



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

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

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO ASFALTO-BORRACHA MODIFICADO COM
ÓLEO VEGETAL VISANDO A REDUÇÃO DA VISCOSIDADE**

PRISCILA REIS

Foz do Iguaçu
2020



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

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

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO ASFALTO-BORRACHA MODIFICADO COM
ÓLEO VEGETAL VISANDO A REDUÇÃO DA VISCOSIDADE**

PRISCILA REIS

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

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Oliveira de Souza

Foz do Iguaçu
2020

PRISCILA REIS

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO ASFALTO-BORRACHA MODIFICADO COM
ÓLEO VEGETAL VISANDO A REDUÇÃO DA VISCOSIDADE**

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

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Oliveira de Souza
UNILA

Prof. Dra. Sandra Oda
UFRJ

Prof. Dra. Edna Possan
UNILA

Prof. Dr. Cesar Winter de Mello
UNILA

Foz do Iguaçu, 16 de setembro de 2020

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

R375a

Reis, Priscila.

Análise do comportamento do asfalto-borracha modificado com óleo vegetal visando a redução da viscosidade / Priscila Reis. - Foz do Iguaçu, 2020.

108 f.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Ricardo Oliveira de Souza.

1. Asfalto (ligas). 2. Asfalto - viscosidade - óleo vegetal. 3. Asfalto-borracha. I. Souza, Ricardo Oliveira de, Orient. II. Título.

CDU: 693.7

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à Deus, por ser essencial em minha vida e autor do meu destino, permitiu que eu cursasse o mestrado e enfrentasse todas as batalhas e desafios da melhor maneira possível, sempre guiou meu caminho e permaneceu ao meu lado. Aos meus pais, meu irmão e a minha família, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e me ajudando com minhas angústias e medos, sempre com os melhores conselhos e nunca mediram esforços para que eu conseguisse alcançar meus objetivos.

Ao Prof.^o Ricardo Oliveira de Souza, que me aceitou como sua orientanda e me conduziu com tamanha maestria e conhecimento, me ensinou e me auxiliou em todos os meus questionamentos. Teve a humildade, sabedoria e paciência para me explicar tudo que não sabia, além do apoio incondicional prestado e assim contribuiu muito para o meu crescimento pessoal e profissional, sendo a peça chave para que eu pudesse concluir minha pesquisa.

Aos amigos que fiz durante minha jornada de pesquisa, e que foram essenciais para que eu não desistisse e permanecesse na busca dos meus sonhos. Em especial ao William de Araujo Thomaz e aos que estiveram comigo no laboratório, onde tive momentos muito difíceis e eles permaneceram ao meu lado dando todo o apoio que precisei. Agradeço também aos técnicos dos laboratórios, em especial à Engenheira Civil Dalila Netto Sella, ao técnico Luciano Ari Fiamonzini e ao técnico Andrey Vinícius Netto, que sempre me auxiliaram e me socorreram em todos os momentos.

À Prof.^a Edna Possan, a Prof.^a Sandra Oda e o Prof. Dr. César Winter de Mello, por aceitarem o convite para participarem da banca examinadora, contribuindo com o todo o conhecimento e assim enriquecendo meu trabalho.

À Universidade Federal da Integração Latino-Americana e ao Parque Tecnológico Itaipu (PTI), que dispuseram os laboratórios e equipamentos para que fosse possível a realização da minha pesquisa. Também, aos técnicos dos laboratórios, que além de me auxiliarem, prestaram todo o apoio possível em tudo que precisei.

A todos os professores com quem tive a oportunidade de obter conhecimento que não tive durante minha jornada na graduação. Por fim, ao mestrado em Engenharia Civil, e ao Programa Demanda Social da UNILA, onde foi possível que eu aprendesse muitas coisas, além de proporcionar minha bolsa de estudos, a qual foi de suma importância para que eu pudesse desenvolver minha pesquisa laboratorial em período integral, muito obrigada!

*“A menos que modifiquemos à nossa maneira de pensar,
não seremos capazes de resolver os problemas
causados pela forma como nos acostumamos a ver o
mundo”. (Albert Einstein)*

RESUMO

Os ligantes asfálticos convencionais empregados nas misturas asfálticas para fins de pavimentação não têm apresentando resistência adequada para suportar o fluxo de veículos diário. Pesquisas bibliográficas indicam que para melhorar a resistência ao surgimento de patologia, tem-se adicionado ao ligante asfáltico convencionais polímeros, fibras, borracha moída de pneus inservíveis, entre outros. A utilização do último aditivo mencionado requer aumento da temperatura de usinagem tendo o produto resultante maior viscosidade rotacional. Em geral, teores de borracha moída entre 18% e 30% (em peso do ligante) apresentam viscosidade rotacional excessiva, o que os torna impróprios para utilização na produção de misturas asfálticas. Para que este tipo de material possa ser utilizado, é preciso adicionar algum produto redutor de viscosidade. Assim, esta pesquisa teve por objetivo avaliar a possível redução da viscosidade rotacional de ligantes asfalto-borracha com viscosidade excessiva mediante adição de óleo vegetal, e consequentemente analisar o desempenho mecânico deste material. Assim, adicionou-se óleo vegetal (soja ou milho/ novo ou residual), em teores de 10, 15 e 20% ao CAP 50/70 modificado com 21% de borracha moída de pneus. A avaliação envolveu ligantes não envelhecidos, envelhecidos em curto prazo e envelhecidos em longo prazo, de modo que todos os ligantes foram submetidos a ensaios de ponto de amolecimento, ponto de fulgor, viscosidade Brookfield, cisalhamento dinâmico e fluência em viga. Também foi efetuada análise termogravimétrica para a mistura CAP 50/70 + óleo de soja (novo e residual) nas porcentagens de 5, 10, 15 e 20%, no estado não envelhecido e envelhecido em longo prazo. Este estudo ainda avaliou o efeito da redução da temperatura de produção do CAP 50/70+21% borracha + 10% de óleo de soja residual. Os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais foram submetidos a Análises de Variância (ANOVA). Constatou-se que a adição do óleo reduziu efetivamente a viscosidade excessiva inicial do CAP 50/70+21% borracha, e quanto maior a porcentagem de óleo adicionada, maior a redução alcançada, contudo a mesma acabou diminuindo a resistência a flexão desse ligante modificado em temperaturas altas. Já em temperaturas baixas o material tendeu a solidificação e apresentou maior dureza. Notou-se também que durante o processo de envelhecimento houve redução de massa quando comparado ao CAP 50/70, mostrando assim a ocorrência de volatilização do óleo ao invés do ligante asfáltico. Além disso, se observou que o óleo preservou algumas propriedades do CAP 50/70 durante o processo de envelhecimento fazendo com que os resultados obtidos antes e após este processo não apresentassem grande diferença. Concluiu-se então que menores porcentagens de óleo apresentam melhor comportamento mecânico em altas e intermediárias temperaturas. No caso deste estudo o CAP modificado com 21% de borracha e contendo 10% de óleo vegetal resultou na melhor opção, maiores porcentagens de óleo resultaram em grandes perdas de resistência à deformação permanente em altas temperaturas enquanto os valores de rigidez em temperaturas negativas aumentaram significativamente. Com relação ao tipo de óleo empregado bem como sua condição, verificou-se inexistência de diferença estatística entre estes fatores, desta forma, considerando o cenário de reaproveitamento de resíduos, seria interessante a utilização de óleo na condição residual. Além disso, para mitigar o impacto ambiental, o óleo de soja seria o preferido haja vista ser o mais consumido hoje no Brasil.

Palavras-chave: Ligantes Asfálticos; Borracha de Pneus; Viscosidade Excessiva; Óleo Vegetal; Asfalto-borracha.

ABSTRACT

The conventional asphalt binders used in asphalt mixtures for paving purposes do not have adequate strength to support the daily flow of vehicles. Bibliographic research indicates that to improve the resistance to the appearance of pathology, polymers, fibers, ground rubber from waste tires, among others, have been added to the conventional asphalt binder. The use of the last additive mentioned requires an increase in the machining temperature with the resulting product having a higher rotational viscosity. In general, levels of ground rubber between 18% and 30% (by weight of the binder) present excessive rotational viscosity, which makes them unsuitable for use in the production of asphalt mixtures. In order for this type of material to be used, it is necessary to add some viscosity reducing product. Thus, this research aimed to evaluate the possible reduction in the rotational viscosity of asphalt-rubber binders with excessive viscosity by adding vegetable oil, and consequently to analyze the mechanical performance of this material. Thus, vegetable oil (soy or corn / new or residual) was added, in levels of 10, 15 and 20% to CAP 50/70 modified with 21% rubber ground tires. The evaluation involved unaged binders, aged in the short term and aged in the long term, so that all binders were subjected to softening point, flash point, Brookfield viscosity, dynamic shear and beam creep tests. Thermogravimetric analysis was also carried out for the mixture CAP 50/70 + soy oil (new and residual) in the percentages of 5, 10, 15 and 20%, in the non-aged and long-term state. This study also evaluated the effect of reducing the production temperature of CAP 50/70 + 21% rubber + 10% residual soy oil. The results obtained in the laboratory tests were submitted to Analysis of Variance (ANOVA). It was found that the addition of oil effectively reduced the initial excessive viscosity of CAP 50/70 + 21% rubber, and the greater the percentage of oil added, the greater the reduction achieved, however it ended up decreasing the flexural strength of this modified binder at high temperatures. At low temperatures, the material tended to solidify and presented greater hardness. It was also noted that during the aging process there was a reduction in mass when compared to CAP 50/70, thus showing the occurrence of oil volatilization instead of the asphalt binder. In addition, it was observed that the oil preserved some properties of the CAP 50/70 during the aging process, making the results obtained before and after this process not present much difference. It was concluded that lower oil percentages show better mechanical behavior at high and intermediate temperatures. In the case of this study, the CAP modified with 21% rubber and containing 10% vegetable oil resulted in the best option, higher oil percentages resulted in large losses of resistance to permanent deformation at high temperatures while the stiffness values at negative temperatures increased significantly. Regarding the type of oil used as well as its condition, there was no statistical difference between these factors, so, considering the scenario of reuse of waste, it would be interesting to use oil in the residual condition. In addition, to mitigate the environmental impact, soybean oil would be preferred since it is the most consumed today in Brazil.

Key words: Asphalt Binders; Tire Rubber; Excessive Viscosity; Vegetable oil; Asphalt rubber.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Entupimento da rede de esgoto..... | 21 |
| Figura 2: Pneus inservíveis..... | 23 |
| Figura 3: Algumas das tecnologias de recuperação energética..... | 25 |
| Figura 4: Composição dos pneus | 27 |
| Figura 5: Destino final de pneus descartados..... | 28 |
| Figura 6: Caracterização físico-química dos óleos de soja e milho | 30 |
| Figura 7: Esquema de aplicação da tensão..... | 31 |
| Figura 8: Defasagem entre tensão e deformação..... | 31 |
| Figura 9: Propriedades melhoradas com a adição dos resíduos modificadores..... | 33 |
| Figura 10: Tipologia das Borrachas | 34 |
| Figura 11: Tipologia dos Plásticos..... | 34 |
| Figura 12: Total de pneus utilizados para incorporação no ligante asfáltico por ano | 37 |
| Figura 13: Diagrama das etapas realizadas nesta pesquisa | 42 |
| Figura 14: Recipiente contendo o Ligante Asfáltico (CAP 50/70) utilizado na pesquisa | 45 |
| Figura 15: Borracha de pneu moída utilizada na pesquisa..... | 45 |
| Figura 16: Óleos vegetais utilizados na pesquisa..... | 46 |
| Figura 17: Produção das amostras com utilização do agitador mecânico | 47 |
| Figura 18: Penetrômetro Universal | 47 |
| Figura 19: Agitador Magnético | 48 |
| Figura 20: Cleveland de vaso aberto | 48 |
| Figura 21: Viscosímetro Rotacional Brookfield | 49 |
| Figura 22: Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) e amostra para ensaio..... | 50 |
| Figura 23: Reômetro de Fluência em Viga (BBR)..... | 50 |
| Figura 24: Moldes para preparação das amostras | 50 |
| Figura 25: Estufa RTFOT..... | 51 |
| Figura 26: Recipientes para ensaio das amostras..... | 51 |
| Figura 27: Vaso de Envelhecimento sob Pressão | 51 |
| Figura 28: Amostras após realização do ensaio | 51 |
| Figura 29: Desenho esquemático dos equipamentos..... | 51 |
| Figura 30: Analisador termogravimétrico | 52 |
| Figura 31: Procedimentos para realização da Análise de Variância (ANOVA)..... | 52 |
| Figura 32: Viscosidade Rotacional a 180°C..... | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 33: Viscosidades Rotacionais a 180°C (amostras com 21% de borracha + % de óleo de soja)..... | 56 |
| Figura 34: Viscosidades Rotacionais a 180°C (amostras com 21% de borracha + % de óleo de milho)..... | 56 |
| Figura 35: Ponto de Amolecimento (amostras com 21% de borracha + % de óleo de soja)..... | 58 |
| Figura 36: Ponto de Amolecimento (amostras com 21% de borracha + % de óleo de milho)..... | 58 |
| Figura 37: Resultados para o ensaio de variação em massa | 59 |
| Figura 38: Ponto de Fulgor de todas as amostras avaliadas | 60 |
| Figura 39: Valores de Rigidez para o ensaio de Fluência em Viga (não envelhecido) | 62 |
| Figura 40: Valores de Rigidez para o ensaio de Fluência em Viga (RTFOT)..... | 63 |
| Figura 41: Valores de Rigidez para o ensaio de Fluência em Viga (PAV)..... | 63 |
| Figura 42: Valores-m para o ensaio de Fluência em Viga (não envelhecido) | 64 |
| Figura 43: Valores-m para o ensaio de Fluência em Viga (RTFOT) | 65 |
| Figura 44: Valores-m para o ensaio de Fluência em Viga (PAV) | 65 |
| Figura 45: Rigidez das amostras modificadas com óleo a temperatura de -30°C | 66 |
| Figura 46: Valor-m para amostras modificadas com óleo a temperatura de -30°C..... | 66 |
| Figura 47: Rigidez das amostras modificadas com 10% de óleo..... | 67 |
| Figura 48: Valor-m para amostras modificadas com 10% de óleo..... | 67 |
| Figura 49: Valores para o ângulo de fase (δ) não envelhecido a 58°C | 69 |
| Figura 50: Valores para o ângulo de fase (δ) não envelhecido a 64°C | 69 |
| Figura 51: Valores para o ângulo de fase (δ) não envelhecido a 70°C e 76°C | 69 |
| Figura 52: Valores para o ângulo de fase (δ) após ensaio RTFOT a 58°C | 70 |
| Figura 53: Valores para o ângulo de fase (δ) após ensaio RTFOT a 64°C | 70 |
| Figura 54: Valores para o ângulo de fase (δ) após ensaio RTFOT a 70°C e 76°C | 70 |
| Figura 55: Valores para o ângulo de fase (δ) considerando a porcentagem do óleo utilizado (10%, 15% e 20%) antes e após envelhecimento em curto prazo..... | 71 |
| Figura 56: Valores para o Módulo Complexo (G^*) a 58°C (não envelhecido)..... | 72 |
| Figura 57: Valores para o Módulo Complexo (G^*) a 64°C (não envelhecido)..... | 72 |
| Figura 58: Valores para o Módulo Complexo (G^*) a 70°C e 76°C (não envelhecido)..... | 72 |
| Figura 59: Valores para o Módulo Complexo (G^*) após RTFOT a 58°C..... | 73 |
| Figura 60: Valores para o Módulo Complexo (G^*) após RTFOT a 64°C..... | 73 |

| | |
|--|----|
| Figura 61: Valores para o Módulo Complexo (G^*) após RTFOT a 70°C e 76°C..... | 73 |
| Figura 62: Valores para o módulo complexo (G^*) considerando a porcentagem do óleo utilizado (10%, 15% e 20%) antes e após envelhecimento em curto prazo..... | 74 |
| Figura 63: Valores para o quociente $ G^* /\text{sen}(\delta)$ de todos os CAP's não envelhecidos (óleos novos)..... | 74 |
| Figura 64: Valores para o quociente $ G^* /\text{sen}(\delta)$ de todos os CAP's não envelhecidos (óleos residuais)..... | 75 |
| Figura 65: Valores para o quociente $ G^* /\text{sen}(\delta)$ de todos os CAP's após RTFOT (óleos novos)..... | 75 |
| Figura 66: Valores para o quociente $ G^* /\text{sen}(\delta)$ de todos os CAP's após RTFOT (óleos residuais)..... | 76 |
| Figura 67: Valores para o quociente $ G^* /\text{sen}(\delta)$ considerando a porcentagem de óleo utilizado (10%, 15% e 20%) antes e após envelhecimento em curto prazo..... | 76 |
| Figura 68: Valores para o ângulo de fase (δ) de todas as amostras após PAV (óleos normais)..... | 77 |
| Figura 69: Valores para o ângulo de fase (δ) de todas as amostras após PAV (óleos residuais)..... | 77 |
| Figura 70: Valores para o módulo complexo (G^*) de todas as amostras após PAV (óleos normais)..... | 78 |
| Figura 71: Valores para o módulo complexo (G^*) de todas as amostras após PAV (óleos residuais)..... | 78 |
| Figura 72: Valores para o produto $ G^* \times\text{sen}(\delta)$ de todas as amostras após PAV (óleos normais)..... | 79 |
| Figura 73: Valores para o produto $ G^* \times\text{sen}(\delta)$ de todas as amostras após PAV (óleos residuais)..... | 79 |
| Figura 74: Viscosidade Rotacional Brookfield..... | 83 |
| Figura 75: Ponto de Amolecimento..... | 83 |
| Figura 76: Valores de Rigidez para o ensaio de Fluência em Viga..... | 84 |
| Figura 77: Valores-m para o ensaio de Fluência em Viga..... | 84 |
| Figura 78: Valores para o Módulo Complexo (G^*)..... | 85 |
| Figura 79: Valores para o ângulo de fase (δ)..... | 85 |
| Figura 80: Valores para o quociente $ G^* /\text{sen}(\delta)$ | 86 |
| Figura 81: Termograma para o óleo de soja em seu estado novo e residual..... | 86 |

| | |
|---|----|
| Figura 82: Termogramas para as amostras não envelhecidas de CAP 50/70 e CAP 50/70+21% borracha+%óleo de soja | 87 |
| Figura 83: Análise termogravimétrica para as amostras envelhecidas em longo prazo de CAP 50/70 e CAP 50/70+21% borracha+%óleo de soja | 88 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: CAP's pesquisados neste estudo (continua)..... | 43 |
| Tabela 1: CAP's pesquisados neste estudo (conclusão) | 44 |
| Tabela 2: Caracterização do cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70) | 45 |
| Tabela 3: Viscosidades Rotacionais e Pontos de Fulgor dos materiais coletados | 47 |
| Tabela 4: Elementos considerados durante a produção dos CAP's modificados | 47 |
| Tabela 5: Valores das Viscosidades Rotacionais (Cp) | 55 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1: Estudos realizados com a utilização de borracha de pneus inservíveis (continua) | 36 |
| Quadro 1: Estudos realizados com a utilização de borracha de pneus inservíveis (conclusão) | 37 |
| Quadro 2: Tipologia de óleos utilizados em pesquisas | 38 |
| Quadro 3: Estudos realizados com a utilização de óleos vegetais (continua) | 39 |
| Quadro 3: Estudos realizados com a utilização de óleos vegetais (continua) | 40 |
| Quadro 3: Estudos realizados com a utilização de óleos vegetais (conclusão) | 41 |
| Quadro 4: Ensaios realizados e respectivas normas | 44 |
| Quadro 5: Combinação de viscosidade rotacional que apresentou diferença estatística significativa entre porcentagens de adição de óleo e entre tipos e condições dos óleos | 80 |
| Quadro 6: Combinações de pontos de fulgor que apresentaram diferença estatística entre porcentagens de adição de óleo e entre tipos e condições dos óleos | 80 |
| Quadro 7: Combinações de pontos de amolecimento que apresentaram diferença estatística entre porcentagens de adição de óleo e entre tipos e condições dos óleos | 80 |
| Quadro 8: Combinações de valores de rigidez que apresentaram diferença estatística entre porcentagens de adição de óleo e entre tipos e condições dos óleos | 81 |
| Quadro 9: Combinações de valores-m que apresentaram diferença estatística entre porcentagens de adição de óleo e entre tipos e condições dos óleos | 81 |
| Quadro 10: Combinações de quocientes $ G^* /\text{sen}(\delta)$ que apresentaram diferença estatística entre porcentagens de adição de óleo e entre tipos e condições dos óleos | 81 |
| Quadro 11: Combinações de quocientes $ G^* \times\text{sen}(\delta)$ que apresentaram diferença estatística entre porcentagens de adição de óleo e entre tipos e condições dos óleos | 81 |
| Quadro 12: Resumo das conclusões obtidas (continua) | 91 |
| Quadro 12: Resumo das conclusões obtidas (continua) | 92 |
| Quadro 12: Resumo das conclusões obtidas (continua) | 93 |
| Quadro 12: Resumo das conclusões obtidas (conclusão) | 94 |

LISTA DE ABREVIações

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials (Associação Americana dos funcionários de Departamentos de Estradas e Transportes)

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ANIP – Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos

ANOVA – Análise de Variância

APROBIO – Associação de biodiesel do Brasil

ASTM – American Society for Testing and Materials (Sociedade americana de testes de materiais)

BBR – Bending Beam Rheometer (Reômetro de fluência em viga)

BO – Borracha

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte

DSR – Dynamic Shear Rheometer (Reômetro de cisalhamento dinâmico)

ECP – Envelhecido em curto prazo

ELP – Envelhecido em longo prazo

EVA – Etil Vinil Acetato

INCONC - Inconclusivo

NE – Não Envelhecido

OL – Óleo

OMN – Óleo de Milho Novo

OMR – Óleo de Milho Residual

OSN – Óleo de Soja Novo

OSR – Óleo de Soja Residual

PAV – Pressure Aging Vessel (Vaso de envelhecimento sob pressão)

REF – Referência

RTFOT – Rolling Thin Film Oven Test (estufa de filme fino rotativo)

SBS – Estireno Butadieno Estireno

TG – Análise Termogravimétrica

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 18 |
| 1.1 OBJETIVOS..... | 20 |
| 1.1.1 Objetivo Geral..... | 20 |
| 1.1.2 Objetivos Específicos..... | 20 |
| 1.2 HIPÓTESE..... | 21 |
| 1.3 JUSTIFICATIVA | 21 |
| 2 REFERÊNCIAL TEÓRICO | 24 |
| 2.1 APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS | 24 |
| 2.1.1 Pneus..... | 26 |
| 2.1.2 Óleo vegetal..... | 28 |
| 2.2 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)..... | 30 |
| 2.2.1 Ligante Asfáltico Modificado | 32 |
| 2.2.2 Ligante Asfáltico Modificado com Borracha | 34 |
| 2.2.3 Ligante Asfáltico Modificado com Óleo Vegetal | 38 |
| 3 METODOLOGIA..... | 42 |
| 3.1 MATERIAIS..... | 44 |
| 3.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP 50/70) | 44 |
| 3.1.2 Borracha moída | 45 |
| 3.1.3 Óleo vegetal..... | 46 |
| 3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS | 46 |
| 3.3 ENSAIOS CONVENCIONAIS..... | 47 |
| 3.3.1 Penetração | 47 |
| 3.3.2 Ponto de Amolecimento | 48 |
| 3.3.3 Ponto de Fulgor | 48 |
| 3.4 ENSAIOS SUPERPAVE..... | 49 |
| 3.4.1 Viscosidade Rotacional (Brookfield) | 49 |
| 3.4.2 Cisalhamento Dinâmico (DSR)..... | 49 |
| 3.4.3 Fluência em Viga (BBR) | 50 |
| 3.4.4 Envelhecimento em curto prazo (RTFOT) | 50 |
| 3.4.5 Envelhecimento em longo prazo (PAV)..... | 51 |
| 3.4.6 Análise termogravimétrica (TG) | 52 |

| | |
|--|------------|
| 3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS..... | 52 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 54 |
| 4.1 VISCOSIDADE ROTACIONAL BROOKFIELD | 54 |
| 4.1.1 Viscosidade rotacional do CAP 50/70+21% de borracha moída de pneus | 54 |
| 4.1.2 Viscosidade rotacional do CAP 50/70+21% de borracha moída de pneus+%óleo ... | 55 |
| 4.2 PONTO DE AMOLECIMENTO | 57 |
| 4.3 VARIAÇÃO EM MASSA..... | 59 |
| 4.4 PONTO DE FULGOR | 60 |
| 4.5 FLUÊNCIA EM VIGA | 61 |
| 5.6 CISALHAMENTO DINÂMICO..... | 68 |
| 4.7 RESUMO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS..... | 79 |
| 4.8 EFEITO DA REDUÇÃO DE TEMPERATURA DE FABRICAÇÃO | 82 |
| 4.9 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG)..... | 86 |
| 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 89 |
| 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 94 |
| REFERÊNCIAS | 95 |
| APÊNDICES..... | 108 |

1 INTRODUÇÃO

O ligante asfáltico convencional, também conhecido como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP), é um produto obtido pelo refino de petróleo, não cristalino, impermeável à água, que apresenta durabilidade e resistência a grande parte dos ácidos, álcalis e sais. É um material termo-viscoelástico de cadeia complexa, que necessita de aquecimento para ser utilizado (AZIZ, MOHD e BAKAR, 2015; MIRÓ, MARTÍNEZ, et al., 2015; CARVALHO, 2018). Inicialmente o asfalto era empregado como impermeabilizante, principalmente em tanques, posteriormente com a evolução da tecnologia passou a ser utilizado em várias outras aplicações, especialmente em pavimentação de rodovias incluindo técnicas que fazem o uso de asfaltos modificados com intuito de melhorar o desempenho do material (PIZZORNO, 2010; BEHNOOD e GHAREHVERAN, 2019).

Um CAP é capaz de proporcionar junção entre os agregados contribuindo com as características termomecânicas de uma mistura asfáltica, e com isso tornando a mesma eficiente para resistir aos esforços oriundos das cargas dos veículos. Contudo, devido a dimensionamento inadequado, problemas durante a usinagem ou até mesmo deficiências nas propriedades físicas do ligante convencional, pode ocorrer o surgimento de patologia precoce na via, não garantindo um bom desempenho da mistura asfáltica (KASANAGH, AHMEDZADE, FAINLEIB, e BEHNOOD, 2020).

Com intuito de reduzir a grande demanda de petróleo em todo o mundo, pesquisas têm tomado direcionamento para o emprego de materiais alternativos que possam, além de reduzir o uso deste recurso natural não renovável, diminuir o consumo energético e ainda contribuir para o comportamento mecânico de um pavimento rodoviário. Esta alternativa de utilização de outras fontes de recursos e ainda mais se forem de fonte renovável, podem apresentar grande representatividade na economia bem como no meio ambiente (PORTUGAL, 2016; SUN, YI, et al., 2016).

O ligante asfáltico passa a ser modificado quando é feita substituição ou adição de uma parcela do mesmo por outra fonte de material. Os CAP's modificados começaram a ser fabricados devido a necessidade de material com maior vida útil dos mesmos frente ao aumento dos fluxos, intensidades e cargas oriundas do tráfego (POLACCO, FILIPPI, et al., 2015). Uma modificação bastante conhecida utiliza, desde 1960, borracha moída de pneus inservíveis, e devido ao seu bom desempenho nos Estados Unidos da América, surgiu em 1991 a lei conhecida como ISTEA (Intermodal Surface Transportation Efficiency Act) que visava o uso deste resíduo na produção de misturas

asfálticas, e assim disseminou o uso desta tecnologia (PATIL, LOLE, *et al.*, 2016). No Brasil, o Estado de São Paulo regulamentou o emprego desta técnica pela lei 14.691 a qual prevê que para a construção de novas rodovias deve-se utilizar, sempre que possível borracha pulverizada proveniente da reciclagem de pneus inservíveis (ROSA, SANTOS, *et al.*, 2012). Silva, Benta e Picado (2018), afirmam que a borracha é bastante utilizada devido as suas características de resistência, impermeabilidade, elasticidade e fácil adesão aos ligantes asfálticos.

Em virtude das boas características da borracha somado a problemas ambientais derivados do aumento do tráfego de carros, ônibus, caminhões e motos, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA – Resolução nº301/02) definiu desde 2005 que as empresas que fabricam pneus são responsáveis em dar destinação final a cada cinco pneus inservíveis para cada quatro novos. De acordo com dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2019), 4.5 milhões de pneus inservíveis tiveram seu destino correto no Brasil até 2019. Este fato resultou de um programa gerado em 1999 sobre conscientização da população em relação ao descarte de pneus usados. Do mesmo modo, de acordo com Araújo (2018), devido ao seu poder calorífico os pneus inservíveis também são co-processados na indústria cimenteira como combustível em fornos de clínquer. A queima dos pneus com intuito de geração de energia também tem sido uma maneira de atenuar o descarte incorreto deste resíduo, além da destinação dos mesmos para utilização em obras como agregados quando em sua forma granular ou em pó (XIAO, YAO, *et al.*, 2018).

Outros materiais também vêm sendo estudados com o intuito de melhorar as características dos CAP'S, por exemplo, resíduos da indústria de calçados, polímeros termoplásticos, borracha natural, resíduos de óleos, entre outros. O surgimento da reutilização de materiais tem sido muito importante na construção de rodovias, pois alguns materiais quando utilizados na composição do CAP tem mostrado que a mistura asfáltica apresenta melhor desempenho, ajudando na redução da formação de trincas térmicas e afundamentos de trilhas de roda (KASANAGH, AHMEDZADE, *et al.*, 2020). Segundo Kumar e Yadav (2019), para minimizar o descarte irregular de resíduos, é apropriado que os mesmos sejam empregados em aplicações de longa vida útil, por exemplo, a pavimentação asfáltica.

Apesar das boas contribuições que a incorporação da borracha moída de pneus proporciona ao CAP, esta acaba aumentando a viscosidade do ligante e assim ocasionando menor trabalhabilidade, necessitando então de temperaturas maiores ou a

utilização de aditivos, por exemplo, óleos que visam à redução dessa viscosidade (PRESTI, IZQUIERDO e CARRIÓN, 2018).

Os óleos vegetais vêm sendo empregados como aditivos orgânicos para reduzir as temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas. Este produto é utilizado em grande quantidade em cozinhas, sejam elas industriais ou residenciais. Segundo dados da Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE, 2019), em 2018 foram processados cerca de 44 milhões de óleo de soja. São produtos empregados em processos de frituras e quando descartados incorretamente podem gerar consequências negativas ao meio ambiente (BARROS, ZIEGLER, *et al.*, 2017).

Diante disso, visando estas características dos óleos vegetais e atribuindo ao aumento da viscosidade causada pela inserção da borracha ao CAP 50/70, a utilização do óleo pode resultar em uma opção para redução da resistência ao escoamento do ligante asfáltico modificado, além de ser uma alternativa ambientalmente correta devido a redução do descarte incorreto dos dois materiais mencionados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Esta pesquisa tem por objetivo geral avaliar a influência da adição de diferentes teores de óleo vegetal para redução da excessiva viscosidade de um CAP modificado com borracha moída oriunda de pneus inservíveis.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas de CAP's modificados e não modificados;
- Analisar a influência da adição de óleo vegetal no CAP 50/70 + borracha moída no comportamento à deformação permanente em altas temperaturas, bem como o comportamento ao trincamento por fadiga em temperaturas intermediárias;
- Verificar a influência da adição de óleo vegetal no CAP 50/70 + borracha moída no comportamento ao trincamento térmico em baixas temperaturas;
- Analisar o efeito da adição de óleo vegetal em diferentes estados (novo ou residual) na mistura (CAP 50/70 + borracha moída);

1.2 HIPÓTESE

O óleo vegetal descartado (de soja ou de milho) é capaz de reduzir a viscosidade do ligante asfáltico modificado com borracha moída, bem como garantir as características de resistência ao trincamento por fadiga, ao trincamento térmico e à deformação permanente.

