especialmente nas maiores temperaturas.

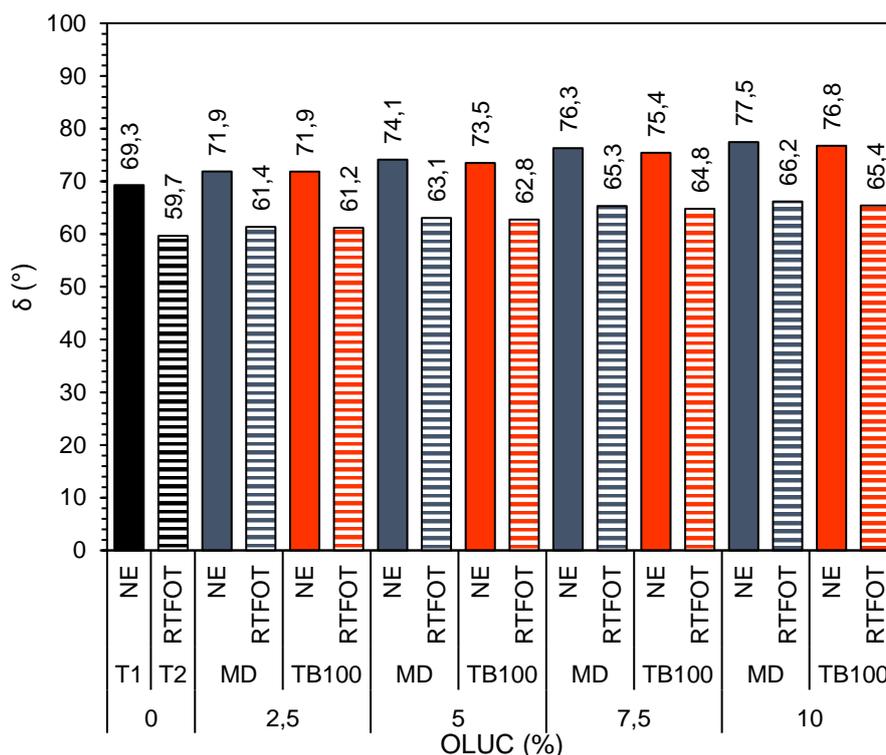
Selecionou-se a temperatura de 64 °C para avaliar mais detalhadamente o ângulo de fase. Os resultados dessa avaliação são apresentados na Figura 35 e na Tabela 13.

Tabela 13 – Ângulo de fase médio (°, 64 °C)

OLUC (%)	NE				RTFOT					
	MD	$\Delta\%_{T1}$	TB100	$\Delta\%_{T1}$	MD	$\Delta\%_{T2}$	$\Delta\%_{NE}$	TB100	$\Delta\%_{T2}$	$\Delta\%_{NE}$
2,5	71,9	4%	71,9	4%	61,4	3%	15%	61,2	3%	15%
5,0	74,1	7%	73,5	6%	63,1	6%	15%	62,8	5%	15%
7,5	76,3	10%	75,4	9%	65,3	9%	14%	64,8	9%	14%
10,0	77,5	12%	76,8	11%	66,2	11%	15%	65,4	10%	15%
<b>Testemunha</b>	69,3				59,7					

Testemunha: asfalto-borracha sem adição de OLUC (NE e RTFOT); NE: amostras não envelhecidas; RTFOT: amostras envelhecidas no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: tratamento da borracha (100 °C, 1 h);  $\Delta\%_{T1}$ : Variação percentual em relação à testemunha 1 (NE);  $\Delta\%_{T2}$ : Variação percentual em relação à testemunha 2 (RTFOT);  $\Delta\%_{NE}$ : Variação percentual após envelhecimento.

Figura 35 – Ângulo de fase médio (64 °C)



A ANOVA realizada para os ângulos de fase permitiu constatar que o teor de OLUK, a condição de envelhecimento e o tipo de modificação tiveram influência significativa nos resultados obtidos (valores- $p < 0,05$ , Tabela A - 50). As análises Post Hoc indicaram que os valores dos ângulos de fase são estatisticamente diferentes para todos os teores de OLUK considerados neste estudo (valores- $p_{\text{tukey}} < 0,05$ , Tabela A - 53). O ângulo de fase aumentou com maiores doses de OLUK (Figura A - 33), portanto o óleo reduziu a elasticidade do asfalto-borracha. O tratamento da borracha diminuiu o ângulo de fase (Figura A - 32) e melhorou a elasticidade das amostras, assim como o envelhecimento (Figura A - 31). A quantidade percentual de OLUK e o ângulo de fase são correlacionados por um modelo de regressão linear (Tabela A - 54 e Tabela A - 55).

#### 4.5.1.3 Parâmetro $G^*/\text{sen}(\delta)$

Na especificação SUPERPAVE, a relação entre o módulo complexo e o seno do ângulo de fase é usado como um indicador da resistência do asfalto ao acúmulo de deformações permanentes. Quanto maior o valor de  $G^*/\text{sen}(\delta)$ , maior é a resistência do ligante asfáltico ao afundamento de trilha de roda.

A Figura 36 mostra o gráfico do parâmetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$  em função da temperatura. Todas as amostras apresentaram o mesmo comportamento, com redução da resistência à deformação permanente em função do aumento da temperatura de ensaio. Esse resultado está diretamente relacionado com a redução da rigidez e da elasticidade do ligante asfáltico com a elevação da temperatura (Figura 32 e Figura 34).

Para melhor avaliar o efeito dos fatores no parâmetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$ , selecionou-se a temperatura de 64 °C. A Tabela 14 apresenta os resultados da incorporação do OLUC no desempenho mecânico do asfalto-borracha.

Figura 36 – Parâmetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$  em função da temperatura de ensaio

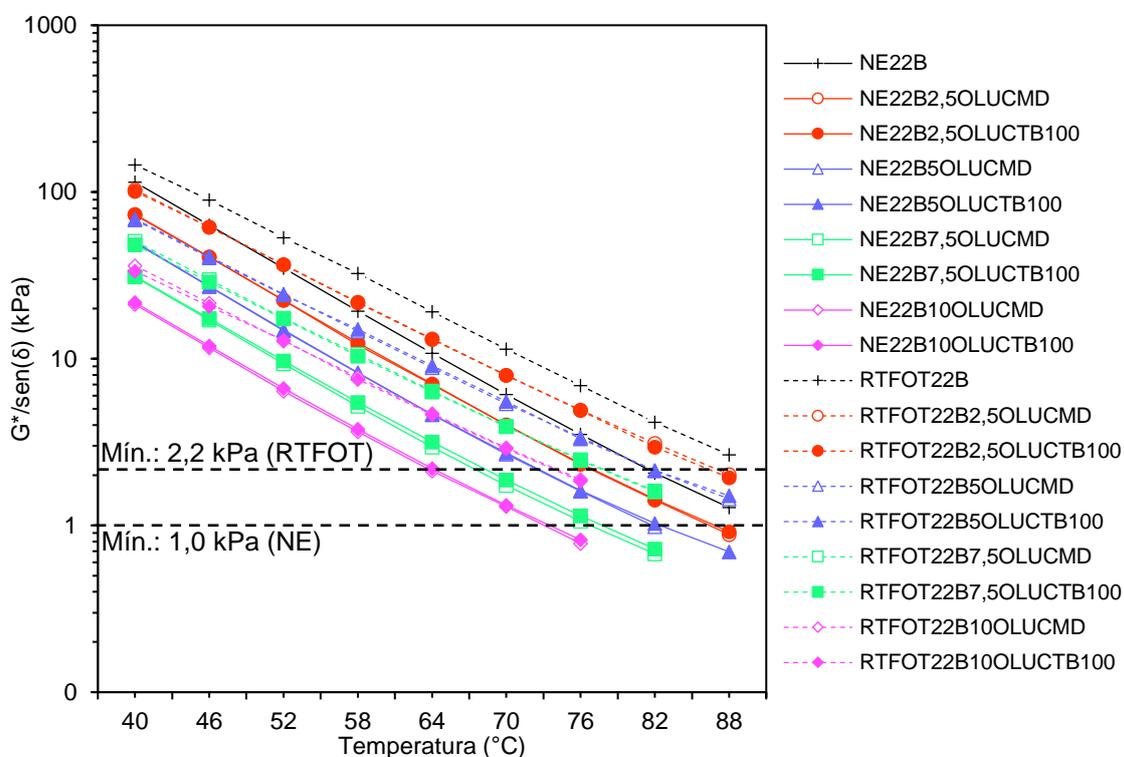


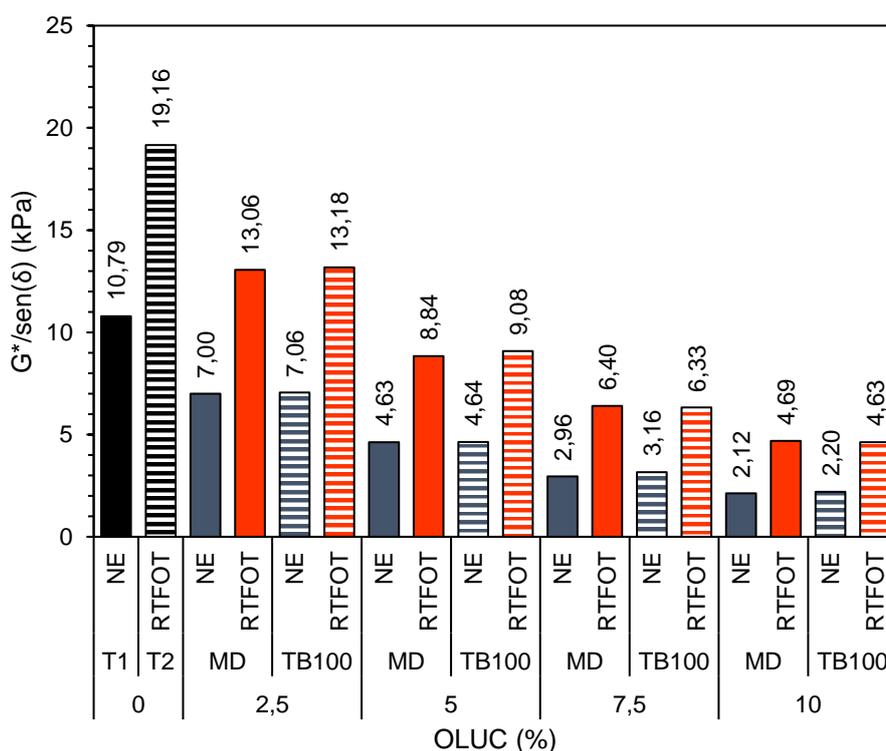
Tabela 14 – Parâmetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$  médio (kPa, 64 °C)

OLUC (%)	NE				RTFOT					
	MD	$\Delta\%_{T1}$	TB100	$\Delta\%_{T1}$	MD	$\Delta\%_{T2}$	$\Delta\%_{NE}$	TB100	$\Delta\%_{T2}$	$\Delta\%_{NE}$
2,5	7,00	35%	7,06	35%	13,06	32%	87%	13,18	31%	87%
5,0	4,63	57%	4,64	57%	8,84	54%	91%	9,08	53%	96%
7,5	2,96	73%	3,16	71%	6,40	67%	116%	6,33	67%	100%
10,0	2,12	80%	2,20	80%	4,69	76%	121%	4,63	76%	110%
<b>Testemunha</b>	10,79				19,16					

Testemunha: asfalto-borracha sem adição de OLUC (NE e RTFOT); NE: amostras não envelhecidas; RTFOT: amostras envelhecidas no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: tratamento da borracha (100 °C, 1 h);  $\Delta\%_{T1}$ : Variação percentual em relação à testemunha 1 (NE);  $\Delta\%_{T2}$ : Variação percentual em relação à testemunha 2 (RTFOT);  $\Delta\%_{NE}$ : Variação percentual após envelhecimento.

A resistência ao afundamento de trilha das amostras envelhecidas (RTFOT) foi superior às não envelhecidas (NE), no entanto, mesmo após o envelhecimento, as amostras com mais de 5% de OLUC apresentaram menor resistência do que o asfalto-borracha não envelhecido e sem adição de óleo lubrificante. Portanto, o OLUC degrada as propriedades do asfalto-borracha em temperaturas elevadas, comprometendo seu desempenho mecânico e sua resistência à deformação permanente (Figura 37).

Figura 37 –  $G^*/\text{sen}(\delta)$  médio (64 °C)



A partir dos testes estatísticos efetuados com a ANOVA, se observou que as doses de OLUC e a condição de envelhecimento afetaram significativamente os valores do parâmetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$ , com interação significativa entre esses dois fatores (valores- $p < 0,05$ , Tabela A - 60). Pelas análises Post Hoc da interação, verificou-se que todos os valores de  $G^*/\text{sen}(\delta)$  obtidos são estatisticamente diferentes para todos os teores de OLUC avaliados, nas duas condições de envelhecimento, além disso o envelhecimento é significativo para todos os teores de OLUC (valores- $p_{\text{tukey}} < 0,05$ , Tabela A - 61). A adição de maiores quantidades de OLUC reduz gradualmente a resistência à deformação permanente (Figura A - 38) e a correlação entre a quantidade percentual de OLUC e o parâmetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$  se dá por um modelo quadrático, nas duas condições de envelhecimento (NE:

Tabela A - 62 e Tabela A - 63; RTFOT: Tabela A - 64 e Tabela A - 65). O envelhecimento torna o ligante mais rígido e aumenta sua resistência ao afundamento (Figura A - 37).

#### 4.5.1.4 Grau de desempenho (PG) em alta temperatura

A especificação SUPERPAVE define valores mínimos admissíveis para o parâmetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$ , de modo a garantir adequada resistência à deformação permanente em temperaturas elevadas. Amostras não envelhecidas falham quando esse parâmetro apresenta valores inferiores a 1,0 kPa e amostras envelhecidas no curto prazo (RTFOT) falham para valores menores que 2,2 kPa (AASHTO, 2021; ASTM, 2021).

As temperaturas de falha de todas as amostras avaliadas são apresentadas na Tabela 15 e na Figura 38. Se observa redução da temperatura de falha para amostras asfalto-borracha-OLUC não envelhecidas e envelhecidas no curto prazo, submetidas a modificação direta ou a modificação com tratamento da borracha. Além disso, essa diminuição se torna mais expressiva com o crescimento da quantidade de OLUC adicionada.

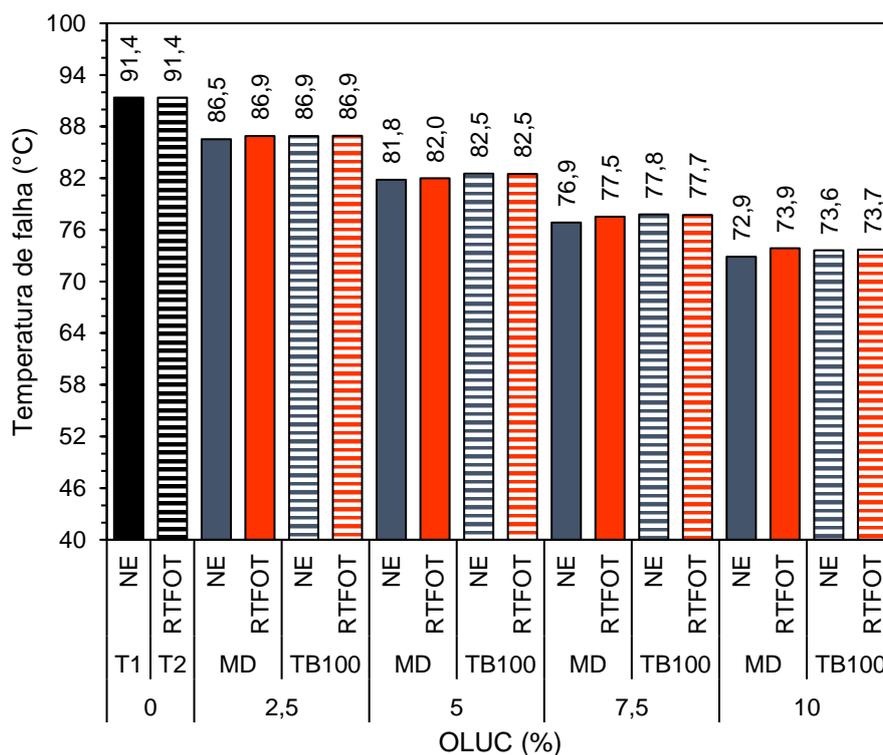
Também se constata para cada teor de OLUC, temperaturas de falha muito próximas antes e após o envelhecimento. Idem quando se avalia o tipo de modificação efetuada (modificação direta ou modificação com tratamento da borracha).

Tabela 15 – Temperatura de falha (°C)

OLUC (%)	NE				RTFOT			
	MD	$\Delta\%_{T1}$	TB100	$\Delta\%_{T1}$	MD	$\Delta\%_{T2}$	TB100	$\Delta\%_{T2}$
2,5	86,5	5%	86,9	5%	86,9	5%	86,9	5%
5,0	81,8	10%	82,5	10%	82,0	10%	82,5	10%
7,5	76,9	16%	77,8	15%	77,5	15%	77,7	15%
10,0	72,9	20%	73,6	19%	73,9	19%	73,7	19%
<b>Testemunha</b>	91,4				91,4			

*Testemunha: asfalto-borracha sem adição de OLUC (NE e RTFOT); NE: amostras não envelhecidas; RTFOT: amostras envelhecidas no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: tratamento da borracha (100 °C, 1 h);  $\Delta\%_{T1}$ : Variação percentual em relação à testemunha 1 (NE);  $\Delta\%_{T2}$ : Variação percentual em relação à testemunha 2 (RTFOT);  $\Delta\%_{NE}$ : Variação percentual após envelhecimento.*

Figura 38 – Temperatura de falha (°C)



O grau de desempenho (PG, Performance Grade) de uma determinada amostra de ligante asfáltico, em temperaturas elevadas, pode ser determinado pela comparação da menor temperatura de falha (entre a amostra não envelhecida e a amostra envelhecida no curto prazo) com as gradações da especificação SUPERPAVE disponíveis na AASHTO M320 ou ASTM D6373. Os resultados obtidos no presente estudo são apresentados na Tabela 16. A incorporação de OLCU reduziu gradativamente o PG do asfalto-borracha, de 88 (0% OLCU) para 70 (10% OLCU-MD e 10% OLCU-TB100). Além disso, as amostras modificadas com 5% de borracha tratada apresentaram desempenho superior ao das amostras com 5% de borracha e modificação direta.

Tabela 16 – Grau de desempenho (PG) em alta temperatura

Teor de OLCU (%)	MD	TB100
2,5	82	82
5,0	76	82
7,5	76	76
10,0	70	70
<b>Testemunha</b>	<b>88</b>	

Testemunha: asfalto-borracha sem adição de OLCU; MD: modificação direta; TB100: tratamento da borracha (100 °C, 1 h).

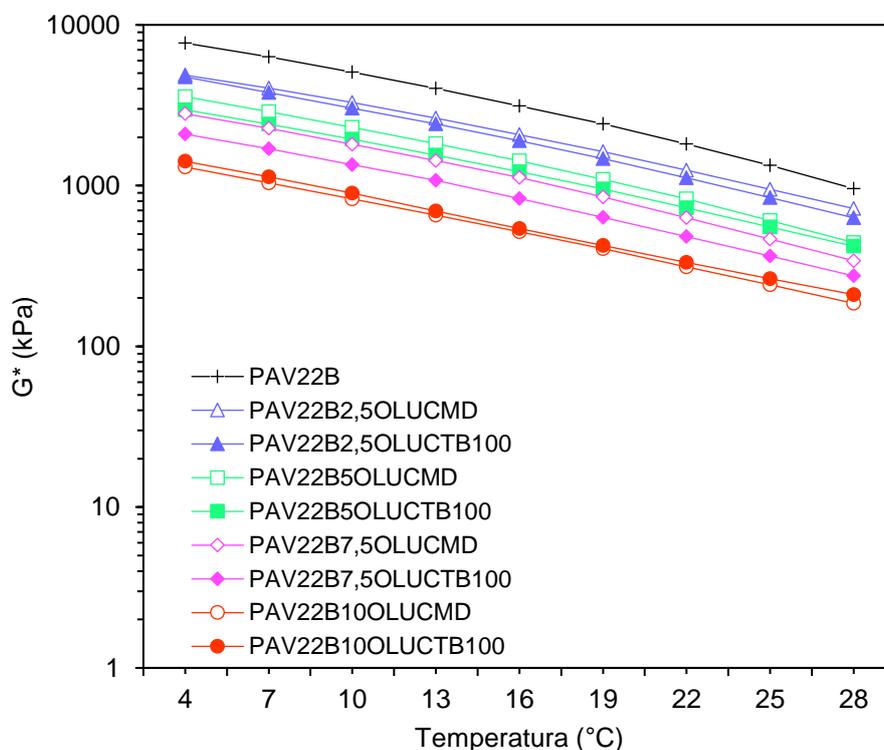
Considerando as análises estatísticas realizadas, se observou diferença significativa nas temperaturas de falha do ponto de vista dos teores de OLUC avaliados (valores- $p < 0,05$ , Tabela A - 70). As análises Post Hoc mostraram que as temperaturas de falha apresentaram valores estatisticamente diferentes entre si para todos os teores de OLUC (valores- $p_{\text{tukey}} < 0,05$ , Tabela A - 71), e quanto maior a quantidade percentual de OLUC, menor é a temperatura de falha (Figura A - 42). Foi possível estabelecer uma correlação entre a redução da temperatura de falha com a elevação da dose de OLUC por um modelo de regressão linear (Tabela A - 72 e Tabela A - 73).

#### 4.5.2 Trincamento por fadiga

##### 4.5.2.1 Módulo complexo ( $G^*$ ) em temperaturas intermediárias

A evolução do módulo complexo em função da temperatura pode ser visualizada na Figura 39. A redução da temperatura de ensaio é responsável pela elevação da rigidez das amostras. Por outro lado, o deslocamento das curvas para baixo fornece indícios de que o OLUC reduz a rigidez do asfalto-borracha.

Figura 39 – Módulo complexo em função da temperatura



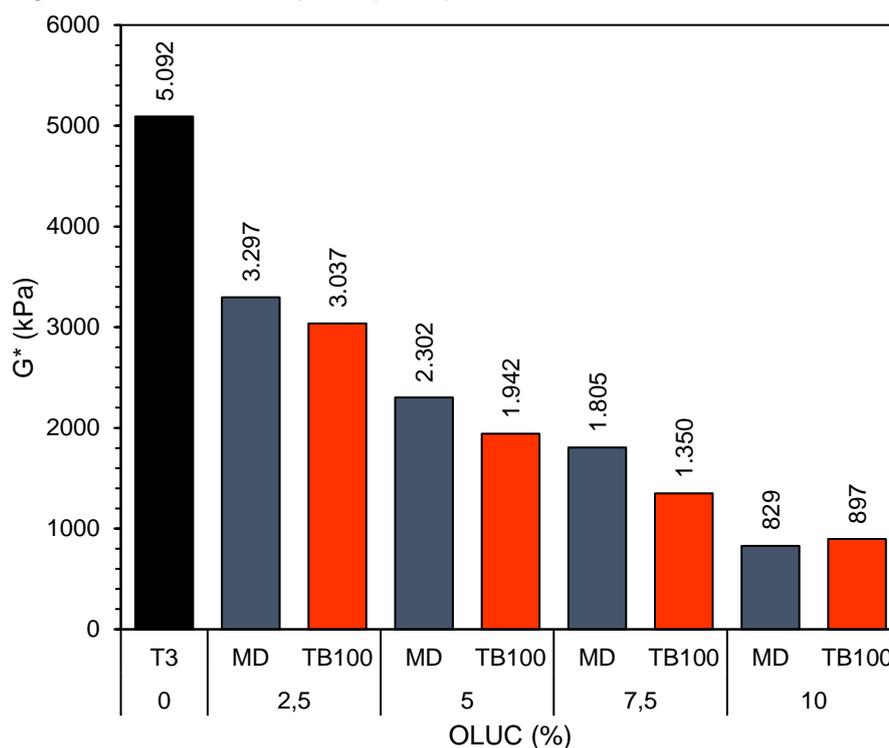
O efeito do resíduo de óleo de motor no módulo complexo, na temperatura de 10 °C, é apresentado na Tabela 17 e Figura 40. Se constata, para os dois tipos de modificação efetuados, redução contínua da rigidez das amostras à medida que aumenta o teor de OLUC adicionado.

Tabela 17 – Módulo complexo médio (kPa, 10 °C)

OLUC (%)	MD	$\Delta\%_{T3}$	TB100	$\Delta\%_{T3}$
2,5	3297	35%	3037	40%
5,0	2302	55%	1942	62%
7,5	1805	65%	1350	73%
10,0	829	84%	897	82%
<b>Testemunha</b>	5092			

Testemunha: asfalto-borracha sem OLUC; MD: modificação direta; TB100: tratamento da borracha (100 °C, 1 h);  $\Delta\%_{T3}$ : Variação percentual em relação à testemunha 3 (PAV).

Figura 40 – Módulo complexo (10 °C)



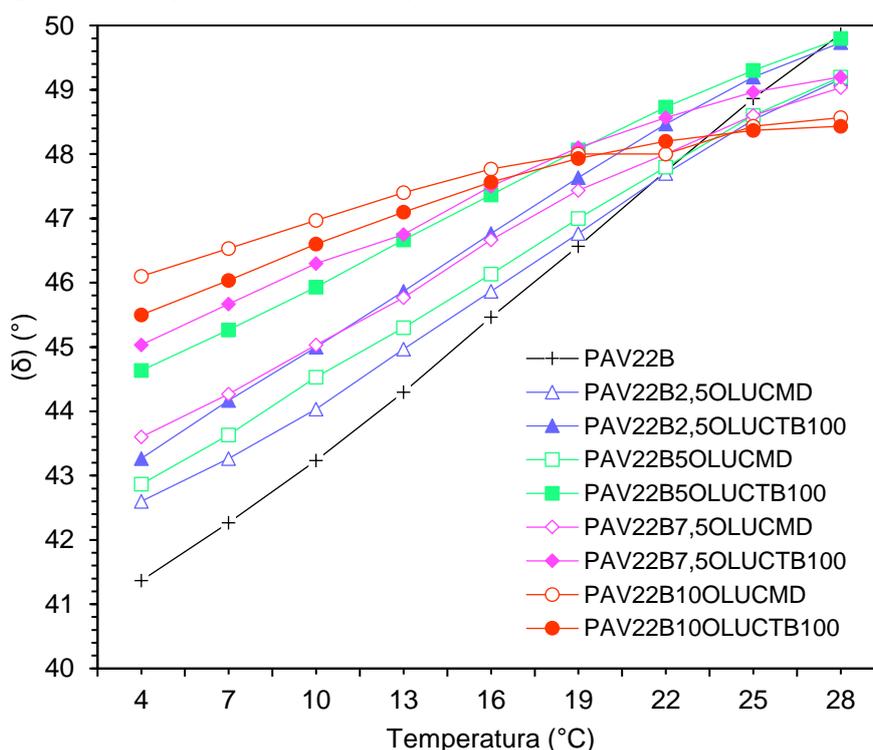
As análises estatísticas desenvolvidas permitiram concluir que existem diferenças significativas nos valores dos módulos complexos devidas aos teores de OLUC e ao tipo de modificação, com interação entre esses fatores (valores- $p < 0,05$ , Tabela A - 78).

As análises Post Hoc da interação mostraram que, do ponto de vista do teor de OLUC adicionado, todos os valores de  $G^*$  são estatisticamente diferentes entre si nos dois tipos de modificação, (valores- $p_{tukey} < 0,05$ , Tabela A - 79). Além disso, se constatou diferença significativa entre os tipos de modificação para a dose de 7,5% de OLUC (valor- $p_{tukey} < 0,05$ , Tabela A - 79), com redução da rigidez devido ao tratamento da borracha (Figura A - 46). Foi possível correlacionar a redução da rigidez das amostras em função da elevação do teor de OLUC por um modelo de regressão linear para as amostras da modificação direta (Tabela A - 80 e Tabela A - 81) e por um modelo de regressão quadrático para as amostras com borracha tratada (Tabela A - 82 e Tabela A - 83).

#### 4.5.2.2 Ângulo de fase ( $\delta$ ) em temperaturas intermediárias

A influência da temperatura no ângulo de fase é ilustrada na Figura 41. É possível observar que há um ganho de elasticidade com a redução da temperatura. No entanto, esse efeito parece ser menor nas amostras modificadas com OLUC. O comportamento da curva pode ser um indicativo de que a sensibilidade térmica do ângulo de fase, das amostras envelhecidas no longo prazo, diminui devido à presença de maiores quantidades de OLUC.

Figura 41 – Ângulo de fase em função da temperatura



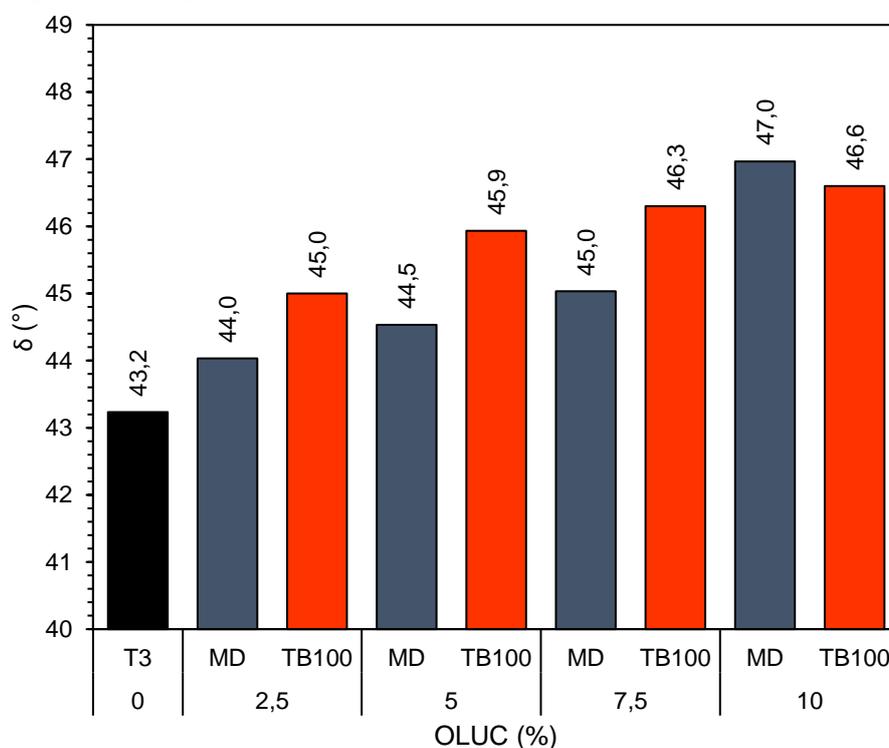
O efeito da incorporação do OLUC nos ângulos de fase, obtidos na temperatura de 10 °C, podem ser visualizados na Tabela 18 e na Figura 42.

Tabela 18 – Ângulo de fase médio (°, 10 °C)

OLUC (%)	MD	$\Delta\%_{T3}$	TB100	$\Delta\%_{T3}$
2,5	44,0	2%	45,0	4%
5,0	44,5	3%	45,9	6%
7,5	45,0	4%	46,3	7%
10,0	47,0	9%	46,6	8%
<b>Testemunha</b>	43,2			

Testemunha: asfalto-borracha sem OLUC; MD: modificação direta; TB100: tratamento da borracha (100 °C, 1 h);  $\Delta\%_{T3}$ : Variação percentual em relação à testemunha 3 (PAV).

Figura 42 – Ângulo de fase médio (10 °C)



Considerando a análise de variância realizada, se constatou que existem diferenças significativas nos ângulos de fase devidas aos teores de OLUC e ao tipo de modificação, com interação entre os fatores (valores- $p < 0,05$ , Tabela A - 88).

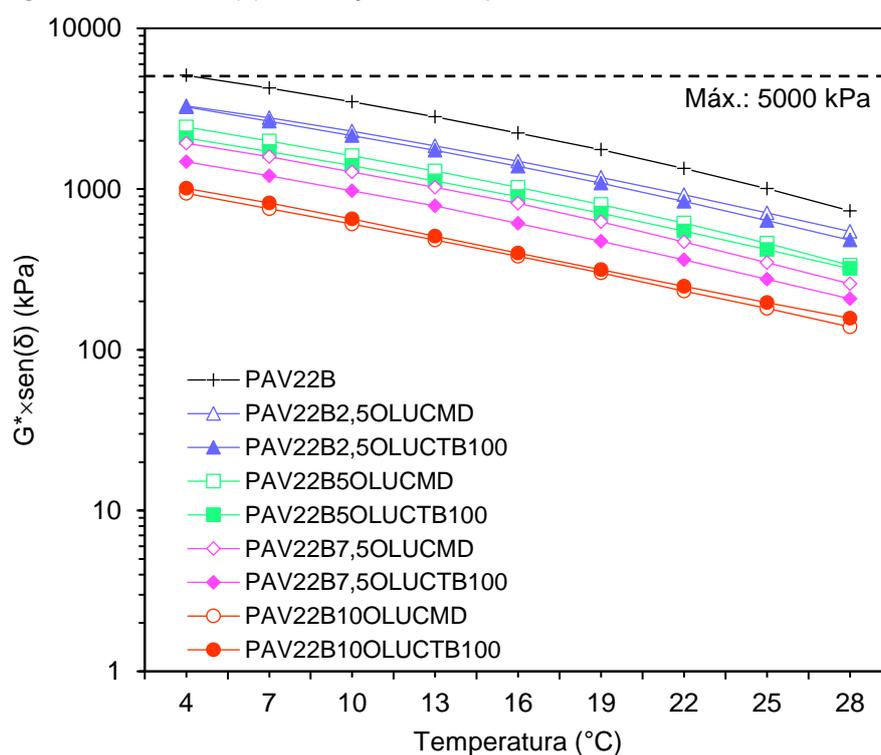
Com relação aos teores de OLUC, a análise Post Hoc da interação revelou que os ângulos de fase apresentaram diferença estatística para algumas combinações dentro de cada nível do tipo de modificação: 2,5%MD×10%MD, 5%MD×10%MD, 7,5%MD×10%MD, 2,5%TB100×7,5%TB100 e 2,5%TB100×10%TB100 (valores-

$p_{tukey} < 0,05$ , Tabela A - 89). As amostras com maior quantidade de OLUC apresentaram maior ângulo de fase e, conseqüentemente, menor elasticidade (Figura A - 52). Com relação ao tipo de modificação, foi observado diferença significativa nas combinações dentro dos seguintes níveis do teor de OLUC: 5%MD×5%TB100 e 7,5%MD×7,5%TB100 (valores- $p_{tukey} < 0,05$ , Tabela A - 89), nesses casos o tratamento da borracha aumentou o ângulo de fase em relação à modificação direta (Figura A - 51). Para as amostras do tratamento da borracha, a correlação entre a dose de OLUC e o ângulo de fase foi explicada por um modelo de regressão linear (Tabela A - 90 e Tabela A - 91).

#### 4.5.2.3 Parâmetro $G^* \times \text{sen}(\delta)$

O produto do módulo complexo pelo seno do ângulo de fase é considerado um parâmetro de resistência ao trincamento por fadiga. Quanto maior o valor desse parâmetro, maior a chance de as tensões acumuladas serem dissipadas em forma de trincas. Nas seções 4.5.2.1 e 4.5.2.2, foi constatado aumento do módulo complexo e redução do ângulo de fase ao diminuir a temperatura de ensaio (Figura 39 e Figura 41). Reunido os dois elementos, tem-se o parâmetro  $G^* \times \text{sen}(\delta)$ , cuja evolução em função da temperatura é apresentada na Figura 43.

Figura 43 –  $G^* \times \text{sen}(\delta)$  em função da temperatura



Nessa figura, se observa para todas as situações avaliadas, crescimento do  $G^* \times \text{sen}(\delta)$  à medida que diminui a temperatura de ensaio. No entanto, as curvas das amostras modificadas com OLUC tendem a estar mais abaixo no gráfico. Assim, o efeito amolecedor do óleo parece contribuir para a melhora da resistência a fadiga. Até a temperatura de 4 °C, todas as amostras modificadas com OLUC apresentaram valores de  $G^* \times \text{sen}(\delta)$  inferiores a 5000 kPa ou 6000 kPa (caso o ângulo de fase fosse superior a 42°). A amostra de asfalto-borracha sem OLUC falhou na temperatura de 4 °C.

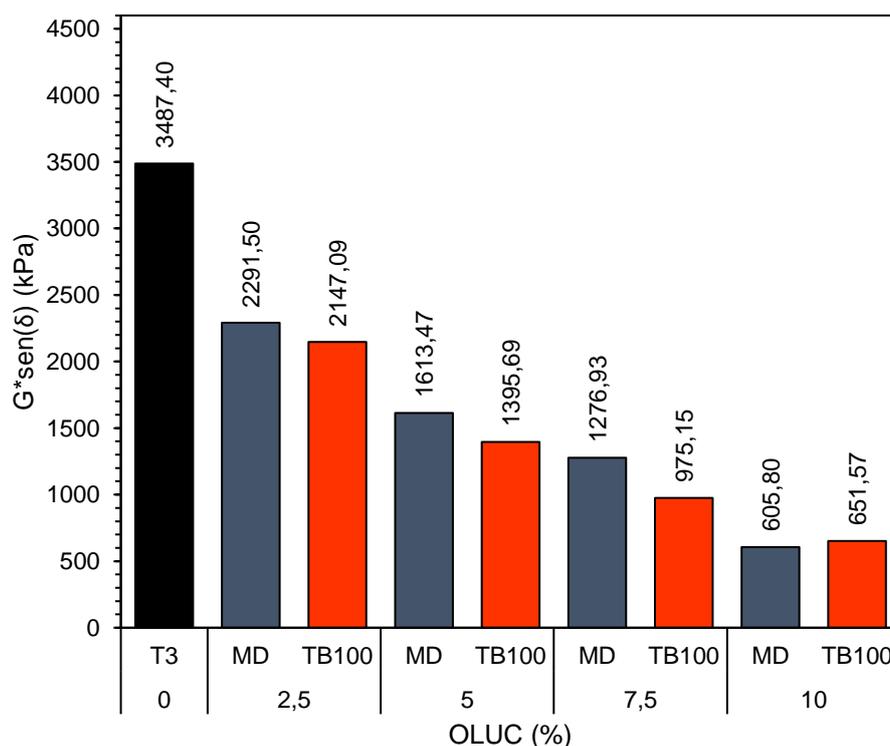
O efeito do óleo lubrificante no parâmetro  $G^* \times \text{sen}(\delta)$  na temperatura de 10 °C é mostrado na Tabela 19 e na Figura 44.

Tabela 19 – Parâmetro  $G^* \times \text{sen}(\delta)$  médio (kPa, 10 °C)

OLUC (%)	MD	$\Delta\%_{T3}$	TB100	$\Delta\%_{T3}$
2,5	2291,50	34%	2147,09	38%
5,0	1613,47	54%	1395,69	60%
7,5	1276,93	63%	975,15	72%
10,0	605,80	83%	651,57	81%
<b>Testemunha</b>	<b>3487,40</b>			

Testemunha: asfalto-borracha sem OLUC; MD: modificação direta; TB100: tratamento da borracha (100 °C, 1 h);  $\Delta\%_{T3}$ : Variação percentual em relação à testemunha 3 (PAV).

Figura 44 –  $G^* \times \text{sen}(\delta)$  médio (10 °C)



A partir da ANOVA realizada, se constatou que existem diferenças significativas nos valores do parâmetro  $G^* \times \text{sen}(\delta)$  devido aos teores de OLUC e ao tipo de modificação, com interação entre esses fatores (valores- $p < 0,05$ , Tabela A - 96).

As análises Post Hoc da interação mostraram que para todos os teores de OLUC avaliados, os valores de  $G^* \times \text{sen}(\delta)$  resultaram estatisticamente diferentes nos dois tipos de modificação (valores- $p_{\text{tukey}} < 0,05$ , Tabela A - 97). A incorporação de maiores quantidades de OLUC resulta em redução do parâmetro  $G^* \times \text{sen}(\delta)$  e melhora da resistência à fadiga (Figura A - 57). No caso da modificação direta essa correlação se deu por um modelo de regressão linear (Tabela A - 98 e Tabela A - 99) e para o tratamento da borracha a redução de  $G^* \times \text{sen}(\delta)$  em função da elevação da quantidade de OLUC foi explicada por uma regressão quadrática (Tabela A - 100 e Tabela A - 101). Também se verificou existência de diferença significativa entre os tipos de modificação para o teor de 7,5% de OLUC (valor- $p_{\text{tukey}} < 0,05$ , Tabela A - 97), onde o tratamento da borracha foi mais eficiente em reduzir o parâmetro  $G^* \times \text{sen}(\delta)$ , favorecendo a melhora da resistência ao trincamento por fadiga (Figura A - 56).

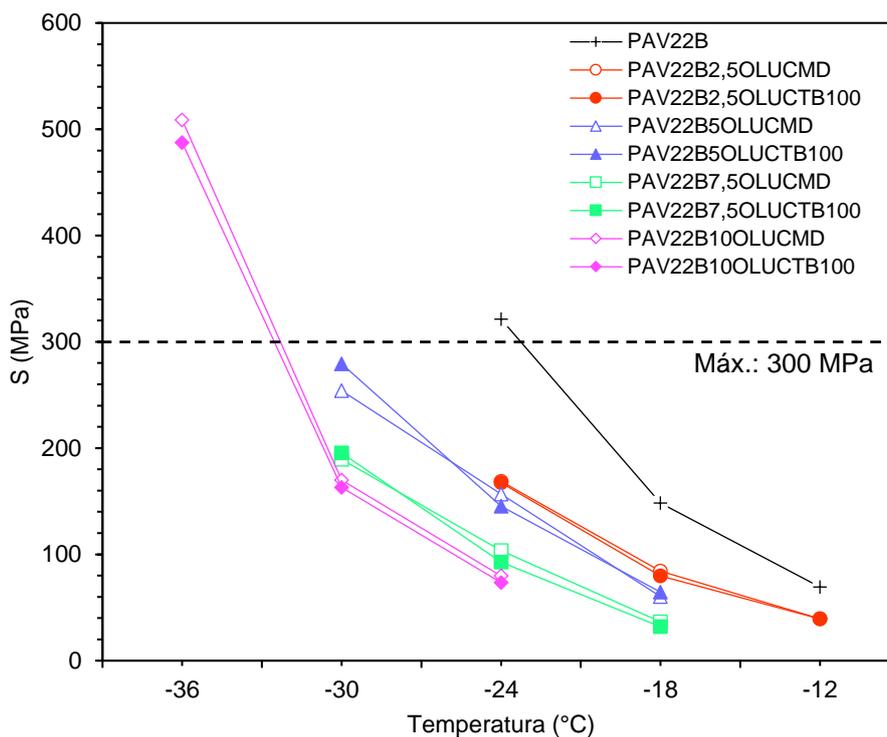
## 4.6 FLUÊNCIA EM VIGA

### 4.6.1 Trincamento térmico

#### 4.6.1.1 Rigidez (S)

A rigidez (S) representa a resistência do asfalto quando submetido a um carregamento constante (fluência). Quanto maior a rigidez do ligante, menor é a sua resistência ao trincamento térmico. As curvas de rigidez em função da temperatura são apresentadas Figura 45. Como esperado, a rigidez aumenta com a redução da temperatura e, como consequência, mais rígido e quebradiço se torna o ligante asfalto-borracha. Por outro lado, se observa que o aumento no teor de OLUC reduziu a rigidez das amostras, o que por sua vez, provocou a diminuição das temperaturas de ensaio para que estes pudessem ser realizados durante os 240s de carregamento previstos.

Figura 45 – Rigidez em função da temperatura



O efeito da modificação com OLUC, na temperatura de -24 °C, pode ser visualizado na Tabela 20 e na Figura 46.

Figura 46 – Rigidez (-24 °C)

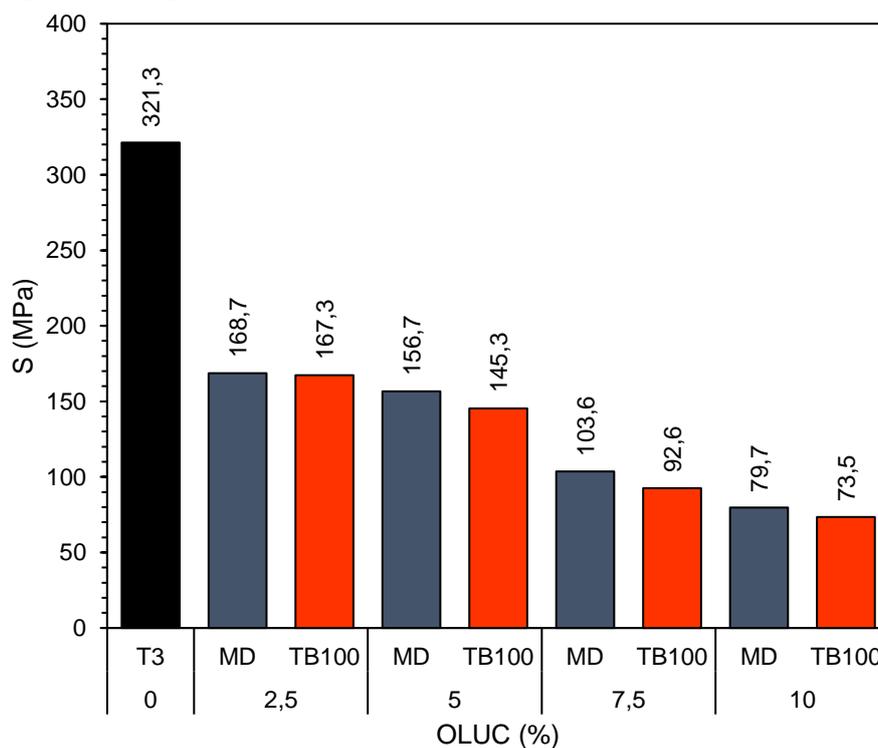


Tabela 20 – Rigidez média (MPa, -24 °C)

<b>OLUC (%)</b>	<b>MD</b>	<b><math>\Delta\%_{T3}</math></b>	<b>TB100</b>	<b><math>\Delta\%_{T3}</math></b>
<b>2,5</b>	168,7	48%	167,3	48%
<b>5,0</b>	156,7	51%	145,3	55%
<b>7,5</b>	103,6	68%	92,6	71%
<b>10,0</b>	79,7	75%	73,5	77%
<b>Testemunha</b>	321,3			

*Testemunha: asfalto-borracha sem OLUC; MD: modificação direta; TB100: tratamento da borracha (100 °C, 1 h);  $\Delta\%_{T3}$ : Variação percentual em relação à testemunha 3 (PAV).*

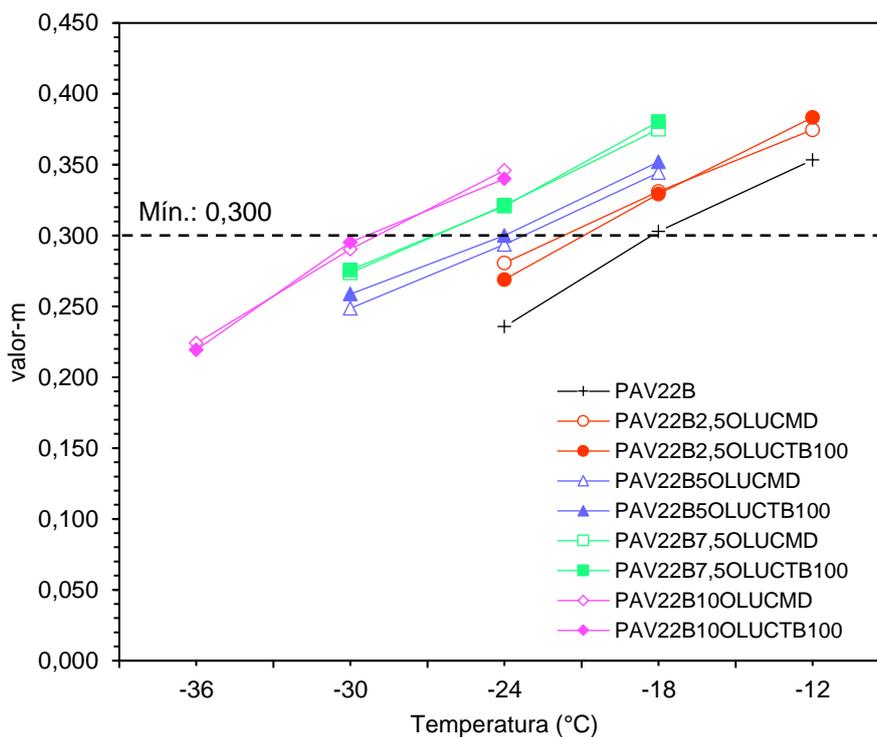
A análise de variância mostrou que os valores de rigidez apresentaram diferença estatística devido ao teor de OLUC e ao tipo de modificação (valores- $p < 0,05$ , Tabela A - 106).

As análises Post Hoc demonstraram que todos os valores de rigidez apresentam diferença estatística entre si, para todos os teores de OLUC avaliados (valores- $p_{\text{tukey}} < 0,05$ , Tabela A - 108), e aumentar a dose de OLUC resulta na redução gradual da rigidez (Figura A - 62). O tipo de modificação também teve efeito significativo (valor- $p_{\text{tukey}} < 0,05$ , Tabela A - 107) e o tratamento da borracha foi mais eficiente na redução da rigidez em comparação com a modificação direta (Figura A - 61).

#### 4.6.1.2 Relaxação (valor- $m$ )

O valor- $m$  é um indicativo da capacidade de relaxação das tensões de origem térmica que surgem no interior do pavimento, quando submetido a variações drásticas de temperatura em regiões de clima frio. Quanto maior o valor desse parâmetro, maior a resistência ao trincamento. O módulo de relaxação das amostras em função da temperatura de ensaio é mostrado na Figura 47. Em temperaturas mais baixas, o ligante se torna mais rígido e menos deformável, assim, o módulo de relaxação também diminui com a redução da temperatura. Além disso, se constata que o aumento no teor de OLUC aumenta a capacidade de relaxação das amostras, haja vista a diminuição dos valores- $m$  obtidos.

Figura 47 – Relaxação em função da temperatura



O efeito da incorporação de OLUCCMD, na temperatura de  $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pode ser visualizado na Tabela 64 e na Figura 48.

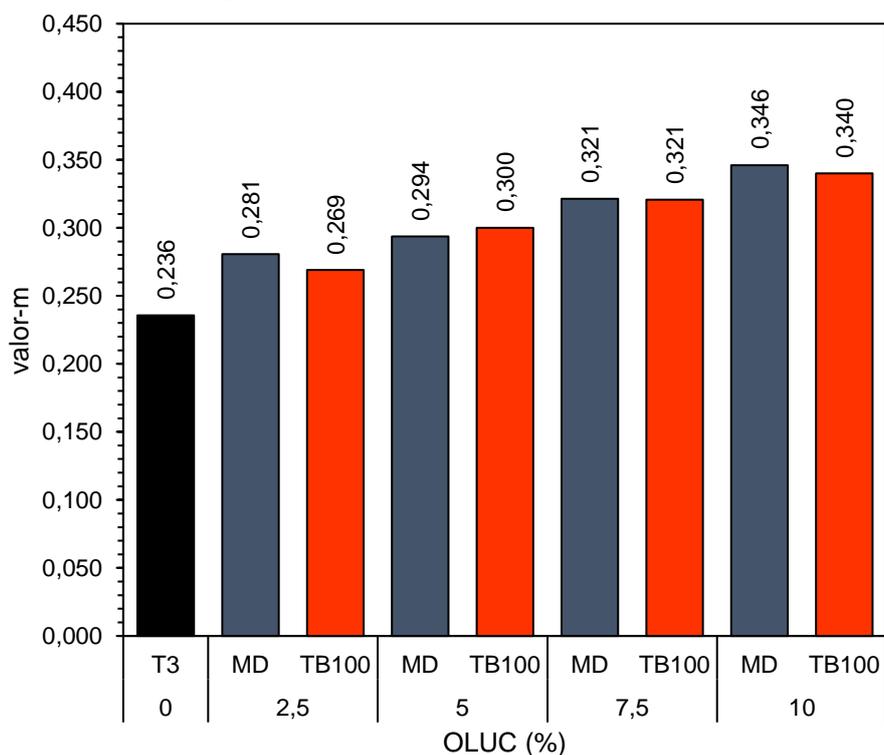
Figura 48 – Relaxação ( $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Tabela 21 – Relaxação média (-24 °C)

<b>OLUC (%)</b>	<b>MD</b>	<b><math>\Delta\%_{T3}</math></b>	<b>TB100</b>	<b><math>\Delta\%_{T3}</math></b>
<b>2,5</b>	0,281	19%	0,269	14%
<b>5,0</b>	0,294	25%	0,300	27%
<b>7,5</b>	0,321	36%	0,321	36%
<b>10,0</b>	0,346	47%	0,340	44%
<b>Testemunha</b>	0,236			

*Testemunha: asfalto-borracha sem OLUC; MD: modificação direta; TB100: tratamento da borracha (100 °C, 1 h);  $\Delta\%_{T3}$ : Variação percentual em relação à testemunha 3 (PAV).*

As análises de variância efetuadas mostraram que os valores-m apresentaram diferença estatística devido apenas ao teor de OLUC (valores- $p < 0,05$ , Tabela A - 113).

A análise Post Hoc mostrou que todos os valores-m apresentaram diferença significativa entre si, para todos as doses de óleo (valores- $p_{\text{tukey}} < 0,05$ , Tabela A - 114). A redução do valor-m se correlaciona com a elevação da quantidade percentual de OLUC por um modelo de regressão linear (Tabela A - 115 e Tabela A - 116), mostrando que o resíduo de óleo de motor melhora a capacidade de relaxação do asfalto-borracha.

#### 4.6.1.3 Grau de desempenho (PG) em baixa temperatura

Para garantir adequado desempenho do ligante em baixas temperaturas e evitar problemas com trincas de origem térmica, a especificação SUPERPAVE define limites para os parâmetros de rigidez (S) e módulo de relaxação (valor-m). O valor-m deve ser superior a 0,300 e a rigidez deve ser inferior a 300 MPa (AASHTO, 2021; ASTM, 2021).

A Figura 49 mostra a temperatura de falha, que é a temperatura na qual pelo menos um dos parâmetros (S ou valor-m) não satisfaz a especificação, e a última temperatura que ambos os parâmetros satisfazem as especificações simultaneamente (temperatura que passa). O grau de desempenho (PG, Performance Grade) em baixa temperatura é definido como a última temperatura que passa subtraída de 10 °C. Os resultados são apresentados na Tabela 22.

A modificação com óleo de motor beneficiou o grau de desempenho do ligante asfalto-borracha em baixas temperaturas, evoluindo de -28 °C (sem óleo) para -34 °C com 10% de OLUC. A amostra de asfalto-borracha-OLUC com 5% de borracha tratada apresentou desempenho superior (-34 °C) comparado a amostra com 5% de borracha e modificação direta (-28 °C).

Figura 49 – Temperaturas de falha e última temperatura que passa

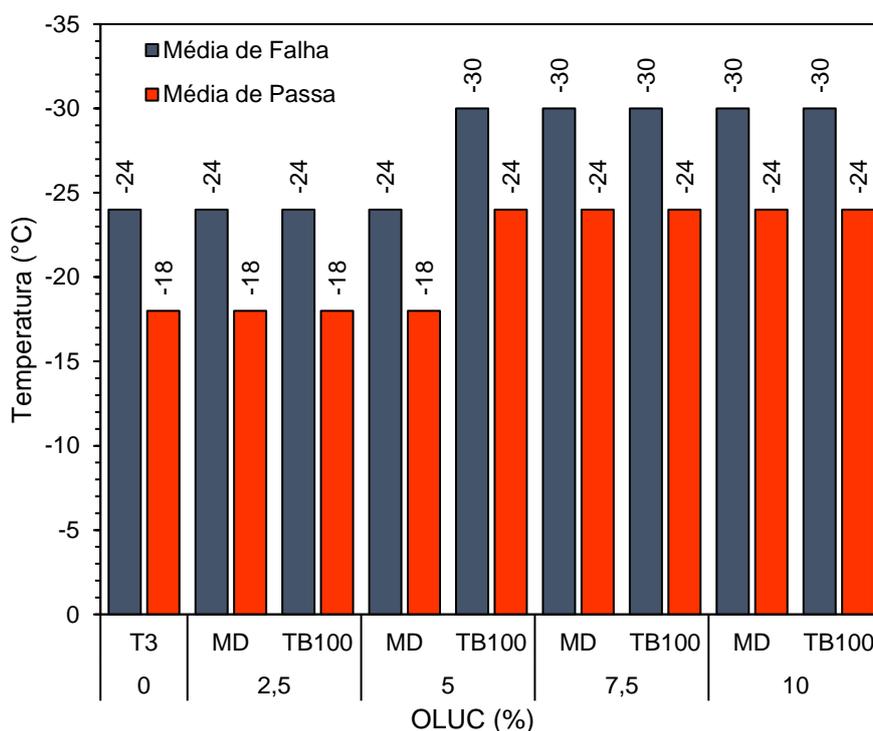


Tabela 22 – Grau de desempenho (PG) em baixa temperatura

Teor de OLUC (%)	MD	TB100
2,5	-28	-28
5,0	-28	-34
7,5	-34	-34
10,0	-34	-34
<b>Testemunha</b>	-28	

Testemunha: asfalto-borracha sem adição de OLUC; MD: modificação direta; TB100: tratamento da borracha (100 °C, 1 h).

#### 4.7 VARIAÇÃO DE MASSA

A variação de massa no ensaio de envelhecimento em curto prazo ocorre devido a alterações de massa causadas por evaporação de frações leves e/ou devido a reações de oxidação entre as moléculas de asfalto e oxigênio. Como resultado, pode haver ganho ou perda de massa. O resultado da variação de massa pode ser visualizado na Figura 50 e na Tabela 23.

A adição de OLUC ao asfalto-borracha aumentou a variação de massa à medida que crescia o teor de OLUC adicionado. Esse resultado decorre da presença de maior quantidade de frações leves do OLUC, as quais acabam evaporando durante o processo.

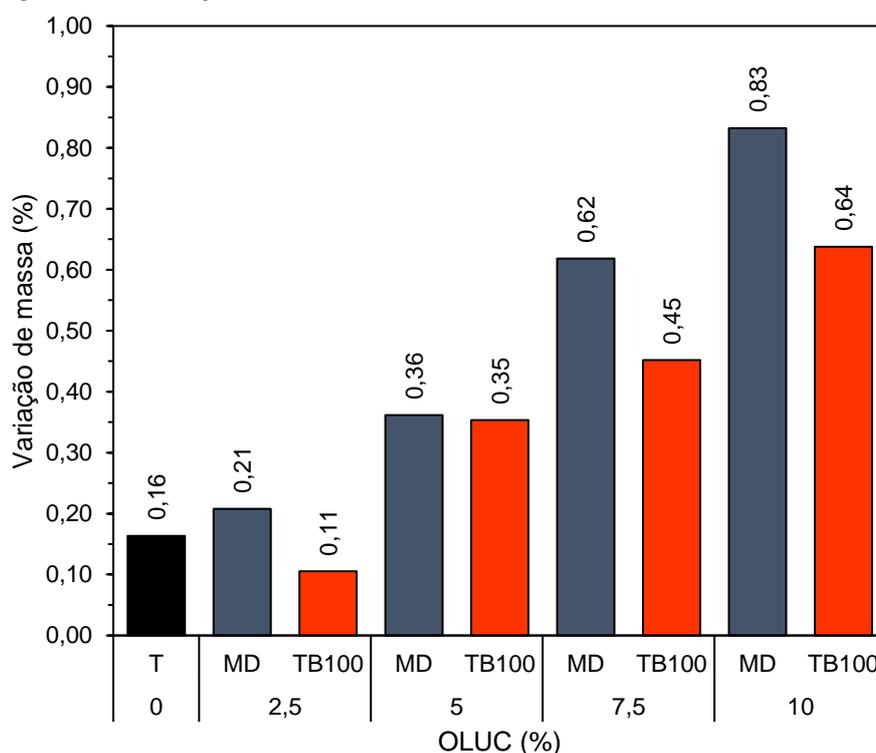
A norma DNIT 111 especifica que a variação de massa para o asfalto-borracha deve ser inferior a 1%. Assim, apesar do OLUC elevar a variação de massa, todas as amostras avaliadas atenderam a especificação.

Tabela 23 – Variação de massa média (%)

OLUC (%)	MD	$\Delta\%_T$	TB100	$\Delta\%_T$
2,5	0,21	27%	0,11	36%
5,0	0,36	121%	0,35	116%
7,5	0,62	279%	0,45	177%
10,0	0,83	410%	0,64	290%
Testemunha	0,16			

Testemunha: asfalto-borracha sem OLUC; MD: modificação direta; TB100: tratamento da borracha (100 °C, 1 h);  $\Delta\%_T$ : Variação percentual em relação à testemunha.

Figura 50 – Variação de massa



A análise de variância mostrou que as variações de massa apresentaram diferença estatística devido ao teor de OLUC e ao tipo de modificação (valores- $p < 0,05$ , Tabela A - 121). As análises Post Hoc revelaram que as variações de massa apresentaram diferença estatística para todos os teores de OLUC avaliados (valores- $p_{Tukey} < 0,05$ , Tabela A - 123), e elevar a dosagem de óleo de motor aumentou a variação de massa (Figura A - 71), esse resultado é um indicativo da redução da durabilidade devido à adição de OLUC.

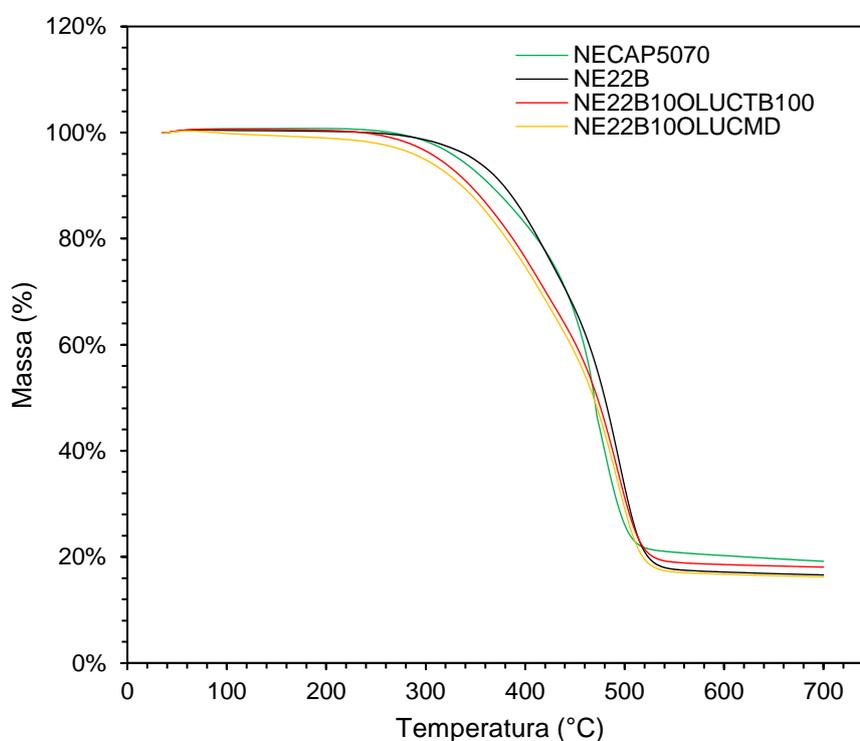
Por outro lado, o tratamento da borracha foi significativo na redução da variação de massa (valor- $p_{tukey} < 0,05$ , Tabela A - 122; Figura A - 70), mitigando os efeitos negativos do envelhecimento.

#### 4.8 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

A análise termogravimétrica é uma análise térmica que permite avaliar a variação de massa (ganho ou perda) dos materiais em função da temperatura em ambiente controlado. O ensaio pode ser utilizado para avaliação da estabilidade térmica dos resíduos e das amostras de ligante nas temperaturas de trabalho do asfalto.

A Figura 51 mostra a TGA das amostras avaliadas. A presença do OLUC parece alterar levemente o comportamento da curva TGA, porém do ponto de vista prático, não tem efeito significativo na estabilidade térmica, visto que as temperaturas de produção e compactação da mistura asfáltica são inferiores à faixa aproximada de decomposição térmica (220 °C à 520 °C) dos ligantes.

Figura 51 – Análise termogravimétricas das amostras de ligante



A Figura 52 apresenta a DTG das amostras de ligante. Os picos de degradação máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ) são apresentados na Tabela 24. Os resultados indicam que a

modificação com a borracha e OLUC acabou sendo positiva para a estabilidade térmica das amostras, visto que as temperaturas são superiores ao do CAP 50/70.

Figura 52 – Termogravimetria derivada das amostras de ligante

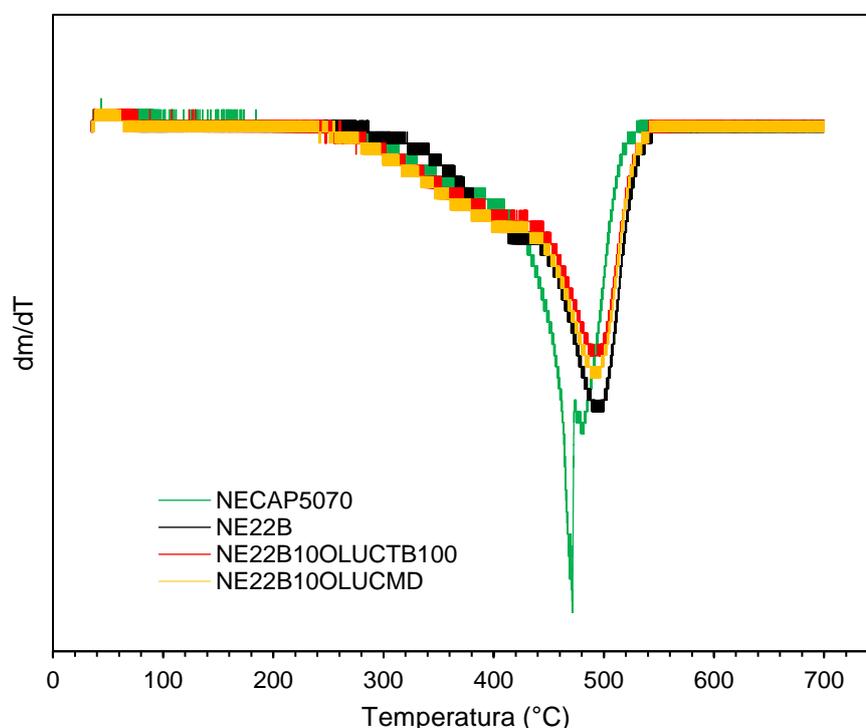


Tabela 24 – Picos de degradação máxima (T<sub>máx</sub>)

Amostra	Temperatura aproximada (°C)
NECAP5070	470
NE22B	495
NE22B10OLUCMD	495
NE22B10OLUCTB100	495

A Figura 53 e a Figura 54 apresentam, respectivamente, os resultados da TGA e DTG para os resíduos. A curva TGA mostra que o OLUC tem menor estabilidade térmica, quando comparado com a borracha, com início da degradação em temperaturas inferiores e maior perda de massa.

A DTG mostra que o pico de degradação do OLUC ocorre na temperatura aproximada de 370 °C. A borracha apresenta dois picos de degradação em temperaturas superiores (aproximadamente 395 °C e 480 °C), confirmando que o OLUC tem menor estabilidade térmica.

Figura 53 – Análise termogravimétrica dos resíduos

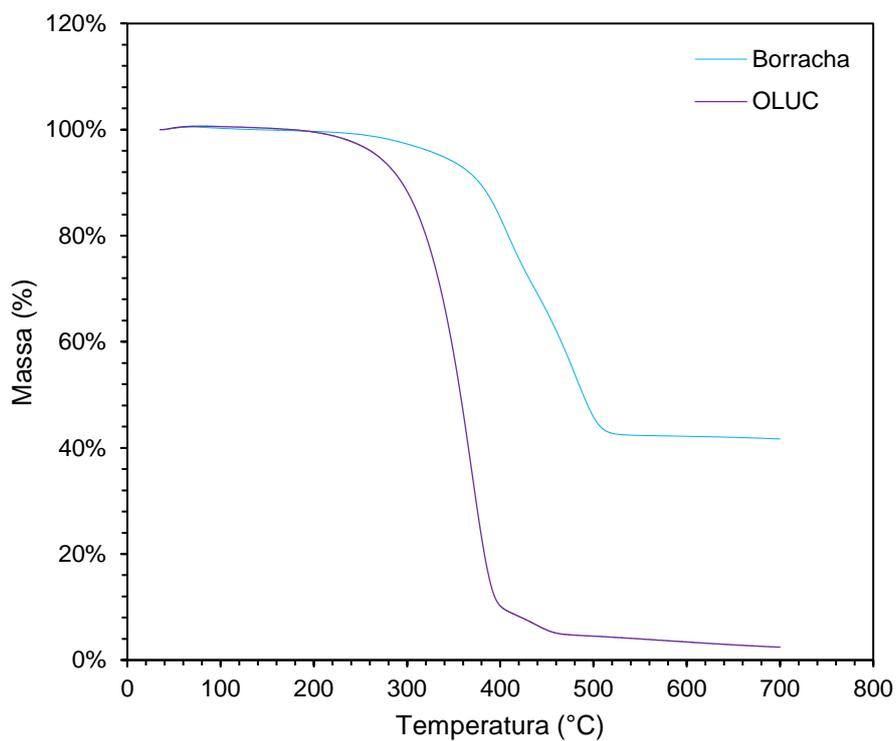
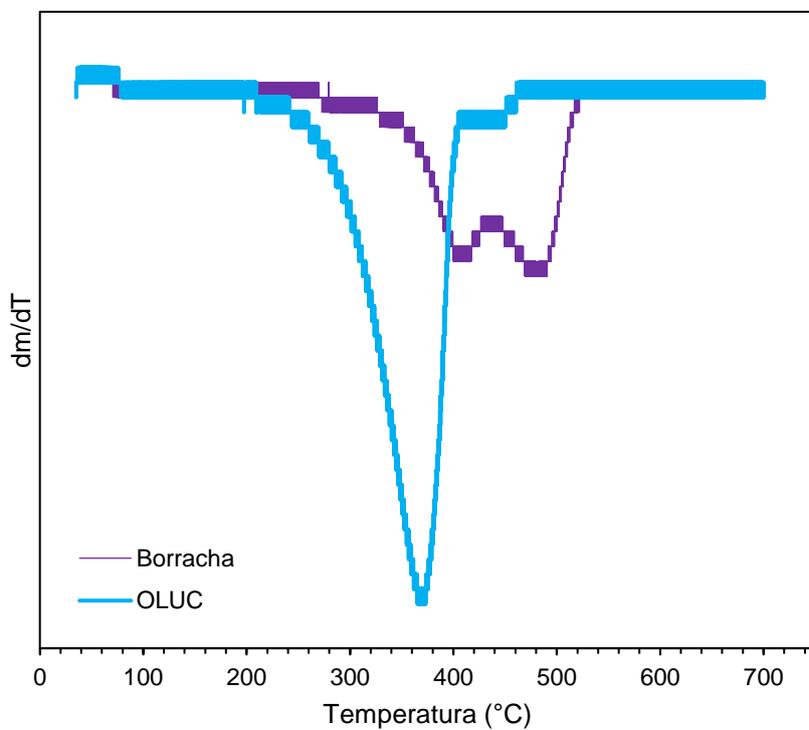


Figura 54 – Termogravimetria derivada dos resíduos



## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar a utilização do óleo lubrificante usado ou contaminado (OLUC) como agente redutor de viscosidade de um ligante asfalto-borracha produzido com elevada quantidade de borracha. Os efeitos de quatro teores de OLUC (2,5; 5,0; 7,5 e 10%) e dois tipos de modificação (modificação direta e tratamento da borracha) nas propriedades do ligante asfalto-borracha foram avaliados antes e depois do envelhecimento de curto e de longo prazo por meio dos ensaios de penetração, ponto de amolecimento, ponto de fulgor, viscosidade rotacional, cisalhamento dinâmico e fluência em viga. O estudo chegou às seguintes conclusões:

- O óleo de motor usado ou contaminado foi capaz de reduzir a viscosidade do asfalto-borracha, sem diferença estatística entre tratamentos. Nesse sentido, os principais mecanismos de redução da viscosidade ocorreram pela diferença relativa de viscosidade entre o asfalto-borracha e o OLUC, pela reposição das frações leves do asfalto, que são absorvidas pela borracha durante a reação de inchamento, e pela lubrificação das partículas de borracha devido a presença de OLUC na mistura.
- A utilização do óleo lubrificante usado ou contaminado afetou de forma negativa a estabilidade térmica do ligante asfalto-borracha. O ponto de fulgor foi reduzido devido à maior volatilidade do OLUC em relação ao asfalto. As amostras modificadas com OLUC apresentaram elevada emissão de fumos. Além disso, a dissolução da borracha pode estar ocorrendo em temperaturas inferiores às usuais devido à presença de OLUC e os gases emanados nesse processo podem estar contribuindo para a redução do ponto de fulgor.
- O OLUC diminuiu o ponto de amolecimento, o módulo complexo ( $G^*$ ) e elevou o ângulo de fase ( $\delta$ ) das amostras. Como consequência, acabou comprometendo o desempenho do ligante asfalto-borracha em altas temperaturas, reduzindo sua resistência ao acúmulo de deformações permanentes. No entanto, mesmo para 10% de adição de OLUC, o desempenho do asfalto-borracha-OLUC ainda foi superior ao do CAP 50/70 convencional.
- A redução do módulo complexo no ensaio de fadiga e a elevação da penetração indicam que o amolecimento do asfalto-borracha, causado pela adição de OLUC, melhora o desempenho do ligante em temperaturas intermediárias. O ligante asfalto-borracha-OLUC apresentou maior resistência ao trincamento por fadiga.
- O OLUC reduziu a rigidez estática e elevou o módulo de relaxação do asfalto-borracha, melhorando sua performance em baixas temperaturas. As amostras de

asfalto-borracha-OLUC são menos susceptíveis ao surgimento de trincas por retração térmica.