1.3 JUSTIFICATIVA

A carência de recursos naturais e o uso não consciente dos mesmos, bem como a falta de informação sobre a destinação final de resíduos, são pontos importantes a serem considerados quando o assunto é minimizar os impactos ambientais gerados pelo descarte incorreto de rejeitos no meio ambiente. A quantidade de óleo vegetal doméstico consumido no Brasil aumenta em torno de 10% a cada ano e conseqüentemente seu descarte se torna crescente. Justificando assim a realização desta pesquisa, devido ao óleo vegetal ser um rejeito doméstico e industrial, cuja reutilização pode ser importante do ponto de vista ambiental e econômico.

Após ser utilizado algumas vezes nos processos de frituras parte do óleo de cozinha é incorporado no alimento e o restante pode acabar descartado em local impróprio como ralos de pia chegando até a natureza. Este fato pode ocorrer devido à falta de locais adequados para seu descarte e até mesmo a carência de informação da população quanto à destinação correta (CAPUANO, COSTA, *et al.*, 2017; ABIOVE, 2019). Em virtude disso, esta situação pode causar contaminação do solo e da água acarretando em danos severos ao meio ambiente (SOUZA e RIBEIRO, 2019). A Figura 1 ilustra o entupimento de rede de esgoto devido ao descarte de óleos e gorduras.

Figura 1: Entupimento da rede de esgoto



Fonte: Companhia Espírito-santense de Saneamento (CESAN, 2016).

Insolúveis em água, os óleos são formados principalmente por triglicerídeos, que chegam até as tubulações e acabam formando uma película de gordura resultando em problemas nas mesmas, bem como em redes de esgoto e conseqüentemente gerando gastos elevados, inclusive podendo ser preciso o emprego de produtos químicos que podem causar maiores prejuízos ao meio ambiente (TSOUTSOS, TOURNAKI, *et al.*, 2016).

Segundo Costa, Lopes e Lopes (2015), no Brasil o consumo de óleo vegetal é de aproximadamente 3,9 bilhões de litros por ano. O consumo doméstico por família gira em torno de 4 litros a cada mês, sendo que destes, pelo menos 1 litro é descartado por mês. Em algumas regiões onde a culinária local é fundamentada em frituras (por exemplo, Estado do Espírito Santo), o consumo anual chega a 150 milhões de litros apenas nesse Estado. Além disso, conforme dados da empresa de Saneamento de São Paulo (SABESP, 2015), cada litro de óleo descartado inadequadamente pode chegar a poluir aproximadamente 20 mil litros de água. De acordo com dados da Enciclopédia Única de Previsões e Estatísticas Mundiais, para todas as principais sementes oleaginosas, óleos e gorduras (OIL WORLD ANUAL, 2018), o volume de óleos e gorduras descartadas inadequadamente no Brasil pode chegar a 200 milhões de litros.

O óleo de cozinha vem sendo reaproveitado para fabricação de alguns produtos, por exemplo, nas indústrias do ramo de cosméticos, rações animais, sabão e biodiesel. Segundo a Associação de Biodiesel do Brasil (APROBIO, 2017), aproximadamente 30 milhões de litros deste resíduo são utilizados para o processamento do biodiesel. Entretanto, se comparado com o total de óleo de cozinha consumido por ano se torna um valor muito pequeno, sendo importante o desenvolvimento de novas tecnologias que permitam sua reutilização.

Em contrapartida aos óleos, a borracha proveniente de pneus inservíveis (Figura 2) vem sendo estudada com maior frequência, não só na pavimentação asfáltica, mas também em outras aplicações como o coprocessamento onde os pneus são reaproveitados como fonte de energia para fabricação do clínquer e até mesmo utilizados na composição do concreto de cimento Portland. No mundo cerca de 1000 milhões de pneus se tornam inservíveis por ano, e em torno de 50% são destinados inadequadamente. Assim acabam se tornando um problema ambiental devido à demora (em torno de 600 anos) para passar pelo processo de decomposição. Além de problemas como poluição e contaminação, podem acabar se tornando foco de doenças devido à água que pode ser acumulada nos mesmos. Economicamente o descarte inadequado deste material também

acaba gerando problemas devido ao gasto excessivo para o governo retirá-los do meio ambiente (THOMAS e GUPTA, 2016; YADAV e TIWARI , 2019).

Figura 2: Pneus inservíveis



Fonte: Penna, Santos, *et al.*, (2017)

Diante dos problemas apresentados, em virtude da quantidade destes resíduos descartados e a falta de local apropriado para destinação, e até mesmo falta de informação sobre destinação adequada de resíduos, bem como diante da relevância deste tema na esfera do reaproveitamento, esta pesquisa apresentará uma alternativa de reaproveitamento dos óleos de soja e de milho, novos e residuais adicionando-os ao CAP 50/70 + borracha moída de pneus com intuito de redução da viscosidade a fim de enquadrá-lo no asfalto-borracha AB8 (NBR15529/07 - ASTM D2196), analisando as propriedades obtidas para aplicação na pavimentação rodoviária.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS

Reutilizar é uma das soluções para minimizar o uso de novas matérias-primas, ou seja, recursos naturais. A reciclagem e outros métodos promovem o aproveitamento de resíduos sendo uma alternativa eficiente em relação à economia e a preservação do meio ambiente (CONKE, 2018). Um resíduo é a sobra de qualquer produto e pode ser dividido em resíduo sólido urbano ou resíduo industrial, e ambos possuem potencial para tratamento e até mesmo recuperação energética (CHEN, 2018).

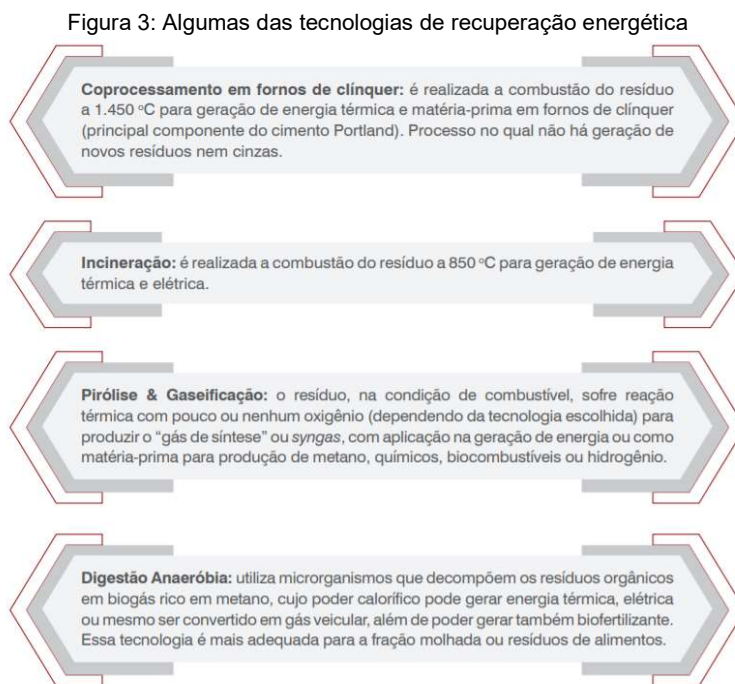
A lei nº 12.305/2010 instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos e estabeleceu a responsabilidade dos cidadãos sobre o acondicionamento adequado dos resíduos sólidos gerados, bem como a devida separação nos municípios onde houver coleta seletiva, resultando assim em uma importante ferramenta para as questões ambientais, sociais e econômicas (KONRAD e CALDERAN, 2011).

Em 2018 o Brasil gerou aproximadamente 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos, sendo que destes cerca de 92% foram coletados, contudo apenas 59.5% destes resíduos tiveram destinação adequada (ABRELPE, 2019). Estes dados geram preocupação, pois mesmo este assunto sendo tratado com sua devida importância desde a Conferência Rio 92, ainda existe muitos aspectos que precisam ser melhorados com urgência. Países desenvolvidos ou não, tem mostrado que este assunto deve ser prioritário, sendo necessário o comprometimento do governo, das empresas e indústrias bem como da sociedade, devido à ligação deste tema com o aquecimento global e as alterações climáticas severas. É preciso aumentar o reaproveitamento e consequentemente a coleta seletiva bem como a reciclagem e ainda reduzir as fontes geradoras e a disposição irregular (BESSEN, RIBEIRO, *et al.*, 2014; KHANDELWAL, DHAR, *et al.*, 2019).

A gestão de resíduos sólidos no Brasil custa quase 122 reais/ano/cidadão e devido à má gestão, a administração pública gasta quase 1.5 bilhões de reais/ano devido a doenças associadas ao descarte irregular desses resíduos (SNIS, 2019).

Existem diversos métodos corretos capazes de projetar uma estratégia de gerenciamento de resíduos. O principal objetivo destes é minimizar a queima dos resíduos, a destinação dos mesmos para aterros e consequentemente o uso de fontes primárias (WOOLLEY, LUO e SIMEONE, 2018). Uma estratégia muito eficiente empregada

atualmente é a utilização de técnicas (Figura 3) que permitem a recuperação da energia contida nos resíduos. No Brasil em torno de 0.2 milhões de toneladas foram submetidas a este tratamento em 2019 (ABREN, 2019).



Autor: Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2019)

Alguns resíduos como borrachas e plásticos tem decomposição lenta e são facilmente encontrados em aterros sanitários, causando danos à natureza e a saúde da população. Materiais como pneus inservíveis vêm sendo incorporados em concretos de cimento Portland e CAP's a fim de melhorar suas propriedades. Este fato acaba resultando em uma importante ferramenta na construção de rodovias, pois alguns dos materiais utilizados têm melhorado o desempenho das misturas asfálticas, reduzindo a formação de trincas térmicas, afundamentos de trilhas de roda e trincamento por fadiga (MENG, LING e MO, 2018).

Segundo dados da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), em 2019 foram comercializados aproximadamente 74 milhões de pneus e cerca de 471 toneladas tiveram seu destino correto neste mesmo ano. A cada ano o número de carros em circulação nas cidades aumenta, e conseqüentemente o descarte de pneus. Assim, para que este tipo de problema seja reduzido, é preciso reutilizar e/ou reciclar (COLLINS, SOUZA, *et al.*, 2018).

O processo que chega a aproveitar 90% dos componentes existentes em um

pneu é conhecido como pirólise (decomposição térmica). Este método é utilizado em diversas partes do mundo devido a sua capacidade de geração de energia, bem como o potencial deste processo para transformar em outros materiais, objetos que seriam descartados evitando assim a extração de matéria-prima da natureza (PIYATHILAKA, RANAWEERA e SEWWANDIKA, 2018). Outro método que vem sendo cada vez mais utilizado para dar destinação correta aos pneus inservíveis é o coprocessamento, onde este resíduo é utilizado em fornos de clínquer sendo uma alternativa também econômica devido à redução dos gastos do processo (ARAÚJO, 2018; MUCKE, RIBEIRO e TUBINO, 2019).

Os óleos vegetais constituem outro tipo de resíduo que pode gerar poluição ambiental devido à falta de locais para destinação adequada e alto custo de tratamento, tendo-se então descarte em ralos de pias e risco de contaminação da água e do solo. O manuseio correto deste tipo de resíduos inclui destinação adequada, reaproveitamento, reciclagem ou outras formas que constituem planos interessantes e fundamentais para a preservação do meio ambiente (BUSATO, STUMM e NOVELLO, 2014; CALANCA e GROSSI, 2019).

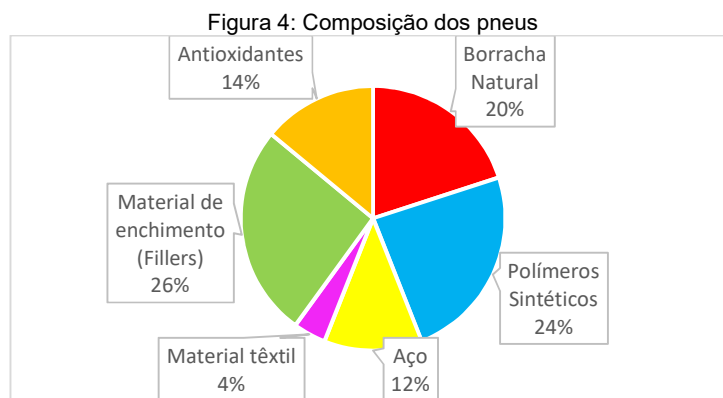
A construção civil é uma das maiores produtoras de resíduos industriais, tanto em sua fase de construção quanto nas fases de demolição, reforma ou reparos, porém é um setor com grande potencial para reutilizar materiais descartados, bem como restos da própria construção. Sendo assim é importante destacar a reutilização de materiais nesta área devido ao grande consumo de matéria-prima (PIMENTEL, 2013; MENEGAKI e DAMIGOS, 2018).

2.1.1 Pneus

Antes da Segunda Guerra Mundial os pneus eram fabricados apenas com borracha natural. No entanto, após este período Charles Goodyear descobriu por acidente a “vulcanização” quando deixou cair enxofre sobre uma porção de borracha aquecida. Esta nova tecnologia originava então a borracha sintética, resultando em um processo que reunia maior resistência, durabilidade e elasticidade (ODA, 2000; ITEGO, 2018).

O pneu além de melhorar o desempenho dos veículos, é um material fundamental em relação à segurança. Os materiais constituintes destes (Figura 4) são considerados resistentes e acabam contribuindo para a vida longa do material e conseqüentemente com a difícil decomposição. Diante disso, os mesmos passaram a ter papel de suma importância quando o assunto é impacto ambiental, pois em consequência

de seu tamanho, não são aceitos inteiros em aterros e acabam sendo destinados irregularmente (PARRA, NASCIMENTO e FERREIRA, 2010; FRANÇA, ROSSETO e DECKER, 2018).



Fonte: Li, Stubblefield, *et al.*, (2004); Gomes, Neto, *et al.*, (2019), adaptado pelo autor

Segundo dados do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), o número de carros em circulação em fevereiro de 2019 aumentou em torno de 8% em relação a dezembro de 2016, gerando assim aumento da quantidade de pneus descartados. Estas estimativas, quando realizadas, apresentam uma situação preocupante no Brasil devido ao passivo ambiental negativo que o descarte irregular de pneus pode causar (THOMAS e GUPTA, 2016; YADAV e TIWARI, 2019).

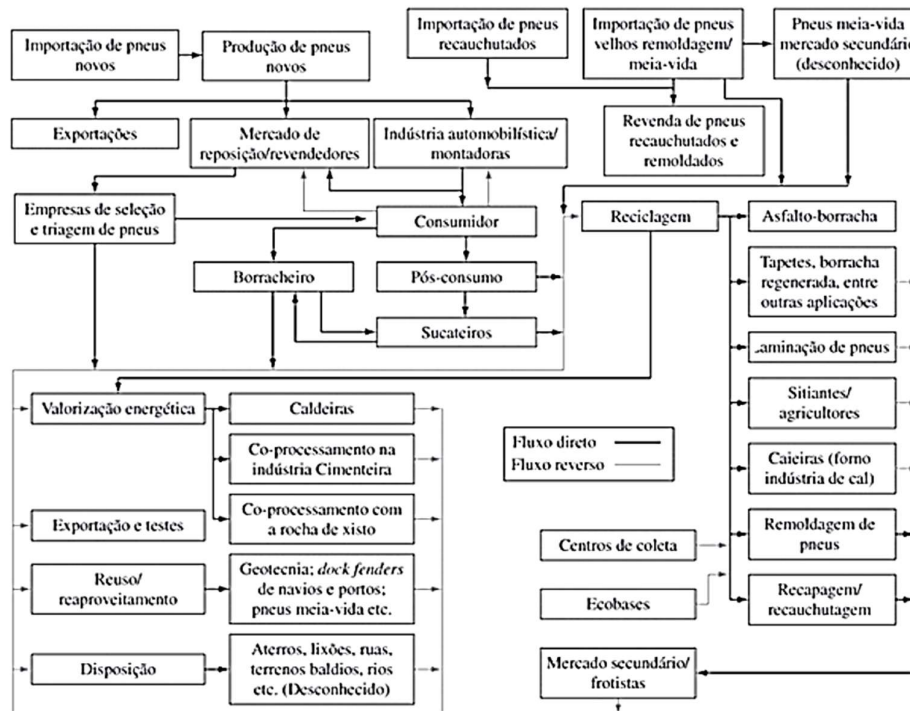
Segundo Ribeiro, Maldonado, *et al.* (2018), devido ao aumento da frota de carros, ônibus, caminhões e motos, os problemas ambientais cresceram levando em consideração o excessivo descarte de pneus, e se tornou uma grande preocupação, fazendo com que a legislação possibilitasse o uso de alternativas para aumentar a vida útil deste material.

Existem diversas maneiras para o descarte correto dos pneus, dentre elas temos reutilização, reforma, regeneração, coprocessamento, pirólise e reciclagem, porém ainda não se definiu qual o melhor método para se adotar. Uma alternativa que vem sendo muito utilizada para definir qual método empregar é análise do ciclo de vida, onde este dá valor ao impacto e assim ajuda a escolher a melhor alternativa (GOMES, NETO, *et al.*, 2019). A Figura 5 apresenta algumas maneiras da disposição final dos pneus gerados a cada ano.

Considerando a pavimentação rodoviária, os pneus inservíveis triturados podem ser utilizados como material de enchimento em aterros ou como agregados finos em misturas asfálticas. Também podem ser utilizados como modificadores dos CAP's e até

mesmo para a construção de muros de contenção (FARIA, 2015).

Figura 5: Destino final de pneus descartados



Fonte: Lagarinhos e Tenório (2008)

2.1.2 Óleo vegetal

Sendo resultado de um processo industrial, os óleos vegetais são encontrados em vários tipos (soja, girassol, amêndoas, linhaça, entre outros). Segundo *The Statistics Portal* (STATISTA, 2019), o consumo mundial de óleo vegetal entre 2018-2019 alcançou aproximadamente 200 bilhões de toneladas, e considerando os tipos de óleos vegetais consumidos, mais de 85% corresponderam a óleo de girassol, soja, milho, canola e palma.

Em relação à produção de grãos, as maiores produções nacionais são observadas para soja com 48% e para o milho com 39,63% (CONAB, 2016). Esses grãos são processados em plantas para a retirada da resina oleosa encontrada em suas sementes. Essas resinas não se dissolvem na água, contudo são solúveis orgânicos (RODACOSKI, OLIVEIRA, e ANDRADE, 2014).

Os óleos vegetais são produtos utilizados em grande quantidade em cozinhas sejam elas industriais ou residenciais. Este produto é empregado em processos

de frituras, e quando descartado incorretamente pode gerar consequências negativas ao meio ambiente (BARROS, ZIEGLER, COSTA, SILVA, COSTA, & LUCENA, 2017). Os óleos utilizados nas cozinhas para fritura podem resultar em um produto para a confecção de sabão e outros produtos, por exemplo, tintas e detergentes (BUSATO, STUMM, & NOVELLO, 2014). Devido ao seu ponto de fulgor ser superior a 220°C, também é uma boa escolha para empregar na modificação de ligantes asfálticos (PORTUGAL, 2016).

Quando este resíduo é descartado em ralos de pia, acabam causando danos às tubulações podendo aumentar os gastos com tratamento e ainda podem requerer a utilização de produtos químicos, resultando em maiores danos ao meio ambiente. Quando rejeitado sem tratamento adequado em galerias de águas pluviais e redes coletoras de esgoto, pode causar problemas nas redes bem como contaminação das águas, solos, fauna e flora (FRANÇA, GUARNIERI e DINIZ, 2016; AZAHAR, JAYA, *et al.*, 2019). Esses óleos também podem contribuir para o efeito estufa, chuva ácida e mau cheiro, pois durante sua decomposição liberam CH₄ (Gás Metano). Quando em contato com a água acabam reduzindo o oxigênio e a passagem de luz, além de afetar poços e lençóis freáticos (RODACOSKI, OLIVEIRA e ANDRADE, 2014).

Segundo Chen, Leng, *et al.* (2014), os óleos vegetais quando residuais não apresentam gases tóxicos por já terem passado pelo processo de aquecimento, sendo que a temperatura utilizada em um processo de fritura varia entre 150°C e 180°C. De acordo com a Enciclopédia Única de Previsões e Estatísticas Mundiais para todas as principais sementes oleaginosas, óleos e gorduras (OIL WORLD ANUAL, 2018), no Brasil 1/3 dos 9 bilhões de litros de óleos vegetais produzidos a cada ano são comestíveis. Desse total fabricado, mais de 200 milhões de litros são descartados inadequadamente.

Segundo Barros, Parente, *et al.* (2018), para saber a quantidade exata desse resíduo descartado a cada processo de fritura, é preciso considerar a absorção do mesmo no alimento e assim levar em consideração diversos fatores, como por exemplo o formato do alimento, a temperatura, quantidade de vezes que o óleo foi reutilizado e o tempo de imersão do alimento no óleo.

Um estudo realizado por estes mesmos autores, em uma lanchonete na cidade de Forquilha no Ceará, mostrou que semanalmente são utilizados 384 litros de óleo, e destes 73 litros são descartados. Considerando oito litros de óleo novo e cinco reutilizações para fritura de peixes, batatas e polentas à 170°C, onde o alimento foi

submerso entre 20 e 40 minutos, foi constatado o descarte de 3.68 litros de óleo, correspondente a aproximadamente 46% (*)¹.

Segundo Cao, Wang, *et al.* (2018), devido a ser considerado um material estável e que não interfere de maneira significativa na composição química do ligante asfáltico, os óleos vem sendo destinados a modificação do CAP e tem mostrado ganhos positivos como redução da temperatura de usinagem e compactação, além de redução da viscosidade em asfaltos modificados com borracha moída de pneus. A Figura 6 apresenta a caracterização físico-química obtida por Portugal (2016) para o óleo de soja e de milho em seu estado novo e residual.

Figura 6: Caracterização físico-química dos óleos de soja e milho

| ÍNDICES | UNIDADES | VALORES ENCONTRADOS | | | |
|---------------------------|-------------------------|---------------------|----------|---------------|----------|
| | | OLEO DE SOJA | | ÓLEO DE MILHO | |
| | | NOVO | RESIDUAL | NOVO | RESIDUAL |
| Índice de Acidez | mg KOH/g | 0,75 | 2,21 | 0,70 | 1,07 |
| Índice de Iodo | mg I ₂ /100g | 56,21 | 62,68 | 63,80 | 62,34 |
| Índice de Peróxido | meq/kg | 23,96 | 21,99 | 14,99 | 35,96 |
| Índice de Refração (26°C) | - | 73,25 | 72,60 | 72,50 | 72,50 |
| Viscosidade (40°C-50 rpm) | cP | 30,00 | 39,00 | 35,00 | 37,00 |

Fonte: Portugal (2016)

2.2 CIMENTO ASFÁLTICO DE PETRÓLEO (CAP)

O Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) tem sua origem na destilação do petróleo, contribui significativamente com o comportamento da mistura asfáltica, pois suas propriedades são diretamente transferidas à mesma, assim é importante que este tenha resistência e não apresente falhas na sua microestrutura (MENG, AMIT e YIQIU, 2017).

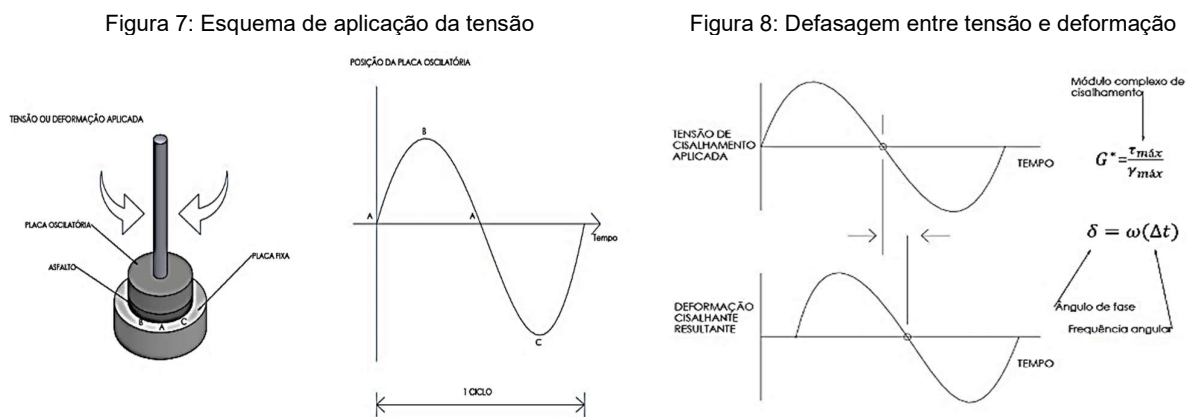
Sua composição química depende da fonte de origem do petróleo bruto e procedimento utilizado para o refino, considerando se foram empregados aditivos ou não (ANTUNES, 2020). O CAP é formado por mistura de aproximadamente 90 a 95% de hidrocarbonetos de diversos tamanhos e em torno de 5 a 10% de heteroátomos polarizados constituídos por ligações covalentes dos quais podem ser citados o oxigênio, enxofre, nitrogênio e metais. Nos processos de modificações do CAP as propriedades químicas deste afetam diretamente o comportamento físico e mecânico das misturas asfálticas (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2006; OSMARI, 2016).

¹ (*) Cálculo efetuado pelo autor, a fim de obter maior precisão sobre a quantidade de óleo descartada no local onde foi coletado o resíduo para realização da pesquisa.

Além do CAP convencional (puro) ou modificado, existem ainda o asfalto diluído, emulsão asfáltica e o asfalto espuma. As emulsões são definidas como um composto de aditivos dispersantes do tipo óleo e água, ou seja, dois líquidos imiscíveis que são dispersos como gotículas (NIKFEKR, 2015). O asfalto diluído é caracterizado por ser a diluição do CAP em solventes leves a base de petróleo (PEREIRA, 2018). O asfalto espuma é conhecido como uma técnica dependente da água, a qual proporciona o aumento do volume do CAP mediante choque térmico durante a adição de água em temperatura ambiente (OZTURK e KUTAY, 2014; HASAN e YOU, 2016).

Para caracterizar o ligante asfáltico e definir então suas propriedades existem diferentes ensaios que podem ser realizados, onde estes são subdivididos em duas categorias sendo ensaios convencionais (penetração, ponto de fulgor, ponto de amolecimento, outros) e os ensaios reológicos com a utilização de reômetros (viscosidade, cisalhamento dinâmico, fluência em viga, outros). A reologia é empregada pois estuda o fluxo e a deformação do material integrando diversas variáveis (força, deformação e tempo), sendo possível relacionar as características do ligante asfáltico com as propriedades de desempenho do mesmo, o que não é possível apenas com a realização de ensaios convencionais (SILVA, 2014).

Um exemplo de como um ensaio reológico funciona, esta esquematizado na Figura 7, onde a mesma apresenta um esquema de aplicação das tensões ou deformações que acontecem durante o ensaio de cisalhamento dinâmico com a utilização de um reômetro, enquanto a Figura 8 apresenta a defasagem entre tensão cisalhante e deformação cisalhante em um intervalo de tempo específico (BERNUCCI, MOTTA, *et al.*, 2006).



Fonte: BERNUCCI, MOTTA, *et al.* (2006) adaptado pelo autor

Uma das principais propriedades do CAP é a sua resistência ao escoamento, definida como viscosidade. Esta característica está diretamente relacionada com o bombeamento, capacidade de fácil mistura e aplicação. A principal característica do ligante asfáltico é ser aglutinante para que a mistura asfáltica possa ser devidamente resistente para suportar os inúmeros esforços oriundos do tráfego intenso ou moderado de veículos (BEHNOOD e GHAREHVERAN, 2019).

Apesar de suas características resistentes, os revestimentos asfálticos podem apresentar algumas patologias, como o trincamento por fadiga e o afundamento de trilha de roda, que acabam diminuindo sua vida útil (OLIVEIRA, BIFANO, *et al.* 2019). O trincamento por fadiga no revestimento asfáltico pode aparecer devido ao excesso de tensões às quais o pavimento é submetido durante a aplicação de cargas repetidas (POKORSKI, RADZISZEWSKI e SARNOWSKI, 2016). O afundamento de trilha de roda é definido pelo surgimento de depressões longitudinais, sendo conhecido como deformação permanente e tende a aumentar com o volume de tráfego e cargas (HIRATO, HIMENO e MURAYAMA, 2016).

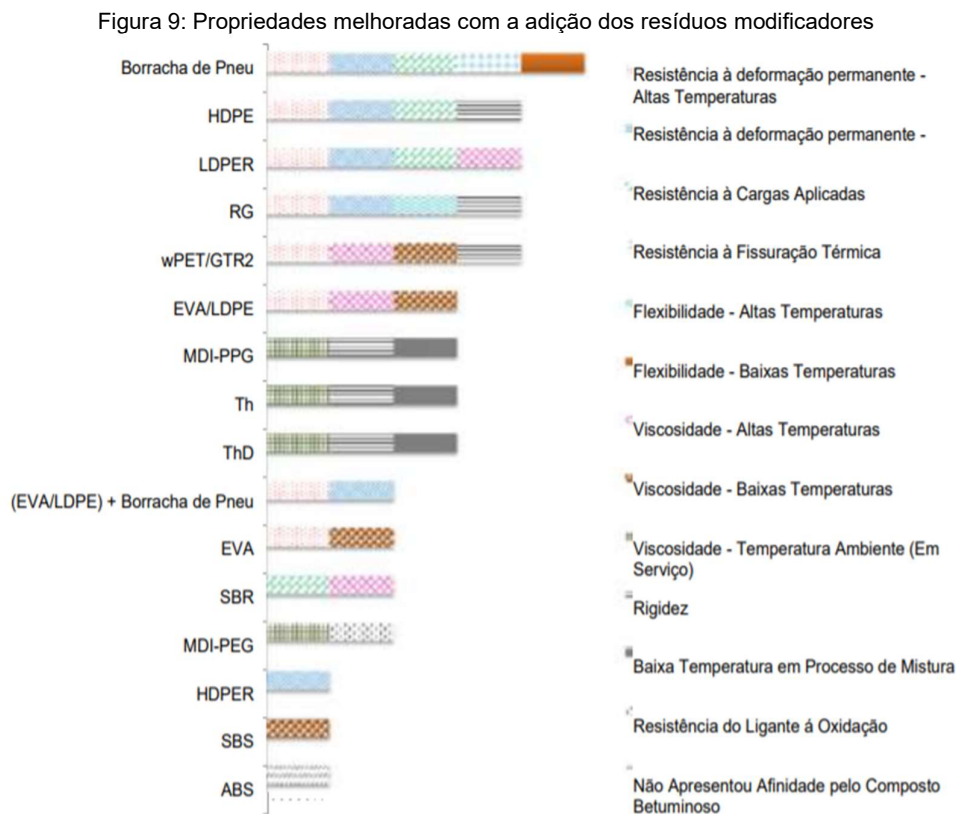
O envelhecimento do material asfáltico devido ao processo de oxidação também é outro fator que contribui para o surgimento de patologia devido ao surgimento de uma barreira de autocura. Diante destes problemas, torna-se de fundamental importância novas pesquisas que busquem modificar o ligante asfáltico, com intuito de descobrir materiais que possam ser empregados na composição das misturas asfálticas, e que possam minimizar ou retardar o surgimento destas patologias, bem como minimizar o envelhecimento do material (XU e WANG, 2017).

2.2.1 Ligante Asfáltico Modificado

Pesquisadores tem buscado produzir CAP's modificados com aditivos de uso industrial, como por exemplo, borrachas, fibras e fíleres. Segundo Vivian Junior, Ferreira e Oliveira (2019), as modificações do CAP têm como intuito principal aumentar sua resistência, minimizando assim o surgimento de patologias. As modificações se tornaram um importante avanço na pavimentação rodoviária nas últimas três décadas devido ao desenvolvimento de diversas técnicas e materiais que modificam o CAP, com destaque ao uso de polímeros (ZANI, GIUSTOZZI e HARVEY, 2017).

Segundo pesquisa realizada por Guimarães (2018), as modificações frequentes que tem acontecido no Brasil são com o uso de polímeros, por exemplo, Estireno

Butadieno Estireno (SBS), Butadieno Estireno (SBR), Borracha Moída de Pneus e Etil Vinil Acetato (EVA) (Figura 9). Desta forma, melhoram-se as propriedades dos ligantes asfálticos quanto à deformação permanente em altas temperaturas e à rigidez em temperaturas baixas e intermediárias.