- O tratamento da borracha se mostrou mais eficiente do que a modificação direta na redução da rigidez das amostras envelhecidas. Esse resultado pode ser um indício de que o tratamento da borracha com OLUC pode estar colaborando com a dissolução e liberação dos compostos poliméricos da borracha e de parte do OLUC absorvido para o asfalto após o envelhecimento;
- A maior variação de massa e dos índices físicos e reológicos após o envelhecimento mostrou que o OLUC compromete a durabilidade do asfalto-borracha. As amostras modificadas com o resíduo de óleo de motor são menos resistentes aos efeitos do envelhecimento. Ainda assim, os valores obtidos para a penetração retida, variação do ponto de amolecimento e variação de massa, respeitaram os valores limite estabelecidos nas especificações. O tratamento da borracha mitigou a agressividade do envelhecimento, reduzindo a variabilidade das propriedades do asfalto-borracha com o envelhecimento. Esse resultado pode ser um indicativo de que o OLUC absorvido pela borracha durante o tratamento sofre menor volatilização e acaba sendo liberado na matriz asfáltica após o envelhecimento.

O Quadro 4 apresenta um resumo das propriedades do CAP 50/70 modificado com 22% de borracha e diferentes percentuais de OLUC.

Quadro 4 – Resumo das propriedades

Propriedade	OLUC (%)	MD	TB	Especificação
Penetração a 25 °C (0,1 mm)	Testemunha	39 		30-70
	2,5	54 	54 	
	5,0	75 	76 	
	7,5	99 	101 	
	10,0	128 	131 	

Propriedade	OLUC (%)	MD	TB	Especificação
Ponto de amolecimento (°C)	Testemunha	64,0 		≥ 57
	2,5	60,2 	60,4 	
	5,0	55,8 	55,8 	
	7,5	52,7 	52,5 	
	10,0	48,9 	48,8 	
Viscosidade rotacional (175 °C, cP)	Testemunha	4540 		2200-4000
	2,5	3691 	3726 	
	5,0	3252 	3379 	
	7,5	2693 	2787 	
	10,0	2394 	2483 	
Ponto de fulgor (°C)	Testemunha	248 		≥ 235
	2,5	237 	239 	
	5,0	229 	235 	
	7,5	226 	227 	
	10,0	227 	229 	

Propriedade	OLUC (%)	MD	TB	Especificação
Variação de massa (%)	Testemunha	0,16 ✓		≤ 1,00
	2,5	0,21 ✓	0,11 ✓	
	5,0	0,36 ✓	0,35 ✓	
	7,5	0,62 ✓	0,45 ✓	
	10,0	0,83 ✓	0,64 ✓	
Variação do ponto de amolecimento, (°C)	Testemunha	6,6 ✓		≤ 10
	2,5	5,8 ✓	4,0 ✓	
	5,0	6,0 ✓	3,9 ✓	
	7,5	5,9 ✓	6,2 ✓	
	10,0	6,3 ✓	6,4 ✓	
Porcentagem de penetração original (%)	Testemunha	84 ✓		≥ 55
	2,5	78 ✓	85 ✓	
	5,0	74 ✓	76 ✓	
	7,5	74 ✓	73 ✓	
	10,0	69 ✓	69 ✓	

Propriedade	OLUC (%)	MD	TB	Especificação
Grau de desempenho (PG)	Testemunha	PG 88-28		<b>PG alta temp.</b> $G^*/\text{sen}(\delta) \geq 1,0$ kPa (NE) e $G^*/\text{sen}(\delta) \geq 2,2$ kPa (RTFOT)
	2,5	PG 82-28	PG 82-28	
	5,0	PG 76-28	PG 82-34	<b>PG baixa temp.</b> $S \leq 300$ MPa e valor-m $\geq 0,300$
	7,5	PG 76-34	PG 76-34	
	10,0	PG 70-34	PG 70-34	

*Testemunha: asfalto-borracha sem adição de OLUC;*

*PG em alta temperatura definido com base nos resultados do parâmetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$  para amostras não envelhecidas e envelhecidas no RTFOT;*

*PG em baixa temperatura definido com base nos resultados dos parâmetros S e valor-m para amostras envelhecidas no PAV*

*Especificação para cimento asfáltico modificado com borracha: DNIT 111;*

*Especificação para determinação do grau de desempenho: AASHTO M320 e ASTM D6373*

Portanto, o OLUC pode ser utilizado como óleo extensor para redução da viscosidade do ligante asfalto-borracha, entretanto deve ser utilizado em pequenas quantidades, pois teores mais elevados podem comprometer o desempenho em altas temperaturas, a estabilidade térmica e a durabilidade do asfalto-borracha. De todos os teores avaliados na pesquisa, a dose de 2,5% de OLUC atendeu todas as especificações da DNIT 111 para asfalto-borracha do tipo AB22.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliação do efeito do tratamento da borracha para diferentes condições: maior tempo de absorção em temperatura ambiente, maior tempo e temperatura de reação em estufa e diferentes temperaturas de modificação com o asfalto;
- Produção de um agente rejuvenescedor pelo tratamento da borracha com OLUC em elevadas temperaturas e diferentes proporções para recuperação e melhora das propriedades de ligantes envelhecidos;
- Avaliar o desempenho de um concreto asfáltico produzido com ligante asfalto-borracha-OLUC pelo método úmido e comparar com um concreto asfáltico produzido com a incorporação direta da borracha tratada com OLUC à mistura asfáltica pelo método a seco.



AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T315**: Standard method of test for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer (DSR). Washington: AASHTO, 2020.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE AND HIGHWAY TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T316**: Standard method of test for viscosity determination of asphalt binder using rotational viscometer. Washington: AASHTO, 2019b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D2872**: Standard test method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin-film oven test). West Conshohocken: ASTM International, 2019a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D36**: Standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus). West Conshohocken: ASTM International, 2020b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D4402**: Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer. West Conshohocken: ASTM International, 2015a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D5**: Standard test method for penetration of bituminous materials. West Conshohocken: ASTM International, 2020a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6373**: Standard specification for performance graded asphalt binder. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6521**: Standard practice for accelerated aging of asphalt binder using a pressurized aging vessel (PAV). West Conshohocken: ASTM International, 2019b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6648**: Standard test method for determining the flexural creep stiffness of asphalt binder using the bending beam rheometer (BBR). West Conshohocken: ASTM International, 2016b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D7175**: Standard test method for determining the rheological properties of asphalt binder using a dynamic shear rheometer. West Conshohocken: ASTM International, 2015b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D92**: Standard test method for flash and fire points by Cleveland open cup tester. West Conshohocken: ASTM International, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2550**: Standard test method for thermal stability by thermogravimetry. West Conshohocken: ASTM International, 2021.

ANSARI, A. H. et al. Natural rubber as a renewable and sustainable bio-modifier for pavement applications: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, p. 125727, mar.

2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125727>. Acesso em: 21 set. 2021.

ASPHALT INSTITUTE. **The asphalt handbook**. Manual series n. 4. 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: Resíduos sólidos - classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11341**: Derivados de petróleo: determinação dos pontos de fulgor e de combustão em vaso aberto Cleveland. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

BAI, T. et al. Rejuvenation of short-term aged asphalt-binder using waste engine oil. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 47, n. 7, p. 822–832, jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/cjce-2019-0268>. Acesso em: 21 set. 2021.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projeto e restauração. 1. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2007.

BEHNOOD, A. Application of rejuvenators to improve the rheological and mechanical properties of asphalt binders and mixtures: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 171–182, set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.209>. Acesso em: 21 set. 2021.

BEHNOOD, A.; MODIRI GHAREHVERAN, M. Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders. **European Polymer Journal**, v. 112, p. 766–791, mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049>. Acesso em: 21 set. 2021.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. 3. ed. Rio de Janeiro: Abeda, 2008. Disponível em: <http://www.abeda.org.br/livro-pavimentacao/>. Acesso em: 21 set. 2021.

BILEMA, M. et al. Performance of Aged Asphalt Binder Treated with Various Types of Rejuvenators. **Civil Engineering Journal**, v. 7, n. 3, p. 502–517, 1 mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.28991/cej-2021-03091669>. Acesso em: 21 set. 2021.

BRANCO, F. et al. **Pavimentos rodoviários**. Coimbra: Almedina, 2016.

BRESSI, S. et al. Crumb Rubber Modifier in Road Asphalt Pavements: State of the Art and Statistics. **Coatings**, v. 9, n. 6, p. 384, 13 jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings9060384>. Acesso em: 21 set. 2021.

CHEN, Z. et al. High temperature rheological characteristics of activated crumb rubber modified asphalts. **Construction and Building Materials**, v. 194, p. 122–131, jan. 2019a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.223>. Acesso em: 21 set. 2021.

CHEN, Z. et al. Low Temperature and Fatigue Characteristics of Treated Crumb Rubber Modified Asphalt after a Long Term Aging Procedure. **Journal of Cleaner Production**, vol. 234, outubro de 2019b, p. 1262–74. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.147>. Acesso em: 20 jun. 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Boletim estatístico**: janeiro de 2019. CNT, 2019a. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/boletins>. Acesso em: 21 set. 2021.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES. **Óleos lubrificantes automotivos**: uso e destinação adequada. CNT, 2019b. Disponível em: <https://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/303>. Acesso em: 21 set. 2021.

DEEF-ALLAH, E. et al. Balancing the Performance and Environmental Concerns of Used Motor Oil as Rejuvenator in Asphalt Mixes. **Recycling**, v. 4, n. 1, p. 11, 23 fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/recycling4010011>. Acesso em: 21 set. 2021.

DEEF-ALLAH, E.; ABDELRAHMAN, M. Effect of used motor oil as a rejuvenator on crumb rubber modifier's released components to asphalt binder. **Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology**, v. 37, n. 2, p. 87–114, maio 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1477760620918600>. Acesso em: 21 set. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 095**: Cimentos asfálticos de petróleo: especificação de material. Rio de Janeiro: Ipr, 2006. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-material-em/dnit\\_095\\_2006\\_em.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-material-em/dnit_095_2006_em.pdf). Acesso em: 21 set. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 129**: Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico: especificação de material. Rio de Janeiro: Ipr, 2011. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-material-em/dnit\\_129\\_2011\\_em.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-material-em/dnit_129_2011_em.pdf). Acesso em: 21 set. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 131**: Materiais asfálticos: determinação do ponto de amolecimento: método do Anel e Bola: método de ensaio. Rio de Janeiro: Ipr, 2010a. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit\\_131\\_2010\\_me.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit_131_2010_me.pdf). Acesso em: 21 set. 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 155**: Material asfáltico: determinação da penetração: método de ensaio. Rio de Janeiro: Ipr, 2010b. Disponível em: [https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit155\\_2010\\_me.pdf](https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dnit155_2010_me.pdf). Acesso em: 21 set. 2021.

DONG, R. et al. **Influence of Activating Agent on the Performance of Waste Crumb Rubber Modified Asphalt**. Transportation Research Congress 2017. **Anais...** In: TRANSPORTATION RESEARCH CONGRESS 2017. Beijing, China: American Society of Civil Engineers, 3 out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/9780784482513.019>. Acesso em: 21 set. 2021.

ELEYEDATH, A.; SWAMY, A. K. Use of waste engine oil in materials containing asphaltic components. In: **Eco-Efficient Pavement Construction Materials**. [s.l.] Elsevier, 2020. p. 33–50. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818981-8.00003-5>. Acesso em: 21 set. 2021.

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, set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.180>. Acesso em: 21 set. 2021.

FERNANDES, S. et al. Effect of incorporating different waste materials in bitumen. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, v. 29, n. 1, p. e204–e209, jan. 2017a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ctmat.2016.07.003>. Acesso em: 21 set. 2021.

FERNANDES, S. et al. Improving Asphalt Mixture Performance by Partially Replacing Bitumen with Waste Motor Oil and Elastomer Modifiers. **Applied Sciences**, v. 7, n. 8, p. 794, 5 ago. 2017b. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app7080794>. Acesso em: 21 set. 2021.

FERNANDES, S. R. M.; SILVA, H. M. R. D.; OLIVEIRA, J. R. M. Developing enhanced modified bitumens with waste engine oil products combined with polymers. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 714–724, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.112>. Acesso em: 21 set. 2021.

GUIMARÃES, M. E. **Efeito da adição de resíduos de polietileno de alta densidade e borracha de pneus em ligante asfáltico 50/70**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Foz do Iguaçu-PR, 2019. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/5212>. Acesso em: 21 set. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Manual de procedimentos para fiscalização das atividades relacionadas a óleos lubrificantes usados ou contaminados**: Resolução Conama nº 362/2005 / Diqua. – Brasília: IBAMA, 2008. Disponível em: <https://static-sindirrefino-prod.s3.amazonaws.com/upload/manuaisetreinamentos/00001457.pdf>. Acesso em: 21 set. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Óleos lubrificantes**. IBAMA, 2021a. Disponível em: [http://www.ibama.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=728&catid=124&Itemid=601](http://www.ibama.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=728&catid=124&Itemid=601). Acesso em: 21 set. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatório de pneumáticos**: Resolução Conama nº 416/09: 2020 (ano-base 2019). Brasília: IBAMA, 2021b. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/relatorios/pneumaticos/relatorio-de-pneumaticos>. Acesso em: 21 set. 2021.

JAHANBAKSH, H. et al. Sustainable asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavements and recycling agents: Performance assessment, cost analysis, and environmental impact. **Journal of Cleaner Production**, v. 244, p. 118837, jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118837>. Acesso em: 21 set. 2021.

JIA, X. et al. Infrared spectra and rheological properties of asphalt cement containing waste engine oil residues. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 683–691, jan.

2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.012>. Acesso em: 21 set. 2021.

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, jan. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2008.08.011>. Acesso em: 21 set. 2021.

LI, H. et al. Effect of Waste Engine Oil and Waste Cooking Oil on Performance Improvement of Aged Asphalt. **Applied Sciences**, v. 9, n. 9, p. 1767, 28 abr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app9091767>. Acesso em: 21 set. 2021.

LI, J. et al. Surface activation of scrap tire crumb rubber to improve compatibility of rubberized asphalt. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 169, p. 105518, jun. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105518>. Acesso em: 21 set. 2021.

LI, Y. et al. Ground tire rubber thermo-mechanically devulcanized in the presence of waste engine oil as asphalt modifier. **Construction and Building Materials**, v. 222, p. 588–600, out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.162>. Acesso em: 21 set. 2021.

LIU, S. et al. Evaluation of rheological characteristics of asphalt modified with waste engine oil (WEO). **Petroleum Science and Technology**, v. 36, n. 6, p. 475–480, 19 mar. 2018a. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10916466.2018.1430157>. Acesso em: 21 set. 2021.

LIU, S. et al. Evaluation of the ageing behaviour of waste engine oil-modified asphalt binders. **Construction and Building Materials**, v. 223, p. 394–408, out. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.020>. Acesso em: 21 set. 2021.

LIU, S. et al. Waste engine oil influences on chemical and rheological properties of different asphalt binders. **Construction and Building Materials**, v. 191, p. 1210–1220, dez. 2018b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.126>. Acesso em: 21 set. 2021.

LO PRESTI, D. Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. **Construction and Building Materials**, v. 49, p. 863–881, dez. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>. Acesso em: 21 set. 2021.

MAKOUNDOU, C. et al. Functionalization of Crumb Rubber Surface for the Incorporation into Asphalt Layers of Reduced Stiffness: An Overview of Existing Treatment Approaches. **Recycling**, v. 6, n. 1, p. 19, 8 mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/recycling6010019>. Acesso em: 21 set. 2021.

MOHAJERANI, A. et al. Recycling waste rubber tyres in construction materials and associated environmental considerations: A review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, p. 104679, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104679>. Acesso em: 21 set. 2021

MOHD HASAN, M. R. et al. Review of sustainability, pretreatment, and engineering considerations of asphalt modifiers from the industrial solid wastes. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, v. 6, n. 3, p. 209–244, jun. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.08.001>. Acesso em: 21 set. 2021.

MORILHA JUNIOR, A. **Estudo sobre a ação de modificadores no envelhecimento dos ligantes asfálticos e nas propriedades mecânicas e de fadiga das misturas asfálticas**. 2004. 165 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/87049>. Acesso em: 21 set. 2021.

NANJEGOWDA, V. H.; BILIGIRI, K. P. Recyclability of rubber in asphalt roadway systems: A review of applied research and advancement in technology. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 155, p. 104655, abr. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104655>. Acesso em: 21 set. 2021.

NOUALI, M.; DERRICHE, Z.; GHORBEL, E. Effect of Used Engine Oil Addition on the Rheological Properties of a Plastic Bag Waste–Modified 40/50 Grade Bitumen. **Journal of Materials in' Civil Engineering**, v. 33, n. 3, p. 04020484, mar. 2021. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003533](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003533). Acesso em: 21 set. 2021.

ODA, S. **Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-30012018-151928/pt-br.php>. Acesso em: 21 set. 2021.

PETROBRAS. **Óleos básicos lubrificantes**: informações técnicas. 2019. Disponível em: <http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciaticnica/public/downloads/Manual-de-Oleos-Basicos-Lubrificantes.pdf>. Acesso em: 21 set. 2021.

PINTO, S; PINTO, I. E. **Pavimentação asfáltica**: conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

QURASHI, I. A.; SWAMY, A. K. Viscoelastic properties of recycled asphalt binder containing waste engine oil. **Journal of Cleaner Production**, v. 182, p. 992–1000, maio 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.237>. Acesso em: 21 set. 2021.

RAGAB, M.; ABDELRAHMAN, M. Investigation of the Physical and Molecular Properties of Asphalt Binders Processed with Used Motor Oils. **Journal of Materials**, v. 2015, p. e632534, 21 dez. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2015/632534>. Acesso em: 21 set. 2021.

READ, J.; WHITEOAK, D. **The Shell Bitumen Handbook**. 5. ed. Londres: Thomas Telford, 2003.

REIS, P. **Análise do comportamento do asfalto-borracha modificado com óleo vegetal visando a redução da viscosidade**. Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Foz do Iguaçu, 2020.

Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/5966?locale-attribute=en>. Acesso em: 21 set. 2021.

REN, S. et al. Investigating the effects of waste oil and styrene-butadiene rubber on restoring and improving the viscoelastic, compatibility, and aging properties of aged asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 269, p. 121338, fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121338>. Acesso em: 21 set. 2021.

ROBERTS, F., L et al. **Hot mix asphalt materials, mixture, design, and construction**. Lanham: NAPA, 1996.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Projeto programa piloto para a minimização dos impactos gerados por resíduos perigosos**: Documento 3 - gestão de óleo lubrificante automotivo usado em oficinas automotivas. Pernambuco, SENAI, 2006.

SHOUKAT, T.; YOO, P. J. Rheology of Asphalt Binder Modified with 5W30 Viscosity Grade Waste Engine Oil. **Applied Sciences**, v. 8, n. 7, p. 1194, 20 jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app8071194>. Acesso em: 21 set. 2021.

SHU, X.; HUANG, B. Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 217–224, set. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>. Acesso em: 21 set. 2021.

SILVA, H. M. R. D.; OLIVEIRA, J. R. M.; JESUS, C. M. G. Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving? **Resources, Conservation and Recycling**, v. 60, p. 38–48, mar. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.013>. Acesso em: 21 set. 2021.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO RERREFINO DE ÓLEOS MINERAIS. **A externalidade positiva da atividade de rerrefino**: efeitos sociais, ambientais e econômicos. São Paulo, SINDIRREFINO, 2018.

SOHN, H. **Gerenciamento de Óleos Lubrificantes Usados ou Contaminados**. São Paulo, GMP/SENAI, 2011. Disponível em: <https://static-sindirrefino-prod.s3.amazonaws.com/upload/manuaisetreinamentos/00001500.pdf>. Acesso em: 21 set. 2021.

SOUTHERN, M. A Perspective of Bituminous Binder Specifications. **Advances in Asphalt Materials**, Elsevier, 2015, p. 1–27. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100269-8.00001-5>. Acesso em: 24 jun. 2022.

SUBHY, A. Advanced analytical techniques in fatigue and rutting related characterisations of modified bitumen: Literature review. **Construction and Building Materials**, v. 156, p. 28–45, dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.147>. Acesso em: 21 set. 2021.

TAUSTE, R. et al. Understanding the bitumen ageing phenomenon: A review. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 593–609, dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.169>. Acesso em: 21 set. 2021.

TEYMOURPOUR, P., et al. Impacts of Lubricating Oils on Rheology and Chemical Compatibility of Asphalt Binders. **Road Materials and Pavement Design**, vol. 16, no sup1, maio de 2015, p. 50–74. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1030833>. Acesso em: 20 jun. 2022.

VAZQUEZ-DUHALT, R. Environmental impact of used motor oil. **Science of The Total Environment**, v. 79, n. 1, p. 1–23, fev. 1989. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(89\)90049-1](https://doi.org/10.1016/0048-9697(89)90049-1). Acesso em: 21 set. 2021.

VILLANUEVA, A., et al. Asphalt Modification with Used Lubricating Oil. **Canadian Journal of Civil Engineering**, vol. 35, no 2, fevereiro de 2008, p. 148–57. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/L07-092>. Acesso em: 20 jun. 2022.

WU, S.; MUHUNTHAN, B. Evaluation of the Effects of Waste Engine Oil on the Rheological Properties of Asphalt Binders. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 30, n. 3, p. 06017020, mar. 2018. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002189](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002189). Acesso em: 21 set. 2021.

XU, P. et al. Research on highly dissolved rubber asphalt prepared using a composite waste engine oil addition and microwave desulfurization method. **Construction and Building Materials**, v. 282, p. 122641, maio 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122641>. Acesso em: 21 set. 2021.

ZAHOOR, M. et al. Recycling asphalt using waste bio-oil: A review of the production processes, properties and future perspectives. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 147, p. 1135–1159, mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.01.032>. Acesso em: 21 set. 2021.

ZAUMANIS, M. et al. 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, nov. 2014a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073>. Acesso em: 21 set. 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, out. 2014b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.035>. Acesso em: 21 set. 2021.

ZHENG, W. et al. A review on compatibility between crumb rubber and asphalt binder. **Construction and Building Materials**, v. 297, p. 123820, ago. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123820>. Acesso em: 21 set. 2021

## APÊNDICE A – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

### CONFIGURAÇÃO DO EXPERIMENTO

Como as unidades experimentais (ligantes asfálticos) são similares, o delineamento experimental foi inteiramente ao acaso e os tratamentos foram designados às unidades experimentais por simples sorteio, ou seja, optou-se por um delineamento inteiramente casualizado (DIC).

Os fatores de avaliação são os teores de OLUC e o tipo de modificação/interação borracha-OLUC. Porém, para algumas propriedades do asfalto, há ainda um terceiro fator de interesse, que é o efeito do envelhecimento de curto prazo (RTFOT). Além disso, as amostras contendo apenas borracha, sem a adição de OLUC, são designadas apenas como amostras de controle ou testemunhas.

Dessa forma, para a análise de variância, serão consideradas duas configurações diferentes. A primeira será utilizada para avaliar as amostras não envelhecidas e envelhecidas no curto prazo (RTFOT). A segunda configuração será utilizada para avaliar o efeito dos fatores nas amostras envelhecidas no longo prazo (PAV).

Para a primeira configuração, será considerado um esquema fatorial triplo (fatores: %OLUC, tipo de modificação e condição de envelhecimento). Sendo, portanto, dois fatores qualitativos (forma de incorporação dos resíduos e condição de envelhecimento das amostras) e um quantitativo (teores de OLUC).

Na segunda configuração, para as amostras envelhecidas no longo prazo (PAV), os fatores avaliados serão teor de OLUC (quantitativo) e tipo de modificação (qualitativo). A análise de alguns ensaios como variação de massa e ponto de fulgor foram realizados nessa mesma configuração.

## VISCOSIDADE ROTACIONAL BROOKFIELD (175 °C)

Os resultados dos ensaios de viscosidade rotacional na temperatura de 175 °C, classificados por ordem de leitura, são apresentados na Tabela A - 1.

Tabela A - 1 – Viscosidade rotacional Brookfield (175 °C)

Ordem	Amostra	Condição	TM	OLUC (%)	Viscosidade rotacional (cP)	Resíduo
1	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	2350	-44,222
2	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	2450	-32,556
3	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	6667	-36,222
4	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	3393	141,667
5	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	3258	6,667
6	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	5743	196,889
7	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	4270	81,000
8	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	4284	94,667
9	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	2487	92,444
10	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	2346	-48,222
11	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	3953	-120,000
12	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	3547	167,667
13	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	5400	115,667
14	NE22B	NE	T1	0	4396	-143,778
15	NE22B	NE	T1	0	4757	216,889
16	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	5246	-38,000
17	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	3	3650	-41,000
18	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	3	3782	90,667
19	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	3	5947	-73,667
20	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	8	2800	107,444
21	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	8	4373	-117,778
22	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	8	2640	-52,556
23	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	8	4640	148,889
24	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	5383	-163,111
25	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	5513	-33,778
26	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	3	3783	56,889
27	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	3	5983	36,889
28	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	8	2655	-132,000
29	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	8	4727	26,556
30	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	8	4584	-116,444
31	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	3	3775	48,556
32	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	3	6077	130,222
33	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	8	2813	26,667
34	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	8	4790	89,889
35	NE22B	NE	T1	0	4467	-73,111
36	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	4013	-175,667
37	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	4130	56,667
38	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	3340	-39,000
39	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	3250	-128,667
40	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	5207	-77,667
41	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	3	3621	-105,444
42	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	3	5779	-167,111
43	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	3103	-148,333
44	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	8	2892	105,333
45	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	6697	-6,556
46	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	6746	42,778
47	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	3	3642	-49,667
48	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	3	6177	156,333
49	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	3	5938	-82,667
50	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	8	2638	-54,889
51	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	8	4460	-31,111
52	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	2560	77,444
53	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	2438	-44,889
54	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	4137	63,333

NE: amostra não envelhecida; RTFOT: amostra envelhecida no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: Tratamento da borracha com OLU (100 °C por 1 h); T1: Testemunha 1 (asfalto-borracha NE); T2: Testemunha 2 (asfalto-borracha RTFOT).

## PRESSUPOSTOS PARA REALIZAÇÃO DA ANOVA

Independência

Figura A - 1 – Resíduos padronizados ordenados

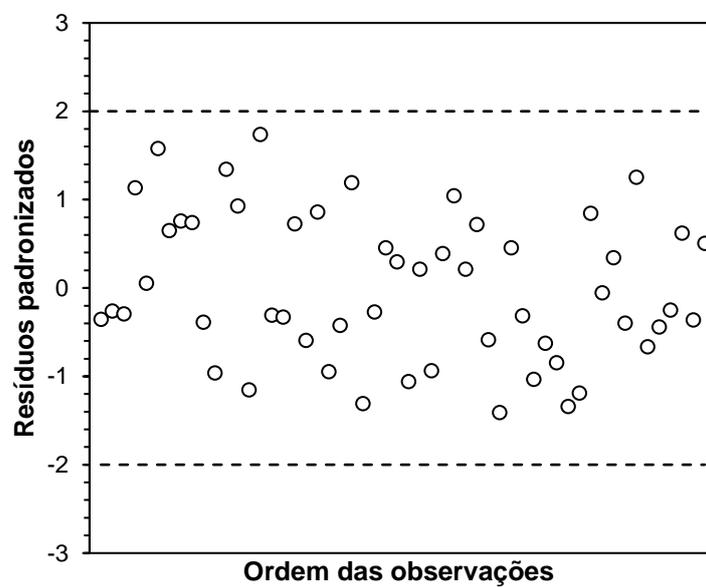


Tabela A - 2 – Teste de independência dos resíduos

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Durbin-Watson	D-stat	2,301	Os resíduos são independentes
	D-lower	1,523	
	D-upper	1,598	

*Critério:  $D_{lower} < D_{stat} < 4 - D_{upper}$*

$\alpha=0,05$

## Homogeneidade

Figura A - 2 – Desvio padrão em função da média

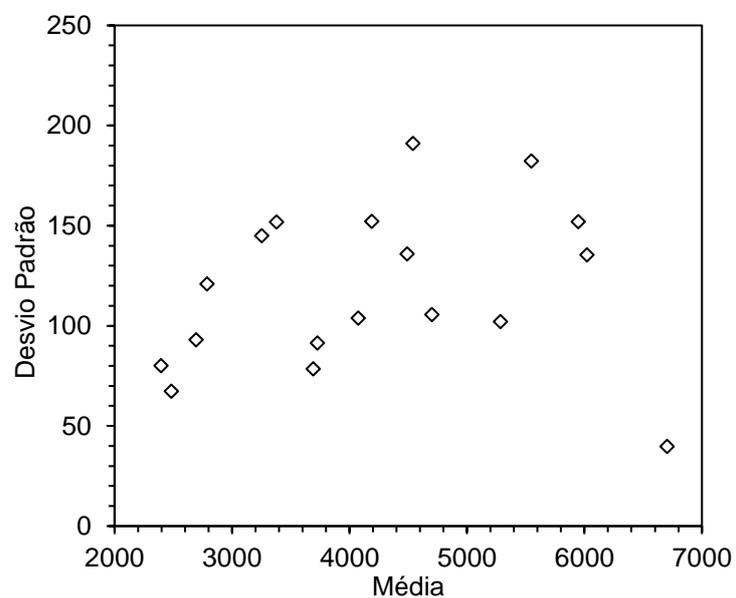


Tabela A - 3 – Teste de homogeneidade das variâncias

Teste	Parâmetro	Valor-p	Conclusão
Levene	Média	0,510	As variâncias dos resíduos são homogêneas
	Mediana	0,999	
	Média aparada	0,510	

*Critério: valor-p (média) >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## Normalidade

Figura A - 3 – Q-Q plot

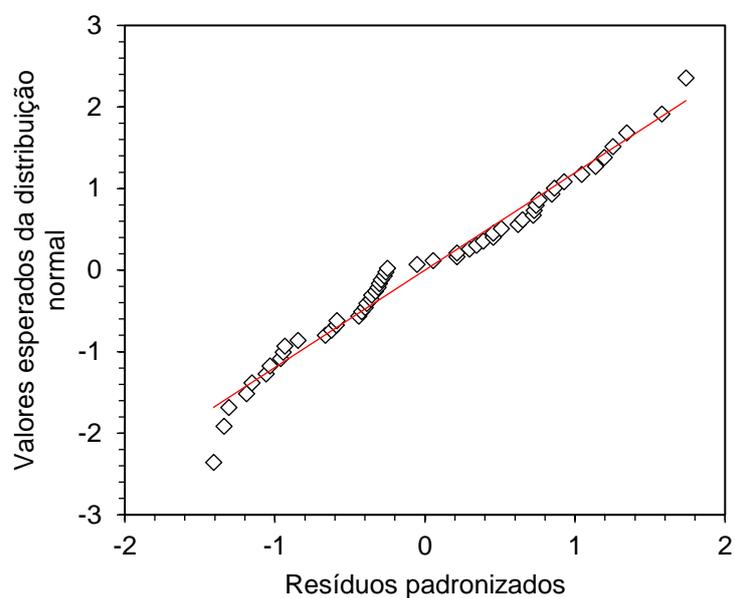


Tabela A - 4 – Teste de normalidade

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Shapiro-Wilk	W-stat	0,968	Os resíduos seguem uma distribuição normal
	Valor-p	0,156	

Critério:  $\text{valor-p} > \alpha$   
 $\alpha=0,05$

## ANOVA

Tabela A - 5 – ANOVA da viscosidade rotacional Brookfield (175 °C)

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Env	47086389.188	1	47086389.188	3113.338	< .001
T_Mod	1963.521	1	1963.521	0.130	0.721
%OLUC	17575166.729	3	5858388.910	387.355	< .001
Env * T_Mod	64753.521	1	64753.521	4.281	0.047
Env * %OLUC	597605.563	3	199201.854	13.171	< .001
T_Mod * %OLUC	82299.563	3	27433.188	1.814	0.164
Env * T_Mod * %OLUC	99280.229	3	33093.410	2.188	0.109
Resíduos	483970.667	32	15124.083		

Tabela A - 6 – Testes de comparações Post Hoc (interação Env x T\_Mod)

Comparação		Env	T_Mod	Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey	
NE	MD	-	NE	TB100	-86.250	50.206	32.000	-1.718	0.331
		-	RTFOT	MD	-2054.333	50.206	32.000	-40.918	< .001
		-	RTFOT	TB100	-1993.667	50.206	32.000	-39.709	< .001
	TB100	-	RTFOT	MD	-1968.083	50.206	32.000	-39.200	< .001
		-	RTFOT	TB100	-1907.417	50.206	32.000	-37.992	< .001
RTFOT	MD	-	RTFOT	TB100	60.667	50.206	32.000	1.208	0.626