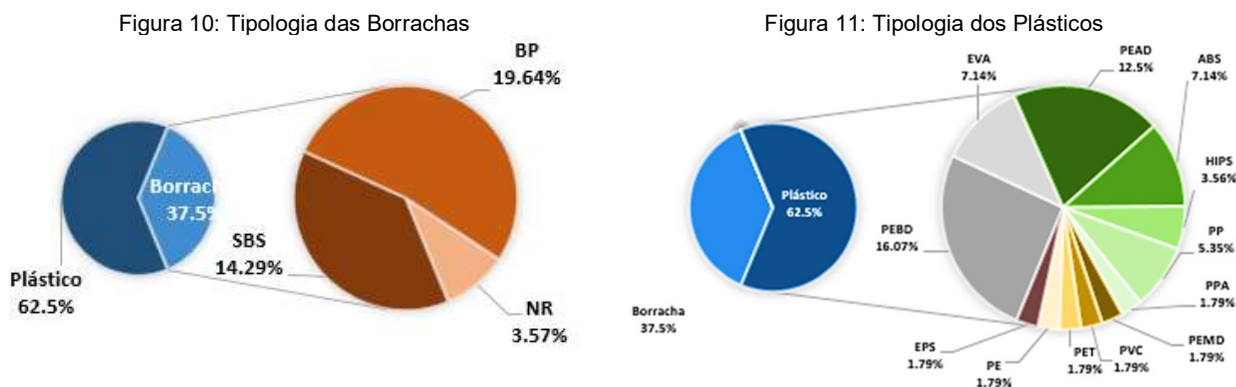


Fonte: Guimarães e Souza (2018)

O ligante asfáltico pode suportar maiores tensões e deformações quando é feita a incorporação de algum tipo de modificador, pois este pode alterar as características de falha ou ruptura do material, e conseqüentemente melhorar suas propriedades (BEHNOOD e GHAREHVERAN, 2019). Para que a modificação de CAP's com polímeros seja economicamente viável, é preciso que o polímero utilizado tenha resistência à variação de temperatura, apresente-se homogêneo com o ligante asfáltico, contribua com a fluidez do CAP quando em temperaturas elevadas, limitando a viscosidade excessiva e a elevada resistência em temperaturas mais baixas (MASHAAN, REZAGHOLILLOU e NIKRAZ, 2019).

Para melhorar as características e conseqüentemente o desempenho da resistência do CAP, Diab e You (2017) recomendam a adição de borracha de pneus ou polímeros, pois esses materiais modificam a estrutura dos ligantes asfálticos e com isso melhoram sua resistência.

As Figuras 10 e 11 apresentam pesquisa realizada por Reis e Souza (2019) sobre algumas modificações com o uso de polímeros efetuadas em estudos publicados nas bases de dados *Scopus* e *Web of Science* nos últimos dez anos em diversos países.



Fonte: Reis e Souza (2019)

Os aditivos orgânicos também são utilizados para modificar os ligantes asfálticos. Têm por finalidade diminuir a viscosidade quando aquecidos, resultando assim em maior trabalhabilidade da mistura asfáltica (OLIVEIRA, 2014). Segundo Ji, Yao, *et al.* (2017), quando esfriam aumentam a rigidez do ligante devido à solidificação das partículas. Dentre esses aditivos destacam-se o óleo de mamona, girassol, linhaça e soja, os quais apresentam estabilidade com a variação de temperatura, redução da tensão superficial entre os dois líquidos, além de características antioxidantes.

2.2.2 Ligante Asfáltico Modificado com Borracha

Segundo Camargo e Bernucci (2017), no estado do Arizona (Estados Unidos) entre 1940-1950, teve início à venda de borracha reciclada desvulcanizada em partículas menores para adição em misturas asfálticas fabricadas em campo. Os primeiros estudos com a utilização de borracha moída de pneus inservíveis em CAP's surgiram apenas na década de 60 do século passado. O produto desenvolvido por Charles Mcdonald era composto por CAP+25% de borracha moída de pneus inservíveis. No Brasil as universidades iniciaram as primeiras pesquisas na década de 1990 (ODA, 2000; FAXINA, 2002).

Oda (2000) avaliou tecnicamente a efetividade da utilização de borracha oriunda de pneus inservíveis incorporadas em ligantes asfálticos para pavimentação rodoviária. Concluiu-se por meio de ensaios laboratoriais que a incorporação da borracha

pode contribuir positivamente com as propriedades do CAP, proporcionando aumento da rigidez do ligante em elevadas temperaturas e fornecendo maior elasticidade à mistura asfalto-borracha, além aumentar a resistência do pavimento a formação de trincas térmicas em baixas temperaturas. Contudo, esta tecnologia apresentava algumas desvantagens relacionadas ao custo elevado para a trituração dos pneus, pois na época em que o estudo foi realizado, as pesquisas sobre asfalto-borracha no Brasil eram incipientes.

Souza (2006) realizou estudo utilizando adição de borracha em ligantes asfálticos e verificou que a borracha contribuiu positivamente com as propriedades dos ligantes em altas e baixas temperaturas, e que a adição de 15% de borracha moída apresentou os melhores resultados em termos de consistência, viscosidade e resistência à deformação em altas temperaturas. Ainda neste mesmo estudo, o autor ressaltou a similaridade de desempenho de CAP's modificados com borracha oriunda de pneus de carros x CAP's modificados com borracha proveniente de pneus de caminhões e ônibus.

Souza e Himeno (2006) também concluíram que a adição de borracha ao CAP 60/80 (grau de penetração) reduziu o envelhecimento do ligante asfáltico e sua suscetibilidade térmica. Mediante Análise de Variância (ANOVA), Oda (2000) mostrou que o teor de borracha utilizado e a temperatura afetaram significativamente os resultados, porém o tamanho das partículas empregadas foi a condição que apresentou menor influência nas amostras. Além disso, concluiu-se que o teor de 12% mostrou-se o mais apropriado para futuras pesquisas. Zhang, Xing, *et al.* (2016) semelhantemente chegaram a mesma conclusão mencionando que quanto menor o diâmetro da borracha menor foi a tensão acumulada no CAP, concluindo que este fator interferiu nos resultados obtidos.

Al-Khateeb e Ramadan (2015) concluíram que a adição de borracha em ligantes asfálticos pode melhorar significativamente o desempenho elástico do mesmo, reduzindo a susceptibilidade à deformação permanente e ao trincamento por fadiga, prolongando assim a vida útil dos revestimentos asfálticos.

Semelhantemente, Ariyapijati, Hadiwardoyo e Sumabrata (2017), indicaram que adição de borracha proporcionou melhora significativa no desempenho dos CAP's, contudo concluíram que a viscosidade do ligante asfáltico cresceu à medida que aumentou a porcentagem de borracha moída adicionada. Assim, foram necessárias temperaturas maiores ou a utilização de aditivos para reduzir essa viscosidade elevada. Neste mesmo sentido Rahman, Hainin e Bakar, (2017) afirmam que o teor de borracha empregado deve ser estudado a fim de utilizar a porcentagem ideal, devido ao aumento da viscosidade.

Com o passar do tempo e o avanço das pesquisas, o processo de trituração da borracha passou a ser mais barato e conseqüentemente economicamente viável. Assim surgiram mais pesquisas com a utilização deste resíduo (HAININ, AZIZ, *et al.*, 2015). O Quadro 1 apresenta diversos estudos realizados com a utilização de diversas porcentagens de borracha moída de pneus inservíveis, apresentando uma observação geral conforme resultado obtido nos ensaios efetuados.

Quadro 1: Estudos realizados com a utilização de borracha de pneus inservíveis (continua)

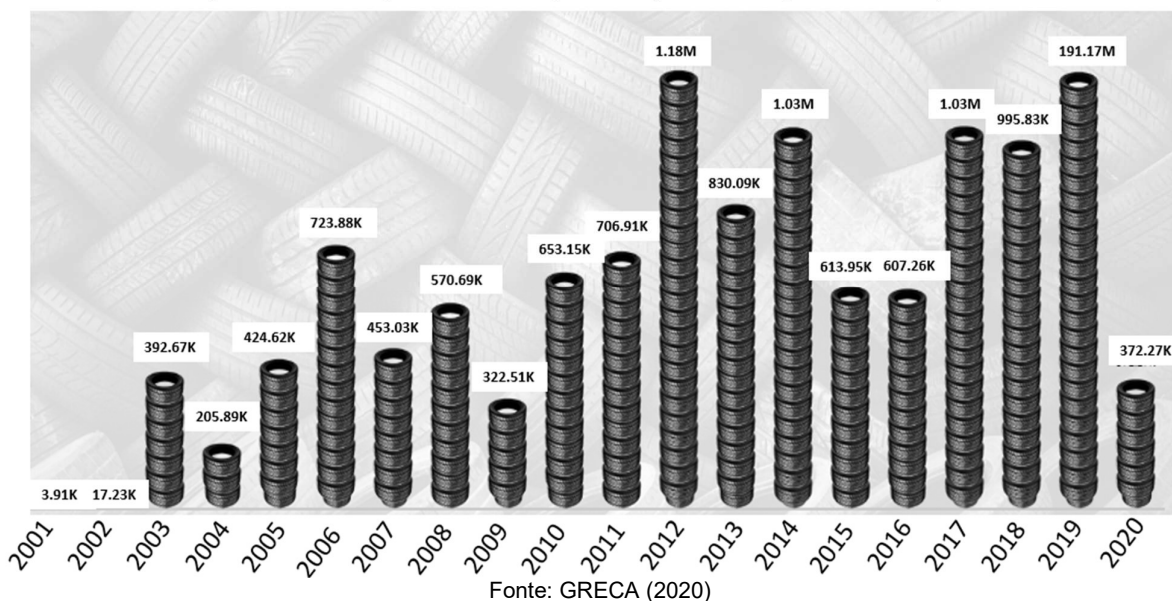
| AUTOR/ANO | ENSAIO | PORCENTAGEM DE BORRACHA | TIPO DE LIGANTE ASFÁLTICO | OBSERVAÇÃO |
|-------------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|---|
| Xu et al. (2016) | Viscosidade Brookfield | 7% | PG 64-22 | Os autores obtiveram aumento da viscosidade com a porcentagem de borracha utilizada. |
| Tayh e Yousif (2019) | | 1%, 3%, 5%, 7% e 9% | CAP 50/70 CAP 80/100 | Comprovaram o aumento de viscosidade do CAP. |
| Liang <i>et al.</i> (2015) | | 9% | CAP 50/70 CAP 80/100 | Estes autores utilizaram diferentes diâmetros de borracha (0.15mm, 0.18mm, 0.25mm e 0.42mm), sendo obtidas viscosidades maiores à medida que aumentava o diâmetro da borracha. |
| Oliveira <i>et al.</i> (2019) | Ponto de amolecimento | 2%, 5% e 8% | CAP 50/70 | Concluíram que a borracha causou aumento do ponto de amolecimento. |
| Yan <i>et al.</i> (2015) | | 5%, 10% e 15% | AH-70 | Obtiveram aumento do ponto de amolecimento, concluindo que a adição da borracha resultou numa mistura com maior consistência. |
| Thuves <i>et al.</i> (2011) | Variação em massa | 17% | CAP 35/50 CAP 50/70. | A adição causou aumento da perda de massa. |
| Yin <i>et al.</i> (2013) | | 15% | CAP 70/100 | A adição de borracha ao ligante asfáltico provocou um aumento da perda de massa. |
| Masson <i>et al.</i> (2017) | Ponto de fulgor | Asfalto AB8 ECOFLEX | CAP 50/70 | O ponto de ignição diminuiu quando da adição de borracha ao ligante convencional |
| Souza (2006) | Ponto de fulgor | 9%, 12%, 15% e 18% | CAP 60/80 | Além de observar a diminuição do ponto de fulgor, constatou que conforme o aumento da porcentagem de borracha, menor era a temperatura para atingir o ponto de ignição. |
| Xu <i>et al.</i> (2020) | Fluência em Viga (BBR) | 1%, 2% e 3% | SK90 | Com a avaliação realizada às temperaturas de -12°C, -18°C e -24°C, foi constatado que a adição de borracha ao ligante virgem torna-o mais rígido e quando há redução da temperatura, maiores são os valores da rigidez e conseqüentemente menores os valores-m. |
| Chen <i>et al.</i> (2019) | | 12% | PG64-22 | A adição tornou o ligante asfáltico mais rígido quando avaliado às temperaturas de -6°C, -12°C e -18°C e conforme o envelhecimento do ligante, maiores foram os valores obtidos para a rigidez e menores os resultados da relaxação (valores-m). |

Quadro 2: Estudos realizados com a utilização de borracha de pneus inservíveis (conclusão)

| AUTOR/ANO | ENSAIO | PORCENTAGEM DE BORRACHA | TIPO DE LIGANTE ASFÁLTICO | OBSERVAÇÃO |
|-------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|--|
| Chen <i>et al.</i> (2019) | Cisalhamento Dinâmico (DSR) | 12% | PG 64-22 | Estes autores constataram que a adição de borracha ao ligante asfáltico melhorou a resistência à fissuração. Além disso, a adição deste resíduo contribuiu para que o CAP fosse menos suscetível a oxidação. (*) Ensaio realizado em amostras não envelhecidas e envelhecidas a curto e longo prazo. |
| Poovaneshvaran <i>et al.</i> (2020) | | 5%, 10% e 15% | CAP 60/70 | A adição de borracha ao ligante asfáltico melhorou a resistência à deformação permanente e o mesmo se tornou menos suscetível a mudanças de temperaturas. A partir dos valores obtidos com a relação $ G^* /\sin(\delta)$, percebeu-se que a borracha melhorou as condições de recuperação elástica do ligante asfáltico. (*) Ensaio realizado em amostras não envelhecidas e envelhecidas a curto prazo, |

No Brasil, devido aos bons resultados obtidos com a incorporação da borracha moída de pneus inservíveis ao CAP, criou-se um produto comercial conhecido como ECOFLEX, desenvolvido pela empresa GRECA asfaltos. Utilizando cerca de 1000 pneus por quilômetro, sua primeira aplicação ocorreu em 2001 e até 2020 foram cerca de 12.305.737 de pneus reutilizados. A Figura 12 apresenta o número total de pneus utilizados por ano para modificação de CAP's entre 2001 e maio/2020.

Figura 12: Total de pneus utilizados para incorporação no ligante asfáltico por ano



Conforme exposto nos parágrafos anteriores, a adição de borracha moída de pneus em ligantes asfálticos além de ser uma alternativa considerada sustentável devido ao reaproveitamento de pneus inservíveis, torna-se economicamente viável devido aos resultados positivos que esta adição proporciona ao CAP convencional (SAMARAKOON, RUBEN, *et al.*, 2019). Vale lembrar que são despendidos cerca 2 bilhões de reais/ano em recapamentos de pavimentos rodoviários devido ao aparecimento de patologias prematuras (SANTOS, 2017).

2.2.3 Ligante Asfáltico Modificado com Óleo Vegetal

Os óleos vegetais são considerados aditivos orgânicos e promovem a redução da viscosidade dos CAP's bem como diminuição das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas (LUCENA, SILVEIRA e COSTA, 2016). Como são capazes de reduzir estas temperaturas, os óleos classificam as misturas asfálticas como sendo misturas mornas, e conseqüentemente reduzem as emissões causadas pela temperatura elevada no processo de fabricação. Além disso, minimizam os gastos com energia nesse processo e assim reduzem os gastos durante a produção (MAJIDIFARD, TABATABAEE e BUTTLAR, 2019).

O Quadro 2 apresenta alguns tipos de óleos vegetais utilizados em pesquisas para modificação de ligantes asfálticos nos últimos anos.

Quadro 2: Tipologia de óleos utilizados em pesquisas

| Autores/ Ano | Tipo de Óleo | Porcentagem utilizada (%) |
|---|------------------------------------|----------------------------------|
| Costa, Cavalcante, <i>et al.</i> (2015) | Óleo de Linhaça | 5% |
| Lucena, Silveira e Costa (2016) | Óleo de Moringa | 0; 0.5; 1; 1.5; 2; 2.5 e 3% |
| Portugal (2016) | Óleo de Soja e Óleo de Milho | 1, 2 e 3% |
| Silva (2016) | Óleo de Girassol e Óleo de Moringa | 1; 1.5; 2 e 2.5% |
| Ji, Yao, <i>et al.</i> (2017) | Óleo de Soja e Óleo de Milho | 2, 4, 6, 8 e 10% |
| Barros, Ziegler, <i>et al.</i> (2017) | Óleo de Soja e Óleo de Milho | 1, 2 e 3% |
| Ziegler, Barros, <i>et al.</i> (2017) | Óleo de Algodão | 1, 2 e 3% |
| Carvalho (2018) | Óleo de Girassol | 1, 2 e 3% |

O uso de aditivos orgânicos proporciona a redução do trincamento térmico em baixas temperaturas, ou seja, melhora seu desempenho reológico e mecânico (RAMADHANSYAH, MASRI, *et al.*, 2019). Além disso, estudos apresentados por Chen, Leng, *et al.* (2014); Yu, Zaumanis, *et al.* (2014); Nayak e Sahoo (2015), Osmari e Aragão

(2016), Ji, Yao, *et al.* (2016), Sun, Sun, *et al.* (2017), concluíram que o uso de óleos vegetais contribuiu para o rejuvenescimento dos ligantes asfálticos.

Sob o mesmo ponto de vista Barros, Ziegler, *et al.* (2017) concluíram que as adições de óleo de soja e de milho, reduziram a temperatura de produção e compactação das misturas asfálticas, e que ao comparar os óleos novos com os residuais, não se obteve diferença significativa nos resultados, resultando em uma alternativa viável para a destinação final deste tipo de resíduo.

Segundo Oliveira (2014) os óleos atuam modificando as propriedades reológicas dos ligantes asfálticos, reduzindo a viscosidade e resultando num aumento da trabalhabilidade do material. Contudo, conforme a temperatura diminui as partículas dos aditivos se solidificam e aumentam a rigidez do CAP, enquanto em temperaturas superiores acabam perdendo resistência à deformação (SUN, SUN, *et al.*, 2017; WANG, XUE, *et al.*, 2018).

O Quadro 3 apresenta diversos estudos realizados com a utilização de diversas porcentagens e tipos de óleo vegetal, apresentando uma observação geral conforme resultado obtido nos ensaios efetuados.

Quadro 3: Estudos realizados com a utilização de óleos vegetais (continua)

| AUTOR/ANO | ENSAIO | PORCENTAGEM DE ÓLEO | TIPO DE LIGANTE ASFÁLTICO | OBSERVAÇÃO |
|-------------------------------|------------------------|--|---------------------------|--|
| Portugal (2016) | Viscosidade Brookfield | 1%, 2% e 3% de óleo de soja e óleo de milho | CAP 50/70 | O autor obteve redução de 8.63%, 16.71% e 31.54% nas viscosidades medidas. Não houve diferença significativa entre os tipos de óleos utilizados, contudo em relação a porcentagem a diferença se mostrou aparente. |
| Azahar <i>et al.</i> (2016) | | 3%, 4% e 5% de óleo vegetal | CAP 50/70 | Verificaram a diminuição da viscosidade, bem como quanto maior o teor de óleo adicionado, maior a redução obtida. |
| Rahman, Hainin e Bakar (2017) | | 5% de óleo de soja | CAP 60/70 | Estes autores também adicionaram borracha ao ligante asfáltico nas taxas de (5%, 7,5% e 10%), e também constaram a redução nos valores das viscosidades, mesmo no ligante modificado com a borracha. |
| Ji <i>et al.</i> (2017) | | 2%, 4%, 6%, 8% e 10% de óleo de soja e milho | PG 64-22 | Foi confirmada a redução da viscosidade, bem como quanto maior a porcentagem de óleo utilizada maior a redução obtida. |
| Portugal <i>et al.</i> (2017) | | 1%, 2% e 3% de óleo de soja e óleo de milho | CAP E55/75 | Verificaram que a inserção de óleo reduziu a consistência do material e conseqüentemente seu ponto de amolecimento. |

Quadro 3: Estudos realizados com a utilização de de óleos vegetais (continua)

| AUTOR/ANO | ENSAIO | PORCENTAGEM DE ÓLEO | TIPO DE LIGANTE ASFÁLTICO | OBSERVAÇÃO |
|-------------------------------|------------------------|---|---------------------------|---|
| Barros <i>et al.</i> (2017) | Viscosidade Brookfield | 1% e 2% de óleo de soja e óleo de milho | CAP 50/70 | Os autores obtiveram a redução da viscosidade, bem como não constaram diferença aparente entre o tipo de óleo, mas em relação a porcentagem empregada a mesma mostrou-se significativa. |
| Portugal (2016) | | 1%, 2% e 3% de óleo de soja e óleo de milho | CAP 50/70 | Não houve diferença aparente no ponto de amolecimento considerando os tipos de óleos utilizados, bem como suas condições, contudo a diferença se tornou visível quando comparadas as porcentagens utilizadas. |
| Chen <i>et al.</i> (2014) | | 3%, 4%, 5%, 6% e 7% de óleo vegetal | CAP 60/80 e CAP 40/80 | A adição de óleo reduziu a densidade dos ligantes asfálticos, deixando-os menos viscosos e assim reduzindo suas temperaturas de escoamento. |
| Al-Omari <i>et al.</i> (2018) | | 1%, 2%, 4%, 6% e 8% de óleo vegetal | CAP 60/70 | Nesse estudo foi constatado que conforme o aumento da porcentagem do óleo, menor o ponto de amolecimento do CAP modificado, tendo-se concluído que é preciso escolher a porcentagem de óleo de acordo com o clima da região onde será utilizado o CAP modificado. |
| Ziegler <i>et al.</i> (2017) | Variação em massa | 1%, 2% e 3% de óleo vegetal | CAP 50/70 | As variações em massa das amostras com adição de óleo foram menores do que a observada para o CAP 50/70 convencional, indicando que o óleo pode prevenir a evaporação e oxidação dos componentes presentes no ligante asfáltico |
| Xinxin <i>et al.</i> (2018) | | 5%, 10%, 15% e 20% de óleo vegetal | PEN 70 | Concluíram que maiores teores de adição de óleo resultaram em maiores variações em massa. |
| Xinxin <i>et al.</i> (2018) | Ponto de fulgor | 5%, 10%, 15% e 20% de óleo vegetal | PEN 70 | Concluíram que a adição desse óleo diminuiu o ponto de inflamação dos ligantes modificados quando comparado ao ligante asfáltico PEN 70. Também se observou que à medida que o teor de óleo aumentou o ponto de fulgor diminuiu. |
| Al-Omari <i>et al.</i> (2018) | | 1%, 2%, 4%, 6% e 8% de óleo vegetal | CAP 60/70 | Foi constatada diminuição do ponto de fulgor dos ligantes modificados com óleo quando comparado ao ligante 60/70 convencional, bem como redução das temperaturas de ignição com o aumento da porcentagem de óleo adicionado. |
| Sun <i>et al.</i> (2016) | Fluência em Viga (BBR) | 2%, 4%, 6% e 8% de óleo de cozinha | CAP 40/60 | Nas temperaturas de -18°C, -24°C e -30°C, foi constatada diminuição da rigidez e aumento no valor-m, ou seja, a adição do óleo reduziu o acúmulo de tensão durante o processo de resfriamento e melhorou a resistência do material ao surgimento de trincas térmicas. |

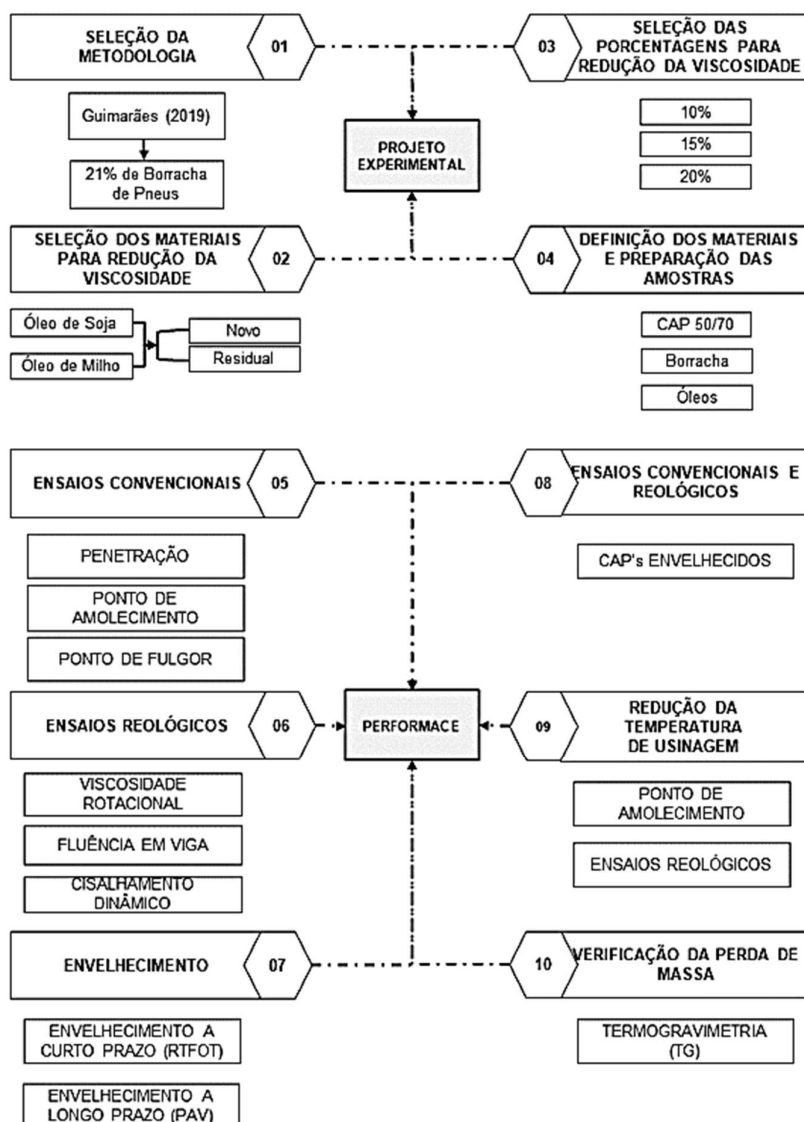
Quadro 3: Estudos realizados com a utilização de óleos vegetais (conclusão)

| AUTOR/ANO | ENSAIO | PORCENTAGEM DE ÓLEO | TIPO DE LIGANTE ASFÁLTICO | OBSERVAÇÃO |
|-------------------------------|------------------------------------|---|----------------------------------|---|
| Zhang <i>et al.</i> (2017) | Fluência em Viga (BBR) | 6% de óleo de cozinha | AH-90 | A avaliação realizada nas temperaturas de -12°C e -18°C concluiu que conforme a temperatura diminuiu maior era a rigidez do material. |
| Portugal (2016) | Cisalhamento Dinâmico (DSR) | 1%, 2% e 3% de óleo de soja e óleo de milho | CAP 50/70 | Afirmou que a adição do óleo de soja e de milho pode causar importante influência nos valores do módulo complexo (G^*) e do ângulo de fase (δ), sendo que quanto maior o teor do óleo utilizado menor será o valor para o ângulo de fase e consequentemente maior será o valor módulo complexo. Também foi concluído que esse aumento da porcentagem do óleo acaba reduzindo os fatores de recuperação do seu modo elástico bem como sua resistência a possíveis deformações. Segundo esse autor, não foi observada diferença significativa entre o tipo do óleo utilizado (milho e soja) nem entre a condição do mesmo (novo e residual). |
| Al-Omari <i>et al.</i> (2018) | | 6% | CAP 50/70 | Os requisitos Superpave foram atendidos até a temperatura de 70°C. Contudo para temperaturas de ensaio superiores, a porcentagem de 2% de óleo foi o limite sugerido para utilização. Após o envelhecimento em curto prazo observou-se o mesmo comportamento. Esses autores também mencionaram que dependendo do teor de adição do óleo, pode haver diminuição na resistência à deformação do ligante asfáltico. |
| Portugal (2016) | Redução da temperatura de produção | 3% de óleo de soja | CAP 50/70 | A adição acarretou uma diminuição de aproximadamente 7°C na temperatura de usinagem. |
| Vasconcelos e Sabaini (2018) | | 8% | CAP 50/70 | Observaram que conforme o aumento da porcentagem de óleo de cozinha, maior foi a redução da temperatura de produção alcançada para o CAP modificado. Estes autores concluíram que 8% de aditivo pode provocar uma redução de temperatura de fabricação de aproximadamente 3°C. |
| Chen <i>et al.</i> (2014) | Análise termogravimétrica | 3%, 4%, 5%, 6% e 7% de óleo vegetal | CAP's (60-80; 40-60 e 40-60+SBS) | Concluíram por meio de análises químicas que a adição de óleo vegetal não tinha potencial de mudar a estrutura molecular dos mesmos. Além disso, o óleo conservou as características dos ligantes asfálticos preservando suas propriedades durante o processo de envelhecimento |
| Somé <i>et al.</i> (2016) | | 14% de óleo de girassol | CAP 15/25 | Observaram que a adição de óleo de girassol (produto que apresenta viscosidade parecida com a do óleo de soja), não provocou degradação significativa nas propriedades do mesmo. |

3 METODOLOGIA

Sendo a presente pesquisa de característica experimental, foram seguidos dez etapas conforme apresentado no diagrama da Figura 13: 1) Seleção da metodologia; 2) Seleção dos materiais para redução da viscosidade; 3) Definição das porcentagens para redução da viscosidade; 4) Definição dos materiais e preparação das amostras; 5) Realização de ensaios convencionais não envelhecidos; 6) Realização de ensaios reológicos não envelhecidos; 7) Envelhecimento dos CAP's; 8) Realização de ensaios convencionais e reológicos nos CAP's envelhecidos; 9) Redução da temperatura de usinagem; e, 10) Análise termogravimétrica (TG).

Figura 13: Diagrama das etapas realizadas nesta pesquisa



Com as etapas definidas, foram consideradas as seguintes variáveis para aplicação no projeto:

- I. Escolheu-se a metodologia apresentada por Guimarães (2019), onde o mesmo encontrou a viscosidade excessiva de 5891.11 cP quando acrescentou 21% de borracha moída de pneus ao CAP 50/70;
- II. Foram utilizados dois tipos de óleos vegetais (Soja e Milho) com intuito de reduzir a viscosidade excessiva, sendo estes facilmente encontrados em mercados e mais utilizados em restaurantes e afins, de modo a facilitar a coleta dos mesmos;
- III. Além dos tipos, foram empregados óleos em seus estados novo (sem ter sido utilizado para frituras) e residual (utilizados para processo de frituras de alimentos), com intuito de avaliar a influência dos dois estados no desempenho das amostras;
- IV. Com intuito de enquadrar o CAP modificado com borracha e óleo na classificação de viscosidade (800-2000 cP) para asfalto borracha (norma ABNT/NBR 15529/2000), foram adicionadas respectivamente, três porcentagens (10%, 15% e 20%) de cada tipo e estado de óleo, com a finalidade de avaliar a influência das porcentagens e do estado do óleo no comportamento dos CAP's modificados;
- V. As amostras foram submetidas aos ensaios convencionais e reológicos em condições não envelhecidas, envelhecidas em curto prazo e envelhecidas em longo prazo. Assim, chegou-se a 38 combinações de CAP's conforme Tabela 1.

Tabela 1: CAP's pesquisados neste estudo (continua)

| Mistura | Tipo de Óleo | Estado do óleo | Condição da Mistura | Porcentagem de Óleo (%) |
|-------------------|--------------|----------------|---------------------|-------------------------|
| CAP 50/70 (REF 1) | - | - | NE | - |
| | | | ECP | |
| | | | ELP | |
| 21% BO (REF 2) | - | - | NE | - |
| | | | ECP | |
| | | | ELP | |
| 21% BO + OL | Óleo de Soja | Novo | NE | 10 |
| | | | | 15 |
| | | | | 20 |
| | | ECP | 10 | |
| | | | 15 | |
| | | | 20 | |
| | Residual | NE | 10 | |
| | | | 15 | |
| | | | 20 | |
| | | ECP | 10 | |
| | | | 15 | |
| | | | 20 | |
| Óleo de Milho | Novo | NE | 10 | |
| | | | 15 | |
| | | | 20 | |
| | ECP | 10 | | |
| | | 15 | | |
| | | 20 | | |
| | | ELP | 10 | |
| | | | 15 | |

Tabela 2: CAP's pesquisados neste estudo (conclusão)

| 21% BO + OL | Óleo de Milho | Novo | ELP | 20 | |
|-------------|---------------|----------|-----|----|----|
| | | Residual | NE | 10 | 15 |
| ECP | 10 | | | 15 | 20 |
| | ELP | | | 10 | 15 |

Legenda: "REF= Referência"; "CAP= Cimento Asfáltico de Petróleo"; "BO= Borracha"; "OL= Óleo"; "NE= Não Envelhecido"; "ECP= Envelhecido em Curto Prazo"; "ELP= Envelhecido em Longo Prazo".

Os ensaios convencionais seguiram as normas do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) enquanto os ensaios de Cisalhamento Dinâmico (DSR), Fluência em Viga (BBR), Envelhecimento em curto prazo (RTFOT) e Envelhecimento em longo prazo (PAV) seguiram as especificações da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), conforme apresentado no Quadro 4.

Quadro 4: Ensaios realizados e respectivas normas

| ENSAIOS | | NORMA | CAP 50/70 | CAP 50/70 + % BORRACHA | CAP 50/70 + % BORRACHA + % ÓLEO |
|------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------|---------------------------|---------------------------------------|
| CONVENCIONAIS (EMPÍRICOS) | Penetração | DNIT 155/2010 - ME | X | - | - |
| | Ponto de Fulgor | ABNT NBR 11341/08 | X | X | X |
| | Ponto de Amolecimento | DNIT 131/2010 - ME | X | X | X |
| REOLÓGICOS | Viscosidade Rotacional | ABNT NBR 15184/04 | X | X | X |
| | Cisalhamento Dinâmico (DSR) | AASHTO T 315-12 | X | X | X |
| | Flexão em Viga (BBR) | AASHTO T 313-12 | X | X | X |
| | Envelhecimento em curto prazo (RTFOT) | AASHTO T 240-13 | X | X | X |
| | Envelhecimento em longo prazo (PAV) | AASHTO 28-12 | X | X | X |

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP 50/70)

Nesta pesquisa utilizou-se o CAP 50/70 (Figura 14), adquirido junto a fornecedor de ligantes asfálticos no Estado do Paraná, sendo seus dados de caracterização expostos na Tabela 2.

Figura 14: Recipiente contendo o Ligante Asfáltico (CAP 50/70) utilizado na pesquisa



Tabela 2: Caracterização do cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70)

| Ensaio | Resultado | | | Especificação |
|-----------------------------------|-----------|---------|-------|--|
| Penetração | 52 mm | | | 50 mm-70 mm |
| Penetração retida (*) | 52% | | | >55% |
| Ponto de amolecimento | 46°C | | | >46°C |
| Ponto de amolecimento pós RTFOT | 51°C | | | Aumento do ponto de amolecimento, máx. - 8°C |
| Ponto de fulgor | 280°C | | | 235°C |
| Varição em massa | 0.13% | | | <0.5 |
| Viscosidade Brookfield | | | | |
| 135°C | 364.33 cP | | | >141 cP |
| 150°C | 191.33 cP | | | >50 cP |
| 177°C | 83.88 cP | | | 30-150 cP |
| Temperatura - G*/sen (δ) | 70°C | | | - |
| Rigidez em (mPa) aos 60s | N/ENV | RTFOT | PAV | |
| -10°C | 192.67 | 223 | 238 | |
| -20°C | 550 | 644.33 | 798 | - |
| -30°C | 1153.33 | 1191.33 | 1224 | |
| Valor-m aos 60 s | N/ENV | RTFOT | PAV | |
| -10°C | 0.387 | 0.332 | 0.315 | |
| -20°C | 0.263 | 0.214 | 0.178 | - |
| -30°C | 0.111 | 0.093 | 0.084 | |

(*) verificou-se que a penetração retida correspondeu a aproximadamente 52%, ficando abaixo do valor mínimo de 55% estabelecido pela norma ABNT NBR 6576/2007, isso provavelmente deve-se ao fato de que o CAP 50/70 utilizado para a realização da pesquisa está no laboratório a cerca de dois anos resultando em um material mais envelhecido e com maior rigidez.

3.1.2 Borracha moída

A borracha moída utilizada (Figura 15) é proveniente de pneus descartados de veículos de passeio, obtidas por trituração à temperatura ambiente, tendo as partículas moídas 0.42mm de diâmetro médio.

Figura 15: Borracha de pneu moída utilizada na pesquisa



Fonte: Capelas (2014)

3.1.3 Óleo vegetal

Foram escolhidos óleos de soja e de milho em seus estados novo e residual (Figura 16) para serem incorporados ao CAP 50/70. As viscosidades e os pontos de fulgor dos óleos vegetais são ilustrados na Tabela 3. Esses produtos foram obtidos num restaurante da cidade de Santa Terezinha de Itaipu, localizada no oeste do Estado do Paraná-BR, o qual utiliza o produto para fritura de peixes, batatas e polentas. Realizou-se a coleta de 2 litros de cada tipo de óleo, sendo que para o estado residual o mesmo foi reutilizado cinco vezes de acordo com o procedimento adotado pelo restaurante. Posteriormente à coleta, o óleo descartado foi filtrado a fim de remover possíveis resíduos oriundos das frituras.



Tabela 3: Viscosidades Rotacionais e Pontos de Fulgor dos materiais coletados

| Material | Viscosidade | Ponto de Fulgor |
|------------------------|-------------|-----------------|
| Óleo de Soja Novo | 42 cP | 240°C |
| Óleo de Milho Novo | 38 cP | 235°C |
| Óleo de Soja Residual | 44 cP | 255°C |
| Óleo de Milho Residual | 40 cP | 240°C |

3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A produção das amostras foi feita com a utilização de um agitador mecânico (Figura 17). Os elementos considerados na produção dos CAP's modificados (temperatura, tempo e rotação) são apresentados na Tabela 4. Inicialmente adicionou-se, 21% de borracha moída de pneus ao ligante aquecido a 180°C e na sequência foi adicionada a

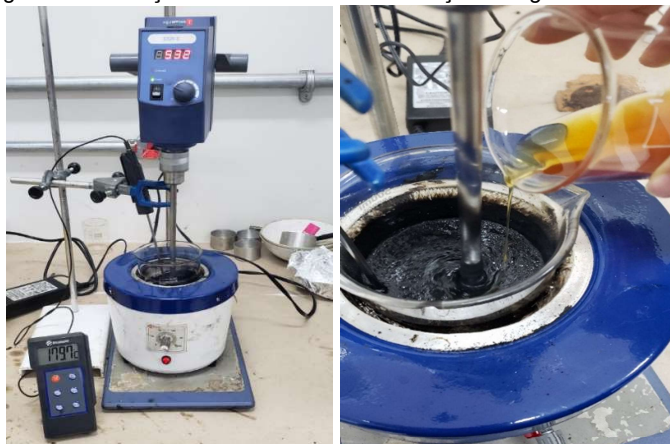
porcentagem de óleo em temperatura ambiente (25°C). As massas de óleo foram calculadas considerando a massa do CAP 50/70+21% de borracha.

Tabela 4: Elementos considerados durante a produção dos CAP's modificados

| | |
|------------------------------------|----------|
| Temperatura de mistura | 180°C |
| Tempo de adição dos resíduos | 15 min |
| Tempo de homogeneização da mistura | 30 min |
| Rotação durante a adição | 500 rpm |
| Rotação para homogeneização | 1200 rpm |

Fonte: Guimarães (2019)

Figura 17: Produção das amostras com utilização do agitador mecânico



3.3 ENSAIOS CONVENCIONAIS

3.3.1 Penetração

Para a realização deste ensaio foi utilizado penetrômetro universal para ligantes asfálticos (Figura 18), considerando tempo de 5 segundos e 100g de carga a 25°C. O ensaio e a preparação das amostras foram realizados segundo os parâmetros estabelecidos pela norma do DNIT 155/2010 – ME.

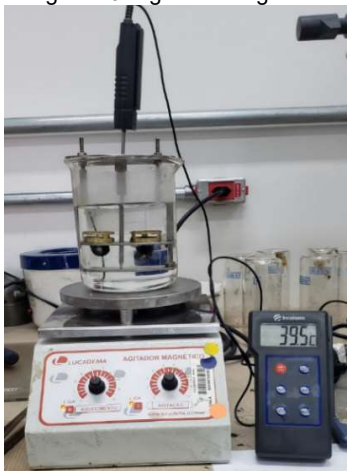
Figura 18: Penetrômetro Universal



3.3.2 Ponto de Amolecimento

A consistência do ligante e em consequência sua resistência à deformação em temperaturas elevadas foi avaliada conforme a norma DNIT 131/2010 – ME para o ensaio de anel e bola com a utilização de um agitador magnético com aquecimento (Figura 19).

Figura 19: Agitador Magnético



3.3.3 Ponto de Fulgor

Para estabelecer a temperatura máxima que o material suporta para sua produção, incluindo seu transporte, estocagem e usinagem, sem que haja perigo de ignição, foi utilizado o equipamento Cleveland de vaso aberto (Figura 20). Os procedimentos para a realização do ensaio, bem como a preparação das amostras obedeceram a norma ABNT NBR 11341/2008.

Figura 20: Cleveland de vaso aberto



3.4 ENSAIOS SUPERPAVE

3.4.1 Viscosidade Rotacional (Brookfield)

Para determinar a consistência do ligante asfáltico a partir da resistência ao escoamento, realizou-se o ensaio com o viscosímetro Brookfield LVDV-E (Figura 21) e spindle nº27, seguindo os preceitos da ABNT NBR 15184/2004.

Figura 21: Viscosímetro Rotacional Brookfield

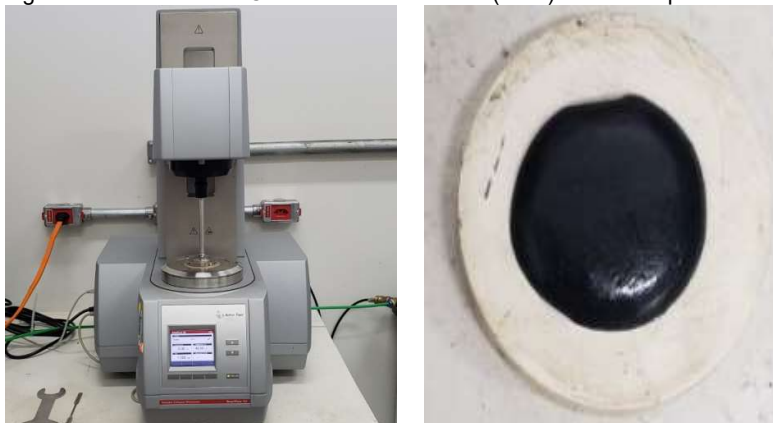


3.4.2 Cisalhamento Dinâmico (DSR)

Para detectar as propriedades do ligante asfáltico em temperaturas elevadas e intermediárias, efetuou-se o ensaio de cisalhamento dinâmico segundo a norma AASHTO T 315-12 (Figura 22). Assim foi possível avaliar o comportamento viscoelástico do material a partir do módulo de cisalhamento complexo (G^*) e do ângulo de fase (δ).

Este ensaio realizado seguiu os requisitos Superpave, onde que para amostras não envelhecidas em altas temperaturas, foi efetuado até temperaturas nas quais os CAP's apresentaram quocientes $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ superiores a 1.0 kPa. Quando avaliadas amostras envelhecidas em curto prazo submetidas a altas temperaturas, os testes foram executados até temperaturas nas quais os CAP's apresentaram quocientes $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ superiores a 2.2 kPa. E para o estado de envelhecimento em longo prazo em temperaturas intermediárias, os ensaios foram efetuados até temperaturas nas quais os produtos $|G^*| \times \text{sen}(\delta)$ apresentassem valores inferiores a 5000 kPa.

Figura 22: Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) e amostra para ensaio



3.4.3 Fluência em Viga (BBR)

Para avaliar o comportamento do material em baixas temperaturas e assim definir a rigidez estática por meio de princípios mecânicos, foram seguidos os preceitos estabelecidos pela norma AASHTO T 313-12, com a utilização do Reômetro de Fluência em Viga (BBR, Figura 23). A Figura 24 apresenta moldes para preparação de amostras e a Figura 26 ilustra a amostra após a realização do ensaio.

Figura 23: Reômetro de Fluência em Viga (BBR)



Figura 24: Moldes para preparação das amostras



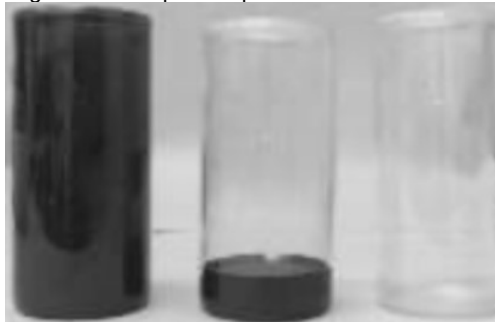
4.4 Envelhecimento em curto prazo (RTFOT)

Para simular o envelhecimento do ligante asfáltico durante o período de usinagem foi utilizada a estufa RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) apresentada na Figura 25. A Figura 26 mostra os recipientes utilizados durante o ensaio. O processo seguiu a norma AASHTO T 240-13 (temperatura de ensaio: 163°C e tempo de ensaio: 80±5 minutos).

Figura 25: Estufa RTFOT



Figura 26: Recipientes para ensaio das amostras



3.4.5 Envelhecimento em longo prazo (PAV)

Para simular o envelhecimento do material entre 7 a 10 anos de serviço, utilizou-se o Vaso de Envelhecimento sob Pressão (Pressure Aging Vessel – PAV). Neste caso foi considerada a norma AASHTO 28-12. Inicialmente as amostras foram preparadas e submetidas ao ensaio de envelhecimento em curto prazo (RTFOT) para depois serem colocadas em pratos rasos e envelhecidas por 20 horas no equipamento (PAV) à pressão de 2.1 MPa e à temperatura de 100°C (Figuras 27, 28 e 29).

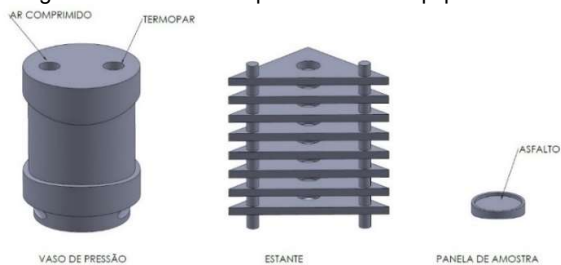
Figura 27: Vaso de Envelhecimento sob Pressão



Figura 28: Amostras após realização do ensaio



Figura 29: Desenho esquemático dos equipamentos

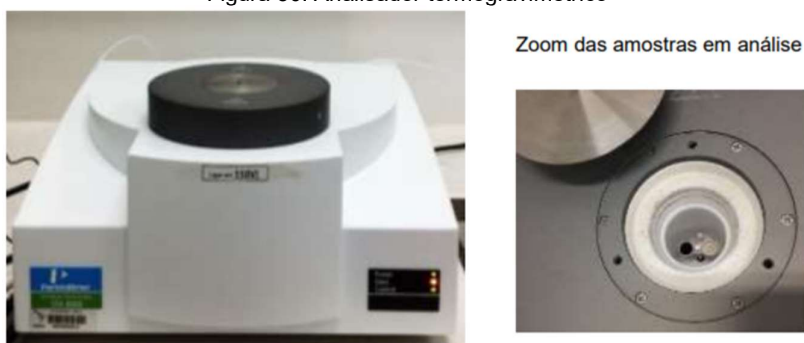


Fonte: BERNUCCI, MOTTA, et al. (2006) adaptado pelo autor

3.4.6 Análise termogravimétrica (TG)

O ensaio de comportamento térmico dos materiais foi avaliado utilizando um termo-analisador modelo STA 8000 da marca Percking Elemer (Figura 30), apresentando uma razão de aquecimento de $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ sob atmosfera inerte de fluxo de nitrogênio, com vazão de $20\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. A temperatura variou de 50 a 700°C , sendo a análise efetuada em um suporte de alumina com massa de aproximadamente de 12 mg de cada amostra.

Figura 30: Analisador termogravimétrico

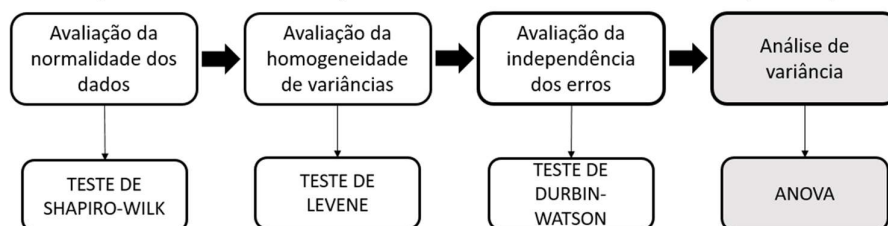


Fonte: Guimarães (2019)

3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Com os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, foram efetuadas Análises de Variância (ANOVA), sendo os resultados dessas análises estão expostos nos Apêndices (A, B, C, D, E e F). A Figura 31 apresenta a ordem dos procedimentos para realização da ANOVA.

Figura 31: Procedimentos para realização da Análise de Variância (ANOVA)



Os testes de Shapiro-Wilk, Teste de Levene e Teste de Durbin-Watson foram executados considerando um nível de significância de 5% e os valores-p maiores que 0.05 indicaram respectivamente, dados seguindo uma distribuição normal (Teste de

Shapiro-Wilk) e dados com variâncias homogêneas (Teste de Levene). Os Testes de Durbin-Watson consideraram a estatística calculada “dw” em lugar do valor-p.

Do ponto de vista das Análises de Variância (ANOVA) efetuadas, também foram considerados níveis de significância de 5% e valores-p inferiores a 0.05 indicaram diferença estatística significativa entre as amostras ou combinações avaliadas. Todos os testes foram realizados no programa Real Statistics.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

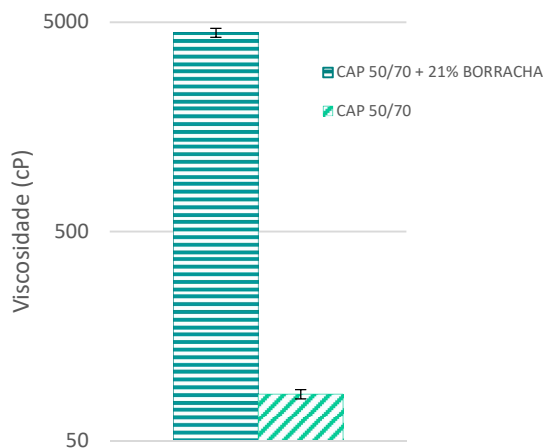
Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios laboratoriais efetuados considerando a adição de óleos de cozinha novos e residuais à mistura CAP 50/70+21% de borracha moída de pneus. Foram utilizados respectivamente, óleos de soja e de milho, considerando-se taxas de adição de óleo de 10%, 15% e 20%, respectivamente, em relação a massa do CAP 50/70+21% de borracha moída.

4.1 VISCOSIDADE ROTACIONAL BROOKFIELD

4.1.1 Viscosidade rotacional do CAP 50/70+21% de borracha moída de pneus

Pesquisa desenvolvida por Guimarães (2019) para diferentes porcentagens de adição de borracha moída ao CAP 50/70 indicou que para 21% de adição, a viscosidade rotacional média alcançou 5891 cP, ultrapassando 4000 cP (limite superior de aceitação) indicado na norma (NBR15529/07 - ASTM D2196). Para confirmação deste valor, refez-se o ensaio de viscosidade rotacional para a amostra com 21% de borracha a 180°C e obteve-se valor médio de 4461 cP (Figura 32), ficando abaixo do valor encontrado por Guimarães (2019), porém esse valor também extrapolou o limite superior normativo. Adicionalmente, realizou-se este ensaio para o CAP 50/70 convencional a 180°C, obtendo assim viscosidade média igual a 83.55 cP (Figura 32). Todos os resultados mencionados correspondem à média das viscosidades medidas para 3 (três) amostras ensaiadas em cada caso.

Figura 32: Viscosidade Rotacional a 180°C



Considerando os valores de viscosidade rotacional obtidos efetuou-se a análise à Análise de Variância (ANOVA) (Apêndice E), e por meio desta foi confirmada a existência de diferença estatística significativa entre o CAP 50/70 e o CAP 50/70+21% de borracha moída de pneus inservíveis.

4.1.2 Viscosidade rotacional do CAP 50/70+21% de borracha moída de pneus+%óleo

Partindo da excessiva viscosidade rotacional encontrada para o CAP 50/70+21% de borracha de pneus, foi então avaliado o efeito da adição do óleo (soja ou milho/ novo ou residual), na mistura CAP 50/70+21% borracha, à temperatura de 180°C. As viscosidades ilustradas na Tabela 5 e nas Figuras 33 (amostras modificadas com óleo de soja) e 34 (amostras modificadas com óleo de milho) correspondem aos valores médios de 3 (três) amostras ensaiadas em cada caso. Constatou-se que a adição de 10%, 15% e 20% de óleo ao ligante modificado com 21% de borracha causou redução de 61.7%, 74% e 79.2% respectivamente, nas viscosidades rotacionais médias. Além disso, os valores médios obtidos se enquadraram no intervalo 800-2000 cP requerido pela norma (NBR15529/07 - ASTM D2196) para o Asfalto (AB 8). Também se observou que para cada porcentagem de adição, as viscosidades rotacionais médias apresentaram a mesma ordem de grandeza independentemente do tipo e da condição do óleo utilizado.

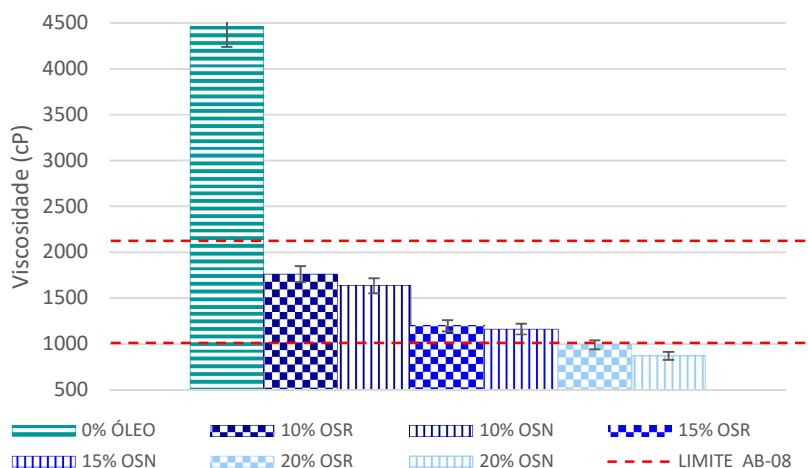
Constatou-se que graficamente não houve diferença significativa entre o tipo de óleo utilizado (soja ou milho), bem como em relação ao seu estado (novo ou residual), contudo a porcentagem empregada mostrou comportamento oposto, apresentando grande diferença entre os valores obtidos. Estes fatos foram então comprovados com a realização da análise de variância (ANOVA) (Apêndice E).

Tabela 5: Valores das Viscosidades Rotacionais (cP)

| Amostra | Porcentagem de óleo adicionado | | | | AB 8 | AB 22 |
|--|--------------------------------|---------|---------|--------|-----------------|------------------|
| | 0%OL | 10%OL | 15%OL | 20%OL | | |
| CAP+21%borracha | 4461.72 | ---- | ---- | ---- | 800-2000 | 2200-4000 |
| CAP+21%borracha +Óleo de soja novo | ---- | 1633.55 | 1162.44 | 990.89 | | |
| CAP+21%borracha +Óleo de soja residual | ---- | 1761.67 | 1198.99 | 869.66 | | |
| CAP+21%borracha +Óleo de milho novo | ---- | 1818.33 | 1195.33 | 992.16 | | |
| CAP+21%borracha +Óleo de milho residual | ---- | 1621.12 | 1083.66 | 862.44 | | |

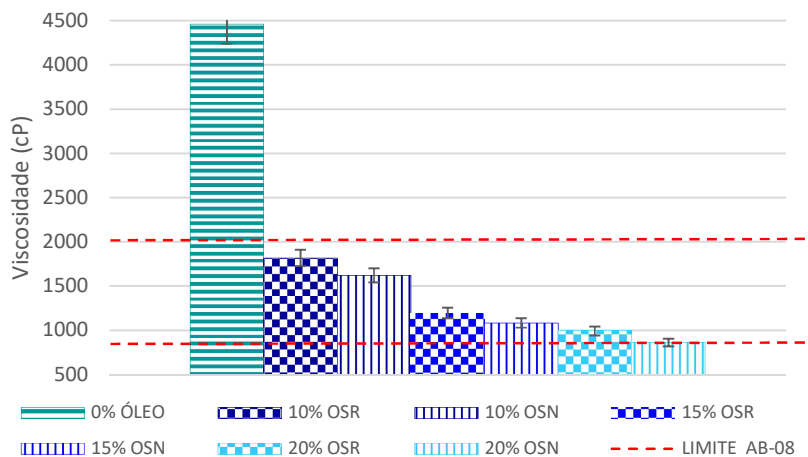
Legenda: "OL= óleo".

Figura 33: Viscosidades Rotacionais a 180°C (amostras com 21% de borracha + % de óleo de soja)



Legenda: "OSR= Óleo de soja residual"; "OSN= Óleo de soja novo".

Figura 34: Viscosidades Rotacionais a 180°C (amostras com 21% de borracha + % de óleo de milho)



Legenda: "OMR= Óleo de milho residual"; "OMN= Óleo de milho novo".

Para fins práticos, o material quando apresenta viscosidade excessiva acarreta dificuldade no bombeamento bem como impossibilita o perfeito envolvimento com os agregados, estes mesmos problemas são encontrados quando o material não possui viscosidade ideal, pois acaba se tornando líquido. Diante disso é preciso realizar os demais ensaios para verificar o comportamento dos ligantes modificados de acordo com as porcentagens de óleo empregadas, com intuito de constatar se o material irá possuir propriedades mecânicas adequadas para proporcionar a mistura asfáltica a devida resistência para suportar os esforços que a mesma irá sofrer durante a vida útil do pavimento.

4.2 PONTO DE AMOLECIMENTO

Os pontos de amolecimento mencionados nesta seção correspondem aos valores médios de 4 (quatro) amostras ensaiadas em cada caso. Foi observado que a temperatura do ponto de amolecimento do CAP 50/70 convencional aumentou aproximadamente 30% quando feita a adição de 21% de borracha moída de pneus, ocasionando um incremento de quase 14°C (Figuras 35 e 36). Além disso, conforme o aumento da porcentagem da borracha, maiores foram os valores de resistência ao escoamento. Em relação a adição de óleos de cozinha (novo ou residual) ao ligante com 21% de borracha, foi percebida diminuição das temperaturas de amolecimento. A adição de 10% de óleo mostrou temperaturas de amolecimento próximas às do CAP 50/70 convencional quando em seu estado não envelhecido. Já para as adições de 15% e 20% de óleo, as temperaturas diminuíram, respectivamente, 16% e 27% quando comparadas ao CAP 50/70 convencional (Figuras 35 e 36).

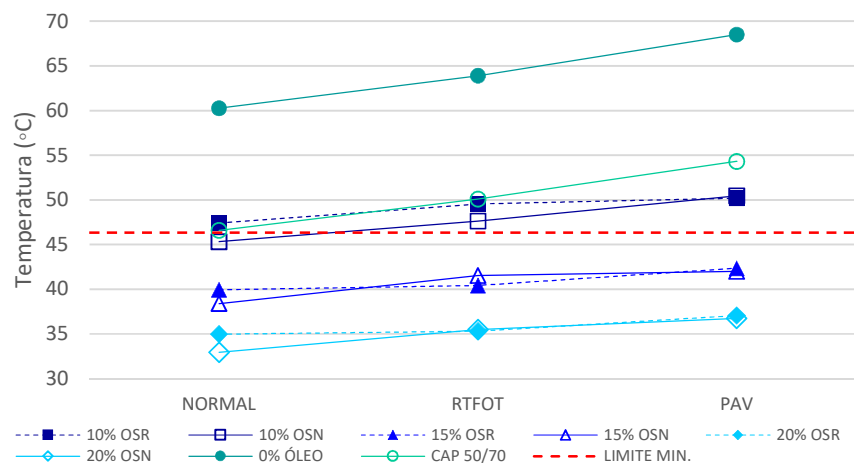
Observou-se também que as amostras não envelhecidas de CAP 50/70+21% de borracha sem adição de óleos atenderam a temperatura mínima de amolecimento (46°C) mencionada nas normas ABNT 6560/16 e ASTM D36. Considerando as amostras de CAP 50/70+21% de borracha+% óleo, somente as misturas com 10% de óleo atenderam as normas citadas.

Quando os ligantes asfálticos foram submetidos ao envelhecimento, houve aumento das temperaturas de amolecimento proporcionalmente ao rigor do ensaio realizado (Figuras 35 e 36), ou seja, se incrementou a consistência. Contudo, apenas o CAP 50/70 convencional, o CAP 50/70+21% de borracha e o CAP 50/70+21% de borracha + 10% de óleo atenderam a temperatura mínima de amolecimento requerida (46°C). Além disso, os CAP's modificados com borracha e óleo apresentaram menores temperaturas de amolecimento comparado ao CAP 50/70 convencional e CAP 50/70+21% de borracha moída. Esse comportamento pode ter ocorrido devido ao menor envelhecimento do ligante asfáltico por causa dos antioxidantes extraídos da borracha moída enquanto os componentes do óleo sofreram maior oxidação.

Além disso, verificou-se que todos os ligantes avaliados apresentaram aumento do ponto de amolecimento inferior a 8°C (NBR 6560/2016), sendo o maior aumento de temperatura detectado para o CAP 50/70+21% de borracha moída. Notou-se que a diferença estatística significativa se apresentou quando comparada os teores de óleo emprego, já quando analisado o tipo de óleo utilizado (soja ou milho), bem como seu estado

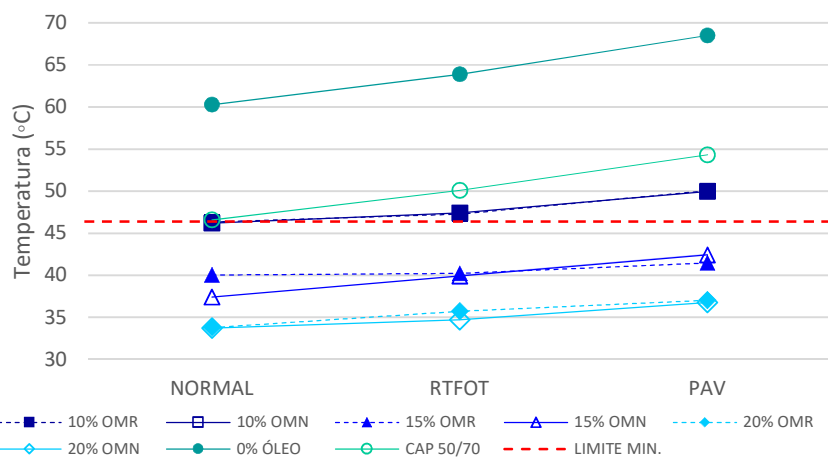
(novo ou residual), a diferença se mostrou insignificante, como apresentaram os resultados obtidos com a análise de variância (ANOVA) (Apêndice E).

Figura 35: Ponto de Amolecimento (amostras com 21% de borracha + % de óleo de soja)



Legenda: "OSR= Óleo de soja residual"; "OSN= Óleo de soja novo".

Figura 36: Ponto de Amolecimento (amostras com 21% de borracha + % de óleo de milho)



Legenda: "OMR= Óleo de milho residual"; "OMN= Óleo de milho novo".

Para fins de funcionamento é interessante que o ponto de amolecimento seja alto, pois quanto maior, conseqüentemente melhor serão as situações de uso, pois o material não irá apresentar condições de escoamento em dias onde a temperatura pode estar elevada, e assim apresentará maior durabilidade e resistência aos esforços mecânicos. Contudo necessitará de temperatura maiores para que seja realizada sua aplicação, ponto este desfavorável em relação a segurança dos trabalhadores e emissões ao meio ambiente. Diante disso é preciso definir o ponto de amolecimento ideal para que cumpra os requisitos de funcionamento e de aplicação simultaneamente.