Figura A - 4 – Viscosidade x Env

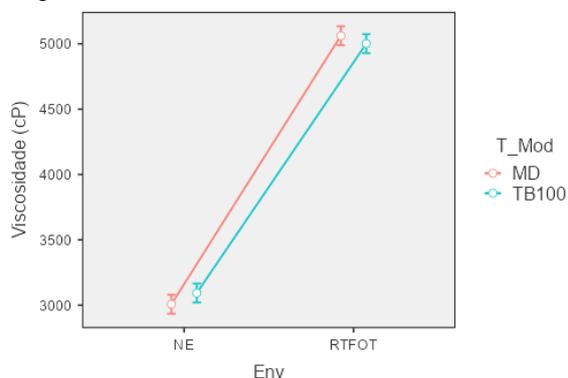


Figura A - 5 – Viscosidade x T\_Mod

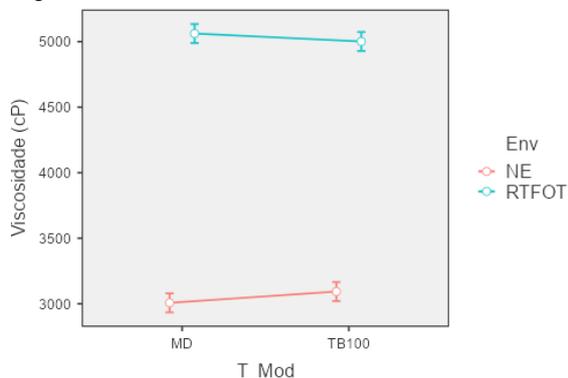


Tabela A - 7 – Testes de comparações Post Hoc (interação Env x %OLUC)

Comparação				Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey	
Env	%OLUC	Env	%OLUC						
NE	2.5	- NE	5.0	393.667	71.003	32.000	5.544	< .001	
		- NE	7.5	969.167	71.003	32.000	13.650	< .001	
		- NE	10.0	1270.333	71.003	32.000	17.891	< .001	
	- RTFOT	2.5	-2274.667	71.003	32.000	-32.036	< .001		
	- RTFOT	5.0	-1706.500	71.003	32.000	-24.034	< .001		
	- RTFOT	7.5	-886.833	71.003	32.000	-12.490	< .001		
	- RTFOT	10.0	-422.333	71.003	32.000	-5.948	< .001		
	5.0	- NE	7.5	575.500	71.003	32.000	8.105	< .001	
		- NE	10.0	876.667	71.003	32.000	12.347	< .001	
		- RTFOT	2.5	-2668.333	71.003	32.000	-37.581	< .001	
		- RTFOT	5.0	-2100.167	71.003	32.000	-29.579	< .001	
		- RTFOT	7.5	-1280.500	71.003	32.000	-18.035	< .001	
		- RTFOT	10.0	-816.000	71.003	32.000	-11.493	< .001	
	7.5	- NE	10.0	301.167	71.003	32.000	4.242	0.004	
		- RTFOT	2.5	-3243.833	71.003	32.000	-45.686	< .001	
		- RTFOT	5.0	-2675.667	71.003	32.000	-37.684	< .001	
- RTFOT		7.5	-1856.000	71.003	32.000	-26.140	< .001		
- RTFOT		10.0	-1391.500	71.003	32.000	-19.598	< .001		
- RTFOT		2.5	-3545.000	71.003	32.000	-49.928	< .001		
10.0	- RTFOT	5.0	-2976.833	71.003	32.000	-41.926	< .001		
	- RTFOT	7.5	-2157.167	71.003	32.000	-30.382	< .001		
	- RTFOT	10.0	-1692.667	71.003	32.000	-23.840	< .001		
	RTFOT	2.5	- RTFOT	5.0	568.167	71.003	32.000	8.002	< .001
			- RTFOT	7.5	1387.833	71.003	32.000	19.546	< .001
			- RTFOT	10.0	1852.333	71.003	32.000	26.088	< .001
5.0		- RTFOT	7.5	819.667	71.003	32.000	11.544	< .001	
		- RTFOT	10.0	1284.167	71.003	32.000	18.086	< .001	
		- RTFOT	10.0	464.500	71.003	32.000	6.542	< .001	

Figura A - 6 – Viscosidade x Env

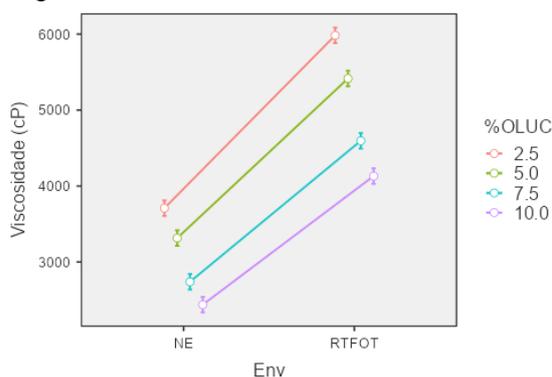
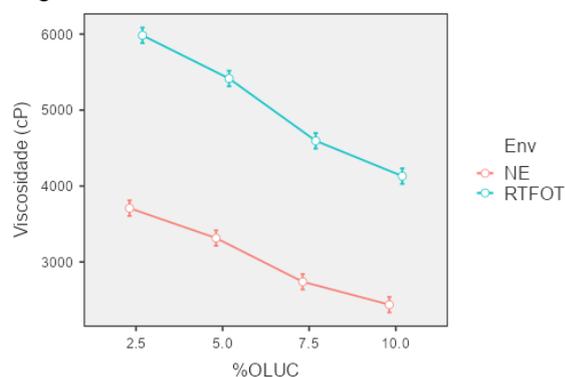


Figura A - 7 – Viscosidade x %OLUC



## ANÁLISE DA REGRESSÃO

Tabela A - 8 – Coeficientes do modelo linear (NE)

	Estimativa	Erro.padrao	tc	valor.p	R <sup>2</sup>
b0	4,147.1670	61.4900	67.4446	0	0.987130
b1	-175.4600	8.9812	-19.5364	0	

Tabela A - 9 – ANOVA da regressão (NE)

	GL	SQ	QM	Fc	valor.p
Efeito linear	1	5,772,415.0000	5,772,415.0000	381.67	0
Desvios de Regressao	2	75,260.7800	37,630.3900	2.49	0.099
Residuos	32	483,970.7000	15,124.0800		

**PENETRAÇÃO (25 °C)**

Os resultados do ensaio de penetração na temperatura de 25 °C são apresentados na Tabela A - 10.

Tabela A - 10 – Penetração a 25 °C

Ordem	Amostra	Condição	TM	OLUC (%)	Penetração (0,1 mm)	Resíduo
1	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	130	2,00
2	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	126	-2,00
3	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	134	2,67
4	NE22B	NE	T1	0	38	-1,11
5	NE22B	NE	T1	0	39	-0,11
6	NE22B	NE	T1	0	41	1,22
7	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	33	-0,22
8	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	71	-4,22
9	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	55	0,00
10	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	90	1,67
11	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	89	0,33
12	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	131	-0,33
13	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	89	-0,78
14	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	92	1,56
15	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	75	-1,11
16	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	58	0,00
17	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	32	-1,22
18	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	77	0,56
19	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	55	-3,00
20	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	54	-0,33
21	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	44	2,00
22	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	56	2,33
23	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	71	-1,89
24	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	72	-0,56
25	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	101	2,44
26	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	99	-0,22
27	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	75	2,44
28	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	57	2,00
29	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	78	3,11
30	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	76	1,11
31	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	54	-0,44
32	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	53	-1,11
33	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	46	-0,22
34	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	102	1,00
35	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	76	2,67
36	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	56	1,56
37	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	48	1,44
38	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	98	-3,00
39	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	73	-0,67
40	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	103	2,00
41	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	35	1,44
42	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	128	0,00
43	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	86	-2,00
44	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	129	-2,33
45	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	89	-0,78
46	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	77	0,56
47	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	61	3,00
48	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	45	-1,22
49	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	53	-2,00
50	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	71	-2,00
51	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	52	-2,00
52	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	42	-0,33
53	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	40	-1,67
54	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	97	-2,22

NE: amostra não envelhecida; RTFOT: amostra envelhecida no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: Tratamento da borracha com OLU (100 °C por 1 h); T1: Testemunha 1 (asfalto-borracha NE); T2: Testemunha 2 (asfalto-borracha RTFOT).

## PRESSUPOSTOS PARA REALIZAÇÃO DA ANOVA

Independência

Figura A - 8 – Resíduos padronizados ordenados

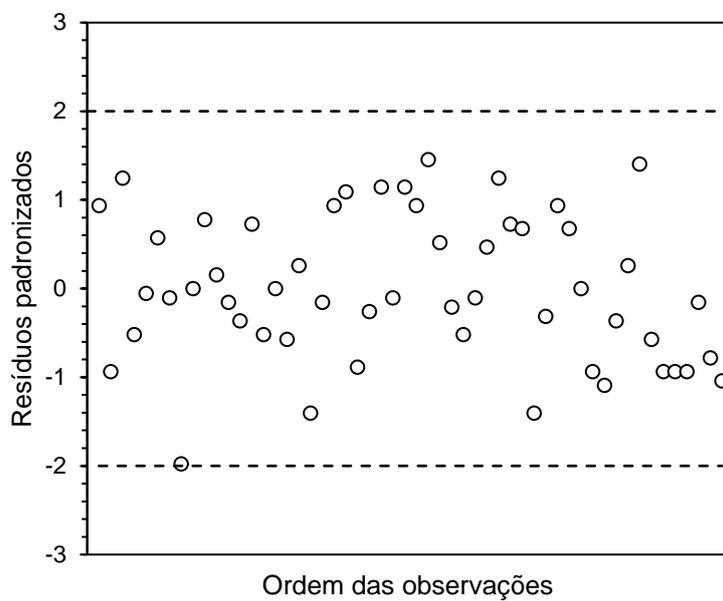


Tabela A - 11 – Teste de independência dos resíduos

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Durbin-Watson	D-stat	1,673	Os resíduos são independentes
	D-lower	1,523	
	D-upper	1,598	

*Critério:  $D_{lower} < D_{stat} < 4 - D_{upper}$*

$\alpha=0,05$

## Homogeneidade

Figura A - 9 – Desvio padrão em função da média

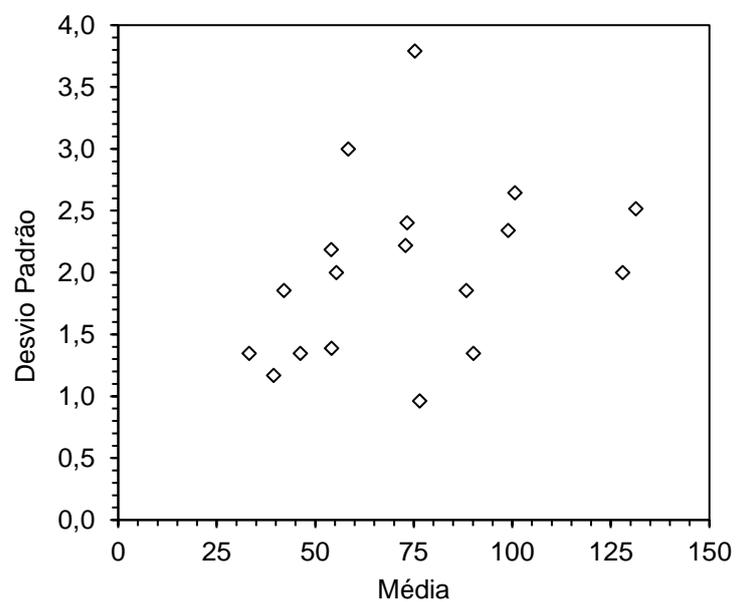


Tabela A - 12 – Teste de homogeneidade

Teste	Parâmetro	Valor-p	Conclusão
	Média	0,715	
Levene	Medianas	0,991	As variâncias dos resíduos são homogêneas
	Média aparada	0,715	

*Critério: valor-p (média) >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## Normalidade

Figura A - 10 – Q-Q plot

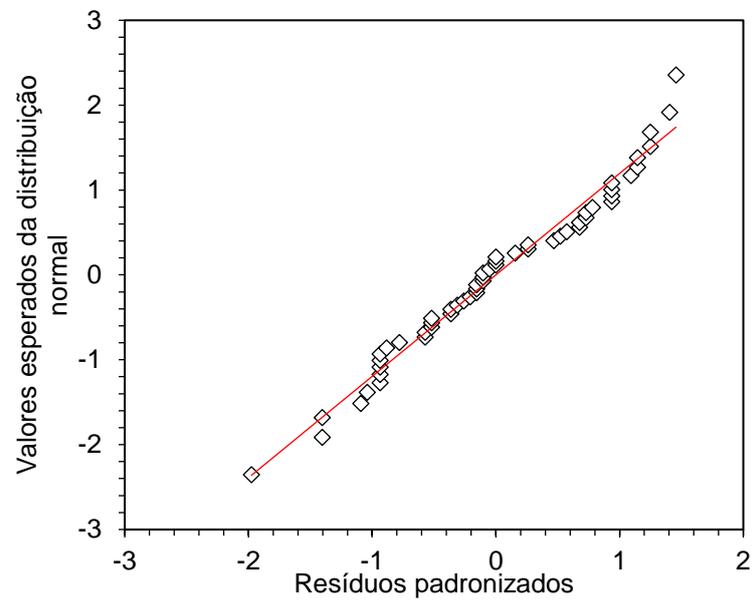


Tabela A - 13 – Teste de normalidade

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Shapiro-Wilk	W-stat	0,972	Os resíduos seguem uma distribuição normal
	Valor-p	0,236	

*Critério: valor-p >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## ANOVA

Tabela A - 14 – ANOVA da penetração (25 °C)

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Env	7008.333	1	7008.333	1413.445	< .001
T_Mod	52.083	1	52.083	10.504	0.003
%OLUC	24389.417	3	8129.806	1639.625	< .001
Env * T_Mod	1.333	1	1.333	0.269	0.608
Env * %OLUC	1501.500	3	500.500	100.941	< .001
T_Mod * %OLUC	2.417	3	0.806	0.162	0.921
Env * T_Mod * %OLUC	16.167	3	5.389	1.087	0.369
Resíduos	158.667	32	4.958		

Tabela A - 15 – Testes de comparações Post Hoc (efeito simples T\_Mod)

Comparação							
T_Mod	T_Mod	Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey	
MD	- TB100	-2.083	0.643	32.000	-3.241	0.003	

Figura A - 11 – Penetração x T\_Mod

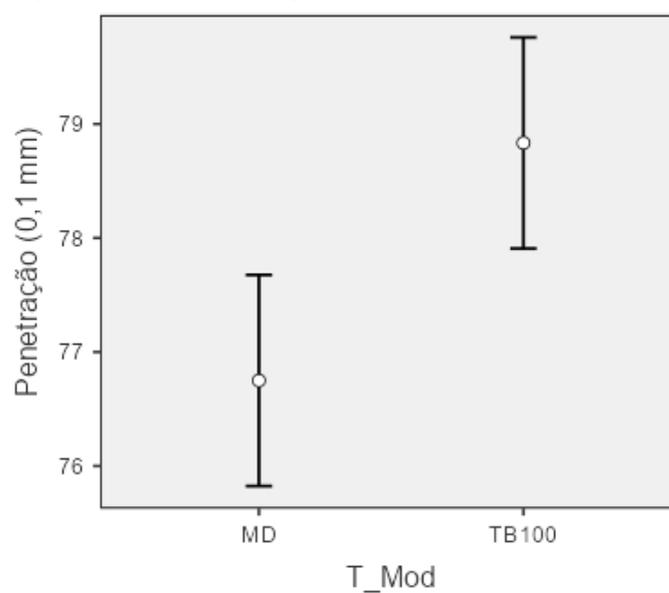


Tabela A - 16 – Testes de comparações Post Hoc (interação Env x %OLUC)

Comparação				Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey		
Env	%OLUC	Env	%OLUC							
NE	2.5	-	NE	5.0	-21.500	1.286	32.000	-16.724	< .001	
		-	NE	7.5	-45.833	1.286	32.000	-35.651	< .001	
		-	NE	10.0	-75.500	1.286	32.000	-58.727	< .001	
	-	RTFOT	2.5	10.000	1.286	32.000	7.778	< .001		
	-	RTFOT	5.0	-2.333	1.286	32.000	-1.815	0.615		
	-	RTFOT	7.5	-18.833	1.286	32.000	-14.649	< .001		
	-	RTFOT	10.0	-35.000	1.286	32.000	-27.225	< .001		
	5.0	-	NE	7.5	-24.333	1.286	32.000	-18.928	< .001	
		-	NE	10.0	-54.000	1.286	32.000	-42.004	< .001	
		-	RTFOT	2.5	31.500	1.286	32.000	24.502	< .001	
		-	RTFOT	5.0	19.167	1.286	32.000	14.909	< .001	
		-	RTFOT	7.5	2.667	1.286	32.000	2.074	0.452	
		-	RTFOT	10.0	-13.500	1.286	32.000	-10.501	< .001	
	7.5	-	NE	10.0	-29.667	1.286	32.000	-23.076	< .001	
		-	RTFOT	2.5	55.833	1.286	32.000	43.430	< .001	
		-	RTFOT	5.0	43.500	1.286	32.000	33.836	< .001	
-		RTFOT	7.5	27.000	1.286	32.000	21.002	< .001		
-		RTFOT	10.0	10.833	1.286	32.000	8.427	< .001		
-		RTFOT	2.5	85.500	1.286	32.000	66.506	< .001		
10.0	-	RTFOT	5.0	73.167	1.286	32.000	56.912	< .001		
	-	RTFOT	7.5	56.667	1.286	32.000	44.078	< .001		
	-	RTFOT	10.0	40.500	1.286	32.000	31.503	< .001		
	RTFOT	2.5	-	RTFOT	5.0	-12.333	1.286	32.000	-9.593	< .001
			-	RTFOT	7.5	-28.833	1.286	32.000	-22.428	< .001
			-	RTFOT	10.0	-45.000	1.286	32.000	-35.003	< .001
5.0		-	RTFOT	7.5	-16.500	1.286	32.000	-12.834	< .001	
	-	RTFOT	10.0	-32.667	1.286	32.000	-25.410	< .001		
7.5	-	RTFOT	10.0	-16.167	1.286	32.000	-12.575	< .001		

Figura A - 12 – Penetração x Env

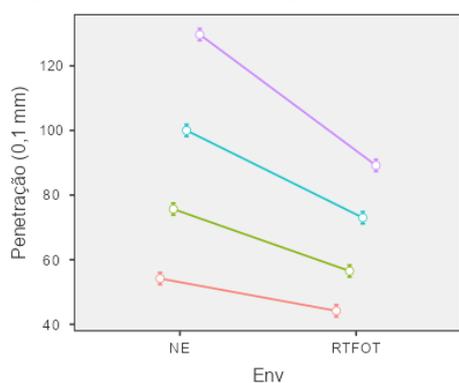
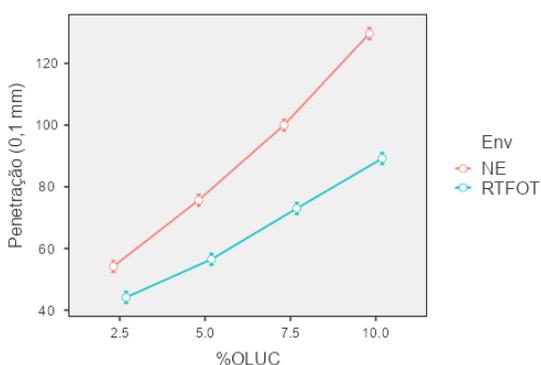


Figura A - 13 – Penetração x %OLUC



## ANÁLISE DA REGRESSÃO

Tabela A - 17 – Coeficientes do modelo quadrático (NE)

	Estimativa	Erro.padrao	tc	valor.p	R <sup>2</sup>
b0	37.3750	2.5307	14.7686	0	
b1	5.9500	0.9235	6.4430	0	0.999901
b2	0.3267	0.0727	4.4918	0.0001	

Tabela A - 18 – ANOVA da regressão (NE)

	GL	SQ	QM	Fc	valor.p
Efeito linear	1	18,875.2100	18,875.2100	3806.76	0
Efeito quadratico	1	100.0417	100.0417	20.18	9e-05
Desvios de Regressao	1	1.8750	1.8750	0.38	0.54294
Residuos	32	158.6667	4.9583		

Tabela A - 19 – Coeficientes do modelo quadrático (RTFOT)

	Estimativa	Erro.padrao	tc	valor.p	R <sup>2</sup>
b0	32.6250	2.5307	12.8916	0	
b1	4.1433	0.9235	4.4866	0.0001	0.999121
b2	0.1533	0.0727	2.1084	0.0429	

Tabela A - 20 – ANOVA da regressão (RTFOT)

	GL	SQ	QM	Fc	valor.p
Efeito linear	1	6,885.6750	6,885.6750	1388.71	0
Efeito quadratico	1	22.0417	22.0417	4.45	0.04292
Desvios de Regressao	1	6.0750	6.0750	1.23	0.27659
Residuos	32	158.6667	4.9583		

## PONTO DE AMOLECIMENTO

A Tabela A - 21 mostra os resultados do ensaio de ponto de amolecimento.

Tabela A - 21 – Ponto de amolecimento

Ordem	Amostra	Condição	TM	OLUC (%)	Ponto de amolecimento (°C)	Resíduo
1	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	48,5	-0,450
2	NE22B	NE	T1	0	65,3	1,317
3	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	71,7	1,133
4	NE22B	NE	T1	0	62,7	-1,333
5	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	70,8	0,233
6	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	56,8	0,983
7	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	55,6	0,400
8	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	48,0	-0,800
9	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	54,3	-0,850
10	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	56,8	1,017
11	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	58,5	-1,217
12	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	69,2	-1,367
13	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	54,0	-1,783
14	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	60,3	0,583
15	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	59,0	-1,200
16	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	66,8	0,850
17	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	61,5	1,300
18	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	60,1	-0,100
19	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	66,3	0,350
20	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	58,8	0,200
21	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	52,1	-0,567
22	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	59,1	0,500
23	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	57,9	-0,700
24	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	54,6	-1,167
25	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	62,5	0,767
26	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	61,8	0,067
27	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	59,4	-1,017
28	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	60,6	0,133
29	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	64,4	-0,083
30	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	52,2	-0,333
31	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	66,4	1,967
32	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	51,9	-0,583
33	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	59,5	0,767
34	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	53,4	0,917
35	NE22B	NE	T1	0	64,0	0,017
36	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	49,6	0,650
37	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	54,3	-0,900
38	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	49,4	0,550
39	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	55,3	0,150
40	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	56,6	0,767
41	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	60,4	0,633
42	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	61,3	0,883
43	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	62,6	-1,883
44	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	56,0	0,183
45	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	60,9	-0,833
46	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	58,0	-0,683
47	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	58,6	-0,083
48	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	48,7	-0,200
49	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	55,7	0,500
50	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	64,8	-1,200
51	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	53,1	0,383
52	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	52,9	0,183
53	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	49,1	0,250
54	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	55,9	0,700

NE: amostra não envelhecida; RTFOT: amostra envelhecida no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: Tratamento da borracha com OLUC (100 °C por 1 h); T1: Testemunha 1 (asfalto-borracha NE); T2: Testemunha 2 (asfalto-borracha RTFOT).

## PRESSUPOSTOS PARA REALIZAÇÃO DA ANOVA

Independência

Figura A - 14 – Resíduos padronizados ordenados

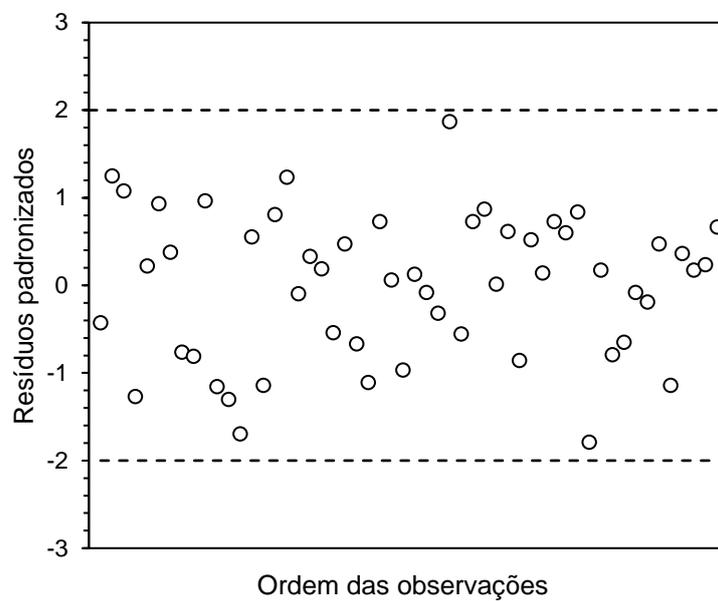


Tabela A - 22 – Teste de independência dos resíduos

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Durbin-Watson	D-stat	2,206	Os resíduos são independentes
	D-lower	1,523	
	D-upper	1,598	

*Critério:  $D_{lower} < D_{stat} < 4 - D_{upper}$*

$\alpha=0,05$

## Homogeneidade

Figura A - 15 – Desvio padrão em função da média

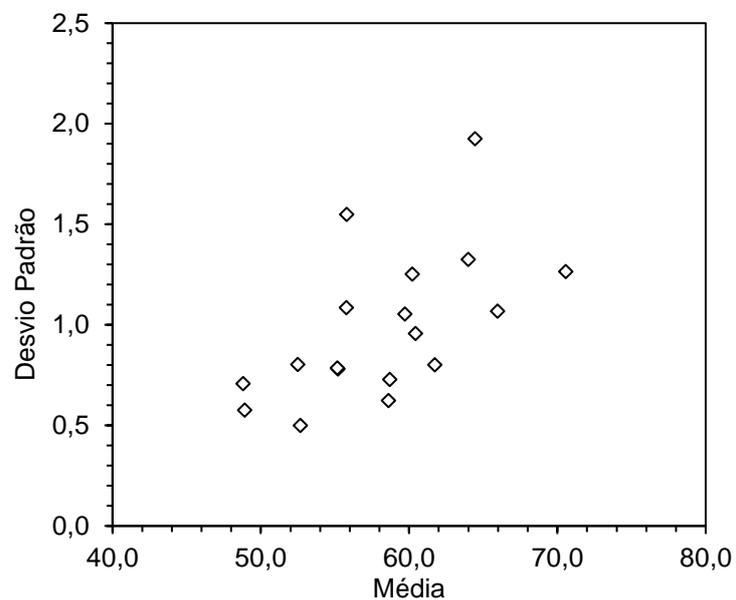


Tabela A - 23 – Teste de homogeneidade das variâncias

Teste	Parâmetro	Valor-p	Conclusão
Levene	Média	0,698	As variâncias dos resíduos são homogêneas
	Medianas	0,992	
	Média aparada	0,698	

*Critério: valor-p (média) >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## Normalidade

Figura A - 16 – Q-Q plot

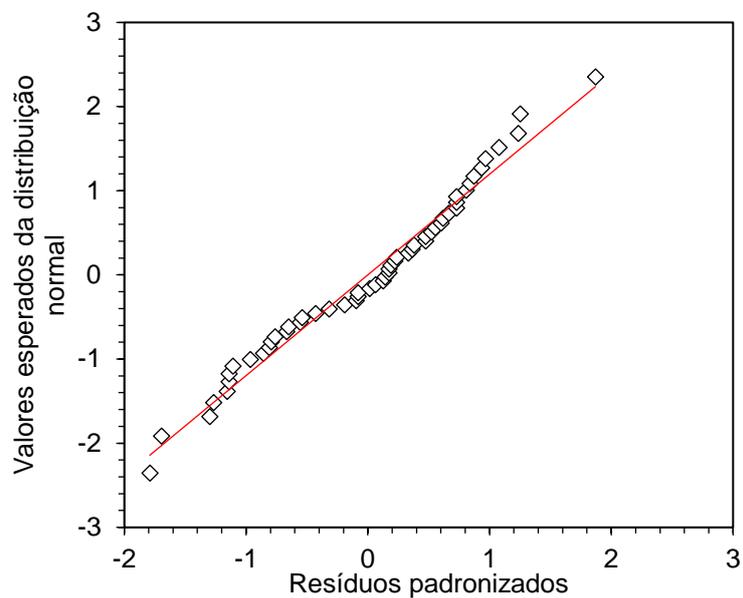


Tabela A - 24 – Teste de normalidade

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Shapiro-Wilk	W-stat	0,975	Os resíduos seguem uma distribuição normal
	Valor-p	0,329	

*Critério: valor-p >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## ANOVA

Tabela A - 25 – ANOVA do ponto de amolecimento

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Env	369.075	1	369.075	354.100	< .001
T_Mod	2.297	1	2.297	2.204	0.147
%OLUC	735.572	3	245.191	235.242	< .001
Env * T_Mod	2.125	1	2.125	2.039	0.163
Env * %OLUC	4.846	3	1.615	1.550	0.221
T_Mod * %OLUC	1.927	3	0.642	0.616	0.609
Env * T_Mod * %OLUC	3.199	3	1.066	1.023	0.395
Resíduos	33.353	32	1.042		

Tabela A - 26 – Testes de comparações Post Hoc (efeito simples Env)

Comparação						
Env	Env	Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey
NE	- RTFOT	-5.546	0.295	32.000	-18.818	< .001

Figura A - 17 – Ponto de amolecimento x Env

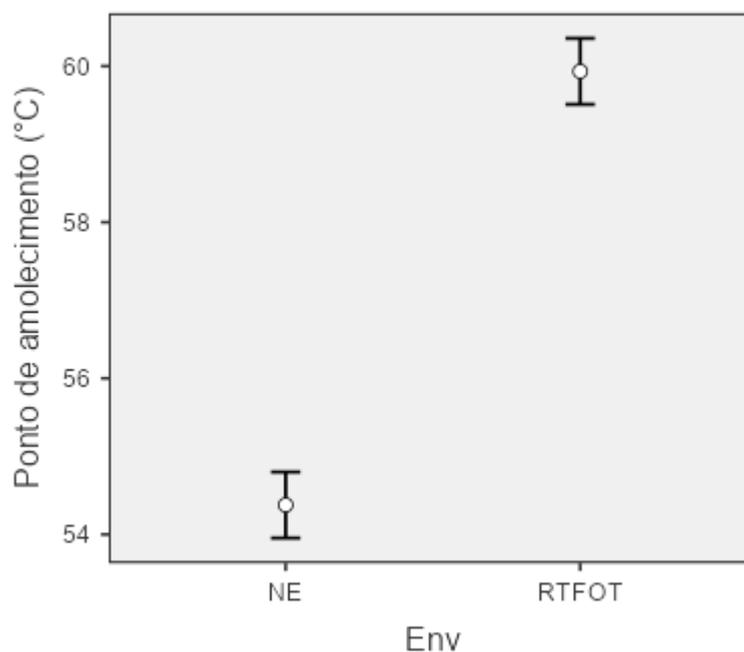
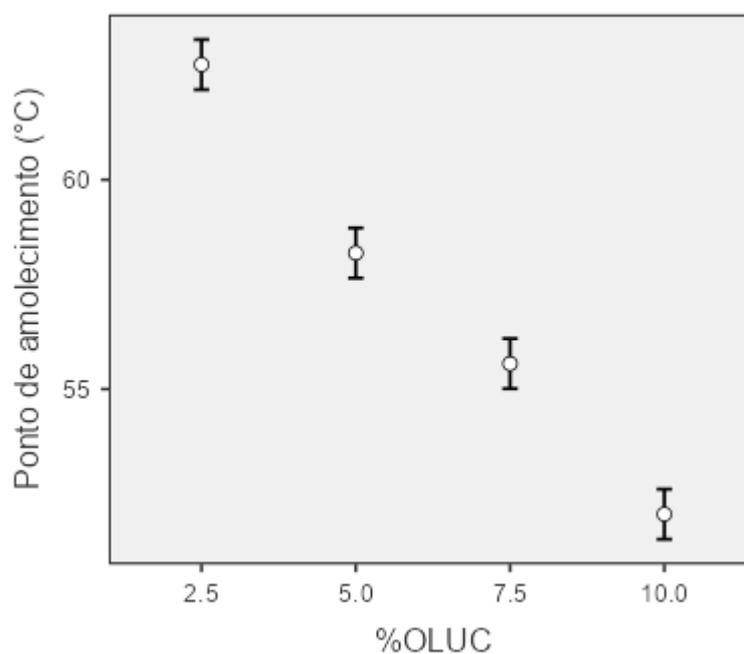


Tabela A - 27 – Testes de comparações Post Hoc (efeito simples %OLUC)

Comparação							
%OLUC	%OLUC	Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey	
2.5	- 5.0	4.500	0.417	32.000	10.797	< .001	
	- 7.5	7.142	0.417	32.000	17.135	< .001	
	- 10.0	10.733	0.417	32.000	25.752	< .001	
5.0	- 7.5	2.642	0.417	32.000	6.338	< .001	
	- 10.0	6.233	0.417	32.000	14.956	< .001	
7.5	- 10.0	3.592	0.417	32.000	8.617	< .001	

Figura A - 18 – Ponto de amolecimento x %OLUC



## PONTO DE FULGOR

A Tabela A - 28 apresenta os resultados dos ensaios de ponto de fulgor.

Tabela A - 28 – Ponto de fulgor

Ordem	Amostra	Condição	TM	OLUC (%)	Ponto de fulgor (°C)	Resíduo
1	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	232	5,333
2	NE22B	NE	T1	0	226	-22,000
3	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	218	-10,667
4	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	220	-6,667
5	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	234	-1,333
6	NE22B	NE	T1	0	270	22,000
7	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	234	-1,333
8	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	232	-4,667
9	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	228	2,000
10	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	234	8,000
11	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	236	7,333
12	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	238	-1,333
13	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	228	0,667
14	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	240	0,667
15	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	222	-5,333
16	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	228	1,333
17	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	220	-8,667
18	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	238	2,667
19	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	240	0,667
20	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	232	3,333
21	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	232	4,667
22	NE22B	NE	T1	0	248	0,000
23	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	244	7,333
24	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	234	-2,667
25	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	216	-10,000
26	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	228	-0,667
27	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	238	9,333

NE: amostra não envelhecida; RTFOT: amostra envelhecida no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: Tratamento da borracha com OLUC (100 °C por 1 h); T1: Testemunha 1 (asfalto-borracha NE); T2: Testemunha 2 (asfalto-borracha RTFOT).