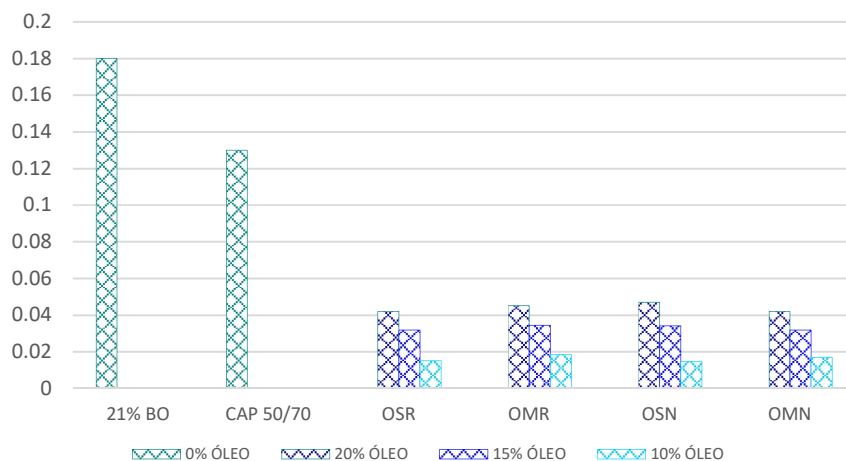
4.3 VARIAÇÃO EM MASSA

Os resultados obtidos para o ensaio de variação em massa após o ensaio de envelhecimento em curto prazo são apresentados na Figura 37, sendo que estes correspondem ao valor médio das massas de 2 (duas) amostras para cada tipo de ligante ensaiado. Todos os CAP's avaliados atenderam o limite estabelecido pelas normas ABNT/NBR 15235/09 e ASTM D 2872 onde a variação em massa máxima é de 1%. Observou-se que houve alterações físicas e químicas, por exemplo, evaporação, desagregação, condensação e oxidação em todos os casos, devido aos mesmos apresentarem perda de massa.

O CAP 50/70 modificado com 21% de borracha foi o que apresentou maior perda de massa seguido pelo CAP 50/70 convencional e finalmente pelos CAP's 50/70+21% de borracha+% de óleo. Essa perda de massa superior do asfalto-borracha indica que o ligante asfáltico modificado com 21% de borracha sofreu maior volatilização. Durante a fabricação do asfalto-borracha, as partículas de borracha moída aumentam de volume e absorvem elementos do CAP. Por outro lado, a borracha moída tem cera em sua composição, a qual pode volatilizar em presença de calor e conseqüentemente diminuir a massa do CAP.

Nas amostras que continham óleo a perda de massa foi menor, contudo quanto maior a porcentagem de óleo, maior o valor da variação em massa. Esse comportamento pode ser devido à volatilização de parte do óleo no lugar do ligante asfáltico, tendo-se como benefício prevenção da evaporação e da oxidação desse ligante.

Figura 37: Resultados para o ensaio de variação em massa



Legenda: "BO= borracha moída de pneus"; "OSR= Óleo de Soja Residual"; "OMR= Óleo de Milho Residual"; "OSN= Óleo de Soja Novo"; "OMN= Óleo de Milho Novo".

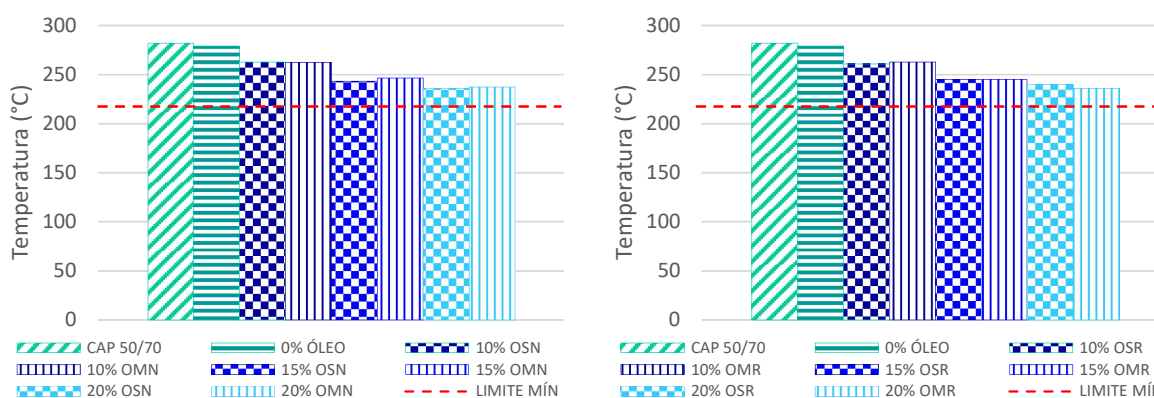
De maneira oposta a porcentagem que apresentou diferença significativa, o tipo de óleo empregado (soja ou milho), e seu estado (novo e residual), não mostraram diferença aparente, onde este feito foi comprovado com a realização da análise de variância (ANOVA) (Apêndice E).

4.4 PONTO DE FULGOR

O ensaio do ponto de fulgor foi realizado para 3 (três) amostras em cada caso. Os resultados apresentados representam a temperatura média de ignição obtida a partir dos ensaios laboratoriais. Observou-se que o ponto de fulgor diminuiu aproximadamente 2% quando adicionado 21% de borracha ao CAP 50/70 convencional (Figura 38).

Considerando os ligantes modificados com 21% de borracha+óleo, também se percebeu redução das temperaturas de ignição, entretanto todas as amostras avaliadas ficaram dentro dos padrões normativos da ABNT NBR 11341/2008, onde a temperatura mínima requerida é de 230°C. Além disso, quanto maior a porcentagem de óleo utilizada menor o ponto de fulgor (Figuras 38(a) e 38(b)). Para o CAP 50/70+21% borracha+10% óleo, houve uma redução de 6% na temperatura de ignição; para CAP 50/70+21% borracha+15% óleo, a redução foi de 12,3% e para o CAP 50/70+21 % borracha+20% óleo, ocorreu uma redução de 15% na temperatura de ignição quando comparadas às temperaturas de ignição do CAP 50/70 convencional.

Figura 38: Ponto de Fulgor de todas as amostras avaliadas



(a) Óleos de soja e de milho novos

(b) Óleos de soja e de milho residuais

Legenda: "OSR= Óleo de Soja Residual"; "OMR= Óleo de Milho Residual"; "OSN= Óleo de Soja Novo"; "OMN= Óleo de Milho Novo".

Observando o tipo de óleo utilizado (soja ou milho) e o seu estado (novo ou residual), assim como nos outros ensaios, a diferença estatística se mostrou insignificante, diferentemente da porcentagem utilizada, onde a mesma pontuou grande diferença nos resultados obtidos, sendo que a análise estatística (ANOVA) (Apêndice E), confirmou estes resultados obtidos graficamente.

4.5 FLUÊNCIA EM VIGA

Neste ensaio, devido às amostras de CAP 50/70+borracha+óleo vegetal começarem a apresentar rigidez a partir de -20°C , os ensaios de fluência em viga foram realizados para as temperaturas de -20°C , -25°C e -30°C . Para cada temperatura de ensaio e para cada tipo de CAP avaliado foram preparadas e ensaiadas três amostras. Os resultados apresentados representam a média aritmética entre os valores obtidos para a rigidez e para o módulo de relaxação (valor-m) de CAP's não envelhecidos, envelhecidos em curto prazo e envelhecidos em longo prazo.

➤ **Resultados obtidos para a rigidez (MPa)**

Para CAP's não envelhecidos verificou-se que os valores de rigidez aumentaram conforme houve a redução da temperatura, ou seja, elevou-se o risco de aparecimento de trincas térmicas (Figura 39). Constatou-se que a rigidez do CAP 50/70 virgem ultrapassou o valor máximo da especificação Superpave (300 MPa) nas três temperaturas avaliadas, mostrando que o ligante convencional não apresenta elasticidade suficiente para impedir a ocorrência de trincas térmicas.

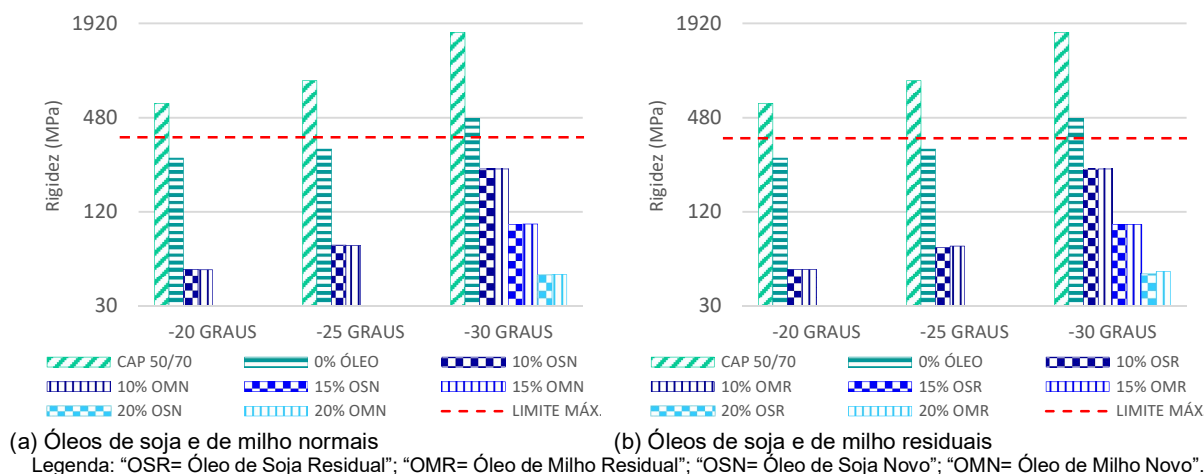
Considerando o CAP 50/70 modificado com 21% de borracha e sem adição de óleos, o requisito de rigidez máxima foi atendido para as temperaturas de -20°C e -25°C , enquanto para -30°C o resultado ultrapassou o valor máximo de 300 MPa indicado na especificação Superpave (Figura 39). Assim, o ligante asfáltico contendo 21% de borracha mostrou melhor comportamento que o ligante asfáltico convencional, isto devido às amostras apresentarem valores menores para o enrijecimento resultando em maior resistência ao trincamento térmico.

As amostras de CAP 50/70+21% borracha+10% óleo mostraram rigidez suficiente para realização do ensaio nas três temperaturas indicadas. Neste caso, a rigidez do CAP 50/70+21% borracha+10% óleo diminuiu 80,62% quando comparada ao CAP

50/70+21% borracha e 91,33% em relação ao CAP 50/70 virgem à temperatura de -20°C . À medida que a temperatura decresceu, foi observada queda na diferença entre os valores de rigidez para os ligantes avaliados. Assim, a rigidez do CAP 50/70+21% borracha+10% óleo diminuiu 52,5% quando comparada ao CAP 50/70+21% borracha e 86,62% em relação ao CAP 50/70 convencional à temperatura de -30°C . Portanto, conforme a temperatura diminuiu, os valores de rigidez tenderam a ficar mais próximos devido à solidificação do óleo, tornando mais consistente o ligante modificado com este aditivo.

Já para as amostras de CAP 50/70+21% borracha+15% óleo e CAP 50/70+21% borracha+20% óleo, não foi alcançada rigidez suficiente para realização deste ensaio nas temperaturas de -20°C e -25°C . Para a temperatura de -30°C esses ligantes exibiram maior consistência, permitindo a realização do ensaio durante os 240s previstos sendo obtidos valores de rigidez inferiores a 300 MPa.

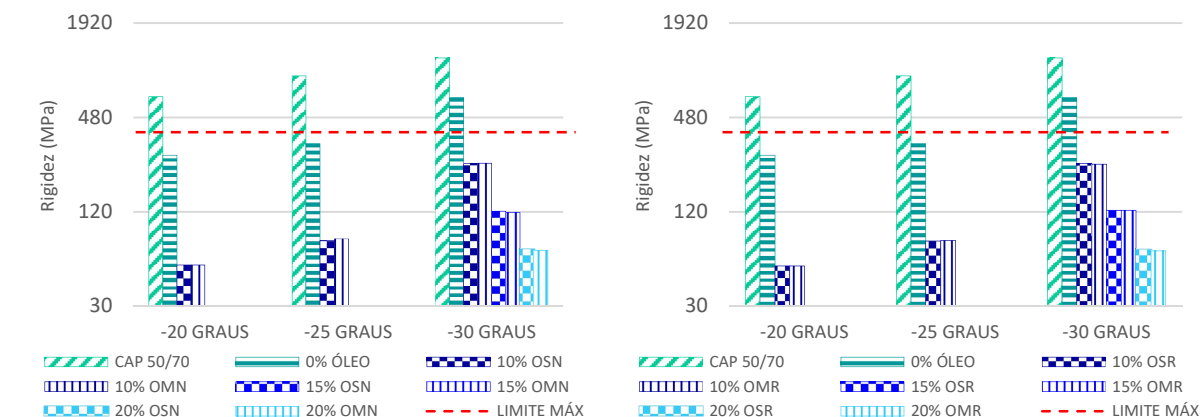
Figura 39: Valores de Rigidez para o ensaio de Fluência em Viga (não envelhecido)



Quando as amostras foram submetidas ao envelhecimento em curto prazo (Figura 40), as amostras de CAP 50/70 virgem ultrapassaram a rigidez máxima nas três temperaturas de ensaio. Para o CAP 50/70+21% borracha sem adição de óleos, o requisito de rigidez máxima foi alcançado apenas para a temperatura de -20°C , diferentemente do estado não envelhecido onde esse quesito também foi atendido à temperatura de -25°C .

Observou-se também (Figura 40) que das amostras com CAP 50/70+21% borracha+10% óleo, a rigidez máxima permitida foi atendida nas três temperaturas avaliadas. Para os CAP's modificados com 15% e 20% de óleo, as amostras apresentaram consistência a partir de -30°C , igualmente ao constatado para as amostras antes do envelhecimento sendo obtidos valores de rigidez inferiores a 300 MPa.

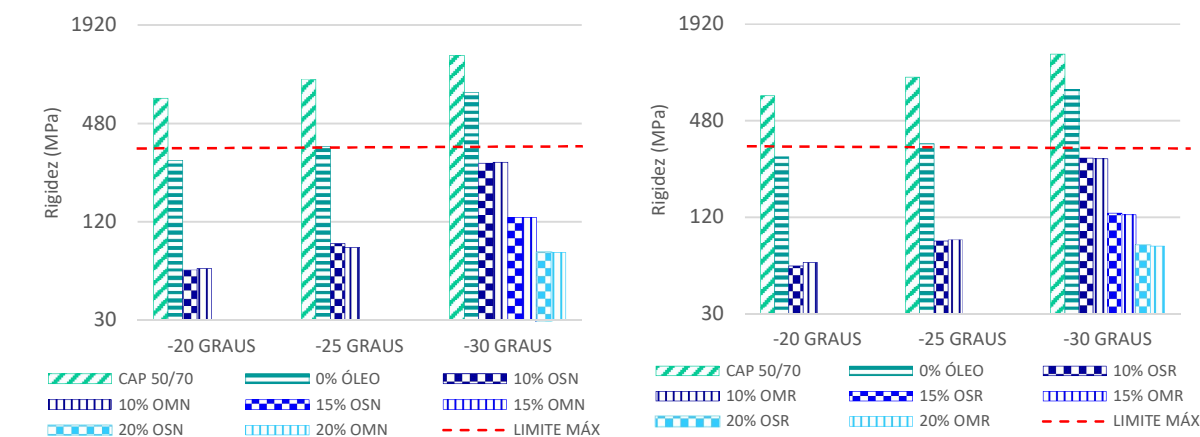
Figura 40: Valores de Rigidez para o ensaio de Fluência em Viga (RTFOT)



Após serem submetidas ao envelhecimento em longo prazo (Figura 41), as amostras com CAP 50/70 virgem mostraram o mesmo comportamento anterior. Para o CAP 50/70+21% borracha sem adição de óleos, o requisito de rigidez máxima foi alcançado apenas para a temperatura de -20°C.

Das amostras com CAP 50/70+21% borracha+10% óleo, a rigidez máxima foi atendida nas três temperaturas avaliadas. As amostras modificadas com 15% e 20% de óleo mostraram comportamento semelhante às não envelhecidas e envelhecidas em curto prazo, alcançando consistência a partir de -30°C, sendo obtidos valores de rigidez inferiores a 300 MPa.

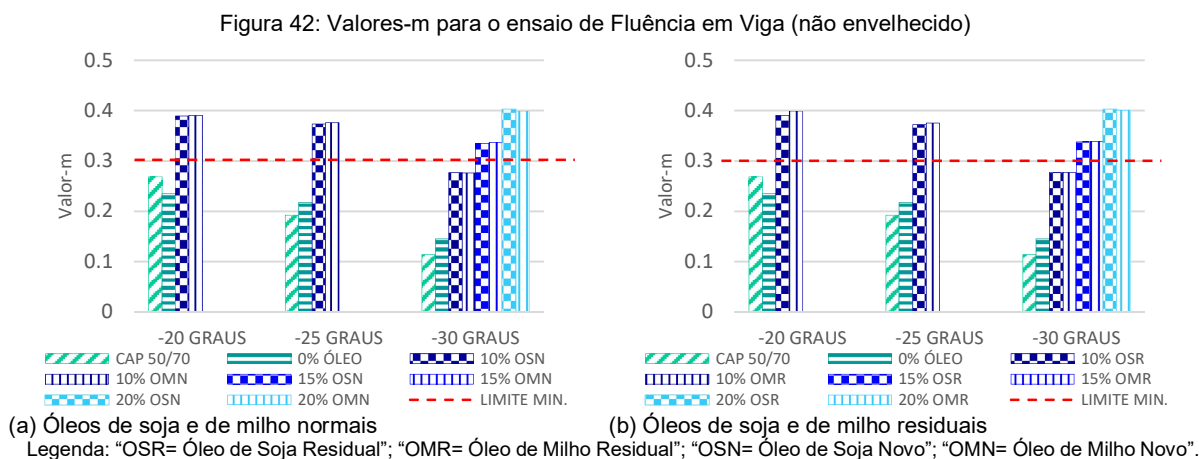
Figura 41: Valores de Rigidez para o ensaio de Fluência em Viga (PAV)



➤ Resultados obtidos para o módulo de relaxação (valores-m)

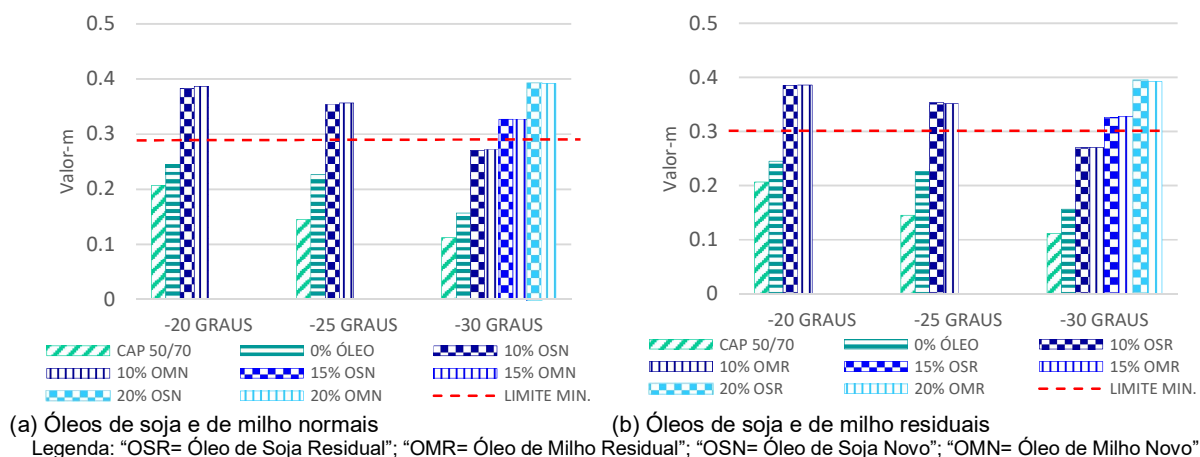
Para os módulos de relaxação (valores-m) (Figura 42), a especificação Superpave requer valores-m maiores que 0.30 aos 60 segundos de ensaio. Assim observou-se que os mesmos diminuíram com a redução da temperatura, ou seja, apresentaram menor eficiência na dissipação das tensões em temperaturas baixas. Considerando então os valores médios obtidos nas três temperaturas de ensaio, notou-se que o CAP 50/70 virgem e o CAP 50/70+21% de borracha não atenderam tal requisito em nenhuma das três temperaturas avaliadas. Além disso, à medida que a temperatura diminuiu, em ambos os casos os valores-m decresceram indicando diminuição da capacidade de dissipação das tensões.

Ainda conforme observado na Figura 42, as amostras de CAP 50/70+21% borracha+10% óleo apresentaram valores-m superiores a 0.30 nas temperaturas de -20°C e -25°C, porém quando submetidas a -30°C não atenderam o requisito especificado. As amostras contendo 15% e 20% de óleo não apresentaram rigidez suficiente nas temperaturas de -20°C e -25°C, conseqüentemente não foram obtidos valores-m nessas temperaturas. Contudo tal requisito foi satisfeito quando essas amostras foram submetidas à temperatura de -30°C.



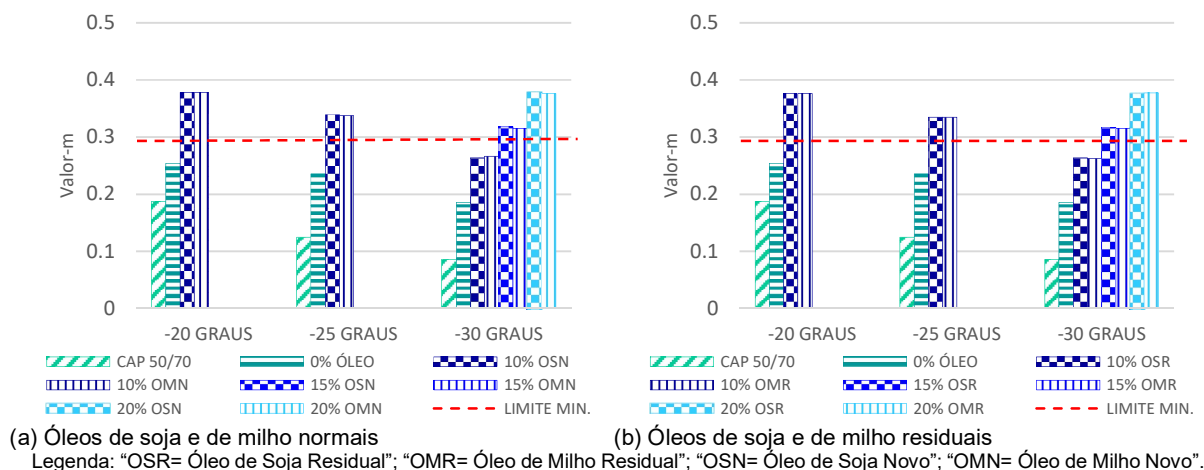
Após o envelhecimento em curto prazo (Figura 43) notou-se diminuição dos valores-m quando a temperatura decresceu para o CAP 50/70+21% borracha+10% óleo, assim como para a amostra com CAP 50/70 virgem. Além disso, o CAP 50/70+21% borracha+10% óleo atendeu a normativa (valor-m maior que 0.30) nas temperaturas de -20°C e -25°C. As demais amostras modificadas com óleo (15% e 20%) não apresentaram rigidez suficiente para realização do ensaio nas temperaturas de -20°C e -25°C, contudo, as mesmas quando submetidas à temperatura de -30°C apresentaram valores-m que atenderam a especificação Superpave após o ensaio RTFOT.

Figura 43: Valores-m para o ensaio de Fluência em Viga (RTFOT)



Depois de submetidas ao envelhecimento em longo prazo (Figura 44), as amostras apresentaram comportamento semelhante ao envelhecimento em curto prazo, resultando na diminuição dos valores-m quando a temperatura decresceu para o CAP 50/70+21% borracha+10% óleo e para o CAP 50/70 virgem. Além disso, os CAP's 50/70+21% borracha+10% óleo atenderam o requisito da especificação Superpave (valor-m maior que 0.30) às temperaturas de -20°C e -25°C. Já para 15% e 20% de adição de óleo à temperatura de -30°C, os valores-m atenderam a especificação Superpave.

Figura 44: Valores-m para o ensaio de Fluência em Viga (PAV)

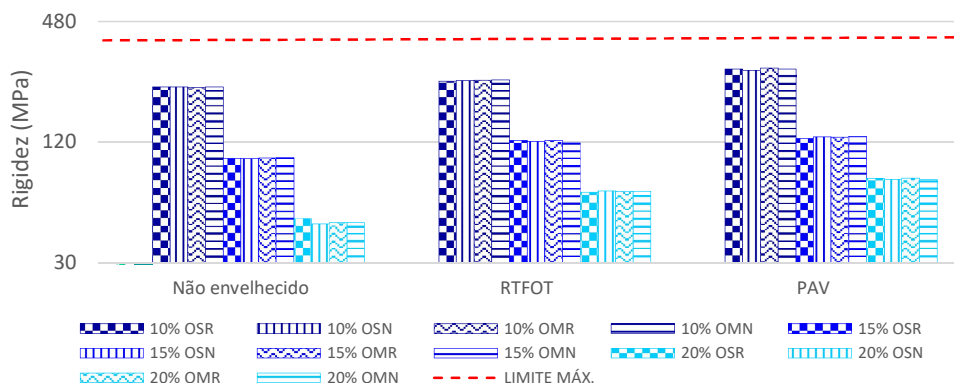


➤ Efeito do envelhecimento a -30°C para 10%, 15% e 20% de adição de óleo

Na temperatura mais extrema considerada neste estudo (-30°C) foi possível ensaiar amostras com 10%, 15% e 20% de óleo em diferentes condições de envelhecimento. Conforme ilustra a Figura 45, à medida que o teor de óleo adicionado aumentou, foi observada diminuição da rigidez dos ligantes modificados com borracha e

óleo, sendo esse comportamento detectado nas três condições de envelhecimento. Por outro lado, para cada porcentagem de óleo pesquisada, foi constatado aumento gradual da rigidez devido ao efeito do envelhecimento, porém em nenhum caso a rigidez ultrapassou os 300 MPa.

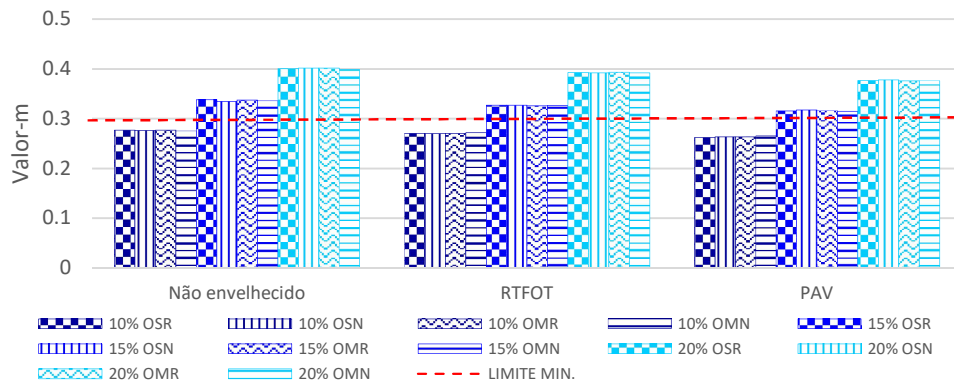
Figura 45: Rigidez das amostras modificadas com óleo a temperatura de -30°C



Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Do ponto de vista do valor-m (Figura 46) na temperatura mais extrema (-30°C), se observou aumento desta variável quando houve incremento no teor de óleo adicionado ao CAP 50/70+21% borracha. Assim, quanto maior a quantidade de óleo, melhor a capacidade para dissipar as tensões na temperatura de -30°C. Porém, as amostras com o mesmo teor de óleo, mas diferentes estados de envelhecimento apresentaram redução gradual dos valores-m absolutos, ou seja, o envelhecimento inibiu a capacidade de dissipação das tensões. Apesar disso, os CAP's 50/70+21% borracha+15% óleo e CAP 50/70+21% borracha+20% óleo atenderam o requisito da especificação Superpave para o valor-m.

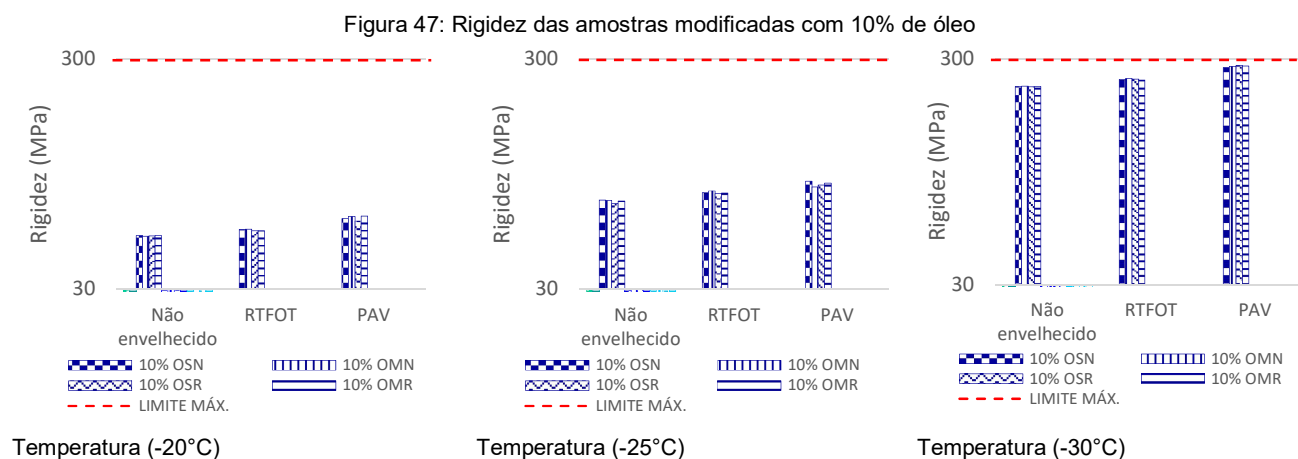
Figura 46: Valor-m para amostras modificadas com óleo a temperatura de -30°C



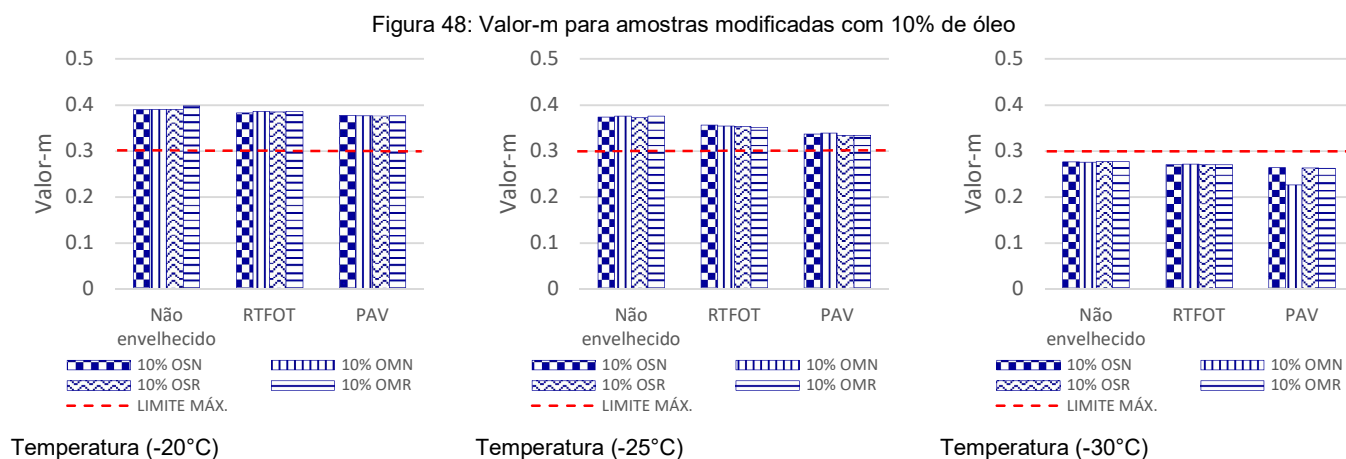
Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

➤ Efeito da adição de 10% de óleo para -20°C, -25°C e -30°C

Considerando apenas as amostras com a porcentagem de 10% de óleo adicionado, foi possível ensaiar amostras à -20°C , -25°C e -30°C em diferentes condições de envelhecimento. Conforme ilustra a Figura 47, à medida que a temperatura diminuiu e incrementou-se o estado de envelhecimento, foi observado aumento da rigidez, apesar disso, os ligantes modificados apresentaram nas três temperaturas mencionadas e para os três estados de envelhecimento, valores de rigidez inferiores a 300 MPa.