## PRESSUPOSTOS PARA REALIZAÇÃO DA ANOVA

Independência

Figura A - 19 – Resíduos padronizados ordenados

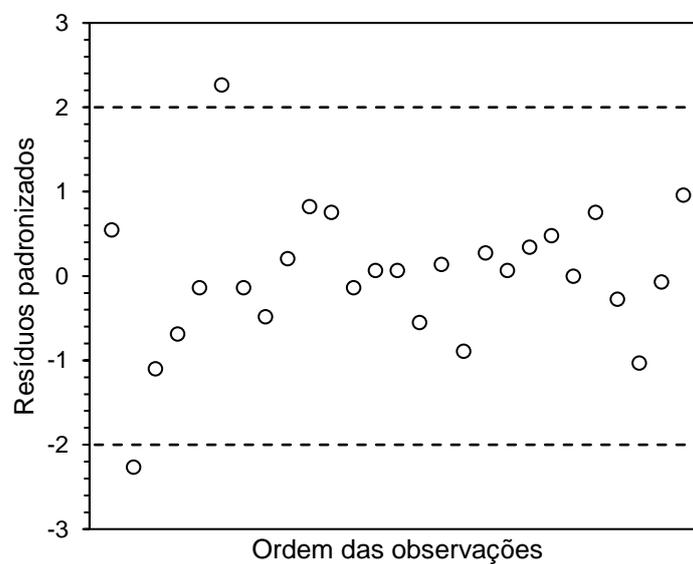


Tabela A - 29 – Teste de independência dos resíduos

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Durbin-Watson	D-stat	1,764	Os resíduos são independentes
	D-lower	1,316	
	D-upper	1,469	

*Critério:  $D_{lower} < D_{stat} < 4 - D_{upper}$*

$\alpha=0,05$

## Homogeneidade

Figura A - 20 – Desvio padrão em função da média

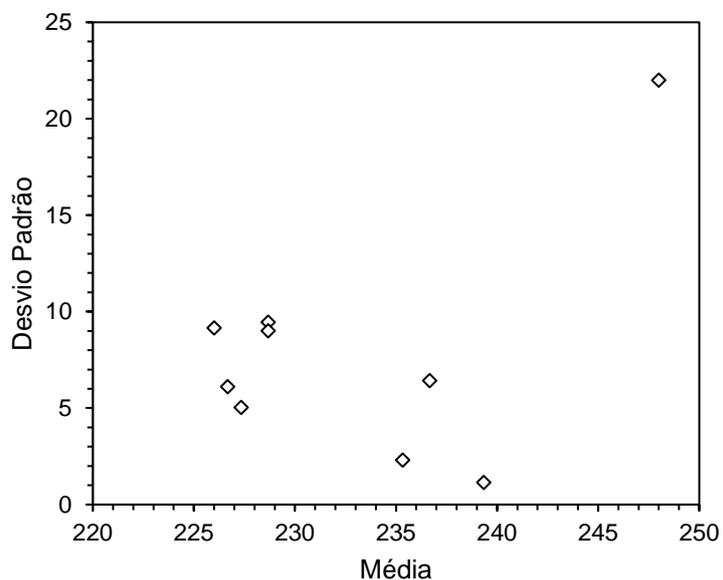


Tabela A - 30 – Teste de homogeneidade das variâncias

Teste	Parâmetro	Valor-p	Conclusão
Levene	Média	0,134	As variâncias dos resíduos são homogêneas
	Medianas	0,289	
	Média aparada	0,134	

*Critério: valor-p (média) >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## Normalidade

Figura A - 21 – Q-Q plot

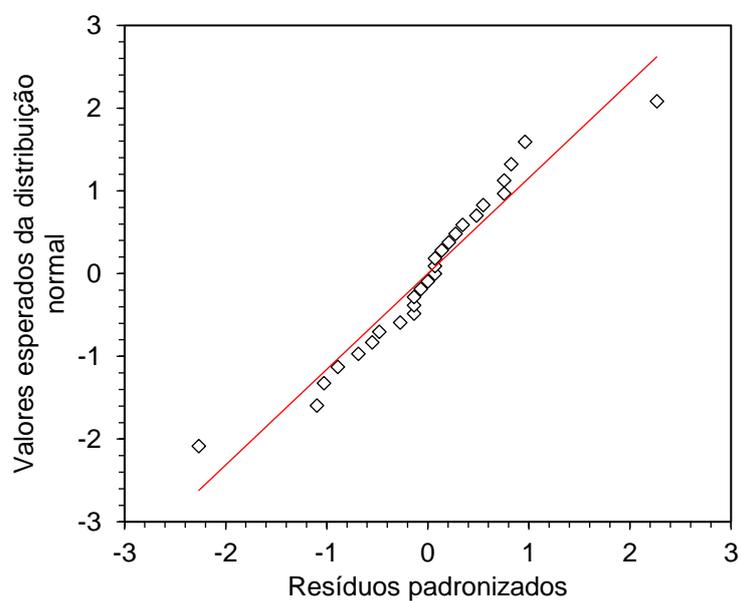


Tabela A - 31 – Teste de normalidade

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Shapiro-Wilk	W-stat	0,950	Os resíduos seguem uma distribuição normal
	Valor-p	0,214	

*Critério: valor-p >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## ANOVA

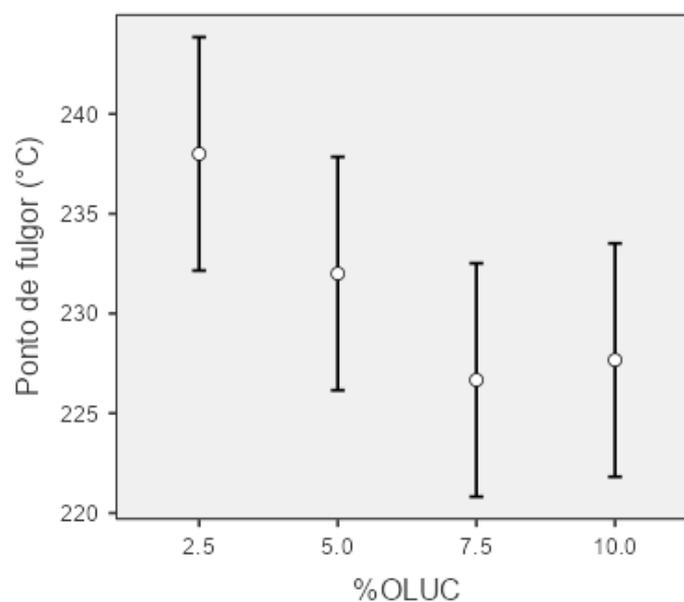
Tabela A - 32 – ANOVA do ponto de fulgor

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
T_Mod	60.167	1	60.167	1.318	0.268
%OLUC	479.167	3	159.722	3.498	0.040
T_Mod * %OLUC	25.833	3	8.611	0.189	0.903
Resíduos	730.667	16	45.667		

Tabela A - 33 – Testes de comparações Post Hoc (efeito simples %OLUC)

Comparação							
%OLUC	%OLUC	Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey	
2.5	- 5.0	6.000	3.902	16.000	1.538	0.439	
	- 7.5	11.333	3.902	16.000	2.905	0.046	
	- 10.0	10.333	3.902	16.000	2.649	0.075	
5.0	- 7.5	5.333	3.902	16.000	1.367	0.536	
	- 10.0	4.333	3.902	16.000	1.111	0.688	
7.5	- 10.0	-1.000	3.902	16.000	-0.256	0.994	

Figura A - 22 – Ponto de fulgor x %OLUC



## ANÁLISE DA REGRESSÃO

Tabela A - 34 – Coeficientes do modelo linear

	Estimativa	Erro.padrao	tc	valor.p	R <sup>2</sup>
b0	240.1667	3.3789	71.0793	0	0.826504
b1	-1.4533	0.4935	-2.9449	0.0095	

Tabela A - 35 – ANOVA da regressão

	GL	SQ	QM	Fc	valor.p
Efeito linear	1	396.0333	396.0333	8.67	0.00951
Desvios de Regressao	2	83.1333	41.5667	0.91	0.42229
Residuos	16	730.6667	45.6667		

## MÓDULO COMPLEXO (ALTA TEMPERATURA)

Os resultados do módulo complexo das amostras não envelhecidas e envelhecidas no curto prazo (RTFOT), obtidos no ensaio de cisalhamento dinâmico, na temperatura de 64 °C, estão resumidos na Tabela A - 36.

Tabela A - 36 – Módulo complexo ( $G^*$ , 64 °C)

Ordem	Amostra	Condição	TM	OLUC (%)	$G^*$ (kPa)	Resíduo
1	NE22B	NE	T1	0	9,8	-0,300
2	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	2,0	-0,067
3	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	2,1	-0,067
4	NE22B	NE	T1	0	10,2	0,100
5	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	16,4	-0,133
6	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	16,7	0,167
7	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	4,4	-0,033
8	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	8,0	0,133
9	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	2,3	0,233
10	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	4,4	0,133
11	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	2,3	0,133
12	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	4,4	0,200
13	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	4,5	0,067
14	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	7,9	-0,167
15	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	4,7	0,267
16	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	16,5	-0,033
17	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	4,1	-0,333
18	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	8,0	-0,067
19	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	8,3	0,233
20	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	6,5	-0,167
21	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	11,3	-0,167
22	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	11,7	0,233
23	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	11,4	-0,067
24	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	7,2	0,533
25	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	3,0	0,133
26	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	5,6	-0,200
27	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	2,7	-0,167
28	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	5,9	0,100
29	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	4,7	0,267
30	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	6,8	0,067
31	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	11,8	0,267
32	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	8,0	0,133
33	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	3,2	0,133
34	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	11,4	-0,133
35	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	5,5	-0,200
36	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	6,6	-0,133
37	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	11,4	-0,133
38	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	5,7	0,000
39	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	3,1	0,033
40	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	5,9	0,200
41	NE22B	NE	T1	0	10,3	0,200
42	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	1,9	-0,167
43	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	4,0	-0,267
44	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	2,1	-0,067
45	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	3,9	-0,300
46	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	6,8	0,067
47	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	4,2	-0,233
48	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	7,6	-0,267
49	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	2,9	-0,167
50	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	4,4	0,133
51	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	6,3	-0,367
52	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	2,9	0,033
53	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	5,9	0,100
54	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	4,3	0,100

NE: amostra não envelhecida; RTFOT: amostra envelhecida no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: Tratamento da borracha com OLUC (100 °C por 1 h); T1: Testemunha 1 (asfalto-borracha NE); T2: Testemunha 2 (asfalto-borracha RTFOT).

## PRESSUPOSTOS PARA REALIZAÇÃO DA ANOVA

Independência

Figura A - 23 – Resíduos padronizados ordenados

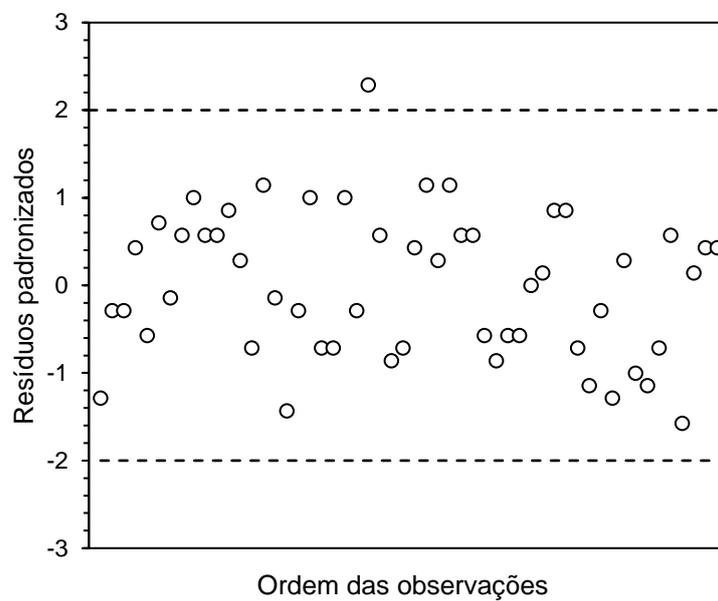


Tabela A - 37 – Teste de independência dos resíduos

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Durbin-Watson	D-stat	1,720	Os resíduos são independentes
	D-lower	1,523	
	D-upper	1,598	

*Critério:  $D_{lower} < D_{stat} < 4 - D_{upper}$*

$\alpha=0,05$

## Homogeneidade

Figura A - 24 – Desvio padrão em função da média

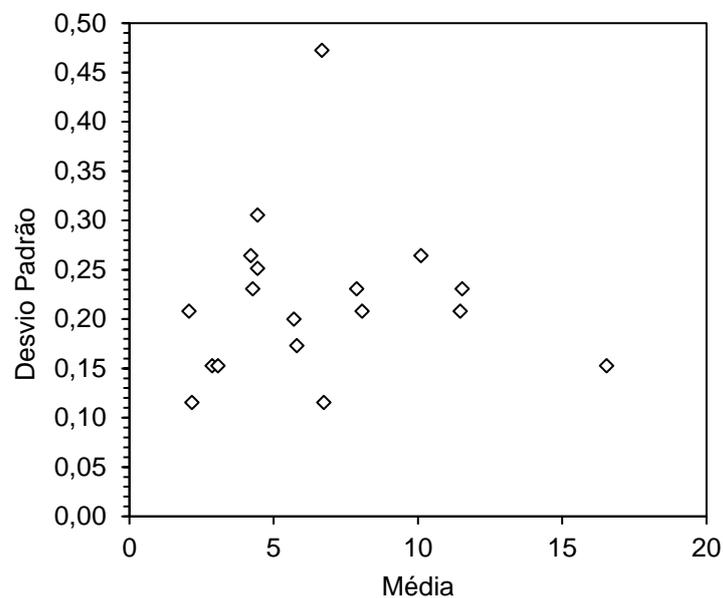


Tabela A - 38 – Teste de homogeneidade das variâncias

Teste	Parâmetro	Valor-p	Conclusão
Levene	Média	0,260	As variâncias dos resíduos são homogêneas
	Medianas	0,998	
	Média aparada	0,260	

*Critério: valor-p (média) >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## Normalidade

Figura A - 25 – Q-Q plot

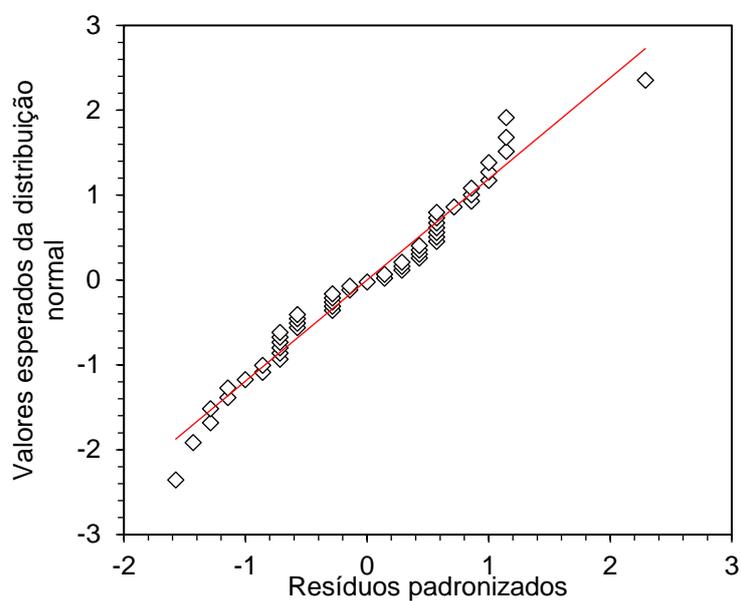


Tabela A - 39 – Teste de normalidade

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Shapiro-Wilk	W-stat	0,968	Os resíduos seguem uma distribuição normal
	Valor-p	0,156	

*Critério: valor-p >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

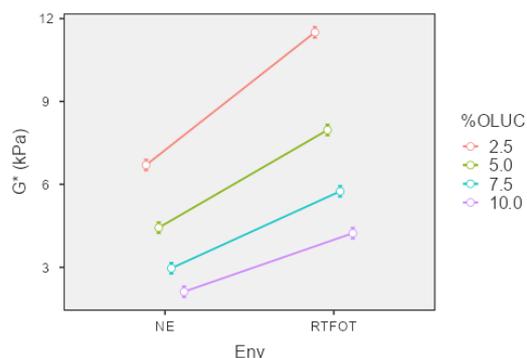
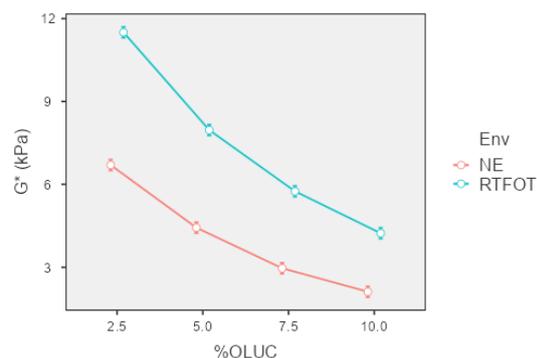
## ANOVA

Tabela A - 40 – ANOVA do módulo complexo (G\*)

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Env	131.341	1	131.341	2379.004	< .001
T_Mod	0.041	1	0.041	0.740	0.396
%OLUC	239.825	3	79.942	1448.000	< .001
Env * T_Mod	0.013	1	0.013	0.242	0.626
Env * %OLUC	11.914	3	3.971	71.935	< .001
T_Mod * %OLUC	0.011	3	0.004	0.065	0.978
Env * T_Mod * %OLUC	0.105	3	0.035	0.634	0.599
Resíduos	1.767	32	0.055		

Tabela A - 41 – Testes de comparações Post Hoc (interação Env x %OLUC)

Comparação					Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey
Env	%OLUC	Env	%OLUC						
NE	2.5	-	NE	5.0	2.267	0.136	32.000	16.709	< .001
		-	NE	7.5	3.733	0.136	32.000	27.520	< .001
		-	NE	10.0	4.583	0.136	32.000	33.786	< .001
	5.0	-	RTFOT	2.5	-4.800	0.136	32.000	-35.383	< .001
		-	RTFOT	5.0	-1.267	0.136	32.000	-9.337	< .001
		-	RTFOT	7.5	0.950	0.136	32.000	7.003	< .001
		-	RTFOT	10.0	2.467	0.136	32.000	18.183	< .001
		-	NE	7.5	1.467	0.136	32.000	10.812	< .001
		-	NE	10.0	2.317	0.136	32.000	17.077	< .001
	7.5	-	RTFOT	2.5	-7.067	0.136	32.000	-52.092	< .001
		-	RTFOT	5.0	-3.533	0.136	32.000	-26.046	< .001
		-	RTFOT	7.5	-1.317	0.136	32.000	-9.706	< .001
-		RTFOT	10.0	0.200	0.136	32.000	1.474	0.815	
-		NE	10.0	0.850	0.136	32.000	6.266	< .001	
-		RTFOT	2.5	-8.533	0.136	32.000	-62.904	< .001	
10.0	-	RTFOT	5.0	-5.000	0.136	32.000	-36.858	< .001	
	-	RTFOT	7.5	-2.783	0.136	32.000	-20.517	< .001	
	-	RTFOT	10.0	-1.267	0.136	32.000	-9.337	< .001	
	-	RTFOT	2.5	-9.383	0.136	32.000	-69.170	< .001	
	-	RTFOT	5.0	-5.850	0.136	32.000	-43.124	< .001	
	-	RTFOT	7.5	-3.633	0.136	32.000	-26.783	< .001	
RTFOT	2.5	-	RTFOT	10.0	-2.117	0.136	32.000	-15.603	< .001
		-	RTFOT	5.0	3.533	0.136	32.000	26.046	< .001
		-	RTFOT	7.5	5.750	0.136	32.000	42.386	< .001
	5.0	-	RTFOT	10.0	7.267	0.136	32.000	53.567	< .001
		-	RTFOT	7.5	2.217	0.136	32.000	16.340	< .001
		-	RTFOT	10.0	3.733	0.136	32.000	27.520	< .001
	7.5	-	RTFOT	10.0	1.517	0.136	32.000	11.180	< .001

Figura A - 26 –  $G^*$  x EnvFigura A - 27 –  $G^*$  x %OLUC

## ANÁLISE DA REGRESSÃO

Tabela A - 42 – Coeficientes do modelo quadrático (NE)

	Estimativa	Erro.padrao	tc	valor.p	R <sup>2</sup>
b0	9.6292	0.2670	36.0588	0	0.999861
b1	-1.3170	0.0974	-13.5151	0	
b2	0.0567	0.0077	7.3843	0	

Tabela A - 43 – ANOVA da regressão (NE)

	GL	SQ	QM	Fc	valor.p
Efeito linear	1	69.4641	69.4641	1258.21	0
Efeito quadratico	1	3.0104	3.0104	54.53	0
Desvios de Regressao	1	0.0101	0.0101	0.18	0.67198
Residuos	32	1.7667	0.0552		

Tabela A - 44 – Coeficientes do modelo quadrático (RTFOT)

	Estimativa	Erro.padrao	tc	valor.p	R <sup>2</sup>
b0	15.8875	0.2670	59.4946	0	0.999364
b1	-1.9690	0.0974	-20.2059	0	
b2	0.0807	0.0077	10.5118	0	

Tabela A - 45 – ANOVA da regressão (RTFOT)

	GL	SQ	QM	Fc	valor.p
Efeito linear	1	173.0401	173.0401	3134.31	0
Efeito quadratico	1	6.1004	6.1004	110.5	0
Desvios de Regressao	1	0.1141	0.1141	2.07	0.16028
Residuos	32	1.7667	0.0552		

## ÂNGULO DE FASE (ALTA TEMPERATURA)

Os resultados do ângulo de fase ( $\delta$ ) das amostras não envelhecidas e envelhecidas no curto prazo (RTFOT), obtidos no ensaio de cisalhamento dinâmico, na temperatura de 64 °C, estão organizados na Tabela A - 46.

Tabela A - 46 – Ângulo de fase ( $\delta$ , 64 °C)

Ordem	Amostra	Condição	TM	OLUC (%)	$\delta$ (°)	Resíduo
1	NE22B	NE	T1	0	69,2	-0,100
2	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	77,2	-0,267
3	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	78	1,233
4	NE22B	NE	T1	0	69,7	0,400
5	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	60,1	0,433
6	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	59,6	-0,067
7	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	74,4	0,267
8	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	62,6	-0,467
9	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	76,8	-0,667
10	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	66	-0,200
11	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	75,7	-1,067
12	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	65,3	-0,133
13	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	73,5	0,000
14	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	63,1	0,333
15	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	72,9	-0,600
16	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	59,3	-0,367
17	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	74,1	0,600
18	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	62,6	-0,167
19	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	62,6	-0,167
20	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	71,7	-0,167
21	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	61,4	0,033
22	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	60,8	-0,567
23	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	61,9	0,533
24	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	72,3	0,433
25	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	76,6	0,300
26	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	65,7	0,367
27	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	77,2	0,900
28	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	65,7	0,367
29	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	73,2	-0,933
30	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	72,3	0,433
31	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	60,8	-0,400
32	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	63,3	0,233
33	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	75,2	-0,233
34	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	61,6	0,400
35	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	65,2	0,400
36	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	72,4	0,533
37	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	61,2	0,000
38	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	64,9	0,100
39	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	75,5	0,067
40	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	64,3	-0,500
41	NE22B	NE	T1	0	69	-0,300
42	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	78,4	0,933
43	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	66,8	0,600
44	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	76,6	-0,167
45	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	66,6	1,167
46	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	70,9	-0,967
47	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	74,8	0,667
48	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	63,3	0,233
49	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	75,6	0,167
50	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	65,8	-0,400
51	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	71,6	-0,267
52	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	75,1	-1,200
53	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	64,6	-0,733
54	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	64,4	-1,033

NE: amostra não envelhecida; RTFOT: amostra envelhecida no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: Tratamento da borracha com OLUC (100 °C por 1 h); T1: Testemunha 1 (asfalto-borracha NE); T2: Testemunha 2 (asfalto-borracha RTFOT).

## PRESSUPOSTOS PARA REALIZAÇÃO DA ANOVA

Independência

Figura A - 28 – Resíduos padronizados ordenados

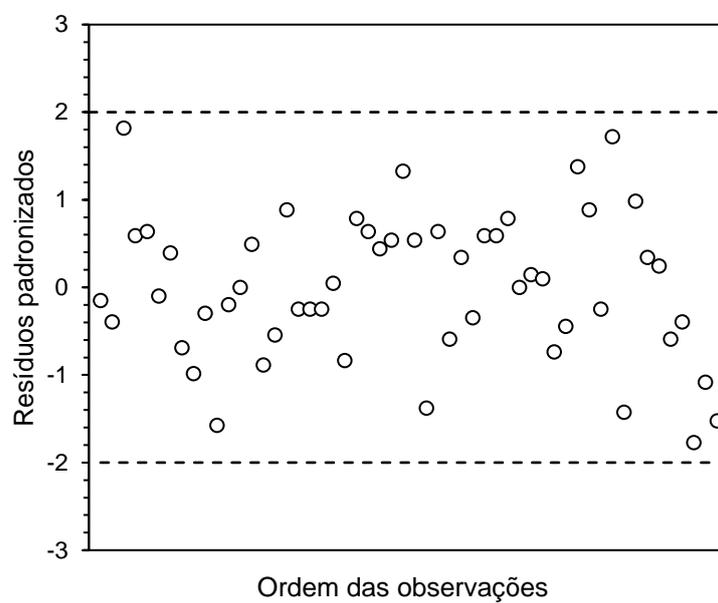


Tabela A - 47 – Teste de independência dos resíduos

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Durbin-Watson	D-stat	1,794	Os resíduos são independentes
	D-lower	1,523	
	D-upper	1,598	

*Critério:  $D_{lower} < D_{stat} < 4 - D_{upper}$*

$\alpha=0,05$

## Homogeneidade

Figura A - 29 – Desvio padrão em função da média

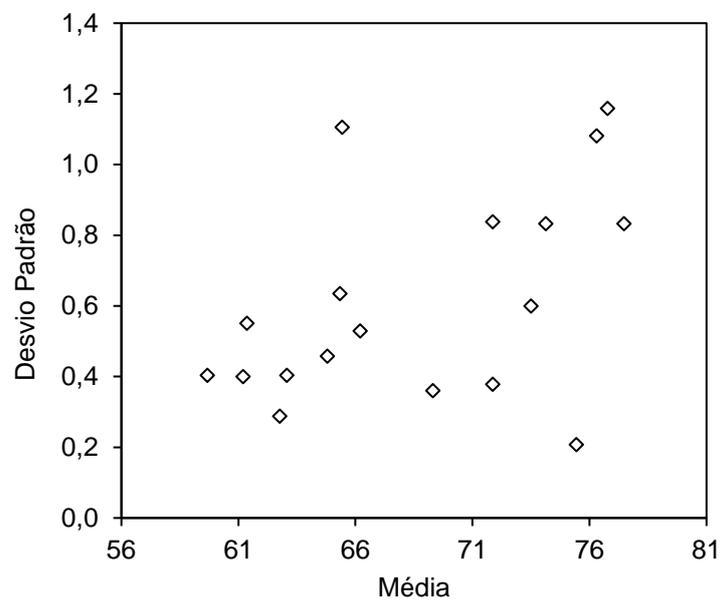


Tabela A - 48 – Teste de homogeneidade das variâncias

Teste	Parâmetro	Valor-p	Conclusão
Levene	Média	0,164	As variâncias dos resíduos são homogêneas
	Medianas	0,950	
	Média aparada	0,164	

*Critério: valor-p (média) >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## Normalidade

Figura A - 30 – Q-Q plot

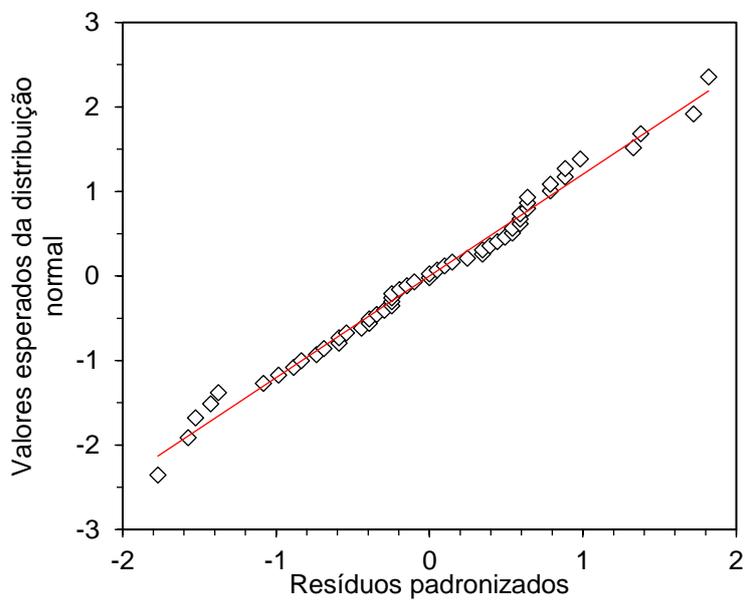


Tabela A - 49 – Teste de normalidade

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Shapiro-Wilk	W-stat	0,986	Os resíduos seguem uma distribuição normal
	Valor-p	0,779	

*Critério: valor-p >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## ANOVA

Tabela A - 50 – ANOVA do ângulo de fase ( $\delta$ )

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Env	1424.630	1	1424.630	2857.595	< .001
T_Mod	2.950	1	2.950	5.918	0.021
%OLUC	171.911	3	57.304	114.942	< .001
Env * T_Mod	0.035	1	0.035	0.071	0.792
Env * %OLUC	0.811	3	0.270	0.542	0.657
T_Mod * %OLUC	0.807	3	0.269	0.540	0.658
Env * T_Mod * %OLUC	0.156	3	0.052	0.104	0.957
Resíduos	15.953	32	0.499		

Tabela A - 51 – Testes de comparações Post Hoc (efeito simples Env)

Comparação						
Env	Env	Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey
NE	- RTFOT	10.896	0.204	32.000	53.456	< .001

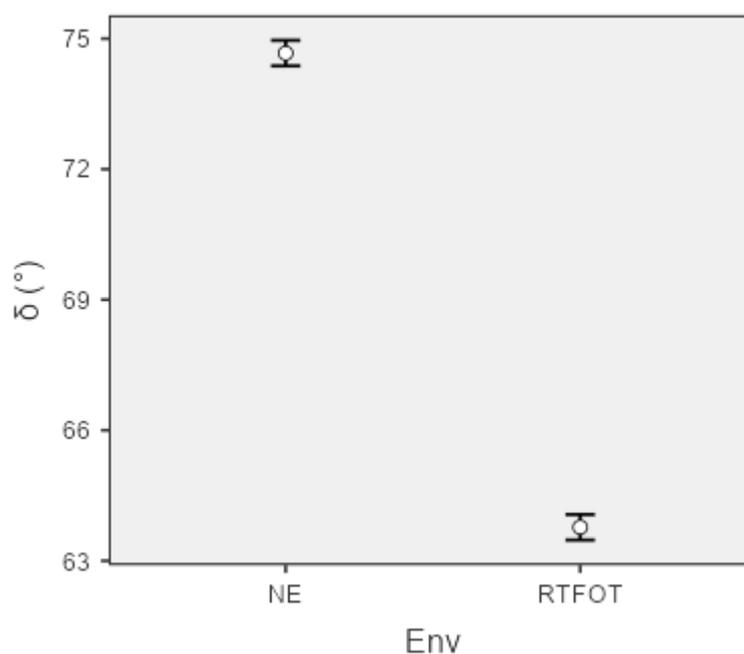
Figura A - 31 – Ângulo de fase ( $\delta$ ) x Env

Tabela A - 52 – Testes de comparações Post Hoc (efeito simples T\_Mod)

Comparação		Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey
T_Mod	T_Mod					
MD	- TB100	0.496	0.204	32.000	2.433	0.021

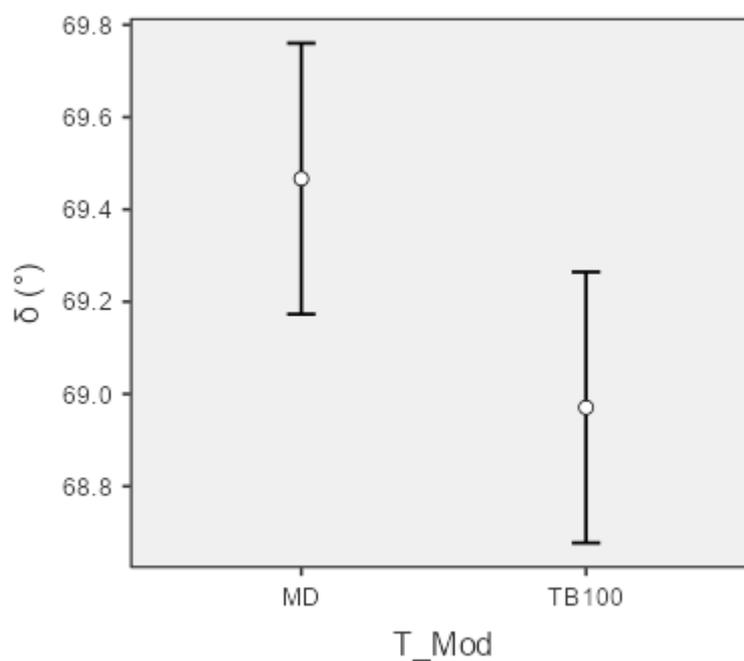
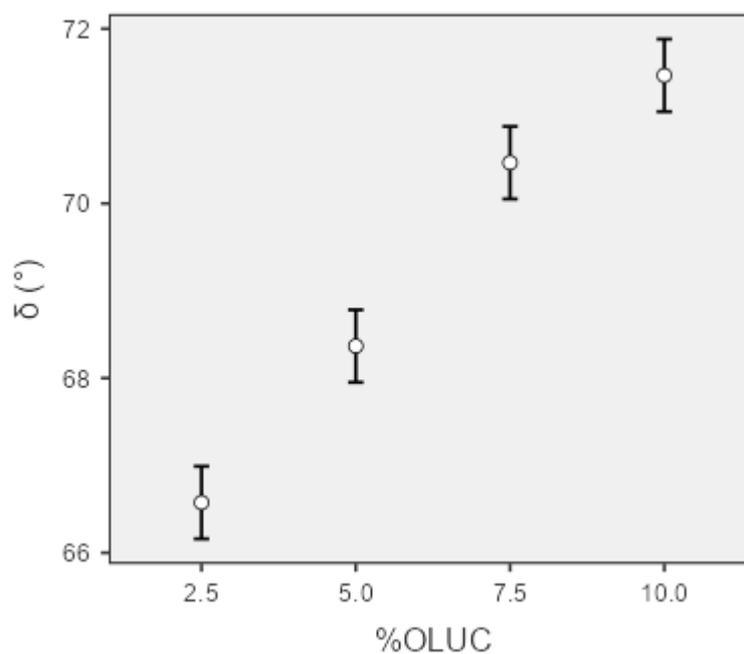
Figura A - 32 – Ângulo de fase ( $\delta$ ) x T\_Mod

Tabela A - 53 – Testes de comparações Post Hoc (efeito simples %OLUC)

Comparação		Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey
%OLUC	%OLUC					
2.5	- 5.0	-1.792	0.288	32.000	-6.216	< .001
	- 7.5	-3.892	0.288	32.000	-13.501	< .001
	- 10.0	-4.892	0.288	32.000	-16.970	< .001
5.0	- 7.5	-2.100	0.288	32.000	-7.285	< .001
	- 10.0	-3.100	0.288	32.000	-10.754	< .001
7.5	- 10.0	-1.000	0.288	32.000	-3.469	0.008

Figura A - 33 – Ângulo de fase ( $\delta$ ) x %OLUC

## ANÁLISE DA REGRESSÃO

Tabela A - 54 – Coeficientes do modelo linear

	Estimativa	Erro.padrão	tc	valor.p	R <sup>2</sup>
b0	65.0250	0.2496	260.4802	0	0.982140
b1	0.6710	0.0365	18.4030	0	

Tabela A - 55 – ANOVA da regressão

	GL	SQ	QM	Fc	valor.p
Efeito linear	1	168.8404	168.8404	338.67	0
Desvios de Regressao	2	3.0703	1.5351	3.08	0.05983
Resíduos	32	15.9533	0.4985		

## DEFORMAÇÃO PERMANENTE (ALTA TEMPERATURA)

Os resultados para o parâmetro de resistência à deformação permanente [ $G^*/\text{sen}(\delta)$ ], das amostras não envelhecidas e envelhecidas no curto prazo (RTFOT), obtidos no ensaio de cisalhamento dinâmico, na temperatura de 64 °C, são mostrados na Tabela A - 56.