Do ponto de vista do valor-m, conforme ilustra a Figura 48 à medida que a temperatura diminuiu e incrementou-se o estado de envelhecimento, foi observado decréscimo do valor-m para todos os ligantes avaliados. Além disso, os mesmos apresentaram valores-m superiores a 0.30 às temperaturas de -20°C e -25°C e para os três estados de envelhecimento pesquisados. À temperatura de -30°C nenhum ligante atendeu o valor mínimo indicado na especificação Superpave.



Diante do exposto graficamente observou-se que a influencia significativa nos resultados está presente no teor de óleo empregado, sendo que o tipo (soja ou milho) e o estado (novo ou residual) não apresentaram diferença significativa, sendo este fato comprovado com a realização da análise estatística (ANOVA) (Apêndice E).

5.6 CISALHAMENTO DINÂMICO

Nesta seção para cada tipo de CAP pesquisado foram preparadas e ensaiadas três amostras, sendo que os resultados apresentados representam a média aritmética entre os valores obtidos respectivamente, para o módulo complexo (G^*), ângulo de fase (δ), quociente $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ e produto $|G^*|\times\text{sen}(\delta)$.

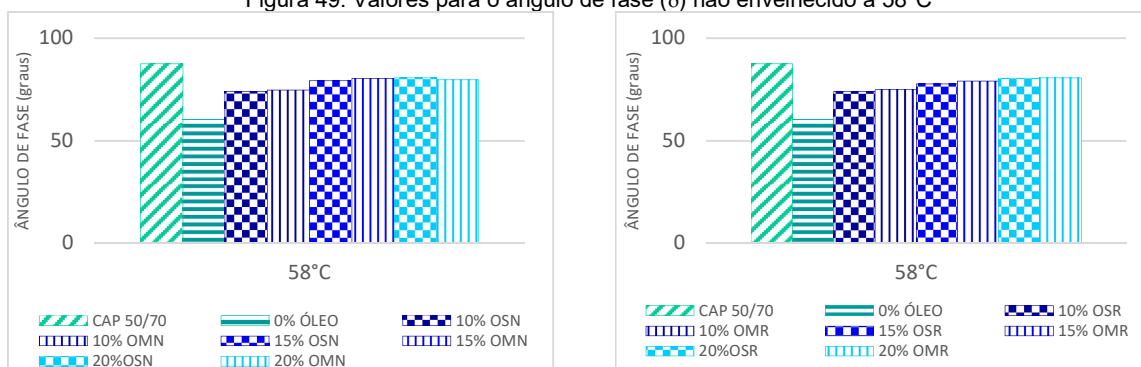
➤ *Avaliação do cisalhamento dinâmico em altas temperaturas*

- **Resultados para o ângulo de fase (δ) a 58°C, 64°C, 70°C e 76°C**

Do ponto de vista do ângulo de fase (δ), observou-se que os valores deste aumentaram conforme o avanço da temperatura em amostras não envelhecidas (Figuras 49 a 51), ou seja, o material se tornou menos elástico em altas temperaturas. Observou-se que o CAP 50/70 sem adições permitiu a realização do ensaio de cisalhamento dinâmico até a temperatura de 70°C, quando o material perdeu elasticidade e rompeu. Já para o CAP 50/70 com 21% de borracha, a temperatura em que o material perdeu suas características elásticas foi de 100°C, com isso verificou-se que este conservou suas propriedades elásticas até temperaturas maiores que o CAP 50/70 convencional.

Contudo, quando feitas às adições de óleo, o ligante asfáltico mesmo com a incorporação da borracha moída perdeu as características relacionadas à elasticidade. As amostras que continham 10% de óleo resistiram até 76°C, as que continham 15% de óleo até 64°C e aquelas contendo 20% de óleo até 58°C.

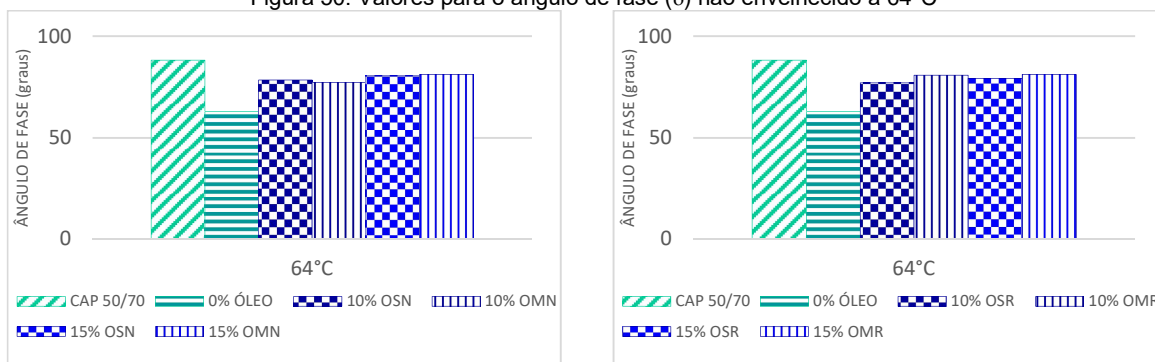
Diante disto percebeu-se que quanto maior a adição de óleo menos elástico o material se tornou e assim acabou rompendo em temperaturas menores, o que não seria ideal em regiões de climas mais quentes, devido ao possível surgimento de afundamentos de trilhas de rodas.

Figura 49: Valores para o ângulo de fase (δ) não envelhecido a 58°C

(a) Óleos de soja e de milho normais

(b) Óleos de soja e de milho residuais

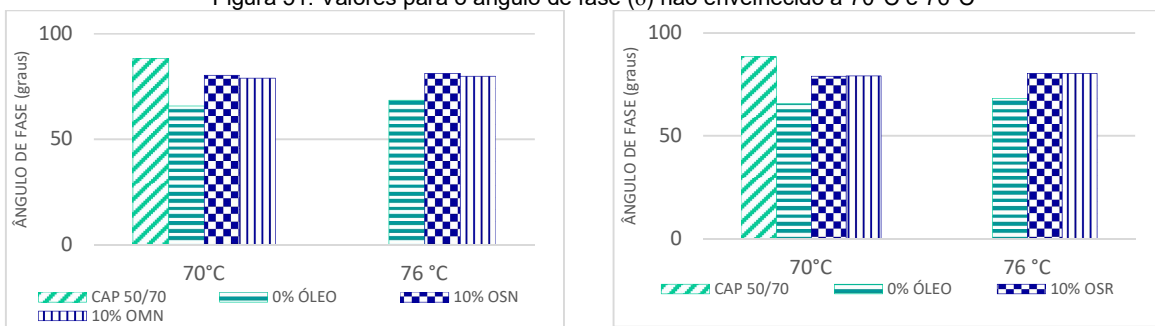
Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Figura 50: Valores para o ângulo de fase (δ) não envelhecido a 64°C

(a) Óleos de soja e de milho normais

(b) Óleos de soja e de milho residuais

Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Figura 51: Valores para o ângulo de fase (δ) não envelhecido a 70°C e 76°C

(a) Óleos de soja e de milho normais

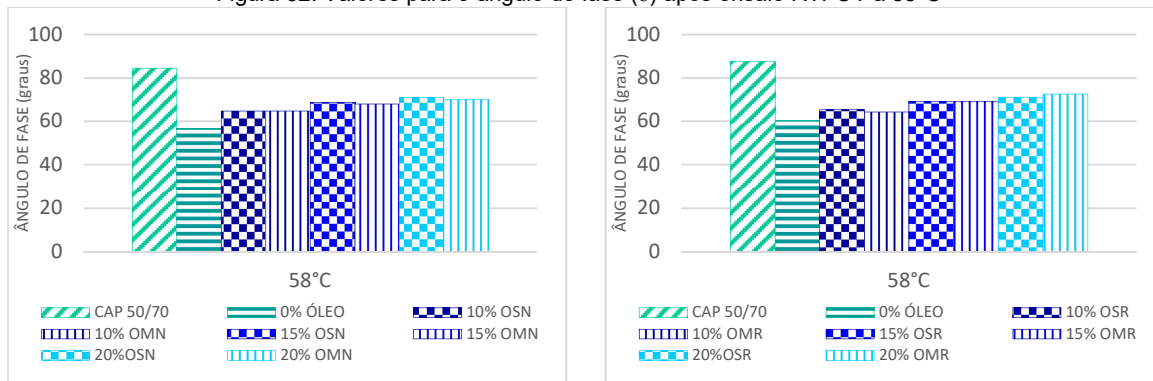
(b) Óleos de soja e de milho residuais

Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Comparando os CAP's antes e após o envelhecimento em curto prazo, observou-se que os valores dos ângulos de fase diminuíram para todos os tipos de ligantes analisados (Figuras 52 a 54), mostrando pequeno ganho de elasticidade após o envelhecimento. Contudo, a tendência de comportamento dos ligantes permaneceu o mesmo daqueles não envelhecidos. Percebeu-se ainda maior variação dos ângulos de fase

dos CAP's sem adição de óleo comparado àqueles que continham o mesmo. Diante disso pode se deduzir que as amostras com óleo reduziram o envelhecimento desses CAP's modificados. Acredita-se que pode ter ocorrido envelhecimento do óleo vegetal no lugar do ligante asfáltico, contribuindo assim para que o CAP 50/70 mantivesse suas propriedades físico-químicas.

Figura 52: Valores para o ângulo de fase (δ) após ensaio RTFOT a 58°C

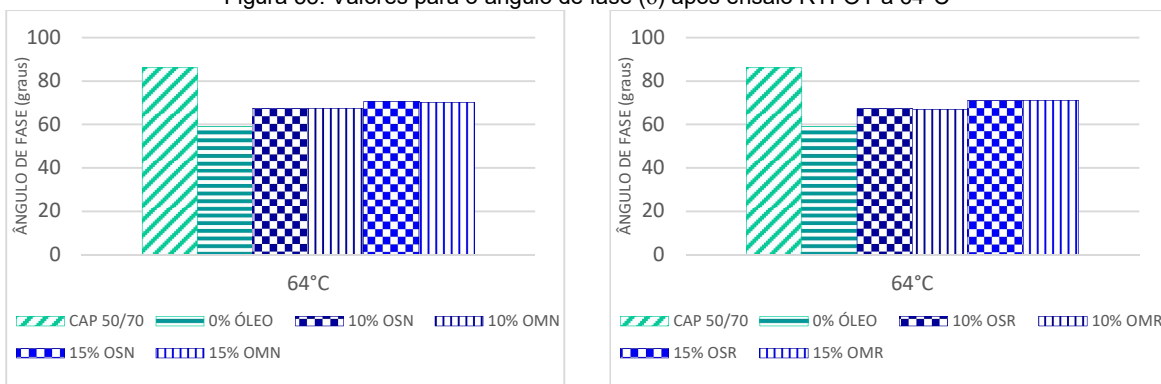


(a) Óleos de soja e de milho normais

(b) Óleos de soja e de milho residuais

Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Figura 53: Valores para o ângulo de fase (δ) após ensaio RTFOT a 64°C

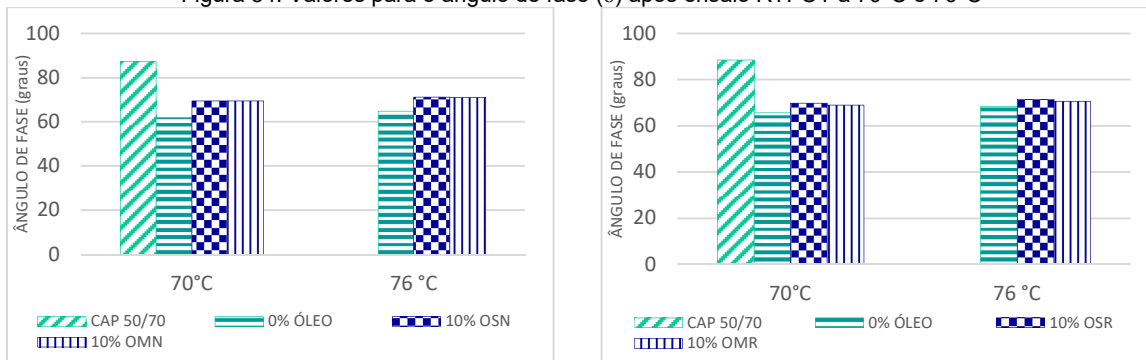


(a) Óleos de soja e de milho normais

(b) Óleos de soja e de milho residuais

Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Figura 54: Valores para o ângulo de fase (δ) após ensaio RTFOT a 70°C e 76°C



(a) Óleos de soja e de milho normais

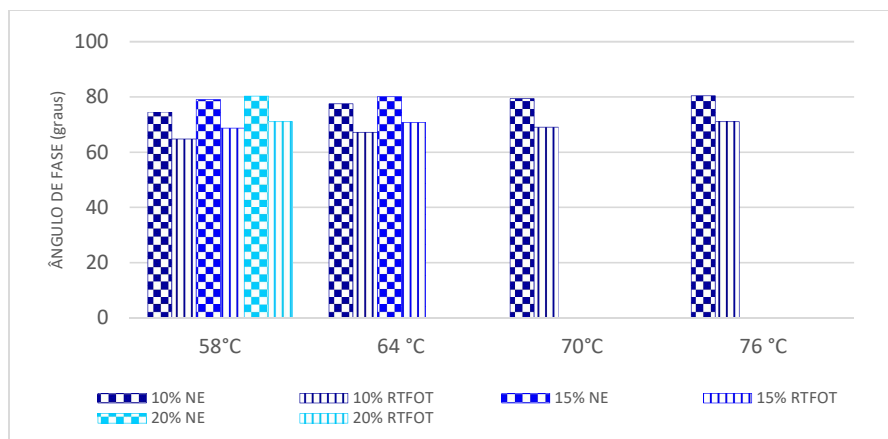
(b) Óleos de soja e de milho residuais

Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Percebeu-se que a adição de borracha ao CAP melhora a característica elástica do CAP modificado, entretanto a adição de óleo ao CAP+borracha resultou em perda de elasticidade. Porém, baixas porcentagens de adição de óleo ao CAP+borracha podem produzir ângulos de fase menores que os do CAP não modificado.

Considerando apenas as porcentagens de óleo pesquisadas neste estudo, a adição de 10% apresentou os menores ângulos de fase quando comparada as porcentagens de 15% e 20%, ou seja, quanto menor a porcentagem de óleo, o material tende a ser mais elástico (Figura 55).

Figura 55: Valores para o ângulo de fase (δ) considerando a porcentagem do óleo utilizado (10%, 15% e 20%) antes e após envelhecimento em curto prazo

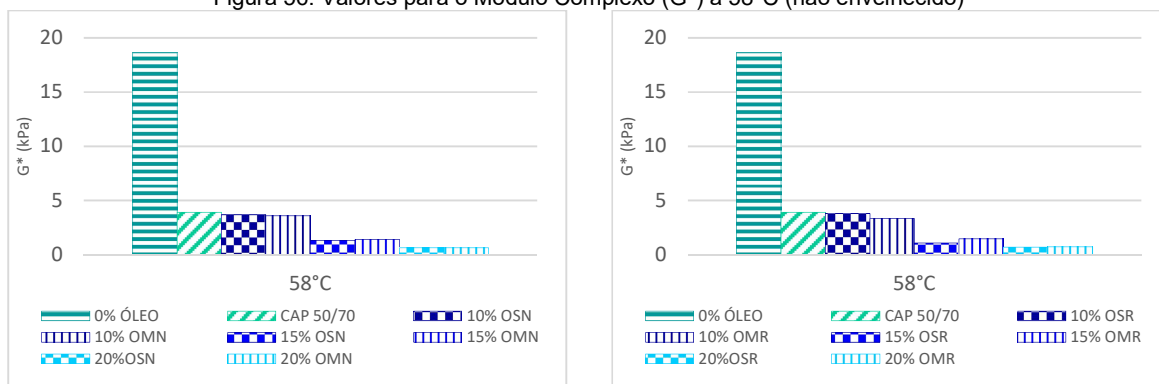


Legenda: "NE"= Não envelhecido; "RTFOT"=Envelhecido a curto prazo.

- **Resultados para o módulo complexo (G^*) a 58°C, 64°C, 70°C e 76°C**

Os ensaios laboratoriais para amostras não envelhecidas indicaram diferenças aparentes para os valores do módulo complexo (G^*) entre os diferentes CAP's ensaiados (Figuras 56 a 58). As amostras de CAP's modificados com 21% de borracha exibiram valores de (G^*) superiores aos dos CAP's 50/70 sem adições. Porém, quando foram feitas as adições de óleo vegetal, os valores de (G^*) diminuiram ficando próximos aos do CAP 50/70 virgem. Diante disso, notou-se então que os óleos vegetais tornaram o CAP 50/70 modificado com borracha e óleo menos resistente a deformação.

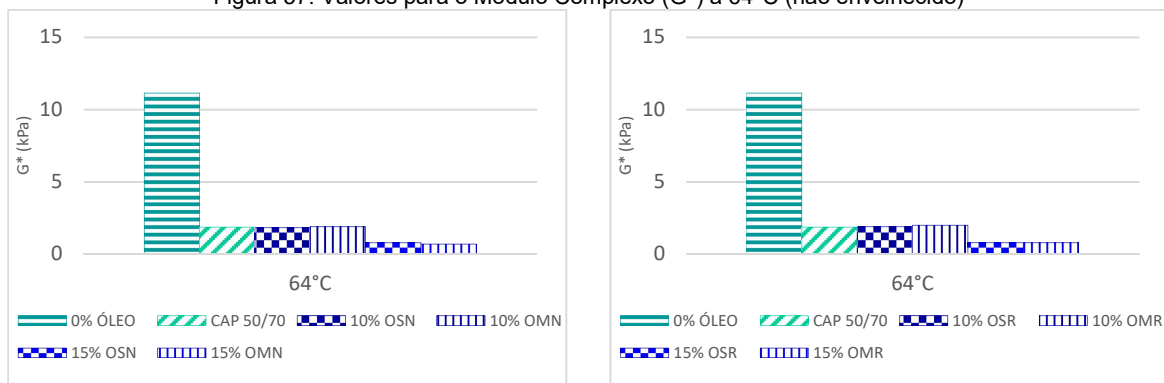
Percebeu-se ainda (Figuras 56 a 58), que o aumento da temperatura de ensaio resultou em menores valores para o (G^*), ou seja, diminuiu a resistência do material à deformação. A redução dos valores de (G^*) indicam que o material perdeu resistência, tornando-se suscetível ao aparecimento de afundamentos superficiais.

Figura 56: Valores para o Módulo Complexo (G^*) a 58°C (não envelhecido)

(a) Óleos de soja e de milho normais

(b) Óleos de soja e de milho residuais

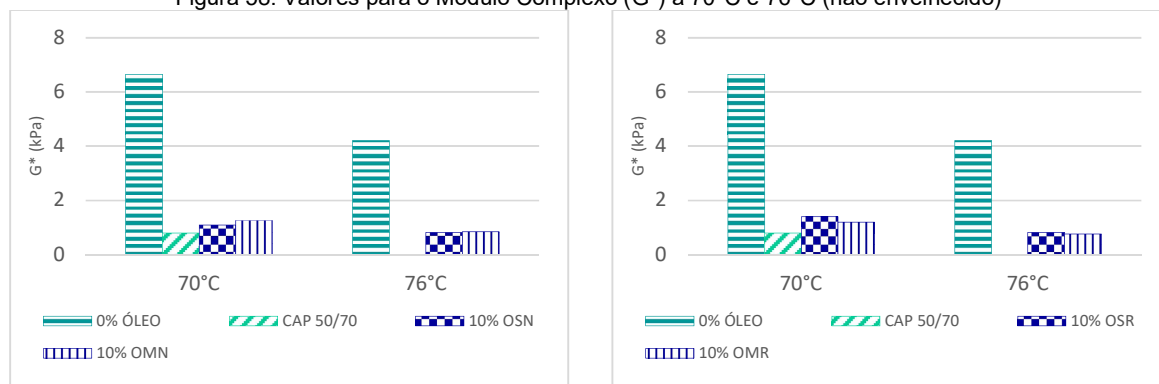
Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Figura 57: Valores para o Módulo Complexo (G^*) a 64°C (não envelhecido)

(a) Óleos de soja e de milho normais

(b) Óleos de soja e de milho residuais

Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Figura 58: Valores para o Módulo Complexo (G^*) a 70°C e 76°C (não envelhecido)

(a) Óleos de soja e de milho normais

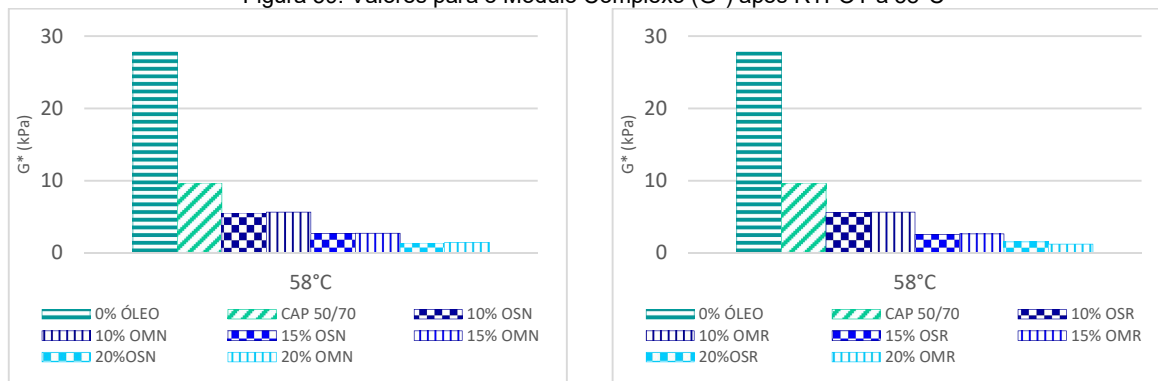
(b) Óleos de soja e de milho residuais

Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Quando os CAP's foram submetidos ao envelhecimento em curto prazo (Figuras 59 a 61), notou-se que os valores de (G^*) aumentaram, ou seja, o envelhecimento tornou o material mais resistente à deformação quando comparado ao estado não envelhecido. Também se constatou a mesma tendência de comportamento entre CAP's envelhecidos em curto prazo x CAP's não envelhecidos. Considerando os CAP's

modificados com borracha e óleo, houve menor variação dos módulos complexos quando comparados os (G^*) envelhecidos x (G^*) não envelhecidos.

Figura 59: Valores para o Módulo Complexo (G^*) após RTFOT a 58°C

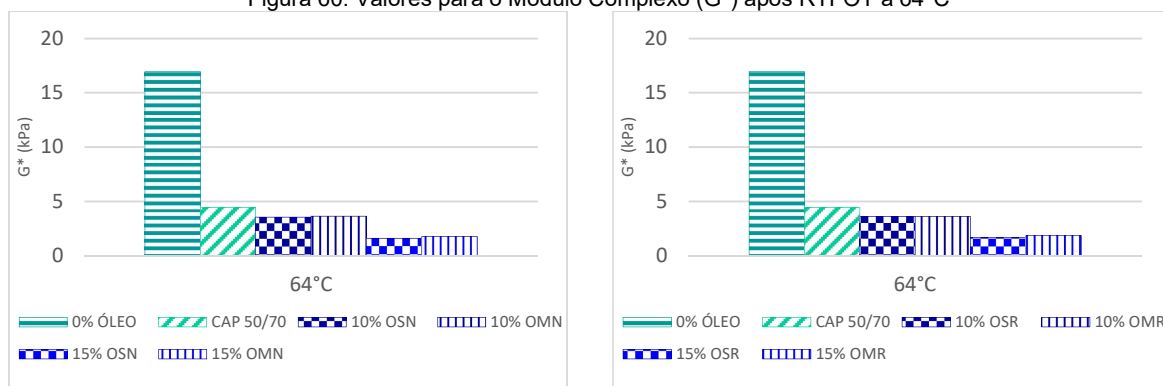


(a) Óleos de soja e de milho normais

(b) Óleos de soja e de milho residuais

Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Figura 60: Valores para o Módulo Complexo (G^*) após RTFOT a 64°C

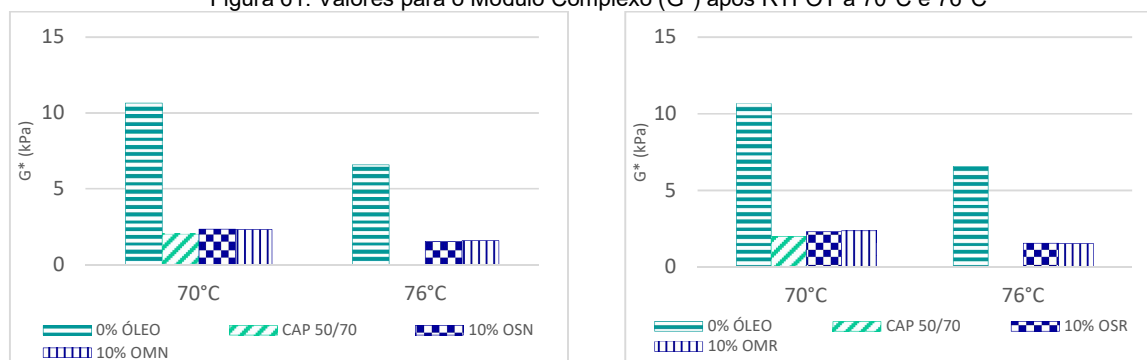


(a) Óleos de soja e de milho normais

(b) Óleos de soja e de milho residuais

Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Figura 61: Valores para o Módulo Complexo (G^*) após RTFOT a 70°C e 76°C



(a) Óleos de soja e de milho normais

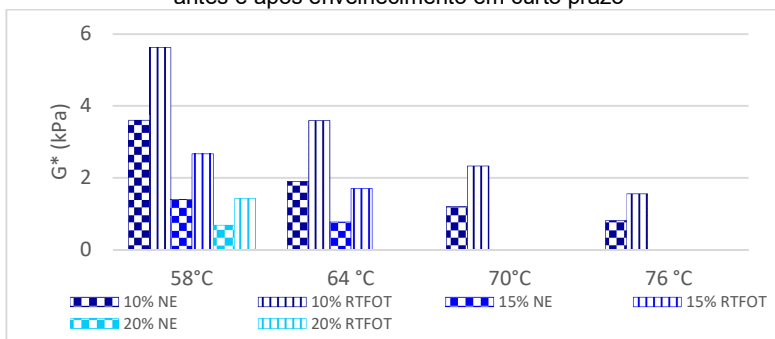
(b) Óleos de soja e de milho residuais

Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Analisando apenas o teor de óleo empregado, percebeu-se que os módulos complexos (G^*) obtidos para a adição de 10% de óleo ao CAP 50/70+21% borracha

mostraram-se superiores aos das adições de 15% e 20%. Adicionalmente, quanto maior a taxa de adição de óleo, menor a variação entre os módulos complexos (Figura 62).

Figura 62: Valores para o módulo complexo (G^*) considerando a porcentagem do óleo utilizado (10%, 15% e 20%) antes e após envelhecimento em curto prazo

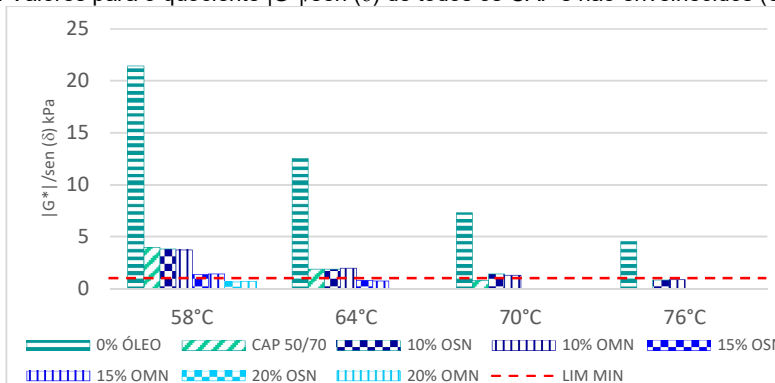


Legenda: "NE"= Não envelhecido; "RTFOT"=Envelhecido a curto prazo.

- **Resultados obtidos para o quociente $|G^*|/\text{sen}(\delta)$**

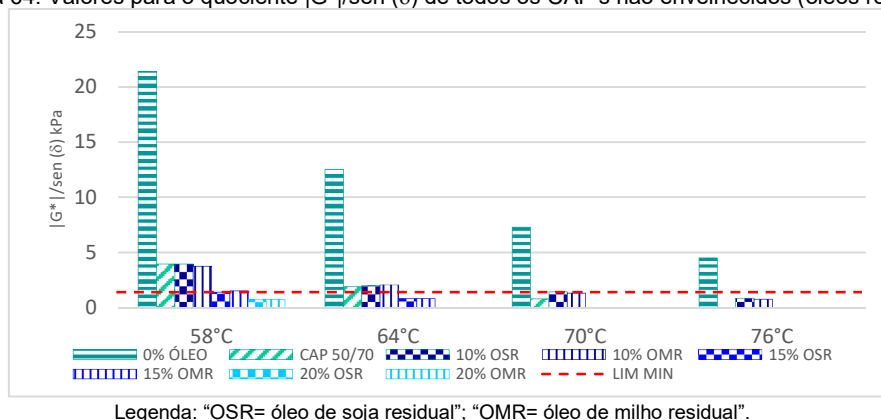
Segundo a especificação Superpave, os ligantes não envelhecidos para terem resistência suficiente à deformação permanente, devem apresentar valores superiores a 1.0 kPa para o quociente $|G^*|/\text{sen}(\delta)$. Conforme apresentado nas Figuras 63 e 64, pode-se observar que este valor foi alcançado até a temperatura de 70°C para o CAP 50/70 convencional. Quando foram adicionados 21% de borracha ao CAP 50/70, o material se tornou mais resistente e suportou temperaturas maiores chegando aos 100°C. Quando foram feitas adições de óleo vegetal ao CAP modificado com borracha, o material perdeu resistência à medida que crescia a temperatura de ensaio e a porcentagem de óleo adicionada. As amostras com 21% de borracha sem adições de óleo continuaram sendo as que alcançaram as maiores temperaturas, mostrando assim que o CAP modificado apenas com borracha apresenta maior elasticidade e resistência à deformação.

Figura 63: Valores para o quociente $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ de todos os CAP's não envelhecidos (óleos novos)



Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo".

Figura 64: Valores para o quociente $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ de todos os CAP's não envelhecidos (óleos residuais)



Para a situação de envelhecimento em curto prazo, a especificação Superpave requer valores maiores que 2.2 kPa para o quociente $|G^*|/\text{sen}(\delta)$. Comparando então as amostras não envelhecidas (Figuras 63 e 64) com as envelhecidas em curto prazo (Figuras 65 e 66), se constatou a mesma tendência de comportamento, porém os quocientes $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ exibiram valores maiores quando submetidos ao processo de envelhecimento. Também se observou que para as mesmas temperaturas de ensaio, houve menor diferença entre os quocientes $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ de amostras modificadas com borracha e óleo. Isso pode ter ocorrido devido ao óleo preservar as propriedades do ligante asfáltico convencional.

As maiores variações dos quocientes $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ antes e após o envelhecimento em curto prazo foram observados para CAP 50/70+21% borracha e CAP 50/70 não modificado enquanto os CAP's modificados com borracha e óleo exibiram as menores variações.