Tabela A - 56 – Parâmetro de resistência à deformação permanente ( $G^*/\text{sen}(\delta)$ , 64 °C)

Ordem	Amostra	Condição	TM	OLUC (%)	$G^*/\text{sen}(\delta)$ (kPa)	Resíduo
1	NE22B	NE	T1	0	10,45	-0,337
2	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	2,02	-0,100
3	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	2,11	-0,090
4	NE22B	NE	T1	0	10,91	0,123
5	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	18,90	-0,260
6	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	19,40	0,240
7	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	4,61	-0,017
8	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	9,01	0,173
9	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	2,41	0,290
10	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	4,84	0,150
11	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	2,34	0,140
12	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	4,86	0,233
13	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	4,66	0,023
14	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	8,84	-0,243
15	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	4,95	0,313
16	RTFOT22B	RTFOT	T2	0	19,18	0,020
17	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5	4,30	-0,337
18	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	9,05	-0,033
19	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5	9,36	0,277
20	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	6,81	-0,190
21	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	12,85	-0,207
22	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	13,37	0,313
23	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	12,95	-0,107
24	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	7,51	0,510
25	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	3,06	0,103
26	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	6,18	-0,220
27	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	2,81	-0,147
28	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	6,45	0,050
29	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	4,91	0,283
30	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	7,10	0,043
31	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	13,56	0,383
32	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	8,99	0,153
33	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	3,27	0,110
34	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	12,96	-0,217
35	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	6,08	-0,247
36	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	6,90	-0,157
37	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	13,01	-0,167
38	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	6,32	-0,007
39	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	3,21	0,050
40	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	6,58	0,253
41	NE22B	NE	T1	0	11,00	0,213
42	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10	1,93	-0,190
43	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	4,36	-0,330
44	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10	2,15	-0,050
45	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	4,23	-0,397
46	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	7,17	0,113
47	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5	4,36	-0,267
48	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5	8,51	-0,327
49	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	3,00	-0,160
50	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10	4,87	0,180
51	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	6,68	-0,320
52	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	3,00	0,043
53	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	6,57	0,170
54	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10	4,79	0,163

NE: amostra não envelhecida; RTFOT: amostra envelhecida no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: Tratamento da borracha com OLUC (100 °C por 1 h); T1: Testemunha 1 (asfalto-borracha NE); T2: Testemunha 2 (asfalto-borracha RTFOT).

## PRESSUPOSTOS PARA REALIZAÇÃO DA ANOVA

Independência

Figura A - 34 – Resíduos padronizados ordenados

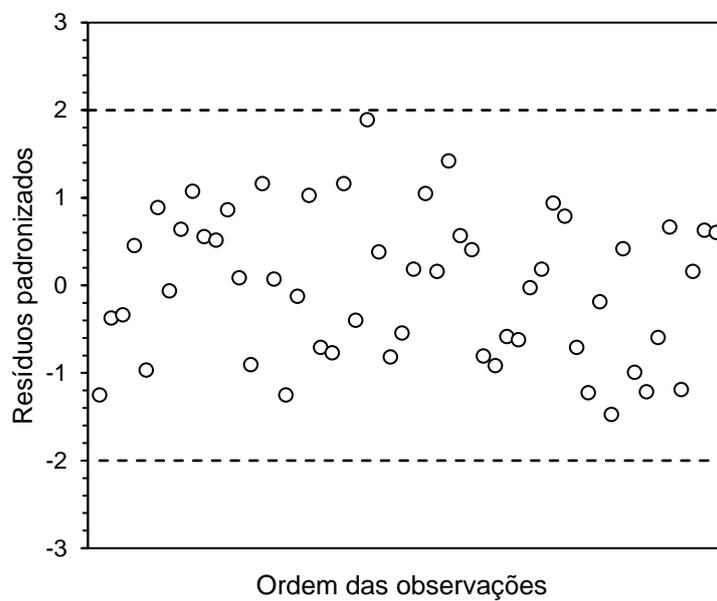


Tabela A - 57 – Teste de independência dos resíduos

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Durbin-Watson	D-stat	1,803	Os resíduos são independentes
	D-lower	1,523	
	D-upper	1,598	

*Critério:  $D_{lower} < D_{stat} < 4 - D_{upper}$*

$\alpha=0,05$

## Homogeneidade

Figura A - 35 – Desvio padrão em função da média

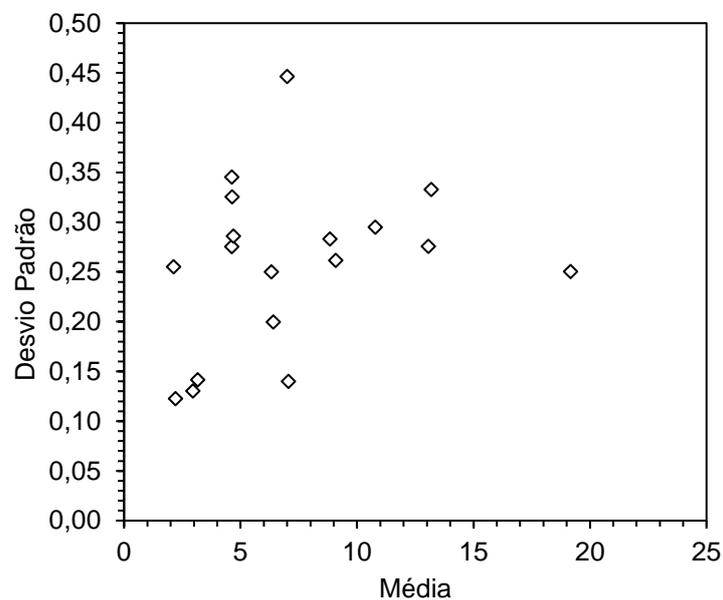


Tabela A - 58 – Teste de homogeneidade das variâncias

Teste	Parâmetro	Valor-p	Conclusão
Levene	Média	0,488	As variâncias dos resíduos são homogêneas
	Medianas	1,000	
	Média aparada	0,488	

*Critério: valor-p (média) >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## Normalidade

Figura A - 36 – Q -Q plot

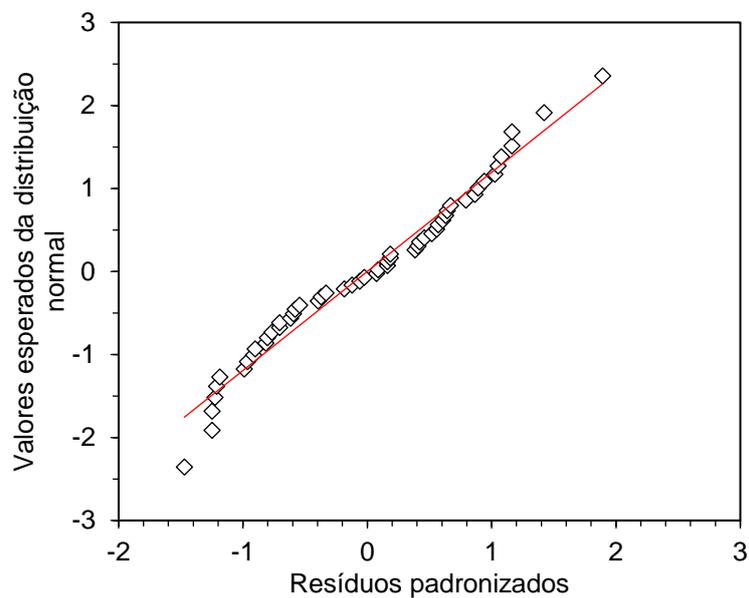


Tabela A - 59 – Teste de normalidade

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Shapiro-Wilk	W-stat	0,968	Os resíduos seguem uma distribuição normal
	Valor-p	0,163	

*Critério: valor-p >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

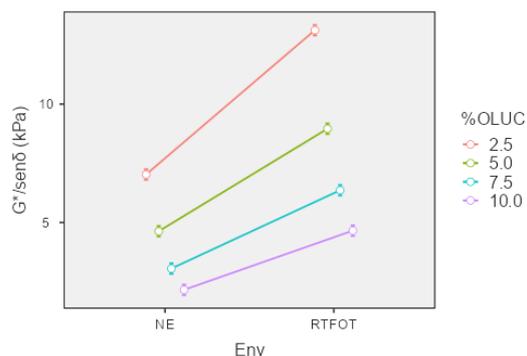
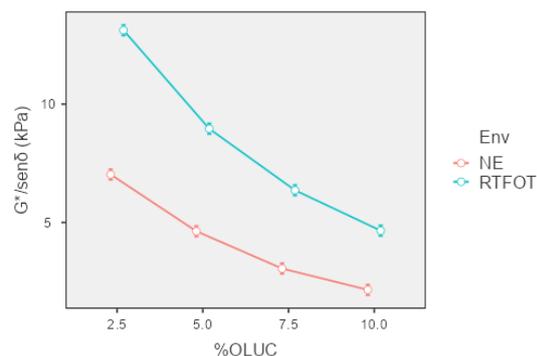
## ANOVA

Tabela A - 60 – ANOVA do parâmetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$ 

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Env	197.316	1	197.316	2728.111	< .001
T_Mod	0.063	1	0.063	0.872	0.357
%OLUC	304.185	3	101.395	1401.897	< .001
Env * T_Mod	0.003	1	0.003	0.037	0.848
Env * %OLUC	21.585	3	7.195	99.477	< .001
T_Mod * %OLUC	0.023	3	0.008	0.104	0.957
Env * T_Mod * %OLUC	0.115	3	0.038	0.531	0.665
Resíduos	2.314	32	0.072		

Tabela A - 61 – Testes de comparações Post Hoc (interação Env x %OLUC)

Comparação					Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptuke	
Env	%OLUC	Env	%OLUC							
NE	2.5	-	NE	5.0	2.397	0.155	32.000	15.435	< .001	
		-	NE	7.5	3.970	0.155	32.000	25.568	< .001	
		-	NE	10.0	4.868	0.155	32.000	31.354	< .001	
	5.0	- RTFOT	2.5	2.5	-6.088	0.155	32.000	-39.211	< .001	
			5.0	5.0	-1.932	0.155	32.000	-12.441	< .001	
			7.5	7.5	0.665	0.155	32.000	4.283	0.003	
		- RTFOT	10.0	10.0	2.370	0.155	32.000	15.264	< .001	
		-	NE	7.5	7.5	1.573	0.155	32.000	10.133	< .001
		-	NE	10.0	10.0	2.472	0.155	32.000	15.918	< .001
	7.5	- RTFOT	2.5	2.5	-8.485	0.155	32.000	-54.646	< .001	
			5.0	5.0	-4.328	0.155	32.000	-27.876	< .001	
			7.5	7.5	-1.732	0.155	32.000	-11.153	< .001	
10.0			10.0	-0.027	0.155	32.000	-0.172	1.000		
10.0	- RTFOT	2.5	2.5	-10.058	0.155	32.000	-64.779	< .001		
		5.0	5.0	-5.902	0.155	32.000	-38.009	< .001		
		7.5	7.5	-3.305	0.155	32.000	-21.285	< .001		
		10.0	10.0	-1.600	0.155	32.000	-10.305	< .001		
RTFOT	2.5	-	RTFOT	5.0	-10.957	0.155	32.000	-70.565	< .001	
		-	RTFOT	5.0	-6.800	0.155	32.000	-43.794	< .001	
		-	RTFOT	7.5	-4.203	0.155	32.000	-27.071	< .001	
		-	RTFOT	10.0	-2.498	0.155	32.000	-16.090	< .001	
	5.0	-	RTFOT	5.0	4.157	0.155	32.000	26.770	< .001	
		-	RTFOT	7.5	6.753	0.155	32.000	43.494	< .001	
		-	RTFOT	10.0	8.458	0.155	32.000	54.475	< .001	
		-	RTFOT	7.5	2.597	0.155	32.000	16.723	< .001	
	7.5	-	RTFOT	10.0	4.302	0.155	32.000	27.704	< .001	
		-	RTFOT	10.0	1.705	0.155	32.000	10.981	< .001	

Figura A - 37 –  $G^*/\text{sen}(\delta)$  x EnvFigura A - 38 –  $G^*/\text{sen}(\delta)$  x %OLUC

## ANÁLISE DA REGRESSÃO

Tabela A - 62 – Coeficientes do modelo quadrático (NE)

	Estimativa	Erro.padrao	tc	valor.p	R <sup>2</sup>
b0	10.1371	0.3056	33.1655	0	0.999919
b1	-1.3963	0.1115	-12.5188	0	
b2	0.0599	0.0088	6.8234	0	

Tabela A - 63 – ANOVA da regressão (NE)

	GL	SQ	QM	Fc	valor.p
Efeito linear	1	78.5215	78.5215	1085.64	0
Efeito quadratico	1	3.3675	3.3675	46.56	0
Desvios de Regressao	1	0.0066	0.0066	0.09	0.76453
Residuos	32	2.3145	0.0723		

Tabela A - 64 – Coeficientes do modelo quadrático (RTFOT)

	Estimativa	Erro.padrao	tc	valor.p	R <sup>2</sup>
b0	18.3321	0.3056	59.9772	0	0.999451
b1	-2.3447	0.1115	-21.0219	0	
b2	0.0981	0.0088	11.1649	0	

Tabela A - 65 – ANOVA da regressão (RTFOT)

	GL	SQ	QM	Fc	valor.p
Efeito linear	1	234.7242	234.7242	3245.31	0
Efeito quadratico	1	9.0160	9.0160	124.66	0
Desvios de Regressao	1	0.1340	0.1340	1.85	0.18298
Residuos	32	2.3145	0.0723		

## TEMPERATURA DE FALHA PARA O PARÂMETRO $G^*/\text{sen}(\delta)$

A temperatura de falha para o parâmetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$  em temperaturas altas e em amostras não envelhecidas e envelhecidas no curto prazo (RTFOT), obtidas no ensaio de cisalhamento dinâmico, é apresentada na Tabela A - 66.

Tabela A - 66 – Temperatura de falha [ $G^*/\text{sen}(\delta)$ ]

Ordem	Amostra	Condição	TM	OLUC (%)	Temperatura de falha (°C)	Resíduo
1	NE22B	NE	T1	0,0	91,0	-0,367
2	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10,0	72,2	-0,700
3	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10,0	72,8	-0,833
4	RTFOT22B	RTFOT	T2	0,0	90,8	-0,567
5	NE22B	NE	T1	0,0	90,9	-0,467
6	RTFOT22B	RTFOT	T2	0,0	91,7	0,333
7	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5,0	82,8	0,800
8	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5,0	81,5	-0,333
9	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10,0	74,7	1,800
10	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10,0	74,4	0,533
11	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10,0	74,2	0,500
12	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10,0	74,7	1,067
13	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5,0	82,3	-0,200
14	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5,0	82,4	-0,133
15	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5,0	83,5	0,967
16	RTFOT22B	RTFOT	T2	0,0	91,6	0,233
17	NE22B5OLUCTB100	NE	TB100	5,0	81,7	-0,833
18	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5,0	82,5	0,000
19	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	86,2	-0,333
20	RTFOT22B5OLUCTB100	RTFOT	TB100	5,0	82,7	0,200
21	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	86,7	-0,200
22	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	87,6	0,700
23	RTFOT22B2,5OLUCMD	RTFOT	MD	2,5	86,4	-0,500
24	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	77,1	0,233
25	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	77,0	-0,533
26	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	87,2	0,667
27	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	76,5	-0,367
28	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	77,6	0,067
29	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5,0	83,0	1,167
30	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5,0	82,0	0,000
31	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	87,2	0,300
32	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	87,7	0,767
33	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	86,7	-0,233
34	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	78,4	0,600
35	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	77,0	-0,733
36	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	86,2	-0,700
37	RTFOT22B2,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	2,5	86,4	-0,533
38	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	77,8	0,067
39	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	77,9	0,100
40	RTFOT22B7,5OLUCTB100	RTFOT	TB100	7,5	78,4	0,667
41	NE22B	NE	T1	0,0	92,2	0,833
42	NE22B10OLUCMD	NE	MD	10,0	71,8	-1,100
43	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10,0	73,0	-0,867
44	NE22B10OLUCTB100	NE	TB100	10,0	73,4	-0,233
45	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10,0	72,6	-1,100
46	NE22B2,5OLUCTB100	NE	TB100	2,5	87,3	0,400
47	NE22B5OLUCMD	NE	MD	5,0	81,0	-0,833
48	RTFOT22B5OLUCMD	RTFOT	MD	5,0	81,2	-0,800
49	NE22B7,5OLUCTB100	NE	TB100	7,5	77,1	-0,700
50	RTFOT22B10OLUCMD	RTFOT	MD	10,0	74,2	0,333
51	NE22B2,5OLUCMD	NE	MD	2,5	86,2	-0,333
52	NE22B7,5OLUCMD	NE	MD	7,5	77,0	0,133
53	RTFOT22B7,5OLUCMD	RTFOT	MD	7,5	78,0	0,467
54	RTFOT22B10OLUCTB100	RTFOT	TB100	10,0	74,3	0,600

NE: amostra não envelhecida; RTFOT: amostra envelhecida no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: Tratamento da borracha com OLUC (100 °C por 1 h); T1: Testemunha 1 (asfalto-borracha NE); T2: Testemunha 2 (asfalto-borracha RTFOT).

## PRESSUPOSTOS PARA REALIZAÇÃO DA ANOVA

Independência

Figura A - 39 – Resíduos padronizados ordenados

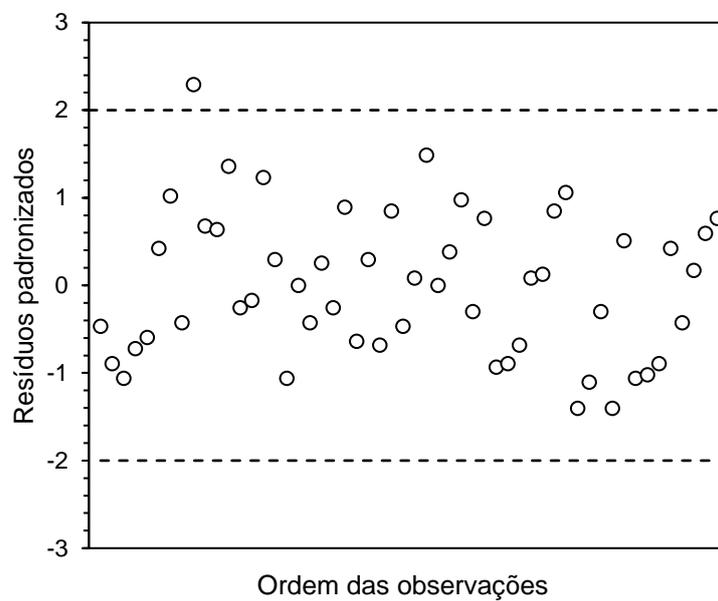


Tabela A - 67 – Teste de independência dos resíduos

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Durbin-Watson	D-stat	1,751	Os resíduos são independentes
	D-lower	1,523	
	D-upper	1,598	

*Critério:  $D_{lower} < D_{stat} < 4 - D_{upper}$*

$\alpha=0,05$

## Homogeneidade

Figura A - 40 – Desvio padrão em função da média

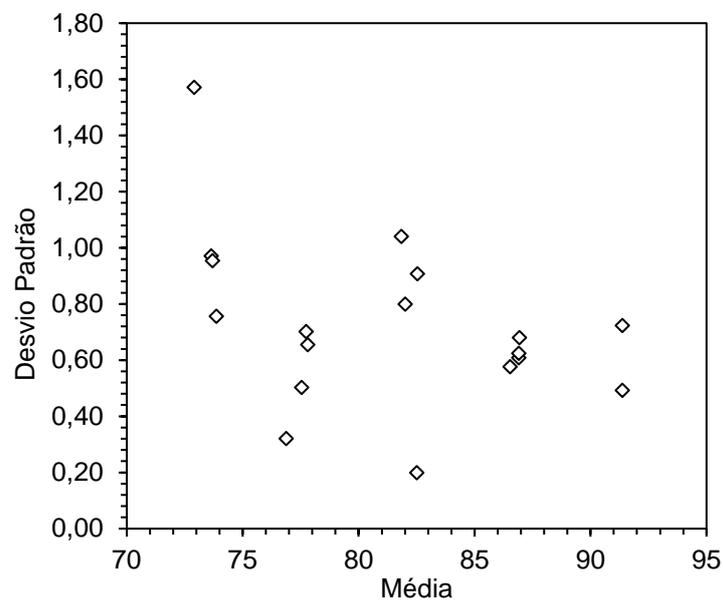


Tabela A - 68 – Teste de homogeneidade das variâncias

Teste	Parâmetro	Valor-p	Conclusão
Levene	Média	0,139	As variâncias dos resíduos são homogêneas
	Medianas	0,996	
	Média aparada	0,139	

*Critério: valor-p (média) >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## Normalidade

Figura A - 41 – Q-Q plot

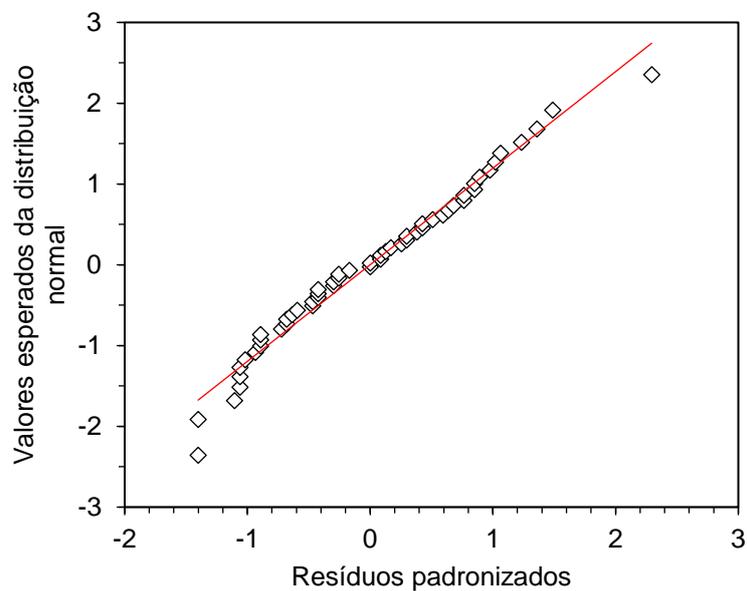


Tabela A - 69 – Teste de normalidade

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Shapiro-Wilk	W-stat	0,974	Os resíduos seguem uma distribuição normal
	Valor-p	0,279	

Critério:  $\text{valor-p} > \alpha$

$\alpha=0,05$

## ANOVA

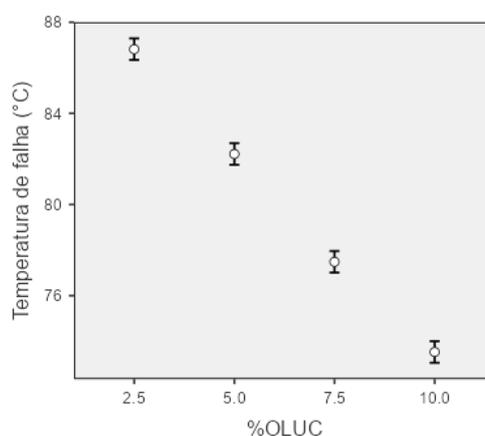
Tabela A - 70 – ANOVA da temperatura de falha do parâmetro  $G^*/\text{sen}(\delta)$ 

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Env	0.880	1	0.880	1.365	0.251
T_Mod	2.042	1	2.042	3.166	0.085
%OLUC	1195.672	3	398.557	617.918	< .001
Env * T_Mod	0.880	1	0.880	1.365	0.251
Env * %OLUC	0.324	3	0.108	0.167	0.918
T_Mod * %OLUC	0.362	3	0.121	0.187	0.904
Env * T_Mod * %OLUC	0.244	3	0.081	0.126	0.944
Resíduos	20.640	32	0.645		

Tabela A - 71 – Testes de comparações Post Hoc (efeito simples %OLUC)

Comparação						
%OLUC	%OLUC	Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey
2.5	- 5.0	4.600	0.328	32.000	14.030	< .001
	- 7.5	9.333	0.328	32.000	28.466	< .001
	- 10.0	13.292	0.328	32.000	40.539	< .001
5.0	- 7.5	4.733	0.328	32.000	14.437	< .001
	- 10.0	8.692	0.328	32.000	26.509	< .001
7.5	- 10.0	3.958	0.328	32.000	12.073	< .001

Figura A - 42 – Temperatura de falha x %OLUC



## ANÁLISE DA REGRESSÃO

Tabela A - 72 – Coeficientes do modelo linear

	Estimativa	Erro.padrao	tc	valor.p	R <sup>2</sup>
b0	91.1625	0.2840	321.0564	0	0.998553
b1	-1.7843	0.0415	-43.0241	0	

Tabela A - 73 – ANOVA da regressão

	GL	SQ	QM	Fc	valor.p
Efeito linear	1	1,193.9420	1,193.9420	1851.07	0
Desvios de Regressao	2	1.7303	0.8651	1.34	0.27582
Residuos	32	20.6400	0.6450		

## MÓDULO COMPLEXO (TEMPERATURA INTERMEDIÁRIA)

Os valores de módulo complexo ( $G^*$ ) durante o ensaio de cisalhamento dinâmico na temperatura de 10 °C, para amostras envelhecidas no longo prazo (PAV), são mostrados na Tabela A - 74.

Tabela A - 74 – Módulo complexo ( $G^*$ , 10 °C)

Ordem	Amostra	Condição	TM	OLUC (%)	$G^*$ (kPa)	Resíduo
1	PAV22B10OLUCMD	PAV	MD	10	859,6	31,100
2	PAV22B	PAV	T3	0	5311,2	219,267
3	PAV22B7,5OLUCTB100	PAV	TB100	7,5	1318,0	-31,567
4	PAV22B7,5OLUCTB100	PAV	TB100	7,5	1450,5	100,933
5	PAV22B10OLUCTB100	PAV	TB100	10	876,5	-20,433
6	PAV22B10OLUCTB100	PAV	TB100	10	894,6	-2,333
7	PAV22B5OLUCMD	PAV	MD	5	2401,0	98,900
8	PAV22B5OLUCMD	PAV	MD	5	2129,2	-172,900
9	PAV22B7,5OLUCMD	PAV	MD	7,5	1602,0	-203,167
10	PAV22B2,5OLUCMD	PAV	MD	2,5	3321,0	24,300
11	PAV22B2,5OLUCTB100	PAV	TB100	2,5	2819,0	-218,133
12	PAV22B	PAV	T3	0	5051,2	-40,733
13	PAV22B2,5OLUCMD	PAV	MD	2,5	3446,7	150,000
14	PAV22B2,5OLUCMD	PAV	MD	2,5	3122,4	-174,300
15	PAV22B5OLUCTB100	PAV	TB100	5	2113,1	170,900
16	PAV22B10OLUCMD	PAV	MD	10	872,3	43,800
17	PAV22B10OLUCMD	PAV	MD	10	753,6	-74,900
18	PAV22B2,5OLUCTB100	PAV	TB100	2,5	3020,8	-16,333
19	PAV22B5OLUCTB100	PAV	TB100	5	1898,7	-43,500
20	PAV22B5OLUCTB100	PAV	TB100	5	1814,8	-127,400
21	PAV22B7,5OLUCMD	PAV	MD	7,5	1952,8	147,633
22	PAV22B7,5OLUCMD	PAV	MD	7,5	1860,7	55,533
23	PAV22B	PAV	T3	0	4913,4	-178,533
24	PAV22B2,5OLUCTB100	PAV	TB100	2,5	3271,6	234,467
25	PAV22B5OLUCMD	PAV	MD	5	2376,1	74,000
26	PAV22B7,5OLUCTB100	PAV	TB100	7,5	1280,2	-69,367
27	PAV22B10OLUCTB100	PAV	TB100	10	919,7	22,767

NE: amostra não envelhecida; RTFOT: amostra envelhecida no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: Tratamento da borracha com OLUC (100 °C por 1 h); T1: Testemunha 1 (asfalto-borracha NE); T2: Testemunha 2 (asfalto-borracha RTFOT).

## PRESSUPOSTOS PARA REALIZAÇÃO DA ANOVA

Independência

Figura A - 43 –Resíduos padronizados ordenados

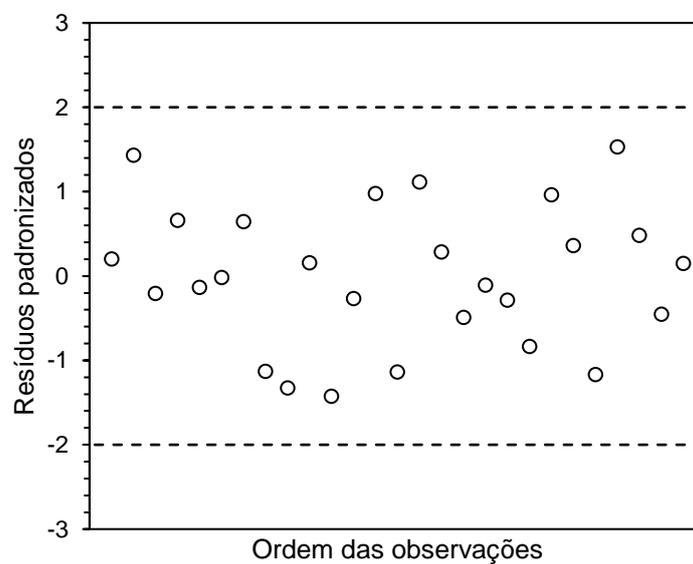


Tabela A - 75 – Teste de independência dos resíduos

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Durbin-Watson	D-stat	2,428	Os resíduos são independentes
	D-lower	1,316	
	D-upper	1,469	

*Critério:  $D_{lower} < D_{stat} < 4 - D_{upper}$*

$\alpha=0,05$

## Homogeneidade

Figura A - 44 –Desvio padrão em função da média

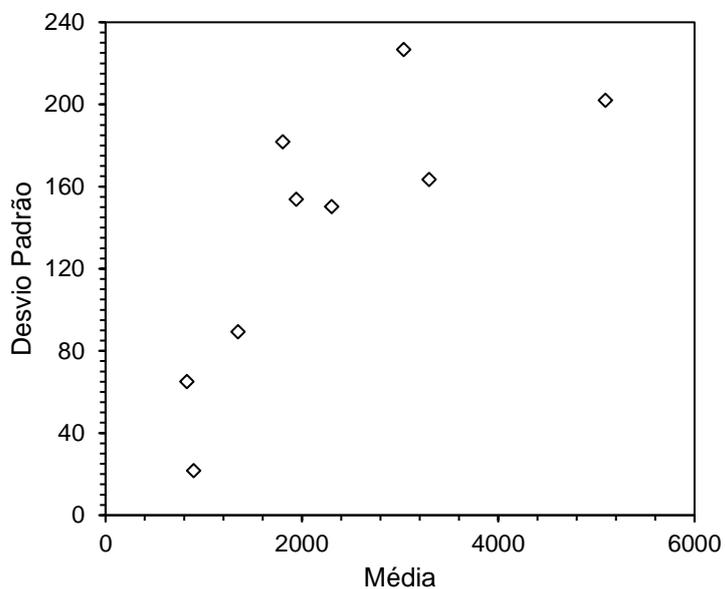


Tabela A - 76 – Teste de homogeneidade das variâncias

Teste	Parâmetro	Valor-p	Conclusão
Levene	Média	0,273	As variâncias dos resíduos são homogêneas
	Medianas	0,812	
	Média aparada	0,273	

*Critério: valor-p (média) >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## Normalidade

Figura A - 45 – Q-Q plot

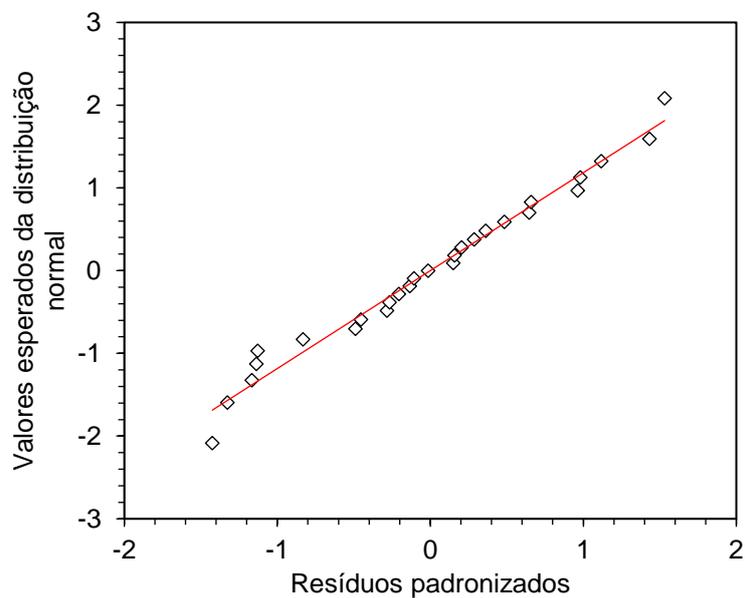


Tabela A - 77 – Teste de normalidade

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Shapiro-Wilk	W-stat	0,970	Os resíduos seguem uma distribuição normal
	Valor-p	0,603	

Critério:  $\text{valor-p} > \alpha$

$\alpha=0,05$

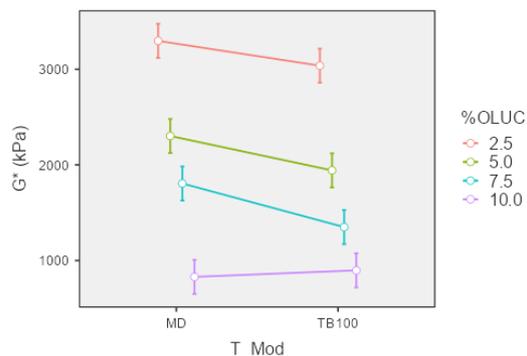
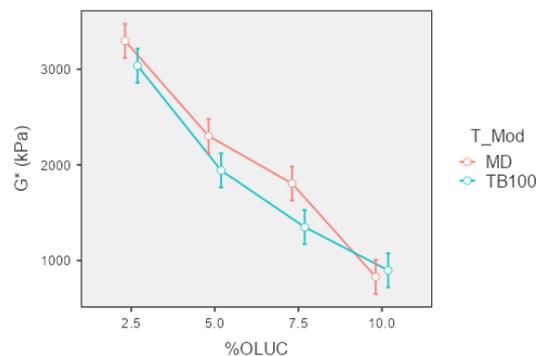
## ANOVA

Tabela A - 78 – ANOVA do módulo complexo (G\*) em temperatura intermediária

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
T_Mod	379991.500	1	379991.500	17.863	< .001
%OLUC	16981845.081	3	5660615.027	266.096	< .001
T_Mod * %OLUC	233744.518	3	77914.839	3.663	0.035
Resíduos	340364.887	16	21272.805		

Tabela A - 79 – Testes de comparações Post Hoc (interação T\_Mod x %OLUC)

Comparação					Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey
T_Mod	%OLUC	T_Mod	%OLUC						
MD	2.5	- MD	5.0	994.600	119.088	16.000	8.352	< .001	
		- MD	7.5	1491.533	119.088	16.000	12.525	< .001	
		- MD	10.0	2468.200	119.088	16.000	20.726	< .001	
	5.0	2.5	- TB100	5.0	259.567	119.088	16.000	2.180	0.411
			- TB100	7.5	1354.500	119.088	16.000	11.374	< .001
			- TB100	10.0	1947.133	119.088	16.000	16.350	< .001
		7.5	- TB100	2.5	2399.767	119.088	16.000	20.151	< .001
			- MD	7.5	496.933	119.088	16.000	4.173	0.013
			- MD	10.0	1473.600	119.088	16.000	12.374	< .001
	10.0	5.0	- TB100	2.5	-735.033	119.088	16.000	-6.172	< .001
			- TB100	5.0	359.900	119.088	16.000	3.022	0.111
			- TB100	7.5	952.533	119.088	16.000	7.999	< .001
7.5		- TB100	10.0	1405.167	119.088	16.000	11.799	< .001	
		- MD	10.0	976.667	119.088	16.000	8.201	< .001	
		- TB100	2.5	-1231.967	119.088	16.000	-10.345	< .001	
TB100	2.5	- TB100	5.0	-137.033	119.088	16.000	-1.151	0.935	
		- TB100	7.5	455.600	119.088	16.000	3.826	0.025	
		- TB100	10.0	908.233	119.088	16.000	7.627	< .001	
	5.0	- TB100	2.5	-2208.633	119.088	16.000	-18.546	< .001	
		- TB100	5.0	-1113.700	119.088	16.000	-9.352	< .001	
		- TB100	7.5	-521.067	119.088	16.000	-4.375	0.009	
7.5	10.0	- TB100	10.0	-68.433	119.088	16.000	-0.575	0.999	
		- TB100	2.5	1094.933	119.088	16.000	9.194	< .001	
		- TB100	7.5	1687.567	119.088	16.000	14.171	< .001	
	5.0	- TB100	10.0	2140.200	119.088	16.000	17.972	< .001	
		- TB100	7.5	592.633	119.088	16.000	4.976	0.003	
		- TB100	10.0	1045.267	119.088	16.000	8.777	< .001	
10.0	- TB100	7.5	452.633	119.088	16.000	3.801	0.026		
	- TB100	10.0							

Figura A - 46 –  $G^*$  x  $T_{Mod}$ Figura A - 47 –  $G^*$  x %OLUC

## ANÁLISE DA REGRESSÃO

Tabela A - 80 – Coeficientes do modelo linear (MD)

	Estimativa	Erro.padrao	tc	valor.p	R <sup>2</sup>
b0	4,033.5000	103.1329	39.1097	0	0.984905
b1	-316.0613	15.0635	-20.9819	0	

Tabela A - 81 – ANOVA da regressão (MD)

	GL	SQ	QM	Fc	valor.p
Efeito linear	1	9,365,134.0000	9,365,134.0000	440.24	0
Desvios de Regressao	2	143,537.8000	71,768.9100	3.37	0.05991
Residuos	16	340,364.9000	21,272.8100		

Tabela A - 82 – Coeficientes do modelo quadrático (TB100)

	Estimativa	Erro.padrao	tc	valor.p	R <sup>2</sup>
b0	4,362.6420	234.4243	18.6100	0	0.997445
b1	-601.6793	85.5444	-7.0335	0	
b2	25.6920	6.7366	3.8138	0.0015	

Tabela A - 83 – ANOVA da regressão (TB100)

	GL	SQ	QM	Fc	valor.p
Efeito linear	1	7,377,816.0000	7,377,816.0000	346.82	0
Efeito quadratico	1	309,412.0000	309,412.0000	14.54	0.00153
Desvios de Regressao	1	19,689.1900	19,689.1900	0.93	0.35034
Residuos	16	340,364.9000	21,272.8100		

### ÂNGULO DE FASE (TEMPERATURA INTERMEDIÁRIA)

Os resultados do ângulo de fase ( $\delta$ ) durante o ensaio de cisalhamento dinâmico na temperatura de 10 °C, para amostras envelhecidas no longo prazo (PAV), são apresentados na Tabela A - 84.