Figura 65: Valores para o quociente $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ de todos os CAP's após RTFOT (óleos novos)

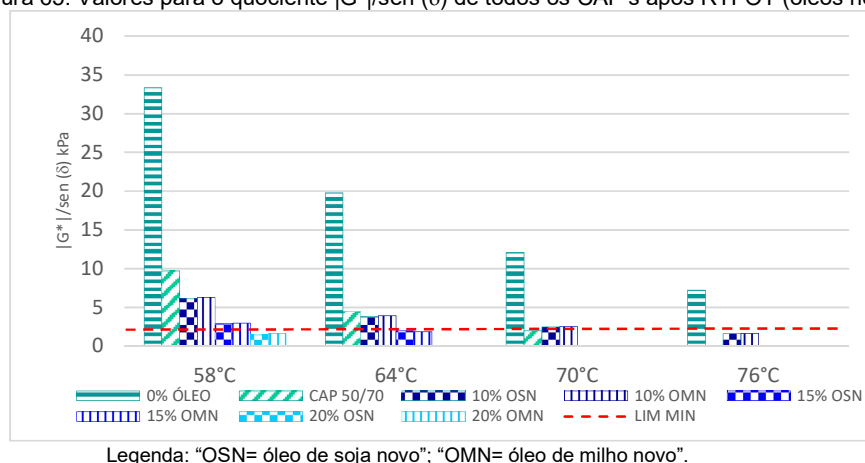
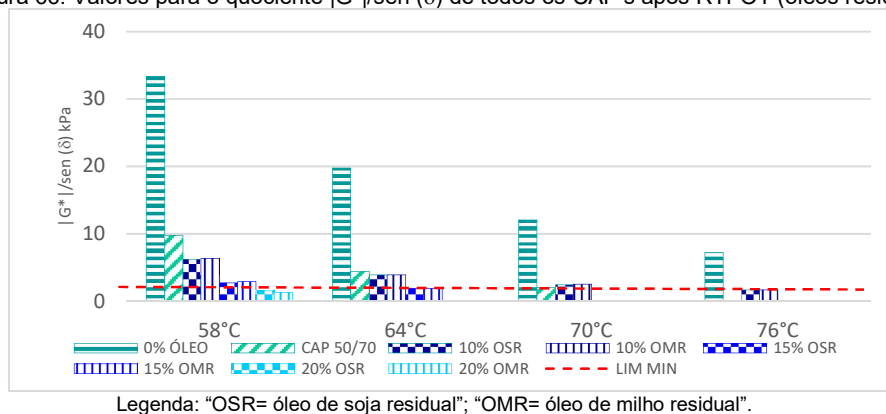
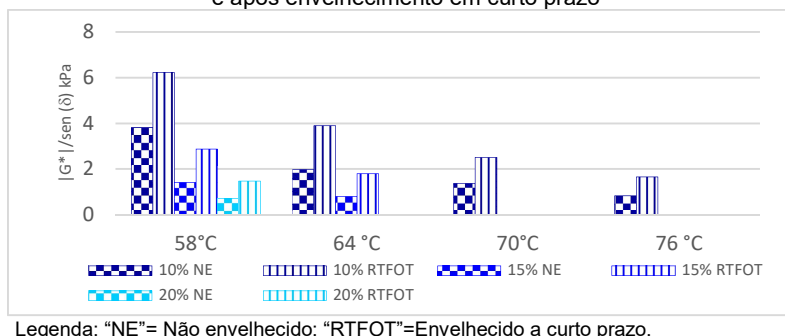


Figura 66: Valores para o quociente $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ de todos os CAP's após RTFOT (óleos residuais)



Considerando os efeitos das porcentagens de adição dos óleos vegetais (Figura 67), observou-se que os quocientes $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ obtidos para 10% de adição de óleo foram superiores aos com adição de 15% e 20%. Constatou-se também que a diferença entre valores de $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ diminuiu com o aumento da porcentagem de óleo, ou seja, a diferença entre $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ fabricado com 10% e 15% de óleo é maior que a diferença entre $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ produzido com 15% e 20% de óleo. Diante disso notou-se que quanto maior a porcentagem de óleo adicionado, menor a resistência à deformação permanente. Assim, o CAP 50/70+21% borracha+20% óleo vegetal não seria indicado para revestimentos asfálticos submetidos a temperaturas superiores a 58°C.

Figura 67: Valores para o quociente $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ considerando a porcentagem de óleo utilizado (10%, 15% e 20%) antes e após envelhecimento em curto prazo



➤ Avaliação do cisalhamento dinâmico em temperaturas intermediárias

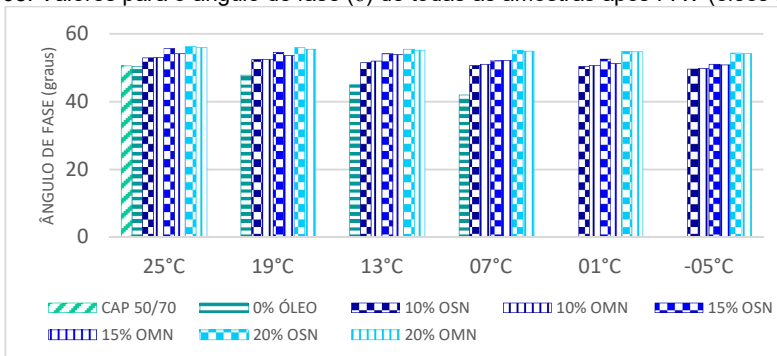
Após o envelhecimento em longo prazo (PAV), avaliou-se o comportamento dos CAP's em temperaturas intermediárias (-5°C a 34°C). A partir dos ensaios laboratoriais foram obtidos os valores dos ângulos de fase (δ), módulos complexos (G^*) e produto $|G^*| \times \text{sen}(\delta)$.

- **Resultados para o ângulo de fase (δ)**

Considerando os ângulos de fase (δ) (Figuras 68 e 69), observou-se que o CAP 50/70 sem modificações permitiu redução da temperatura de ensaio (de 34°C até 25°C) enquanto CAP's modificados com borracha e CAP's modificados com borracha e óleo permitiram alcançar respectivamente, temperaturas de ensaio de 7°C e -5°C. Portanto, a adição de 21% de borracha ao CAP 50/70 diminuiu a rigidez desse CAP modificado até que fosse alcançada a temperatura de 7°C. Quando feitas adições de óleos aos CAP's modificados com borracha moída, foi possível realizar o cisalhamento dinâmico em temperaturas ainda menores até alcançar -5°C.

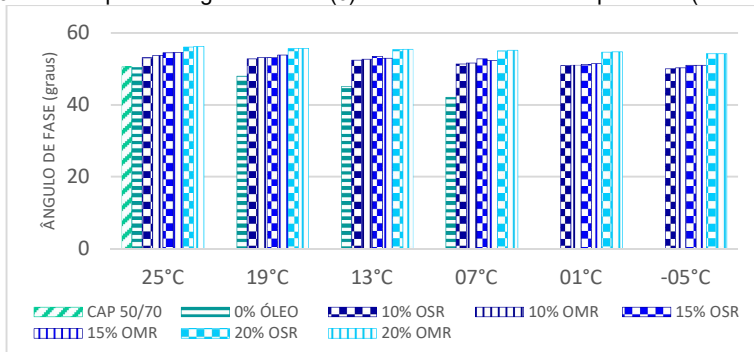
Os ângulos de fase diminuíram levemente com a redução da temperatura mostrando que os CAP's se tornaram ligeiramente mais elásticos. Para a temperatura de 25°C o CAP 50/70 sem modificações apresentou valor próximo ao do CAP modificado com 21% de borracha, contudo o CAP virgem não suportou temperaturas menores. Observou-se ainda que a diferença entre os ângulos de fase para CAP's+21% borracha+% óleo x CAP+21% borracha aumentou à medida que decresceu a temperatura de ensaio.

Figura 68: Valores para o ângulo de fase (δ) de todas as amostras após PAV (óleos normais)



Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Figura 69: Valores para o ângulo de fase (δ) de todas as amostras após PAV (óleos residuais)

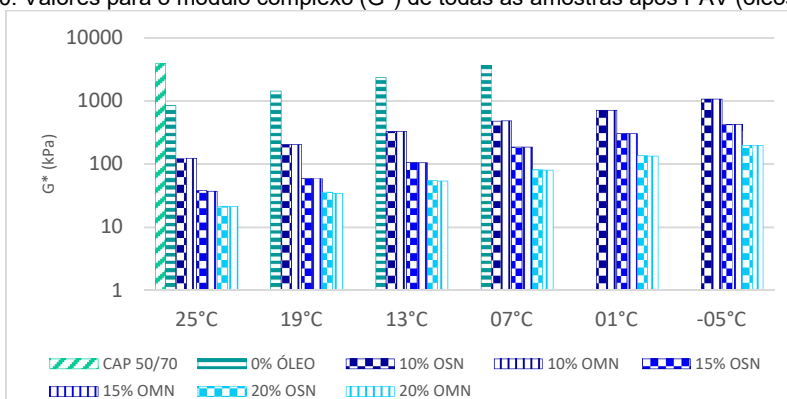


Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

- **Resultados para o módulo complexo (G^*)**

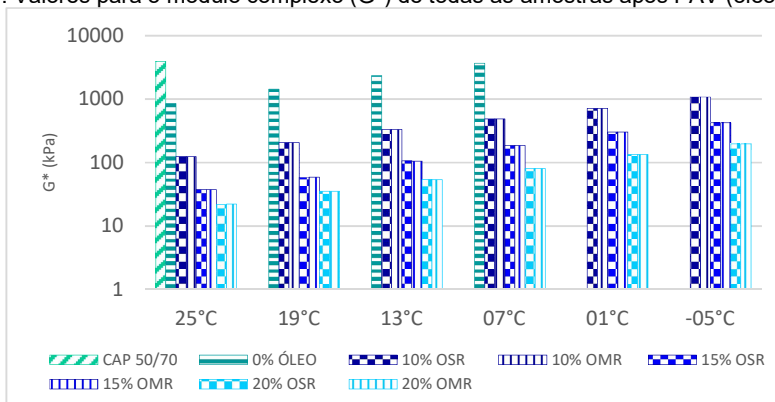
Neste caso observou-se para todos os CAP's avaliados que os módulos complexos (G^*) aumentaram conforme houve redução da temperatura, ou seja, todos os CAP's se tornaram mais rígidos (Figuras 70 e 71).

Figura 70: Valores para o módulo complexo (G^*) de todas as amostras após PAV (óleos normais)



Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Figura 71: Valores para o módulo complexo (G^*) de todas as amostras após PAV (óleos residuais)



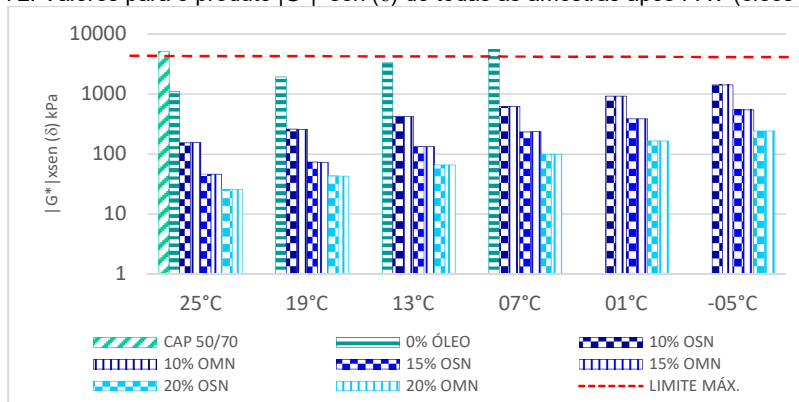
Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

- **Resultados para o produto $|G^*| \times \text{sen}(\delta)$**

Segundo a especificação Superpave, os ligantes envelhecidos em longo prazo devem apresentar valores iguais ou superiores a 5000 kPa para o produto $|G^*| \times \text{sen}(\delta)$. O CAP 50/70 virgem começou a ser ensaiado a 34°C e o produto $|G^*| \times \text{sen}(\delta)$ atingiu o valor limite na temperatura de 25°C, mostrando assim que o material perdeu rapidamente a elasticidade, se tornando muito resistente e mais suscetível ao trincamento por fadiga (Figuras 72 e 73). Para o CAP 50/70+21% borracha se observou que os valores dos produtos $|G^*| \times \text{sen}(\delta)$ satisfizeram o requisito Superpave até a temperatura de 13°C. Por

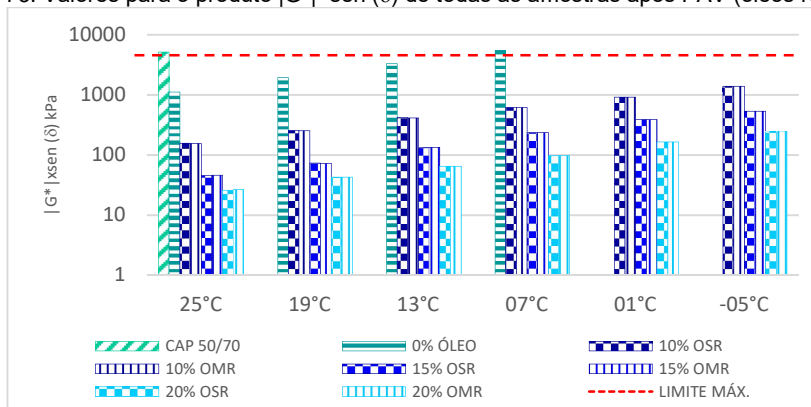
outro lado, quando foram feitas adições de óleo aos CAP's modificados com borracha, foram alcançadas temperaturas negativas (-5°C) sem atingir o valor de 5000 kPa.

Figura 72: Valores para o produto $|G^*| \times \text{sen}(\delta)$ de todas as amostras após PAV (óleos normais)



Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Figura 73: Valores para o produto $|G^*| \times \text{sen}(\delta)$ de todas as amostras após PAV (óleos residuais)



Legenda: "OSN= óleo de soja novo"; "OMN= óleo de milho novo"; "OSR= óleo de soja residual"; "OMR= óleo de milho residual".

Analisando todos os dados expostos nesta seção, observou-se que em todos os resultados obtidos não houve graficamente diferença significativa entre o tipo de óleo utilizado (soja ou milho) bem como seu estado (novo ou residual), sendo a diferença aparente vista na porcentagem utilizada. A análise estatística (ANOVA) (Apêndice E), comprovou este fato.

4.7 RESUMO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Analisando de forma conjunta todos os ensaios realizados, observou-se que o tipo de óleo empregado bem como seu estado, não apresentaram diferença estatística significativa, contudo existiram alguns casos pontuais, onde esta dissemelhança se mostrou presente. Porém esta pequena parcela de dados significativamente diferentes não

interferiu nas conclusões obtidas. Diante disso, nesta seção apresenta-se nos Quadros 5 a 11, um resumo das análises estatísticas com as amostras que apresentaram diferença significativa simultânea considerando as porcentagens de óleo adicionado e os tipos e condições desses óleos, sendo que o estudo estatístico completo realizado está apresentado nos Apêndices (A, B, C, D, E e F)

Analisando todas as tabelas observou-se maior ocorrência de diferença estatística para as combinações (soja residual × milho residual, soja novo × milho novo, soja novo × milho residual). Analisando isoladamente os tipos e condições dos óleos, constatou-se nos ensaios reológicos que os óleos de soja novo e de milho residual apresentaram maior incidência entre os demais.

Quadro 5: Combinação de viscosidade rotacional que apresentou diferença estatística significativa entre porcentagens de adição de óleo e entre tipos e condições dos óleos

| Ensaio | Combinação avaliada | Tipos de óleos e respectivas condições |
|------------------------|----------------------------------|--|
| Viscosidade rotacional | (21%BO+20%OL)NE × (21%BO+0%OL)NE | SOJA RESIDUAL × MILHO RESIDUAL |

Quadro 6: Combinações de pontos de fulgor que apresentaram diferença estatística entre porcentagens de adição de óleo e entre tipos e condições dos óleos

| Ensaio | Combinação avaliada | Tipos de óleos e respectivas condições |
|-----------------|-----------------------------------|--|
| Ponto de Fulgor | (21%BO+15%OL)NE × (21%BO+20%OL)NE | SOJA RESIDUAL × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+15%OL)NE × (21%BO+20%OL)NE | SOJA NOVO × SOJA RESIDUAL |
| | (21%BO+20%OL)NE × (21%BO+0%OL)NE | SOJA RESIDUAL × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+20%OL)NE × (21%BO+0%OL)NE | SOJA NOVO × SOJA RESIDUAL |

Quadro 7: Combinações de pontos de amolecimento que apresentaram diferença estatística entre porcentagens de adição de óleo e entre tipos e condições dos óleos

| Ensaio | Combinação avaliada | Tipos de óleos e respectivas condições |
|-----------------------|---|--|
| Ponto de amolecimento | (21%BO+10%OL)RTFOT × (21%BO+20%OL)RTFOT | SOJA NOVO × MILHO NOVO |
| | (21%BO+10%OL)RTFOT × (21%BO+20%OL)RTFOT | SOJA NOVO × SOJA RESIDUAL |
| | (21%BO+15%OL)RTFOT × (21%BO+20%OL)RTFOT | SOJA RESIDUAL × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+10%OL)PAV × (21%BO+15%OL)PAV | SOJA NOVO × SOJA RESIDUAL |
| | (21%BO+10%OL)PAV × (21%BO+20%OL)PAV | SOJA NOVO × MILHO NOVO |
| | (21%BO+10%OL)PAV × (21%BO+20%OL)PAV | SOJA RESIDUAL × MILHO NOVO |
| | (21%BO+10%OL)PAV × (21%BO+20%OL)PAV | MILHO NOVO × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+15%OL)PAV × (21%BO+20%OL)PAV | SOJA NOVO × MILHO NOVO |
| | (21%BO+15%OL)PAV × (21%BO+20%OL)PAV | SOJA NOVO × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+20%OL)RTFOT × (0%BO+0%OL)RTFOT | SOJA RESIDUAL × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+20%OL)RTFOT × (0%BO+0%OL)RTFOT | SOJA NOVO × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+10%OL)PAV × (0%BO+0%OL)PAV | SOJA NOVO × MILHO NOVO |
| | (21%BO+10%OL)NE × (21%BO+0%OL)NE | MILHO NOVO × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+20%OL)RTFOT × (21%BO+0%OL)RTFOT | SOJA RESIDUAL × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+20%OL)RTFOT × (21%BO+0%OL)RTFOT | SOJA NOVO × MILHO NOVO |
| | (21%BO+20%OL)RTFOT × (21%BO+0%OL)RTFOT | SOJA RESIDUAL × MILHO NOVO |
| | (21%BO+20%OL)RTFOT × (21%BO+0%OL)RTFOT | SOJA NOVO × MILHO RESIDUAL |
| | (21%5BO+15%OL)PAV × (21%BO+0%OL)PAV | SOJA RESIDUAL × MILHO RESIDUAL |

Soja novo: 10 ocorrências em 18 combinações; Milho residual: 9 ocorrências em 18 combinações

Quadro 8: Combinações de valores de rigidez que apresentaram diferença estatística entre porcentagens de adição de óleo e entre tipos e condições dos óleos

| Ensaio | Combinação avaliada | Tipos de óleos e respectivas condições |
|------------------------------|---|--|
| Fluência em viga – (Rigidez) | (21%BO+10%OL)NE × (21%BO+15%OL)NE | SOJA RESIDUAL × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+10%OL)NE × (21%BO+15%OL)NE | SOJA NOVO × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+10%OL)NE × (21%BO+20%OL)NE | SOJA NOVO × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+10%OL)NE × (21%BO+20%OL)NE | MILHO NOVO × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+10%OL)RTFOT × (21%BO+20%OL)RTFOT | SOJA RESIDUAL × MILHO NOVO |
| | (21%BO+15%OL)RTFOT × (21%BO+20%OL)RTFOT | SOJA NOVO × MILHO NOVO |
| | (21%BO+15%OL)RTFOT × (21%BO+20%OL)RTFOT | MILHO NOVO × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+10%OL)NE × (21%BO+0%OL)NE | SOJA NOVO × MILHO RESIDUAL |

Milho residual: 6 ocorrências em 8 combinações; Soja novo: 4 ocorrências em 8 combinações

Quadro 9: Combinações de valores-m que apresentaram diferença estatística entre porcentagens de adição de óleo e entre tipos e condições dos óleos

| Ensaio | Combinação avaliada | Tipos de óleos e respectivas condições |
|------------------------------|-------------------------------------|--|
| Fluência em viga – (Valor-m) | (21%BO+15%OL)NE × (21%BO+20%OL)NE | SOJA RESIDUAL × MILHO NOVO |
| | (21%BO+15%OL)PAV × (21%BO+20%OL)PAV | SOJA NOVO × MILHO NOVO |
| | (21%BO+15%OL)PAV × (21%BO+20%OL)PAV | SOJA NOVO × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+15%OL)PAV × (21%BO+20%OL)PAV | SOJA NOVO × SOJA RESIDUAL |
| | (21%BO+10%OL)NE × (0%BO+0%OL)NE | SOJA RESIDUAL × MILHO NOVO |
| | (21%BO+15%OL)PAV × (0%BO+0%OL)PAV | SOJA NOVO × MILHO NOVO |
| | (21%BO+20%OL)PAV × (0%BO+0%OL)PAV | SOJA NOVO × SOJA RESIDUAL |

Soja novo: 5 ocorrências em 7 combinações; Soja residual: 4 ocorrências em 7 combinações

Quadro 10: Combinações de quocientes $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ que apresentaram diferença estatística entre porcentagens de adição de óleo e entre tipos e condições dos óleos

| Ensaio | Combinação avaliada | Tipos de óleos e respectivas condições |
|--|---|--|
| Cisalhamento dinâmico em altas temperaturas – (58°C) | (21%BO+15%OL)NE × (21%BO+20%OL)NE | SOJA NOVO × SOJA RESIDUAL |
| | (21%BO+15%OL)RTFOT × (21%BO+20%OL)RTFOT | SOJA RESIDUAL × MILHO NOVO |
| Cisalhamento dinâmico em altas temperaturas – (64°C) | (21%BO+10%OL)NE × (21%BO+15%OL)NE | SOJA NOVO × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+10%OL)NE × (21%BO+15%OL)NE | MILHO NOVO × MILHO RESIDUAL |
| Cisalhamento dinâmico em altas temperaturas – (70°C) | (21%BO+10%OL)NE × (0%BO+0%OL)NE | SOJA NOVO × MILHO RESIDUAL |

Soja novo: 3 ocorrências em 5 combinações; Milho residual: 3 ocorrências em 5 combinações

Quadro 11: Combinações de quocientes $|G^*| \times \text{sen}(\delta)$ que apresentaram diferença estatística entre porcentagens de adição de óleo e entre tipos e condições dos óleos

| Ensaio | Combinação avaliada | Tipos de óleos e respectivas condições |
|---|-------------------------------------|--|
| Cisalhamento dinâmico em temperaturas intermediárias – (25°C) | (21%BO+10%OL)PAV × (21%BO+20%OL)PAV | SOJA NOVO × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+10%OL)PAV × (21%BO+20%OL)PAV | MILHO NOVO × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+15%OL)PAV × (21%BO+20%OL)PAV | SOJA NOVO × MILHO NOVO |
| Cisalhamento dinâmico em temperaturas intermediárias – (-5°C) | (21%BO+10%OL)PAV × (21%BO+15%OL)PAV | SOJA NOVO × MILHO NOVO |
| | (21%BO+10%OL)PAV × (21%BO+15%OL)PAV | SOJA NOVO × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+10%OL)PAV × (21%BO+15%OL)PAV | SOJA NOVO × SOJA RESIDUAL |
| | (21%BO+10%OL)PAV × (21%BO+20%OL)PAV | SOJA NOVO × MILHO NOVO |
| | (21%BO+10%OL)PAV × (21%BO+20%OL)PAV | SOJA NOVO × MILHO RESIDUAL |
| | (21%BO+10%OL)PAV × (21%BO+20%OL)PAV | SOJA NOVO × SOJA RESIDUAL |

Soja novo: 8 ocorrências em 9 combinações; Milho residual: 4 ocorrências em 9 combinações

4.8 EFEITO DA REDUÇÃO DE TEMPERATURA DE FABRICAÇÃO

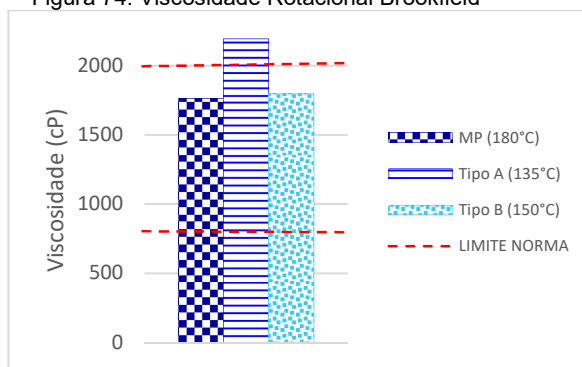
Sabe-se que a adição de borracha moída de pneus ao ligante asfáltico requer aumento da temperatura de produção da mistura asfáltica e assim resultando na maior emissão de gases poluentes. Por isso buscou-se avaliar a redução da temperatura de usinagem da mistura asfáltica fundamentando-se nos resultados do ensaio de viscosidade rotacional Brookfield. Devido aos resultados dos ensaios de viscosidade rotacional a 180°C (item 4.1) não terem mostrado diferença significativa entre o tipo de óleo (soja ou milho) e sua condição (novo ou residual), esta investigação foi realizada apenas para o óleo de soja residual. Além disso, foi escolhida a taxa de 10% de adição devido à mesma ter apresentado os melhores resultados dentre as porcentagens avaliadas anteriormente.

Para produção destas amostras primeiramente foi adicionado ao ligante asfáltico o óleo vegetal e posteriormente a borracha moída de pneus. Este procedimento difere daquele utilizado anteriormente para fabricação dos CAP's modificados. Quanto menor a temperatura, maior a viscosidade do CAP. Assim, a adição inicial de óleo vegetal teve por objetivo reduzir essa consistência para melhorar as condições de mistura da grande quantidade de borracha moída a ser utilizada.

A norma DNIT 129/2011 apresenta valores de viscosidade para as temperaturas de 135°C, 150°C e 177°C. Os resultados das viscosidades rotacionais apresentados na Tabela 7 foram obtidos em amostras fabricadas a 180°C (próximo aos 177°C recomendados pela norma). Assim, optou-se por fabricar os novos CAP's modificados às temperaturas de 135°C (Tipo A) e a 150°C (Tipo B), a fim de verificar o efeito da redução da temperatura de fabricação. A amostra fabricada a 180°C foi apresentada como mistura padrão (MP).

Conforme ilustrado na Figura 74, o CAP modificado produzido a 135°C (Tipo A) apresentou o maior valor de viscosidade média (2192 cP) enquanto o CAP modificado produzido a 150°C (Tipo B) exibiu viscosidade rotacional média de 1794.33 cP. Os CAP's modificados produzidos com óleo e borracha moída a 135°C não se enquadraram na norma ASTM D2196 para o asfalto AB8, onde a viscosidade máxima deve ser de 2000 cP. Por outro lado, os CAP's modificados fabricados a 150°C atenderam ao requisito normativo, tendo valores próximos à viscosidade limite.

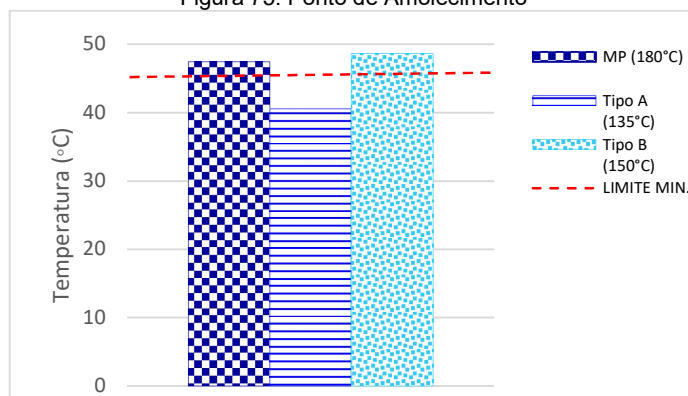
Figura 74: Viscosidade Rotacional Brookfield



Para confirmação de que apesar da redução da temperatura de fabricação, os desempenhos mecânicos dos CAP's modificados ainda teriam resultados satisfatórios, foram realizados ensaios de ponto de amolecimento, fluência em viga e cisalhamento dinâmico. Nesta análise as avaliações foram efetuadas apenas para o estado não envelhecido.

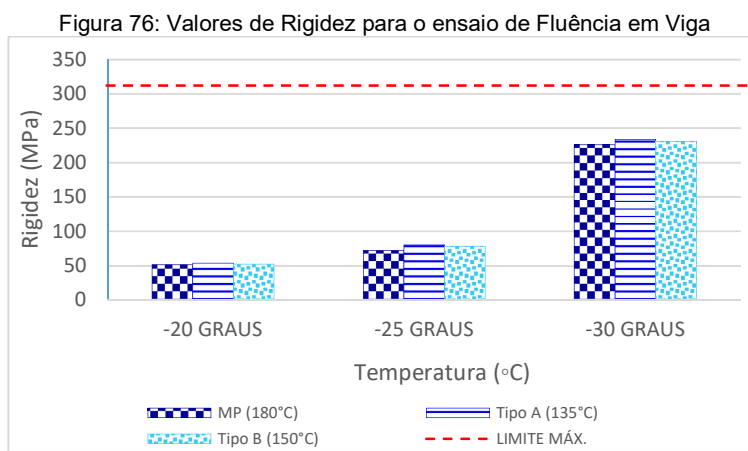
A Figura 75 apresenta os resultados obtidos para o ensaio do ponto de amolecimento. Observou-se que o CAP modificado produzido a 135°C (Tipo A) apresentou o menor ponto de amolecimento quando comparado à mistura padrão (MP) produzida a 180°C e ao CAP modificado fabricado a 150°C (Tipo B). Isto pode ser devido à menor interação ligante-borracha em temperaturas mais baixas, resultando em CAP's modificados menos resistentes e homogêneos.

Figura 75: Ponto de Amolecimento

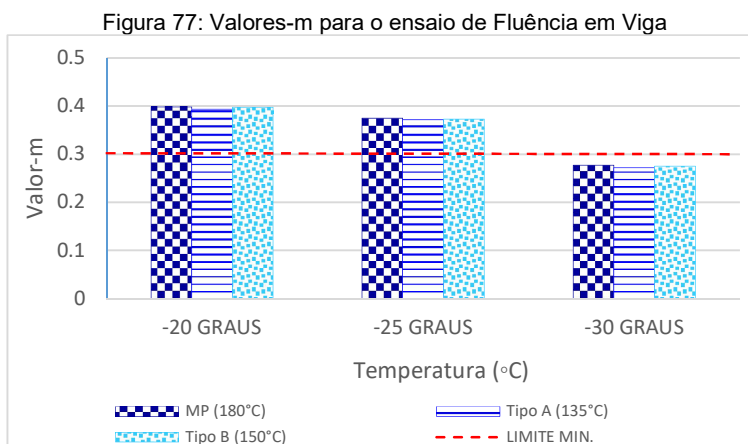


Para o ensaio de fluência em viga (Figura 76), observou-se que não houve diferença aparente entre os valores de rigidez das amostras, ou seja, em temperaturas mais baixas a temperatura de produção dos CAP's modificados não interferiu no comportamento destes. Todas as amostras atenderam o requisito Superpave tendo rigidez menor que 300

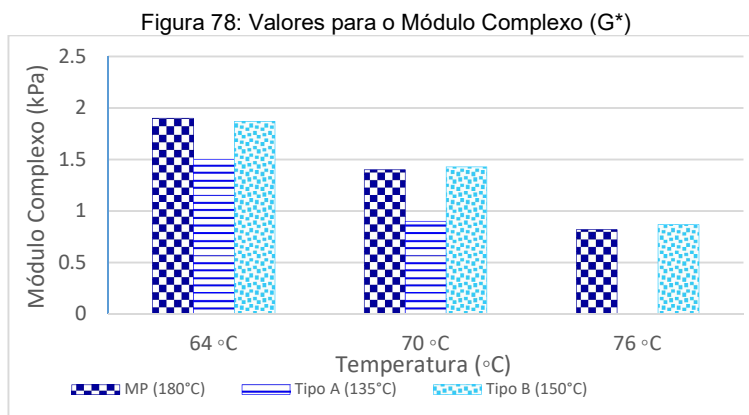
MPa aos 60 segundos nas três temperaturas avaliadas. Além disso, conforme houve redução da temperatura, maiores foram os valores de rigidez obtidos em cada caso.