Tabela A - 84 – Ângulo de fase ( $\delta$ , 10 °C)

Ordem	Amostra	Condição	TM	OLUC (%)	$\delta$ (°)	Resíduo
1	PAV22B10OLUCMD	PAV	MD	10	47,3	0,333
2	PAV22B	PAV	T3	0	42,9	-0,333
3	PAV22B7,5OLUCTB100	PAV	TB100	7,5	46,6	0,300
4	PAV22B7,5OLUCTB100	PAV	TB100	7,5	45,6	-0,700
5	PAV22B10OLUCTB100	PAV	TB100	10	46,7	0,100
6	PAV22B10OLUCTB100	PAV	TB100	10	46,5	-0,100
7	PAV22B5OLUCMD	PAV	MD	5	44,2	-0,333
8	PAV22B5OLUCMD	PAV	MD	5	44,8	0,267
9	PAV22B7,5OLUCMD	PAV	MD	7,5	45,2	0,167
10	PAV22B2,5OLUCMD	PAV	MD	2,5	44,8	0,767
11	PAV22B2,5OLUCTB100	PAV	TB100	2,5	45,5	0,500
12	PAV22B	PAV	T3	0	43,2	-0,033
13	PAV22B2,5OLUCMD	PAV	MD	2,5	43,5	-0,533
14	PAV22B2,5OLUCMD	PAV	MD	2,5	43,8	-0,233
15	PAV22B5OLUCTB100	PAV	TB100	5	45,9	-0,033
16	PAV22B10OLUCMD	PAV	MD	10	46,7	-0,267
17	PAV22B10OLUCMD	PAV	MD	10	46,9	-0,067
18	PAV22B2,5OLUCTB100	PAV	TB100	2,5	45,1	0,100
19	PAV22B5OLUCTB100	PAV	TB100	5	45,7	-0,233
20	PAV22B5OLUCTB100	PAV	TB100	5	46,2	0,267
21	PAV22B7,5OLUCMD	PAV	MD	7,5	45	-0,033
22	PAV22B7,5OLUCMD	PAV	MD	7,5	44,9	-0,133
23	PAV22B	PAV	T3	0	43,6	0,367
24	PAV22B2,5OLUCTB100	PAV	TB100	2,5	44,4	-0,600
25	PAV22B5OLUCMD	PAV	MD	5	44,6	0,067
26	PAV22B7,5OLUCTB100	PAV	TB100	7,5	46,7	0,400
27	PAV22B10OLUCTB100	PAV	TB100	10	46,6	0,000

NE: amostra não envelhecida; RTFOT: amostra envelhecida no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: Tratamento da borracha com OLUC (100 °C por 1 h); T1: Testemunha 1 (asfalto-borracha NE); T2: Testemunha 2 (asfalto-borracha RTFOT).

## PRESSUPOSTOS PARA REALIZAÇÃO DA ANOVA

Independência

Figura A - 48 –Resíduos padronizados ordenados

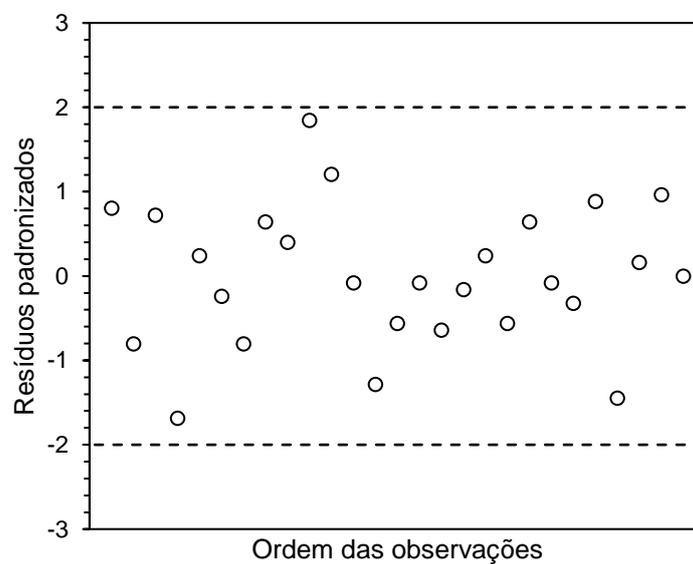


Tabela A - 85 – Teste de independência dos resíduos

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Durbin-Watson	D-stat	2,106	Os resíduos são independentes
	D-lower	1,316	
	D-upper	1,469	

*Critério:  $D_{lower} < D_{stat} < 4 - D_{upper}$*

$\alpha=0,05$

## Homogeneidade

Figura A - 49 – Desvio padrão em função da média

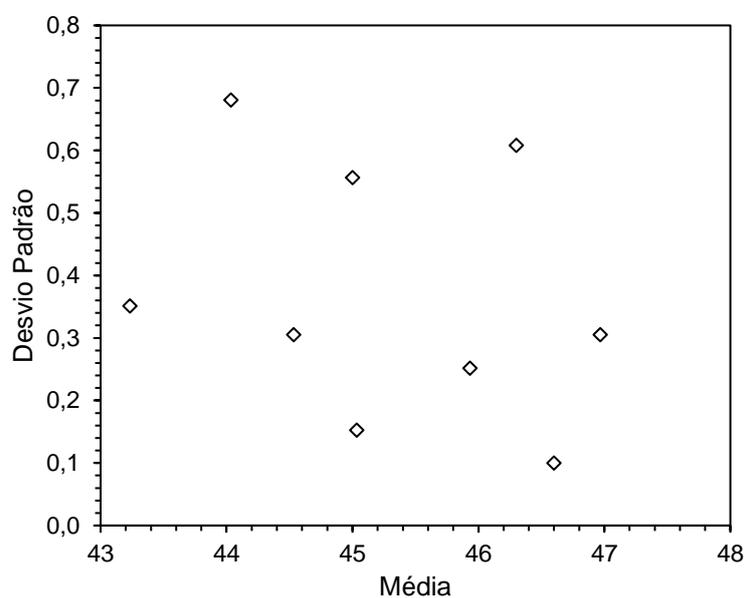


Tabela A - 86 – Teste de homogeneidade das variâncias

Teste	Parâmetro	Valor-p	Conclusão
Levene	Média	0,065	As variâncias dos resíduos são homogêneas
	Medianas	0,836	
	Média aparada	0,065	

*Critério: valor-p (média) >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## Normalidade

Figura A - 50 – Q-Q plot

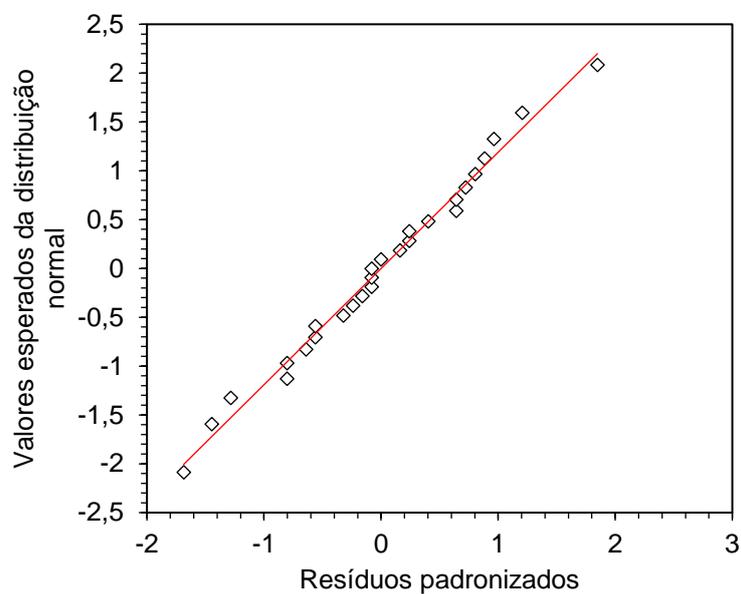


Tabela A - 87 – Teste de normalidade

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Shapiro-Wilk	W-stat	0,989	Os resíduos seguem uma distribuição normal
	Valor-p	0,989	

*Critério: valor-p >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

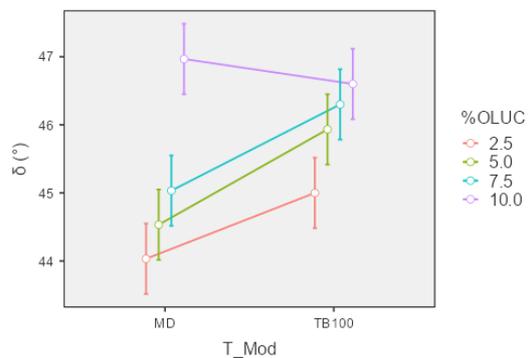
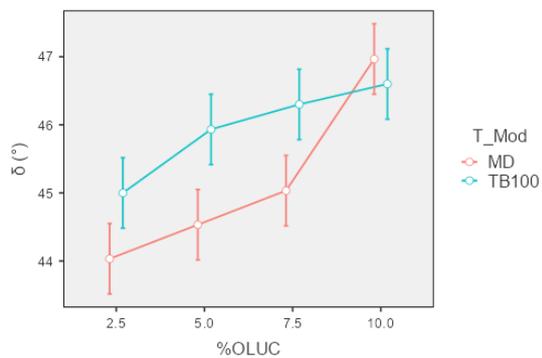
## ANOVA

Tabela A - 88 – ANOVA do ângulo de fase ( $\delta$ ) em temperatura intermediária

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
T_Mod	4.002	1	4.002	22.439	< .001
%OLUC	16.217	3	5.406	30.312	< .001
T_Mod * %OLUC	2.948	3	0.983	5.511	0.009
Resíduos	2.853	16	0.178		

Tabela A - 89 – Testes de comparações Post Hoc (interação T\_Mod x %OLUC)

		Comparação		Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey	
T_Mod	%OLUC	T_Mod	%OLUC						
MD	2.5	- MD	5.0	-0.500	0.345	16.000	-1.450	0.822	
		- MD	7.5	-1.000	0.345	16.000	-2.900	0.137	
		- MD	10.0	-2.933	0.345	16.000	-8.507	< .001	
	5.0	- TB100	2.5	-0.967	0.345	16.000	-2.804	0.162	
			5.0	-1.900	0.345	16.000	-5.510	< .001	
			7.5	-2.267	0.345	16.000	-6.574	< .001	
		- TB100	10.0	-2.567	0.345	16.000	-7.444	< .001	
		7.5	- MD	7.5	-0.500	0.345	16.000	-1.450	0.822
				10.0	-2.433	0.345	16.000	-7.057	< .001
	- TB100			2.5	-0.467	0.345	16.000	-1.353	0.865
	10.0	- TB100	5.0	-1.400	0.345	16.000	-4.060	0.016	
			7.5	-1.767	0.345	16.000	-5.124	0.002	
10.0			-2.067	0.345	16.000	-5.994	< .001		
7.5		- TB100	10.0	-1.933	0.345	16.000	-5.607	< .001	
			2.5	0.033	0.345	16.000	0.097	1.000	
			5.0	-0.900	0.345	16.000	-2.610	0.221	
7.5	- TB100	7.5	-1.267	0.345	16.000	-3.674	0.034		
		10.0	-1.567	0.345	16.000	-4.544	0.006		
		2.5	1.967	0.345	16.000	5.704	< .001		
		5.0	1.033	0.345	16.000	2.997	0.116		
TB100	2.5	- TB100	7.5	0.667	0.345	16.000	1.933	0.550	
		- TB100	10.0	0.367	0.345	16.000	1.063	0.956	
		- TB100	5.0	-0.933	0.345	16.000	-2.707	0.190	
		- TB100	10.0	-1.300	0.345	16.000	-3.770	0.028	
	5.0	- TB100	10.0	-1.600	0.345	16.000	-4.640	0.005	
		- TB100	7.5	-0.367	0.345	16.000	-1.063	0.956	
		- TB100	10.0	-0.667	0.345	16.000	-1.933	0.550	
		- TB100	7.5	-0.300	0.345	16.000	-0.870	0.985	

Figura A - 51 –  $\delta$  x T\_ModFigura A - 52 –  $\delta$  x %OLUC

## ANÁLISE DA REGRESSÃO

Tabela A - 90 – Coeficientes do modelo linear (TB100)

	Estimativa	Erro.padrao	tc	valor.p	R <sup>2</sup>
b0	44.6667	0.2986	149.5830	0	0.922088
b1	0.2067	0.0436	4.7385	0.0002	

Tabela A - 91 – ANOVA da regressão (TB100)

	GL	SQ	QM	Fc	valor.p
Efeito linear	1	4.0042	4.0042	22.45	0.00022
Desvios de Regressao	2	0.3383	0.1692	0.95	0.40802
Residuos	16	2.8533	0.1783		

## FADIGA (TEMPERATURA INTERMEDIÁRIA)

A Tabela A - 92 mostra os resultados do parâmetro de resistência à fadiga  $[G^* \times \text{sen}(\delta)]$  durante o ensaio de cisalhamento dinâmico na temperatura de 10 °C, para amostras envelhecidas no longo prazo (PAV).

Tabela A - 92 – Parâmetro  $G^* \times \text{sen}(\delta)$  na temperatura de 10 °C

Ordem	Amostra	Condição	TM	OLUC (%)	$G^* \times \text{sen}(\delta)$ (kPa)	Resíduo
1	PAV22B10OLUCMD	PAV	MD	10	632,22	26,420
2	PAV22B	PAV	T3	0	3614,12	126,717
3	PAV22B7,5OLUCTB100	PAV	TB100	7,5	958,2	-16,950
4	PAV22B7,5OLUCTB100	PAV	TB100	7,5	1035,68	60,530
5	PAV22B10OLUCTB100	PAV	TB100	10	637,88	-13,693
6	PAV22B10OLUCTB100	PAV	TB100	10	649,1	-2,473
7	PAV22B5OLUCMD	PAV	MD	5	1672,85	59,380
8	PAV22B5OLUCMD	PAV	MD	5	1500,21	-113,260
9	PAV22B7,5OLUCMD	PAV	MD	7,5	1136	-140,930
10	PAV22B2,5OLUCMD	PAV	MD	2,5	2340,45	48,953
11	PAV22B2,5OLUCTB100	PAV	TB100	2,5	2010,31	-136,777
12	PAV22B	PAV	T3	0	3458,52	-28,883
13	PAV22B2,5OLUCMD	PAV	MD	2,5	2372,21	80,713
14	PAV22B2,5OLUCMD	PAV	MD	2,5	2161,83	-129,667
15	PAV22B5OLUCTB100	PAV	TB100	5	1518,45	122,757
16	PAV22B10OLUCMD	PAV	MD	10	634,63	28,830
17	PAV22B10OLUCMD	PAV	MD	10	550,55	-55,250
18	PAV22B2,5OLUCTB100	PAV	TB100	2,5	2140,28	-6,807
19	PAV22B5OLUCTB100	PAV	TB100	5	1357,82	-37,873
20	PAV22B5OLUCTB100	PAV	TB100	5	1310,81	-84,883
21	PAV22B7,5OLUCMD	PAV	MD	7,5	1381,83	104,900
22	PAV22B7,5OLUCMD	PAV	MD	7,5	1312,96	36,030
23	PAV22B	PAV	T3	0	3389,57	-97,833
24	PAV22B2,5OLUCTB100	PAV	TB100	2,5	2290,67	143,583
25	PAV22B5OLUCMD	PAV	MD	5	1667,35	53,880
26	PAV22B7,5OLUCTB100	PAV	TB100	7,5	931,57	-43,580
27	PAV22B10OLUCTB100	PAV	TB100	10	667,74	16,167

NE: amostra não envelhecida; RTFOT: amostra envelhecida no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: Tratamento da borracha com OLUC (100 °C por 1 h); T1: Testemunha 1 (asfalto-borracha NE); T2: Testemunha 2 (asfalto-borracha RTFOT).

## PRESSUPOSTOS PARA REALIZAÇÃO DA ANOVA

Independência

Figura A - 53 – Resíduos padronizados ordenados

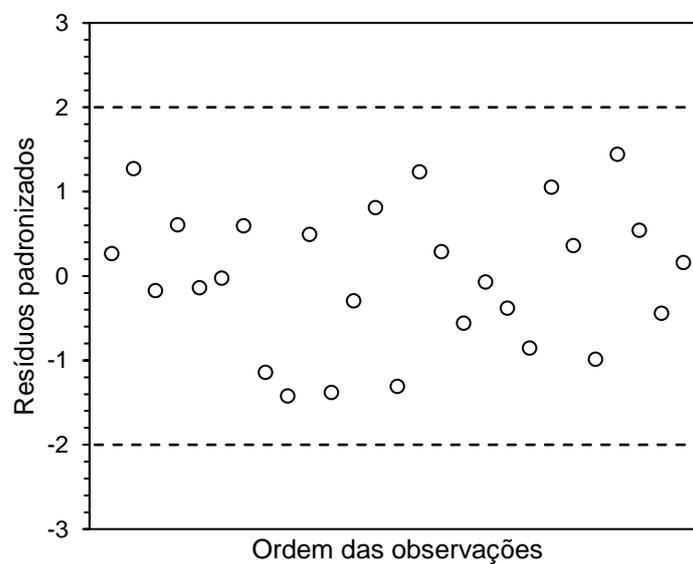


Tabela A - 93 – Teste de independência dos resíduos

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Durbin-Watson	D-stat	2,469	Os resíduos são independentes
	D-lower	1,316	
	D-upper	1,469	

*Critério:  $D_{lower} < D_{stat} < 4 - D_{upper}$*

$\alpha=0,05$

## Homogeneidade

Figura A - 54 – Desvio padrão em função da média

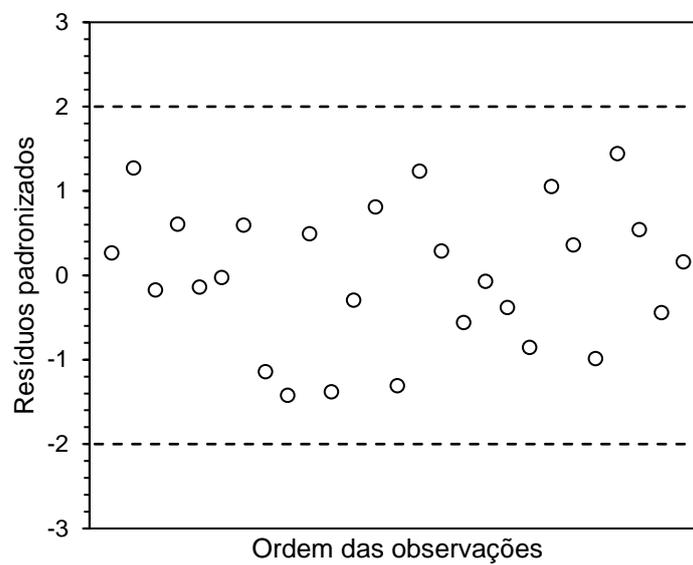


Tabela A - 94 – Teste de homogeneidade das variâncias

Teste	Parâmetro	Valor-p	Conclusão
Levene	Média	0,231	As variâncias dos resíduos são homogêneas
	Medianas	0,894	
	Média aparada	0,231	

*Critério: valor-p (média) >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## Normalidade

Figura A - 55 – Q-Q plot

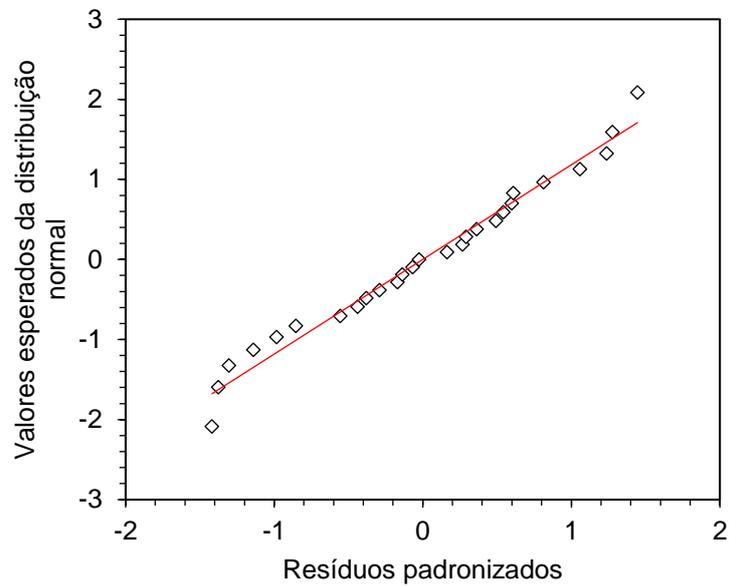


Tabela A - 95 – Teste de normalidade

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Shapiro-Wilk	W-stat	0,967	Os resíduos seguem uma distribuição normal
	Valor-p	0,530	

*Critério: valor-p >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

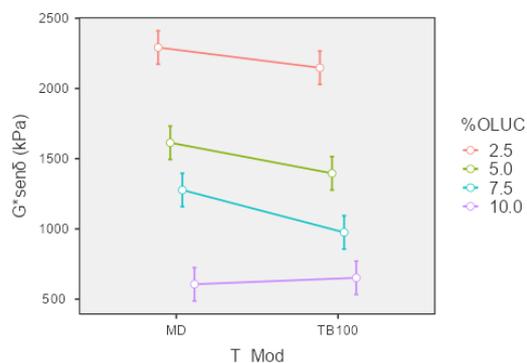
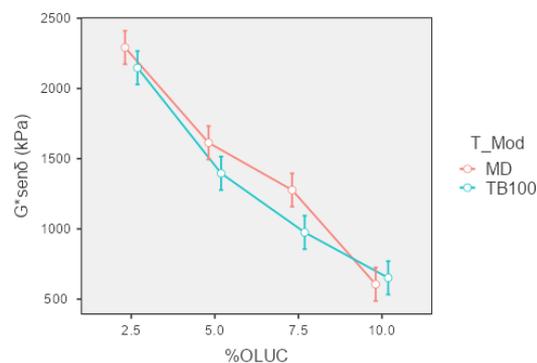
## ANOVA

Tabela A - 96 – ANOVA do parâmetro de resistência à fadiga [ $G^* \times \text{sen}(\delta)$ ]

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
T_Mod	143311.124	1	143311.124	15.174	0.001
%OLUC	8090820.059	3	2696940.020	285.558	< .001
T_Mod * %OLUC	98859.813	3	32953.271	3.489	0.040
Resíduos	151111.081	16	9444.443		

Tabela A - 97 – Testes de comparações Post Hoc (interação T\_Mod x %OLUC)

		Comparação		Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey	
T_Mod	%OLUC	T_Mod	%OLUC						
MD	2.5	- MD	5.0	678.027	79.349	16.000	8.545	< .001	
		- MD	7.5	1014.567	79.349	16.000	12.786	< .001	
		- MD	10.0	1685.697	79.349	16.000	21.244	< .001	
	5.0	2.5	- TB100	5.0	144.410	79.349	16.000	1.820	0.617
			- TB100	7.5	895.803	79.349	16.000	11.289	< .001
			- TB100	10.0	1316.347	79.349	16.000	16.589	< .001
		5.0	- TB100	2.5	1639.923	79.349	16.000	20.667	< .001
			- MD	7.5	336.540	79.349	16.000	4.241	0.011
			- MD	10.0	1007.670	79.349	16.000	12.699	< .001
	7.5	2.5	- TB100	5.0	-533.617	79.349	16.000	-6.725	< .001
			- TB100	7.5	217.777	79.349	16.000	2.745	0.178
			- TB100	10.0	638.320	79.349	16.000	8.044	< .001
5.0		- TB100	2.5	961.897	79.349	16.000	12.122	< .001	
		- MD	10.0	671.130	79.349	16.000	8.458	< .001	
		- TB100	7.5	-870.157	79.349	16.000	-10.966	< .001	
10.0	2.5	- TB100	5.0	-118.763	79.349	16.000	-1.497	0.799	
		- TB100	7.5	301.780	79.349	16.000	3.803	0.026	
		- TB100	10.0	625.357	79.349	16.000	7.881	< .001	
	5.0	- TB100	2.5	-1541.287	79.349	16.000	-19.424	< .001	
		- TB100	7.5	-789.893	79.349	16.000	-9.955	< .001	
		- TB100	10.0	-369.350	79.349	16.000	-4.655	0.005	
TB100	2.5	- TB100	5.0	-45.773	79.349	16.000	-0.577	0.999	
		- TB100	7.5	751.393	79.349	16.000	9.469	< .001	
		- TB100	10.0	1171.937	79.349	16.000	14.769	< .001	
	5.0	- TB100	5.0	1495.513	79.349	16.000	18.847	< .001	
		- TB100	7.5	420.543	79.349	16.000	5.300	0.001	
		- TB100	10.0	744.120	79.349	16.000	9.378	< .001	
7.5	- TB100	5.0	323.577	79.349	16.000	4.078	0.015		
	- TB100	10.0							

Figura A - 56 –  $G^* \times \text{sen}(\delta)$  x T\_ModFigura A - 57 –  $G^* \times \text{sen}(\delta)$  x %OLUC

## ANÁLISE DA REGRESSÃO

Tabela A - 98 – Coeficientes do modelo linear (MD)

	Estimativa	Erro.padrao	tc	valor.p	R <sup>2</sup>
b0	2,795.3320	68.7184	40.6780	0	0.984523
b1	-215.7452	10.0370	-21.4951	0	

Tabela A - 99 – ANOVA da regressão (MD)

	GL	SQ	QM	Fc	valor.p
Efeito linear	1	4,363,687.0000	4,363,687.0000	462.04	0
Desvios de Regressao	2	68,597.6200	34,298.8100	3.63	0.05007
Residuos	16	151,111.1000	9,444.4430		

Tabela A - 100 – Coeficientes do modelo quadrático (TB100)

	Estimativa	Erro.padrao	tc	valor.p	R <sup>2</sup>
b0	3,053.9180	156.1990	19.5514	0	0.997816
b1	-410.1917	56.9990	-7.1965	0	
b2	17.1127	4.4887	3.8124	0.0015	

Tabela A - 101 – ANOVA da regressão (TB100)

	GL	SQ	QM	Fc	valor.p
Efeito linear	1	3,611,920.0000	3,611,920.0000	382.44	0
Efeito quadratico	1	137,270.3000	137,270.3000	14.53	0.00153
Desvios de Regressao	1	8,205.2120	8,205.2120	0.87	0.36514
Residuos	16	151,111.1000	9,444.4430		

**RIGIDEZ (BAIXA TEMPERATURA)**

Os resultados de rigidez na temperatura de -24 °C, obtidos no ensaio de fluência em viga das amostras envelhecidas no longo prazo (PAV), são apresentados na Tabela A - 102.

Tabela A - 102 – Rigidez (-24 °C)

Ordem	Amostra	Condição	TM	OLUC (%)	S (MPa)	Resíduo
1	PAV22B2,5OLUCMD	PAV	MD	2,5	177,0	8,333
2	PAV22B2,5OLUCMD	PAV	MD	2,5	164,0	-4,667
3	PAV22B5OLUCTB100	PAV	TB100	5	148,0	2,667
4	PAV22B5OLUCTB100	PAV	TB100	5	141,0	-4,333
5	PAV22B5OLUCTB100	PAV	TB100	5	147,0	1,667
6	PAV22B7,5OLUCMD	PAV	MD	7,5	96,9	-6,733
7	PAV22B7,5OLUCMD	PAV	MD	7,5	112,0	8,367
8	PAV22B7,5OLUCTB100	PAV	TB100	7,5	98,3	5,733
9	PAV22B10OLUCTB100	PAV	TB100	10	75,8	2,333
10	PAV22B10OLUCTB100	PAV	TB100	10	77,4	3,933
11	PAV22B	PAV	T3	0	329,0	7,667
12	PAV22B	PAV	T3	0	321,0	-0,333
13	PAV22B2,5OLUCTB100	PAV	TB100	2,5	180,0	12,667
14	PAV22B5OLUCMD	PAV	MD	5	151,0	-5,667
15	PAV22B5OLUCMD	PAV	MD	5	163,0	6,333
16	PAV22B10OLUCMD	PAV	MD	10	83,9	4,167
17	PAV22B10OLUCMD	PAV	MD	10	80,6	0,867
18	PAV22B	PAV	T3	0	314,0	-7,333
19	PAV22B2,5OLUCMD	PAV	MD	2,5	165,0	-3,667
20	PAV22B2,5OLUCTB100	PAV	TB100	2,5	160,0	-7,333
21	PAV22B2,5OLUCTB100	PAV	TB100	2,5	162,0	-5,333
22	PAV22B5OLUCMD	PAV	MD	5	156,0	-0,667
23	PAV22B7,5OLUCMD	PAV	MD	7,5	102,0	-1,633
24	PAV22B7,5OLUCTB100	PAV	TB100	7,5	89,8	-2,767
25	PAV22B7,5OLUCTB100	PAV	TB100	7,5	89,6	-2,967
26	PAV22B10OLUCMD	PAV	MD	10	74,7	-5,033
27	PAV22B10OLUCTB100	PAV	TB100	10	67,2	-6,267

NE: amostra não envelhecida; RTFOT: amostra envelhecida no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: Tratamento da borracha com OLUC (100 °C por 1 h); T1: Testemunha 1 (asfalto-borracha NE); T2: Testemunha 2 (asfalto-borracha RTFOT).

## PRESSUPOSTOS PARA REALIZAÇÃO DA ANOVA

Independência

Figura A - 58 – Resíduos padronizados ordenados

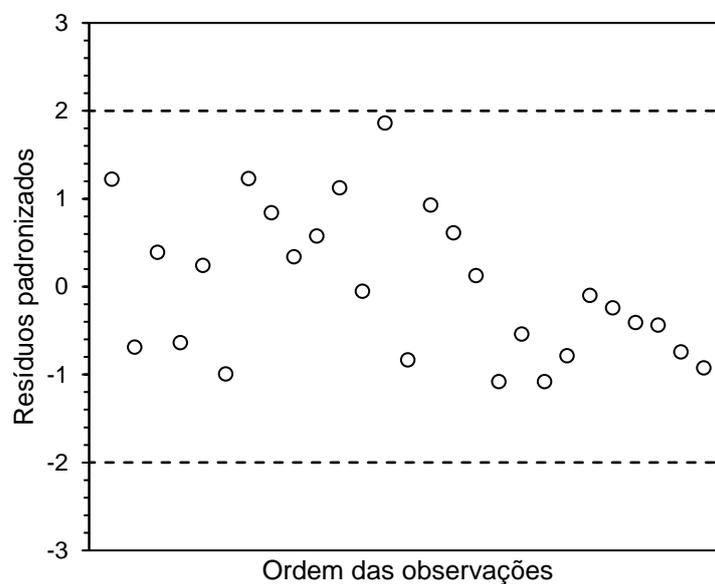


Tabela A - 103 – Teste de independência dos resíduos

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Durbin-Watson	D-stat	2,173	Os resíduos são independentes
	D-lower	1,316	
	D-upper	1,469	

*Critério:  $D_{lower} < D_{stat} < 4 - D_{upper}$*

$\alpha=0,05$

## Homogeneidade

Figura A - 59 – Desvio padrão em função da média

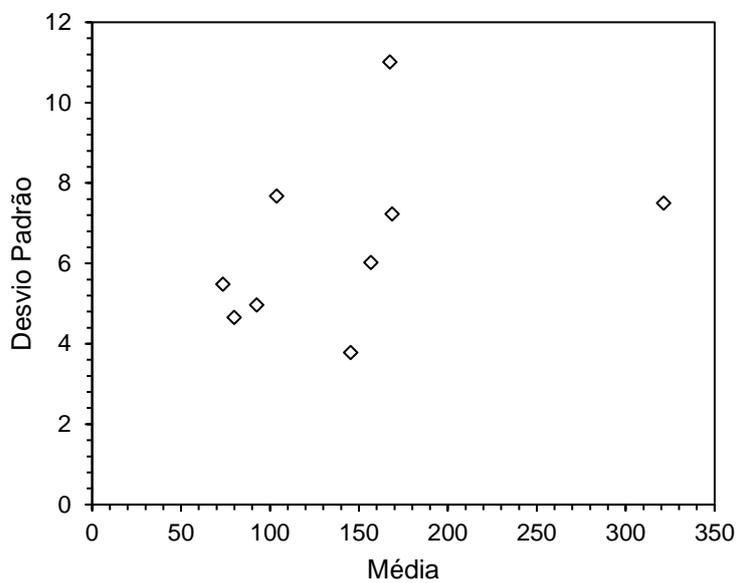


Tabela A - 104 – Teste de homogeneidade das variâncias

Teste	Parâmetro	Valor-p	Conclusão
Levene	Média	0,457	As variâncias dos resíduos são homogêneas
	Medianas	0,990	
	Média aparada	0,457	

*Critério: valor-p (média) >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## Normalidade

Figura A - 60 – Q-Q plot

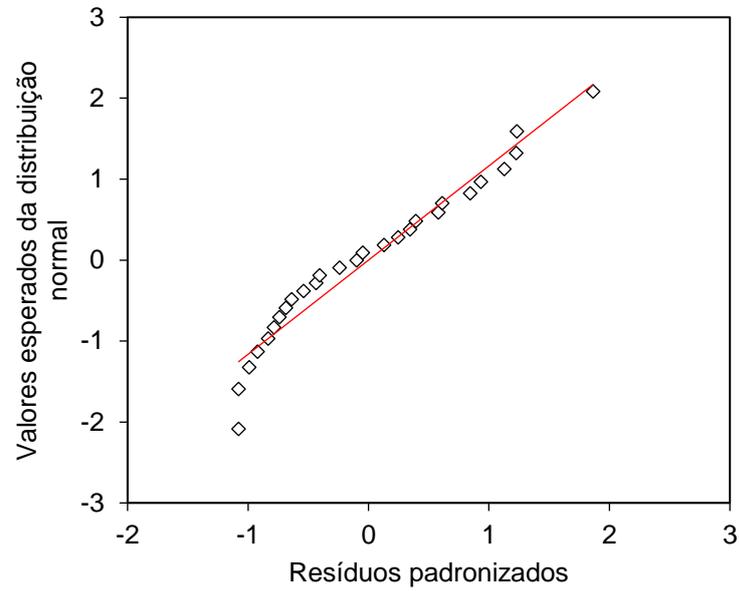


Tabela A - 105 – Teste de normalidade

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Shapiro-Wilk	W-stat	0,939	Os resíduos seguem uma distribuição normal
	Valor-p	0,117	

*Critério: valor-p >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## ANOVA

Tabela A - 106 – ANOVA da rigidez (S)

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
T_Mod	337.500	1	337.500	7.504	0.015
%OLUC	33487.485	3	11162.495	248.182	< .001
T_Mod * %OLUC	100.447	3	33.482	0.744	0.541
Resíduos	719.633	16	44.977		

Tabela A - 107 – Testes de comparações Post Hoc (efeito simples T\_Mod)

Comparação							
T_Mod	T_Mod	Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey	
MD	- TB100	7.500	2.738	16.000	2.739	0.015	

Figura A - 61 – Rigidez x T\_Mod

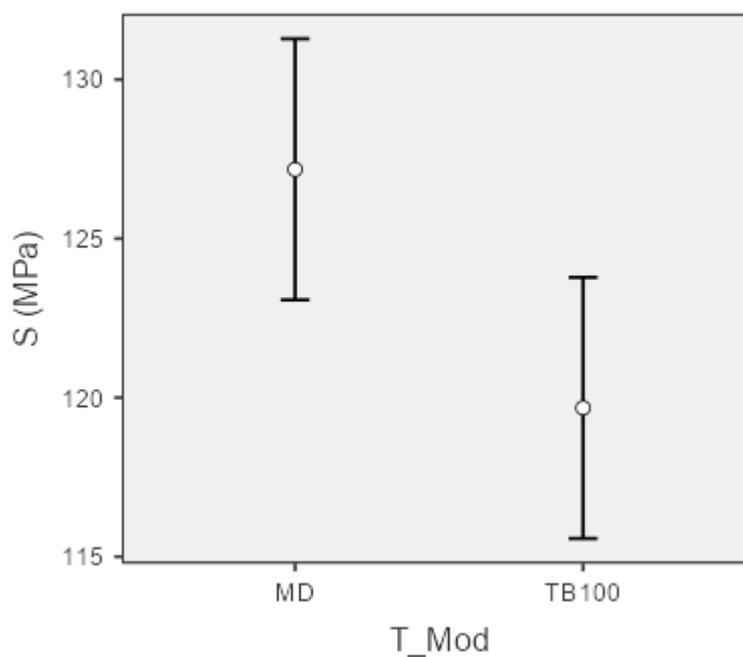
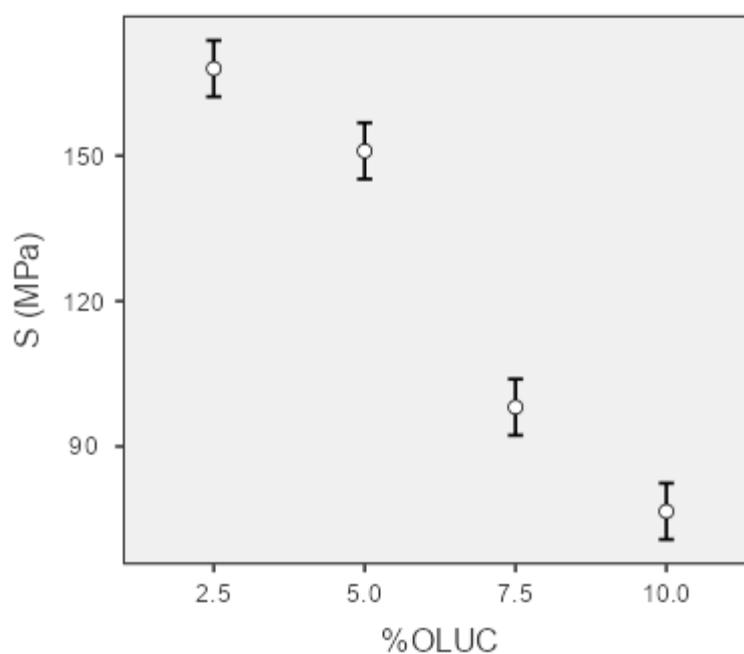


Tabela A - 108 – Testes de comparações Post Hoc (efeito simples %OLUC)

Comparaçã		%OLUC	Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey
%OLUC	%OLUC						
2.5	- 5.0		17.000	3.872	16.000	4.390	0.002
	- 7.5		69.900	3.872	16.000	18.053	< .001
	- 10.0		91.400	3.872	16.000	23.605	< .001
5.0	- 7.5		52.900	3.872	16.000	13.662	< .001
	- 10.0		74.400	3.872	16.000	19.215	< .001
7.5	- 10.0		21.500	3.872	16.000	5.553	< .001

Figura A - 62 – Rigidez x %OLUC



**RELAXAÇÃO (BAIXA TEMPERATURA)**

A Tabela A - 109 mostra os resultados do módulo de relaxação (valor-m) na temperatura de -24 °C, obtidos para as amostras envelhecidas no PAV por meio do ensaio de fluência em viga.

Tabela A - 109 – Módulo de relaxação (valor-m, -24 °C)

Ordem	Amostra	Condição	TM	OLUC (%)	valor-m	Resíduo
1	PAV22B2,5OLUCMD	PAV	MD	2,5	0,278	-0,003
2	PAV22B2,5OLUCMD	PAV	MD	2,5	0,287	0,006
3	PAV22B2,5OLUCTB100	PAV	TB100	2,5	0,276	0,007
4	PAV22B5OLUCTB100	PAV	TB100	5	0,298	-0,002
5	PAV22B5OLUCTB100	PAV	TB100	5	0,293	-0,007
6	PAV22B7,5OLUCMD	PAV	MD	7,5	0,316	-0,005
7	PAV22B7,5OLUCTB100	PAV	TB100	7,5	0,319	-0,002
8	PAV22B10OLUCTB100	PAV	TB100	10	0,34	0,000
9	PAV22B10OLUCTB100	PAV	TB100	10	0,331	-0,009
10	PAV22B	PAV	T3	0	0,235	-0,001
11	PAV22B	PAV	T3	0	0,231	-0,005
12	PAV22B2,5OLUCTB100	PAV	TB100	2,5	0,265	-0,004
13	PAV22B5OLUCMD	PAV	MD	5	0,295	0,001
14	PAV22B7,5OLUCTB100	PAV	TB100	7,5	0,318	-0,003
15	PAV22B10OLUCMD	PAV	MD	10	0,352	0,006
16	PAV22B10OLUCMD	PAV	MD	10	0,347	0,001
17	PAV22B	PAV	T3	0	0,241	0,005
18	PAV22B2,5OLUCMD	PAV	MD	2,5	0,277	-0,004
19	PAV22B2,5OLUCTB100	PAV	TB100	2,5	0,266	-0,003
20	PAV22B5OLUCMD	PAV	MD	5	0,286	-0,008
21	PAV22B5OLUCMD	PAV	MD	5	0,3	0,006
22	PAV22B5OLUCTB100	PAV	TB100	5	0,309	0,009
23	PAV22B7,5OLUCMD	PAV	MD	7,5	0,329	0,008
24	PAV22B7,5OLUCMD	PAV	MD	7,5	0,319	-0,002
25	PAV22B7,5OLUCTB100	PAV	TB100	7,5	0,325	0,004
26	PAV22B10OLUCMD	PAV	MD	10	0,339	-0,007
27	PAV22B10OLUCTB100	PAV	TB100	10	0,349	0,009

NE: amostra não envelhecida; RTFOT: amostra envelhecida no curto prazo; MD: modificação direta; TB100: Tratamento da borracha com OLUC (100 °C por 1 h); T1: Testemunha 1 (asfalto-borracha NE); T2: Testemunha 2 (asfalto-borracha RTFOT).

## PRESSUPOSTOS PARA REALIZAÇÃO DA ANOVA

Independência

Figura A - 63 – Resíduos padronizados ordenados

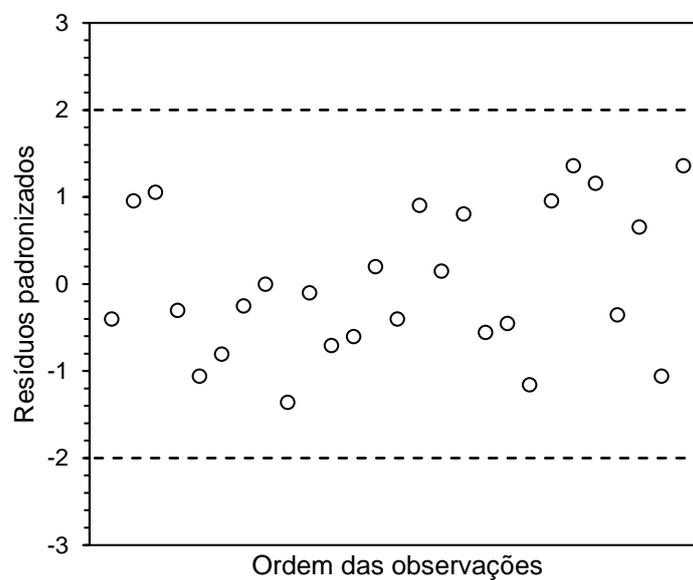


Tabela A - 110 – Teste de independência dos resíduos

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Durbin-Watson	D-stat	1,847	Os resíduos são independentes
	D-lower	1,316	
	D-upper	1,469	

*Critério:  $D_{lower} < D_{stat} < 4 - D_{upper}$*

$\alpha=0,05$

## Homogeneidade

Figura A - 64 – Desvio padrão em função da média

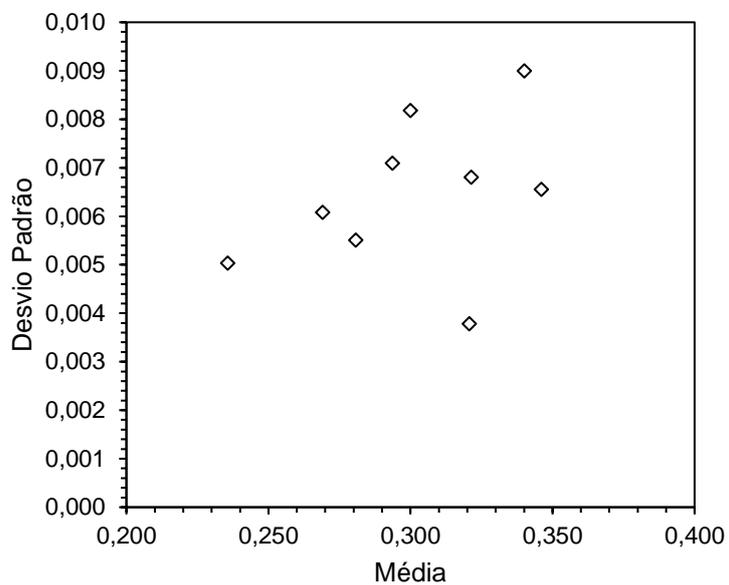


Tabela A - 111 – Teste de homogeneidade das variâncias

Teste	Parâmetro	Valor-p	Conclusão
Levene	Média	0,938	As variâncias dos resíduos são homogêneas
	Medianas	0,992	
	Média aparada	0,938	

*Critério: valor-p (média) >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## Normalidade

Figura A - 65 – Q-Q plot

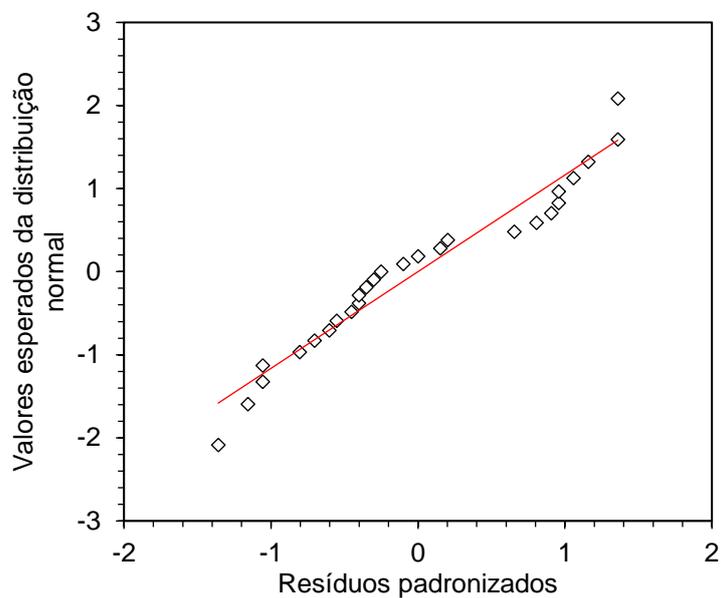


Tabela A - 112 – Teste de normalidade

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Shapiro-Wilk	W-stat	0,936	Os resíduos seguem uma distribuição normal
	Valor-p	0,095	

*Critério: valor-p >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## ANOVA

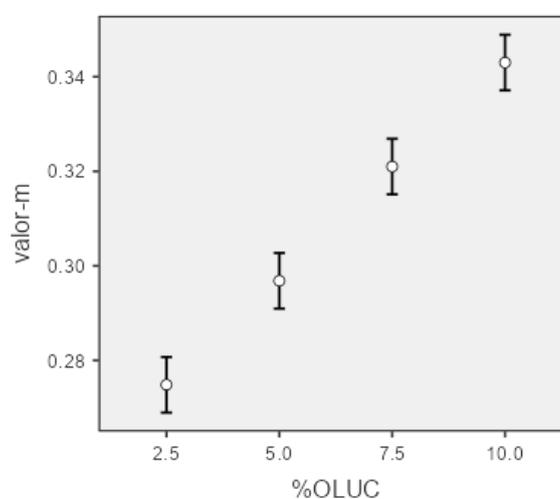
Tabela A - 113 – ANOVA do módulo de relaxação (valor-m)

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
T_Mod	0.000	1	0.000	1.170	0.295
%OLUC	0.016	3	0.005	113.301	< .001
T_Mod * %OLUC	0.000	3	0.000	1.913	0.168
Resíduos	0.001	16	0.000		

Tabela A - 114 – Testes de comparações Post Hoc (efeito simples %OLUC)

Comparação							
%OLUC	%OLUC	Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey	
2.5	- 5.0	-0.022	0.004	16.000	-5.608	< .001	
	- 7.5	-0.046	0.004	16.000	-11.769	< .001	
	- 10.0	-0.068	0.004	16.000	-17.377	< .001	
5.0	- 7.5	-0.024	0.004	16.000	-6.160	< .001	
	- 10.0	-0.046	0.004	16.000	-11.769	< .001	
7.5	- 10.0	-0.022	0.004	16.000	-5.608	< .001	

Figura A - 66 – Valor-m x %OLUC



## ANÁLISE DA REGRESSÃO

Tabela A - 115 – Coeficientes do modelo linear

	Estimativa	Erro.padrao	tc	valor.p	R <sup>2</sup>
b0	0.2517	0.0034	74.1029	0	0.999641
b1	0.0091	0.0005	18.4331	0	

Tabela A - 116 – ANOVA da regressão

	GL	SQ	QM	Fc	valor.p
Efeito linear	1	0.0157	0.0157	339.78	0
Desvios de Regressao	2	0.00001	0	0.06	0.94103
Residuos	16	0.0007	0.00005		

## VARIAÇÃO DE MASSA

Os resultados obtidos para variação de massa após o envelhecimento de curto prazo (RTFOT) são apresentados na Tabela A - 117.

Tabela A - 117 – Variação de massa

Ordem	Amostra	TM	OLUC (%)	Variação de massa (%)	Resíduo
1	22B	T	0	0,15	-0,010
2	22B	T	0	0,24	0,075
3	22B5OLUCTB100	TB100	5	0,44	0,091
4	22B10OLUCMD	MD	10	0,84	0,004
5	22B10OLUCMD	MD	10	0,87	0,033
6	22B	T	0	0,10	-0,065
7	22B5OLUCTB100	TB100	5	0,33	-0,019
8	22B5OLUCTB100	TB100	5	0,28	-0,073
9	22B2,5OLUCMD	MD	2,5	0,16	-0,049
10	22B2,5OLUCMD	MD	2,5	0,12	-0,089
11	22B2,5OLUCMD	MD	2,5	0,35	0,137
12	22B7,5OLUCMD	MD	7,5	0,74	0,121
13	22B7,5OLUCMD	MD	7,5	0,66	0,038
14	22B2,5OLUCTB100	TB100	2,5	0,11	0,003
15	22B2,5OLUCTB100	TB100	2,5	0,09	-0,016
16	22B7,5OLUCTB100	TB100	7,5	0,45	-0,001
17	22B10OLUCMD	MD	10	0,80	-0,037
18	22B10OLUCTB100	TB100	10	0,68	0,043
19	22B10OLUCTB100	TB100	10	0,62	-0,016
20	22B10OLUCTB100	TB100	10	0,61	-0,028
21	22B2,5OLUCTB100	TB100	2,5	0,12	0,013
22	22B5OLUCMD	MD	5	0,29	-0,071
23	22B5OLUCMD	MD	5	0,37	0,008
24	22B5OLUCMD	MD	5	0,42	0,062
25	22B7,5OLUCTB100	TB100	7,5	0,66	0,211
26	22B7,5OLUCTB100	TB100	7,5	0,24	-0,210
27	22B7,5OLUCMD	MD	7,5	0,46	-0,160

MD: modificação direta; TB100: Tratamento da borracha com OLUC (100 °C por 1 h); T: Testemunha (asfalto-borracha).

## PRESSUPOSTOS PARA REALIZAÇÃO DA ANOVA

Independência

Figura A - 67 – Resíduos padronizados ordenados

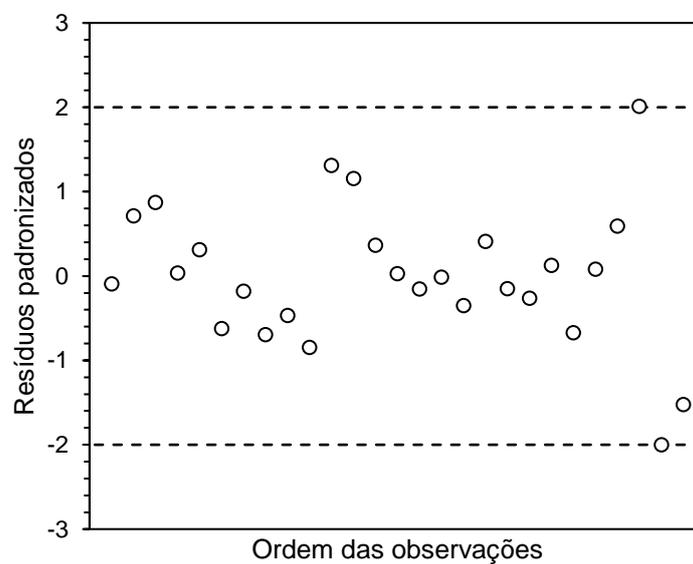


Tabela A - 118 – Teste de independência dos resíduos

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Durbin-Watson	D-stat	1,691	Os resíduos são independentes
	D-lower	1,316	
	D-upper	1,469	

*Critério:  $D_{lower} < D_{stat} < 4 - D_{upper}$*

$\alpha=0,05$

## Homogeneidade

Figura A - 68 – Desvio padrão em função da média

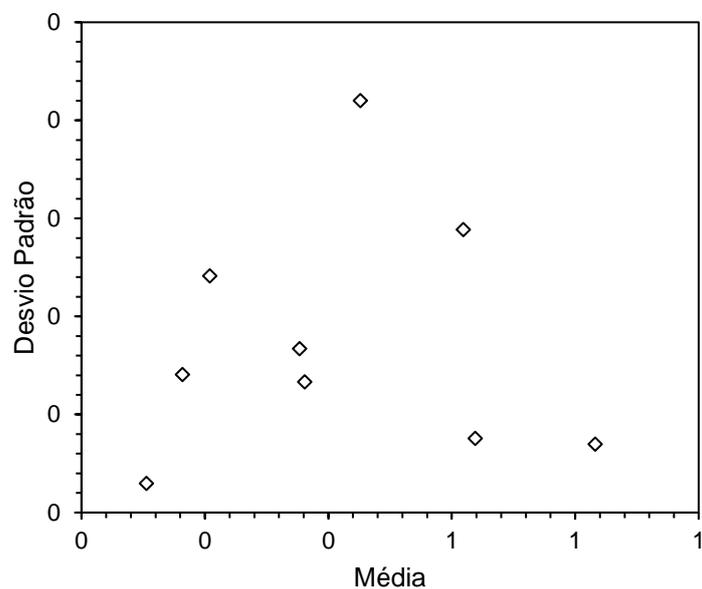


Tabela A - 119 – Teste de homogeneidade das variâncias

Teste	Parâmetro	Valor-p	Conclusão
Levene	Média	0,109	As variâncias dos resíduos são homogêneas
	Medianas	0,427	
	Média aparada	0,109	

*Critério: valor-p (média) >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## Normalidade

Figura A - 69 – Q-Q plot

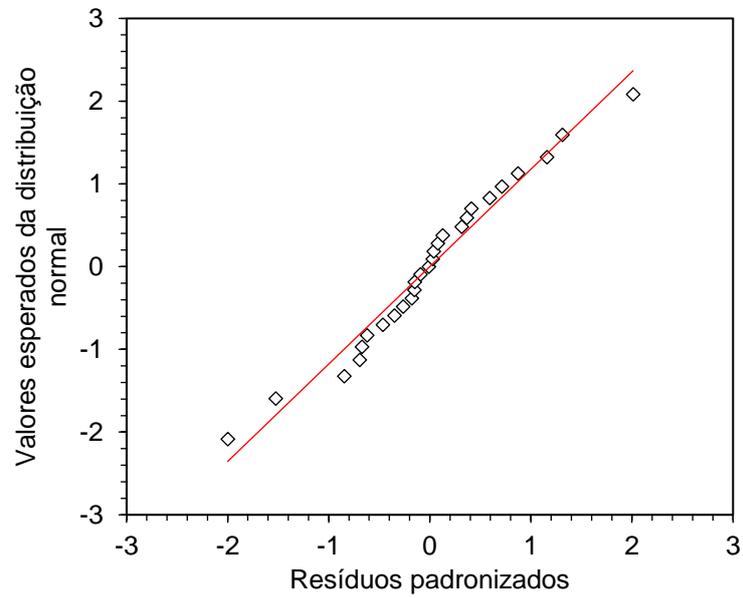


Tabela A - 120 – Teste de normalidade

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Shapiro-Wilk	W-stat	0,976	Os resíduos seguem uma distribuição normal
	Valor-p	0,759	

*Critério: valor-p >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## ANOVA

Tabela A - 121 – ANOVA da variação de massa

	<b>Soma de Quadrados</b>	<b>gl</b>	<b>Quadrado médio</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
T_Mod	0.088	1	0.088	7.464	0.015
%OLUC	1.101	3	0.367	31.257	< .001
T_Mod * %OLUC	0.032	3	0.011	0.906	0.460
Resíduos	0.188	16	0.012		

Tabela A - 122 – Testes de comparações Post Hoc (efeito simples T\_Mod)

<b>Comparação</b>						
<b>T_Mod</b>	<b>T_Mod</b>	<b>Diferença Média</b>	<b>Erro-padrão</b>	<b>gl</b>	<b>t</b>	<b>Ptukey</b>
TB100	- MD	-0.121	0.044	16.000	-2.732	0.015

Figura A - 70 – Variação de massa x T\_Mod

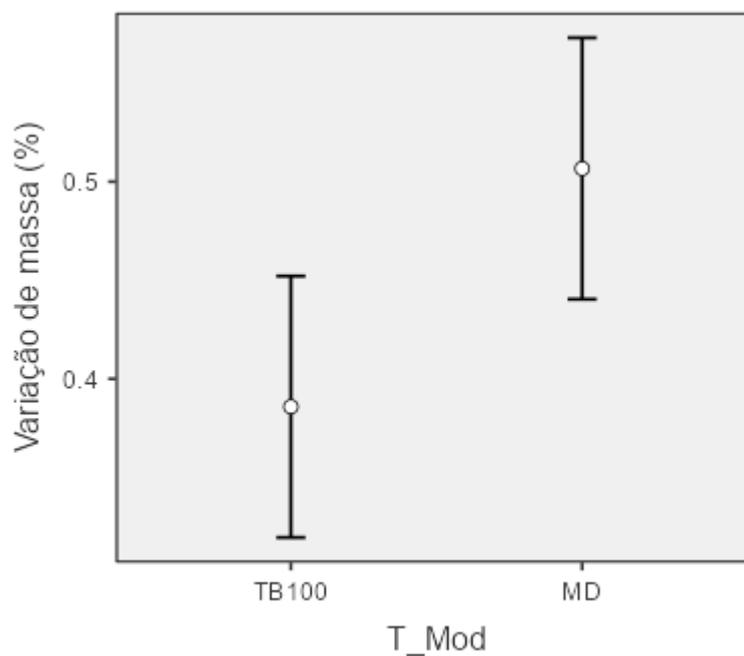
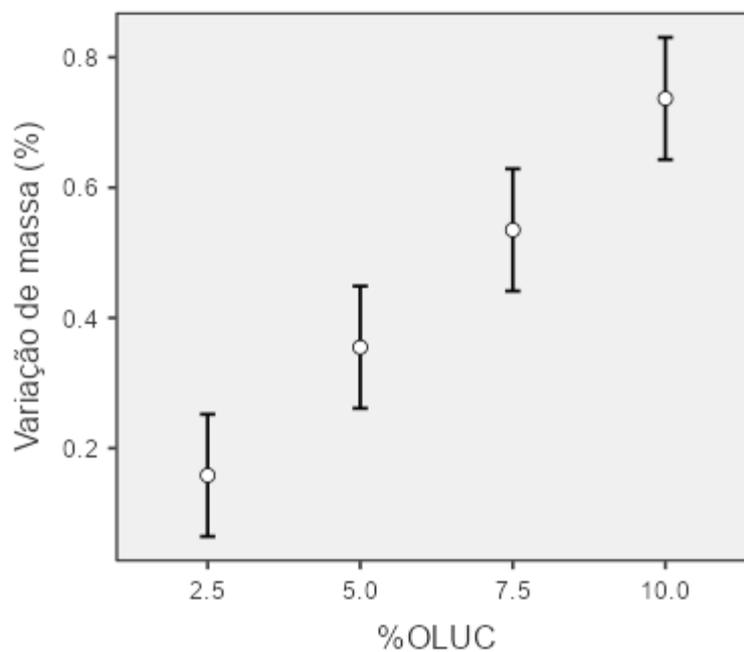


Tabela A - 123 – Testes de comparações Post Hoc ( efeito simples %OLUC)

Comparação		Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey
%OLUC	%OLUC					
2.5	- 5.0	-0.197	0.063	16.000	-3.144	0.029
	- 7.5	-0.377	0.063	16.000	-6.022	< .001
	- 10.0	-0.578	0.063	16.000	-9.246	< .001
5.0	- 7.5	-0.180	0.063	16.000	-2.878	0.048
	- 10.0	-0.382	0.063	16.000	-6.102	< .001
7.5	- 10.0	-0.202	0.063	16.000	-3.224	0.025

Figura A - 71 – Variao de massa x %OLUC



### TESTES DE VISCOSIDADE ROTACIONAL COM BORRACHA (175 °C)

Os testes de viscosidade rotacional Brookfield para avaliar o efeito da incorporação da borracha no CAP 50/70 são apresentados na Tabela A - 124.

Tabela A - 124 – Testes de viscosidade rotacional com borracha (175 °C)

Ordem	Amostra	Condição	Borracha	Viscosidade rotacional (cP)	Resíduo
1	NE21B	NE	21	3663	-187,111
2	NE21B	NE	21	3870	20,222
3	NE21B	NE	21	4017	166,889
4	NECAP5070	NE	0	68	0,911
5	NECAP5070	NE	0	66	-1,756
6	NE22B	NE	22	4757	216,889
7	NE22B	NE	22	4396	-143,778
8	NE22B	NE	22	4467	-73,111
9	NECAP5070	NE	0	68	0,844

*NE: amostra não envelhecida;*

## PRESSUPOSTOS PARA REALIZAÇÃO DA ANOVA

Independência

Figura A - 72 – Resíduos padronizados ordenados

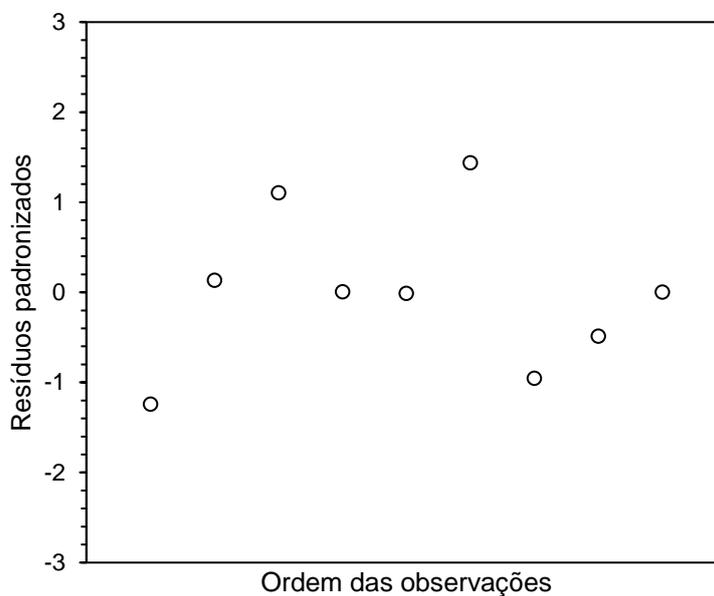


Tabela A - 125 – Teste de independência

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Durbin-Watson	D-stat	2,055	Os resíduos são independentes
	D-lower	0,824	
	D-upper	1,320	

*Critério:  $D_{lower} < D_{stat} < 4 - D_{upper}$*

$\alpha=0,05$

## Homogeneidade

Figura A - 73 – Desvio padrão em função da média

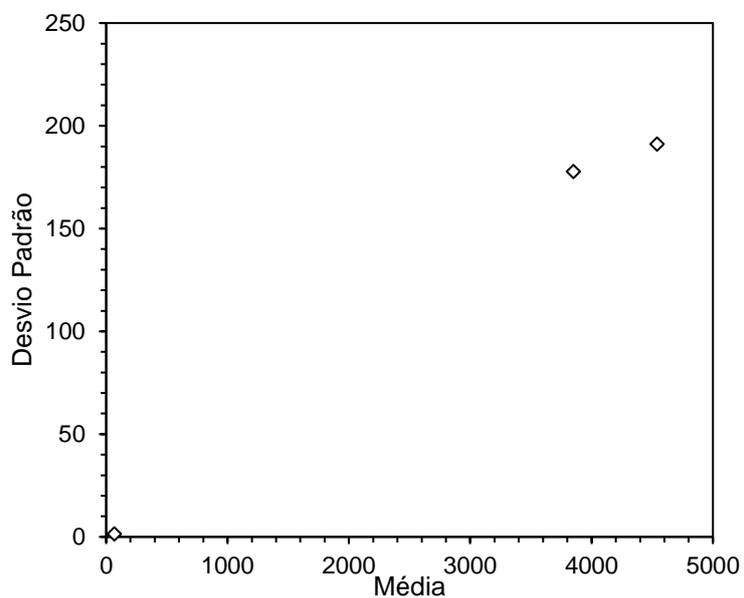


Tabela A - 126 – Teste de homogeneidade

Teste	Parâmetro	Valor-p	Conclusão
Levene	Média	0,077	As variâncias dos resíduos são homogêneas
	Medianas	0,358	
	Média aparada	0,077	

*Critério: valor-p (média) >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## Normalidade

Figura A - 74 – Q-Q plot

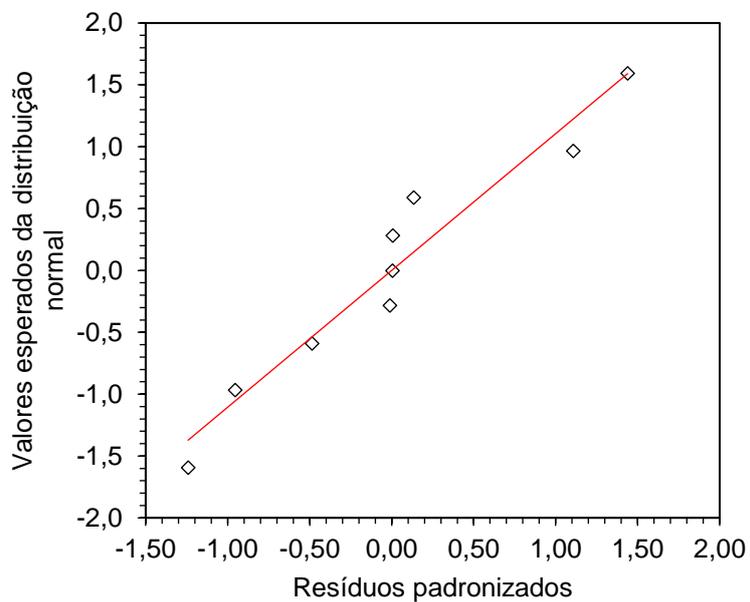


Tabela A - 127 – Teste de normalidade

Teste	Parâmetro	Resultado	Conclusão
Shapiro-Wilk	W-stat	0,936	Os resíduos seguem uma distribuição normal
	Vaolr-p	0,545	

*Critério: valor-p >  $\alpha$*

$\alpha=0,05$

## ANOVA

Tabela A - 128 – ANOVA dos testes de viscosidade rotacional (175 °C)

	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Borracha (%)	34789414.222	2	17394707.111	765.081	< .001
Resíduos	136414.667	6	22735.778		

Tabela A - 129 – Testes de comparações Post Hoc (efeito simples do teor de Borracha)

Comparação						
Borracha (%)	Borracha (%)	Diferença Média	Erro-padrão	gl	t	Ptukey
0	- 21	-3782.667	123.115	6.000	-30.725	< .001
	- 22	-4472.667	123.115	6.000	-36.329	< .001
21	- 22	-690.000	123.115	6.000	-5.605	0.003

Figura A - 75 – Viscosidade rotacional x %borracha