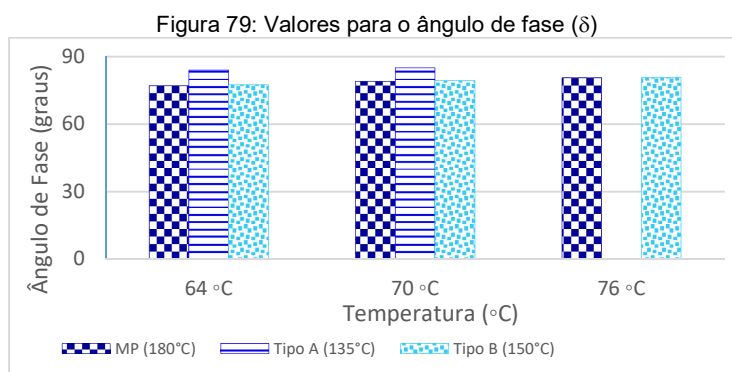
Para os valores-m (Figura 77) observou-se decréscimo destes conforme diminuiu a temperatura, ou seja, apresentaram menor eficiência na dissipação das tensões. À temperatura de -30°C nenhuma das amostras alcançou o valor mínimo requerido pela especificação Superpave (módulo de relaxação ou valor-m ≥ 0.3).



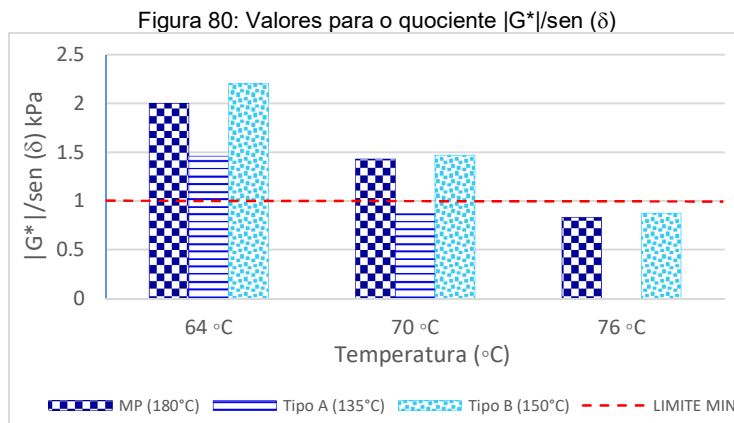
Para o ensaio de cisalhamento dinâmico em altas temperaturas, do ponto de vista do módulo complexo (G^*), observou-se que as maiores temperaturas alcançadas pelos CAP's modificados Tipo B foram inferiores às temperaturas alcançadas pelos CAP's MP (amostras-padrão) e CAP's modificados Tipo A (Figura 78). Portanto, a menor resistência à deformação ocorreu a 150°C.



Percebeu-se que os valores do ângulo de fase (δ) aumentaram conforme o incremento de temperatura de fabricação (Figura 79), ou seja, o material se tornou menos elástico. Os CAP's modificados Tipo A exibiram os maiores valores de ângulos de fase (δ), ou seja, são menos elásticos. Além disso, os CAP's Tipo B não apresentaram diferença aparente quando comparados aos CAP's MP (amostra padrão).



Para o quociente $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ (Figura 80) os CAP's modificados Tipo B mostraram o mesmo comportamento que o CAP MP (amostra-padrão). Ambos atenderam o requisito Superpave ($|G^*|/\text{sen}(\delta) > 1.0$ kPa) até a temperatura de 76 °C. Os CAP's modificados Tipo A exibiram valores de $|G^*|/\text{sen}(\delta)$ menores que 1.0 kPa aos 70 °C, ou seja, este CAP mostrou a menor resistência à deformação permanente em altas temperaturas. Diante dos resultados apresentados, concluiu-se que é possível reduzir a temperatura de fabricação para 150 °C atendendo simultaneamente os requisitos de viscosidade rotacional e resistência à deformação permanente.

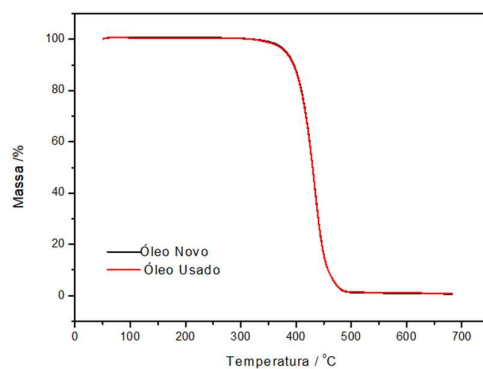


4.9 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TG)

A influência do óleo de soja em sua condição nova e residual no CAP 50/70 convencional foi analisada antes e após o envelhecimento em longo prazo. Foram consideradas as porcentagens de 5%, 10%, 15% e 20% de adição de óleo vegetal. O teor de 5% não foi empregado nesta pesquisa quando da realização dos ensaios mecânicos, contudo foi considerado para os ensaios de comportamento térmico, a fim de observar o comportamento do CAP com teores menores do aditivo. Optou-se por realizar os ensaios apenas com um tipo de óleo (soja) devido aos óleos escolhidos para a realização desta pesquisa apresentarem semelhanças de composição e viscosidade.

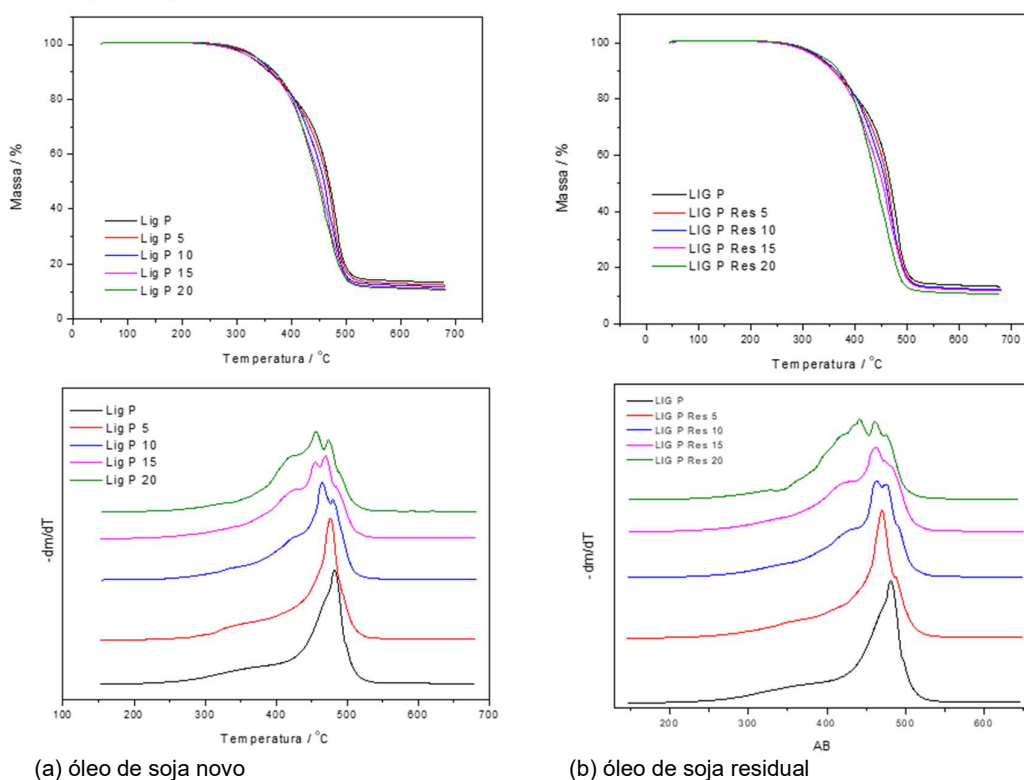
A Figura 81 apresenta a análise térmica realizada somente para o óleo de soja (novo e residual). Observa-se que não houve qualquer diferença entre as propriedades termogravimétricas dos mesmos.

Figura 81: Termograma para o óleo de soja em seu estado novo e residual



As Figuras 82a e 82b apresentam o perfil termogravimétrico para os CAP's modificados com borracha e óleo antes do envelhecimento em longo prazo. A Figura 85a expõe o comportamento do óleo novo e a Figura 85b ilustra o comportamento do óleo residual. Observa-se que não houve mudança significativa do ponto de vista da estabilidade térmica do material. Contudo a degradação do material apresenta-se de forma diferenciada devido à presença do óleo no CAP modificado. Percebe-se que o óleo não apresenta uma interação efetiva com o ligante não sendo capaz de afetar as propriedades térmicas do mesmo

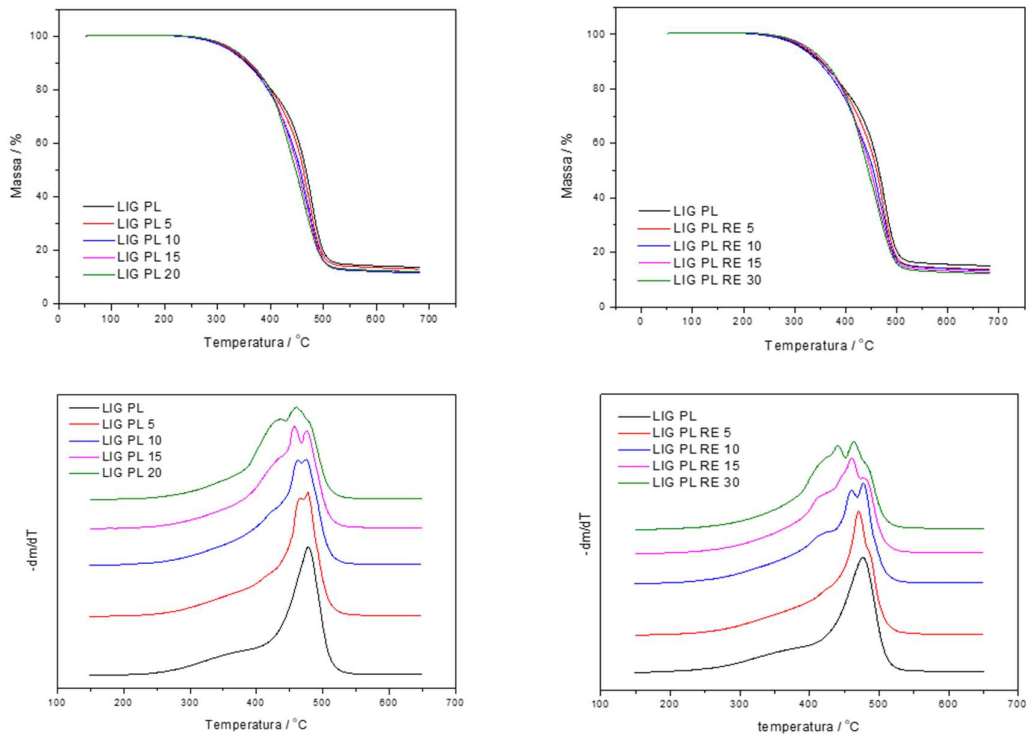
Figura 82: Termogramas para as amostras não envelhecidas de CAP 50/70 e CAP 50/70+21% borracha+%óleo de soja



Verificou-se ainda que independente da porcentagem de adição e condição do óleo utilizado (novo ou residual), a temperatura de degradação máxima ($T_{m\acute{a}x}$) é próxima de 480°C. Após serem submetidos ao envelhecimento em longo prazo (Figuras 83a e 83b), os CAP's modificados apresentaram comportamento semelhante ao constatado antes deste processo. Este mesmo desempenho foi observado nos ensaios mecânicos, onde o óleo aparentemente preserva as características do ligante asfáltico e assim envelhecendo em seu lugar. Diante do exposto percebeu-se então que a adição de óleo no

CAP 50/70+21% borracha não causou alteração estrutural no mesmo, resultando apenas na adição de um componente extra.

Figura 83: Análise termogravimétrica para as amostras envelhecidas em longo prazo de CAP 50/70 e CAP 50/70+21% borracha+%óleo de soja



(a) óleo de soja novo

(b) óleo de soja residual

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta pesquisa avaliou a possibilidade de redução da viscosidade excessiva do CAP 50/70 modificado com 21% de borracha moída de pneus inservíveis, por meio da adição de óleo vegetal a taxas de 10%, 15% e 20%, respectivamente. Concluiu-se que a hipótese formulada foi atendida. O estudo envolveu a análise de dois tipos de óleo vegetal (óleo de soja e óleo de milho) e duas condições (óleo novo e óleo residual). Foram avaliados CAP's modificados não envelhecidos, envelhecidos em curto prazo e envelhecidos em longo prazo. Os ensaios laboratoriais permitiram a obtenção de dados relativos à viscosidade rotacional, ponto de amolecimento, ponto de fulgor, variação em massa, rigidez e módulo de relaxação em temperaturas negativas, resistência à deformação e ângulo de fase em temperaturas altas e intermediárias, assim como propriedades termogravimétricas desses CAP's.

No ensaio de viscosidade rotacional, percebeu-se que a adição de óleo ao CAP 50/70+21%borracha reduziu efetivamente a viscosidade deste. Além disso, ao aumentar a porcentagem do óleo empregado, maior à redução obtida. As porcentagens de adição empregadas permitiram o enquadramento das viscosidades rotacionais na norma ASTM D2196 para o asfalto-borracha AB 8. As Análises de Variância indicaram existência de diferença estatística significativa entre as porcentagens de óleo utilizadas. Quando observado o tipo de óleo empregado e sua respectiva condição não houve diferença estatística apesar das viscosidades terem sido ligeiramente maiores para os óleos oriundos de processos de fritura (óleos residuais). Essa inexistência de diferença estatística pode ser devida às viscosidades e composições químicas semelhantes dos óleos utilizados.

O ensaio de ponto de amolecimento mostrou que quanto maior a porcentagem de óleo empregada, menor a temperatura requerida para os CAP's modificados com borracha e óleo escoarem. As Análises de Variância comprovaram que houve diferença significativa entre as porcentagens de óleo utilizadas. Quando observado o tipo de óleo empregado e sua respectiva condição, não houve diferença estatística para a maioria das combinações avaliadas.

O ensaio do ponto de fulgor mostrou que quanto maior a porcentagem de óleo utilizada, menor a temperatura de ignição dos CAP's modificados com borracha e óleo. No entanto, todos os CAP's apresentaram temperatura superior à temperatura mínima de fulgor requerida pelas normas rodoviárias vigentes. As Análises de Variância comprovaram que houve diferença significativa entre as porcentagens de óleo utilizadas. Quando

observado o tipo de óleo empregado e sua respectiva condição, não houve diferença estatística para a maioria das combinações avaliadas.

Durante o envelhecimento em curto prazo dos CAP's modificados com borracha e óleo, percebeu-se que a volatilização do CAP se tornou menor quando da presença de óleo. Tal fato pode ter ocorrido devido ao óleo volatilizar no lugar do ligante, e assim manter o mesmo com suas características originais prévias ao processo de envelhecimento. Além disso, todos os CAP's modificados com borracha e óleo atenderam o requisito de variação máxima de massa mencionado nas normas vigentes.

O ensaio de cisalhamento dinâmico em altas temperaturas (58°C, 64°C, 70°C e 76°C) mostrou que a adição de borracha moída aumentou a resistência do ligante asfáltico à deformação, contudo quando feita a adição de óleo vegetal esta característica diminuiu, mostrando que este aditivo tende a tornar o material menos resistente a este tipo de sollicitação. Conforme houve aumento da porcentagem de óleo, menor foi a temperatura suportada pelo material, sendo a porcentagem de 20% a que menos resistiu aos esforços em temperaturas elevadas, rompendo aos 58°C. A porcentagem de 10% de adição foi a que demonstrou os melhores resultados, resistindo até a temperatura de 76°C, sendo uma boa opção para aplicação em locais cujos revestimentos asfálticos estejam expostos a temperaturas elevadas. As Análises de Variância comprovaram que houve diferença significativa entre as porcentagens de óleo utilizadas. Quando observado o tipo de óleo empregado e sua respectiva condição, não houve diferença estatística para a maioria das combinações avaliadas.

As amostras envelhecidas em longo prazo e submetidas ao ensaio de cisalhamento dinâmico em temperaturas intermediárias mostraram que quanto maior a taxa de adição de óleo menor a temperatura suportada pelo CAP modificado. O CAP 50/70 exibiu resistência ao trincamento por fadiga até 25°C enquanto os CAP's modificados com borracha e óleo alcançaram temperatura de -5°C sem atingir o valor de 5000 kPa para o produto $|G^*| \times \sin(\delta)$. As Análises de Variância comprovaram que houve diferença significativa entre as porcentagens de óleo utilizadas. Quando observado o tipo de óleo empregado e sua respectiva condição, não houve diferença estatística para a maioria das combinações avaliadas.

Durante o ensaio de fluência em viga, onde os CAP's modificados foram submetidos a temperaturas de (-20°C, -25°C e -30°C), percebeu-se que quanto maior a porcentagem de óleo utilizado menor a temperatura para o material atingir consistência suficiente para realização do ensaio. A taxa de adição de 10% de óleo foi a única que

apresentou rigidez inferior a 300 MPa para as três temperaturas avaliadas mostrando que menores porcentagens desse aditivo tendem a melhorar o desempenho do CAP modificado com borracha e óleo.


Nas análises termogravimétricas realizadas para o óleo de soja (novo e residual), observou-se inexistência de diferença entre as propriedades termogravimétricas dos mesmos. Porém, a degradação do material apresentou-se de forma diferenciada devido à presença de óleo vegetal no CAP modificado. Percebeu-se que o óleo vegetal não apresentou uma interação efetiva com o CAP 50/70+21% borracha, não sendo capaz de afetar as propriedades térmicas do mesmo. Verificou-se ainda temperatura de degradação máxima semelhante ($\approx 480^{\circ}\text{C}$) entre os CAP's modificados com borracha e óleo independente da porcentagem de adição e condição do óleo utilizado.

Diante do exposto concluiu-se que o CAP modificado com 21% de borracha e contendo 10% de óleo vegetal resultou na melhor opção, pois foi o que resistiu sem romper até temperaturas superiores a 70°C no ensaio de cisalhamento dinâmico enquanto apresentou menor rigidez que o CAP 50/70 e CAP 50/70+21% borracha no ensaio de fluência em viga a -20°C . A adição de maiores porcentagens de óleo resultou em grandes perdas de resistência à deformação permanente em altas temperaturas enquanto os valores de rigidez em temperaturas negativas aumentaram significativamente.


















Com relação ao tipo de óleo empregado bem como sua condição, verificou-se inexistência de diferença estatística entre os tipos de óleos e suas respectivas condições na maioria dos ensaios laboratoriais realizados. Desta forma, considerando o cenário de reaproveitamento de resíduos, seria interessante a utilização de óleo na condição residual visto a quantidade descartada deste resíduo, entretanto como não houve diferença entre os estados destes óleos, nada impediria de utilizar os dois juntos em uma mistura caso fosse necessário. Além disso, para mitigar o impacto ambiental, o óleo de soja seria o preferido haja vista ser o mais consumido hoje no Brasil.

Para fins de entendimento geral, a Tabela 13 apresenta um resumo das conclusões obtidas, mostrando quais amostras modificadas com CAP + 21% borracha + % óleo, atenderam as respectivas normas de acordo com cada ensaio realizado.















Quadro 12: Resumo das conclusões obtidas (continua)

| Ensaio | Tipo de óleo | Porcentagem | Atendeu ao requerido por norma? | Norma |
|------------------------|-----------------------|-------------|--|--------------------------|
| Viscosidade Brookfield | Óleo de soja residual | 10 |  | Norma TAL AB8 800-2000cP |
| | | 15 | | |
| | | 20 | | |

Quadro 12: Resumo das conclusões obtidas (continua)

| Ensaio | Tipo de óleo | Porcentagem | Atendeu ao requerido por norma? | Norma | | |
|---|-----------------------|-------------|--|--|--|-------------------------------------|
| Viscosidade Brookfield | Óleo de soja novo | 10 |  | Norma TAL AB8 800-2000cP | | |
| | | 15 | | | | |
| | | 20 | | | | |
| | Óleo de milho residuo | 10 | | | | |
| | | 15 | | | | |
| | | 20 | | | | |
| | Óleo de milho novo | 10 | | | | |
| | | 15 | | | | |
| | | 20 | | | | |
| Ponto de Amolecimento (Não envelhecido) | Óleo de soja residuo | 10 |  | T>46°C (ABNT 6560/16 e ASTM D36) | | |
| | | 15 |  | | | |
| | | 20 |  | | | |
| | Óleo de soja novo | 10 |  | | | |
| | | 15 |  | | | |
| | | 20 |  | | | |
| | Óleo de milho residuo | 10 |  | | | |
| | | 15 |  | | | |
| | | 20 |  | | | |
| | Óleo de milho novo | 10 |  | | | |
| | | 15 |  | | | |
| | | 20 |  | | | |
| Ponto de Amolecimento pós envelhecimento em curto prazo | Óleo de soja residuo | 10 |  | $\Delta T < +8^{\circ}\text{C}$ (NBR 6560/2016) | | |
| | | 15 | | | | |
| | | 20 | | | | |
| | Óleo de soja novo | 10 | | | | |
| | | 15 | | | | |
| | | 20 | | | | |
| | Óleo de milho residuo | 10 | | | | |
| | | 15 | | | | |
| | | 20 | | | | |
| | Óleo de milho novo | 10 | | | | |
| | | 15 | | | | |
| | | 20 | | | | |
| Variação em massa | Óleo de soja residuo | 10 |  | Variação máxima=1% ABNT/NBR 15235/09 | | |
| | | 15 | | | | |
| | | 20 | | | | |
| | Óleo de soja novo | 10 | | | | |
| | | 15 | | | | |
| | | 20 | | | | |
| | Óleo de milho residuo | 10 | | | | |
| | | 15 | | | | |
| | | 20 | | | | |
| | Óleo de milho novo | 10 | | | | |
| | | 15 | | | | |
| | | 20 | | | | |
| Ponto de fulgor | Óleo de soja residuo | 10 |  | Mínimo=230°C ABNT NBR 11341/2008 | | |
| | | 15 | | | | |
| | | 20 | | | | |
| | Óleo de soja novo | 10 | | | | |
| | | 15 | | | | |
| | | 20 | | | | |
| | Óleo de milho residuo | 10 | | | | |
| | | 15 | | | | |
| | | 20 | | | | |
| | Óleo de milho novo | 10 | | |  | Mínimo=230°C ABNT NBR 11341/2008 |
| | | 15 | | | | |
| | | 20 | | | | |

Quadro 12: Resumo das conclusões obtidas (continua)

| Ensaio | Tipo de óleo | Porcentagem | Atendeu ao requerido por norma? | Norma |
|--|-----------------------|-------------|--|---|
| Ponto de fulgor | Óleo de milho novo | 10 |  | Mínimo=230°C ABNT NBR 11341/2008 |
| | | 15 | | |
| | | 20 | | |
| Rigidez para a temperatura de (-30°C) | Óleo de soja residuo | 10 |  | SUPERPAVE Máx. 300Mpa - aos 60s |
| | | 15 | | |
| | | 20 | | |
| | Óleo de soja novo | 10 | | |
| | | 15 | | |
| | | 20 | | |
| | Óleo de milho residuo | 10 | | |
| | | 15 | | |
| | | 20 | | |
| | Óleo de milho novo | 10 | | |
| | | 15 | | |
| | | 20 | | |
| Valor-m para a temperatura de (-30°C) | Óleo de soja residuo | 10 |  | SUPERPAVE Min. 0,30 - aos 60s |
| | | 15 |  | |
| | | 20 |  | |
| | Óleo de soja novo | 10 |  | |
| | | 15 |  | |
| | | 20 |  | |
| | Óleo de milho residuo | 10 |  | |
| | | 15 |  | |
| | | 20 |  | |
| | Óleo de milho novo | 10 |  | |
| | | 15 |  | |
| | | 20 |  | |
| Cisalhamento dinâmico (Não envelhecido e envelhecido em curto prazo) | Óleo de soja residuo | 10 | Até a temperatura de 76°C ☆ | Não envelhecido SUPERPAVE $ G^* /\text{sen}(\delta) > 1\text{KPa}$ Envelhecido em curto prazo SUPERPAVE $ G^* /\text{sen}(\delta) > 2,2\text{KPa}$ |
| | | 15 | Até a temperatura de 58°C | |
| | | 20 | Até a temperatura de 64°C | |
| | Óleo de soja novo | 10 | Até a temperatura de 76°C ☆ | |
| | | 15 | Até a temperatura de 58°C | |
| | | 20 | Até a temperatura de 64°C | |
| | Óleo de milho residuo | 10 | Até a temperatura de 76°C ☆ | |
| | | 15 | Até a temperatura de 58°C | |
| | | 20 | Até a temperatura de 64°C | |
| | Óleo de milho novo | 10 | Até a temperatura de 76°C ☆ | |
| | | 15 | Até a temperatura de 58°C | |
| | | 20 | Até a temperatura de 64°C | |
| Cisalhamento dinâmico (Envelhecido em longo prazo) | Óleo de soja residuo | 10 | Temperatura inferiores a -05°C | SUPERPAVE $ G^* /\text{sen}(\delta) < 5000\text{KPa}$ |
| | | 15 | | |
| | | 20 | | |
| | Óleo de soja novo | 10 | | |
| | | 15 | | |
| | | 20 | | |

Quadro 12: Resumo das conclusões obtidas (conclusão)

| Ensaio | Tipo de óleo | Porcentagem | Atendeu ao requerido por norma? | Norma |
|---|-----------------------|-------------|---------------------------------|--|
| Cisalhamento dinâmico (Envelhecido em longo prazo) | Óleo de milho resíduo | 10 | Temperatura inferiores a -05°C | SUPERPAVE $ G^* _{\text{sen}(\delta)} < 5000\text{KPa}$ |
| | | 15 | | |
| | | 20 | | |
| | Óleo de milho novo | 10 | | |
| | | 15 | | |
| | | 20 | | |

Por fim, afirma-se que o óleo é capaz de reduzir a viscosidade rotacional do ligante asfáltico modificado com borracha, contudo não garante que as características de resistência ao trincamento por fadiga, ao trincamento térmico e à deformação permanente serão mantidas. Acredita-se que para obter melhores resultados é preciso reduzir a quantidade de óleo utilizada, pois percebeu-se que menores teores de óleo apresentam melhor comportamento mecânico.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Reduzir a quantidade de borracha utilizada e conseqüentemente a porcentagem de óleo empregada a fim de analisar o comportamento desse CAP modificado;
- Realizar mais estudos com relação à redução da temperatura, utilizando outras temperaturas, porcentagens de adição de óleo, entre outros;
- Analisar outros tempos e velocidades de mistura mecânica para produção dos CAP's modificados para esta mesma pesquisa;
- Avaliar o desempenho de misturas asfálticas utilizando o CAP modificado com borracha e óleo.

REFERÊNCIAS

ABIOVE. Associação Brasileira das Indústrias de óleos Vegetais, 2019. Disponível em: <<http://www.abiove.org.br/site/index.php?page=estatistica&area=NC0yLTE=>>. Acesso em: 28 de março de 2019.

ABRELPE, A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019. São Paulo, p. 68. 2019. Disponível em: https://www.migalhas.com.br/arquivos/2020/1/492DD855EA0272_PanoramaAbrelpe_-2018_2019.pdf. Acesso em: 28 de março de 2019.

ABREN, Associação Brasileira de recuperação energética de resíduos. **Contribuição para Consulta Pública**. Upside finance. Brasília, p. 28. 2019. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/consultas-publicas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&_participacaopublica_WAR. Acesso em 18 de abril de 2020.

AL-KHATEEB, G. G.; RAMADAN , E. Z. **Investigation of the effect of rubber on rheological properties of asphalt binders using superpave DSR**. KSCE Journal of Civil Engineering, Jordan, p. 127-135, January 2015. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s12205-012-0629-2>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2020.

AL-OMARI, A. ; KHEDAYWI, T. S.; KHASAWNEH, M. A. **Laboratory characterization of asphalt binders modified with waste vegetable oil using SuperPave specifications**. International Journal of Pavement Research and Technology, Jordan, January 2018. 68-76. ISSN: 1996-6814, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.09.004>. Acesso em: 05 de março de 2020.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO R 28: **Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV)**. Washington, DC, p. 11. 2012.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 313: **Standard Method of Test for Determining the Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using the Bending Beam Rheometer (BBR)**. Washington, DC, p. 22. 2012.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 315-12: **Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)**. Washington, DC, p. 33. 2012.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 240: **Standard Method of Test for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test)**. Washington, DC, p. 12. 2013.

ANIP. Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos. **Mercado nacional de pneus em 2018**. Disponível em: <<http://www.anip.org.br/anip-em-numeros/publicacoes/>>. Acesso em: 20 de abril de 2019.

ANTUNES, E. J. **Uma análise do asfalto convencional e do asfalto ecológico**. Babilônia, Rio de Janeiro , n. 6, p. 71-84, Janeiro 2020. Disponível em: <http://www.ebrevistas.eb.mil.br/index.php/RB/article/view/3305>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2020.

APROBIO - Associação dos Produtos de Biodiesel do Brasil. **Brasil recicla 30 milhões de litros de óleo de cozinha na produção de biodiesel**, 2017. Disponível em: <<https://aprobio.com.br/2017/01/10/brasil-recicla-30-milhoes-de-litros-de-oleo-de-cozinha-na-producao-de-biodiesel/>>. Acesso em: 23 de janeiro de 2019.

ARAÚJO, V. F. D. **Coprocessamento de pneus inservíveis na indústria cimenteira**. Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFRS - Scientia Tec, Rio Grande do Sul, dezembro, 2018. 169-192. Disponível em: <https://doi.org/10.35819/scientiatec.v5i2.3020>. Acesso em: 08 de fevereiro de 2020.

ARIYAPIJATI, R. H.; HADIWARDYO, S. P.; SUMABRATA, J. **Contributions crumb rubber in hot mix asphalt to the resilient modulus**. AIP Conference Proceedings, iNDONESIA, p. 1-6, June, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.4985475>. Acesso em: 14 de fevereiro em 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 15184: **Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional**. Rio de Janeiro, p. 4. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 6576: **Materiais asfálticos - Determinação da penetração**. Rio de Janeiro, p. 5. 2007.

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, p. 15. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT NBR 6560: **Ligantes asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do anel e bola**. Rio de Janeiro, p. 7. 2016.

AZAHAR, W. N. A. W. et al. **Chemical modification of waste cooking oil to improve the physical and rheological properties of asphalt binder**. *Construction and Building Materials*, Malaysia, 126, November, 2016. p. 218-226 ISSN: 0950-0618, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.032>. Acesso em: 12 de março de 2020.

AZAHAR, W. N. A. W. et al. **X-Ray Diffraction Analysis of Bitumen Containing Untreated and Treated Waste Cooking Oil**. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, Malaysia, n. https://www.researchgate.net/profile/Ramadhansyah_Putra_Jaya/publication/337884815_X-Ray_Diffraction_Analysis_of_Bitumen_Containing_Untreated_and_Treated_Waste_Cooking_Oil/links/5df0549492851c8364738e8d/X-Ray-Diffraction-Analysis-of-Bitumen-Containing-Unt, p. 434-437, November, 2019. Disponível em: doi: 10.35940/ijrte.C1020.1183S319. Acesso em: 02 de fevereiro de 2020.

AZIZ, M. M. A.; MOHD, M. T. R.; BAKAR, W. A. W. A. **An overview on alternative binders for flexible pavement**. *Construction and Building Materials*, junho, 2015. p315-319. ISSN: 0950-0618; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.068>. Acesso em: 10 de fevereiro de 2020.

BARROS, A. G. D. et al. **Avaliação das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Modificadas com Adição do óleo da Soja e do óleo de Milho**. XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET, Recife, 29-01 Outubro/Novembro 2017. Disponível em: <http://146.164.5.73:30080/tempsite/anais/documentos/2017/Infraestrutura/Ligantes%20e%20Misturas%20Asfálticas%20I/3_236_AC.pdf>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2019.

BARROS, C. S. et al. **Destinação do resíduo de óleo de cozinha usado de lanchonetes na cidade de Forquilha - CE.** XX ENGEMA, Ceará, p. 1-13, dezembro, 2018. ISSN 2359-1048; Disponível em: <http://engemausp.submissao.com.br/20/anais/arquivos/148.pdf>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2020

BEHNOOD, A.; GHAREHVERAN, M. M. **Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders.** European Polymer Journal, USA, v. 112, p. 766-791, março, 2019. ISSN 0014-3057; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049>. Acesso em: 15 de março de 2020.

BEHNOOD, A.; GHAREHVERAN, M. M. **Morphology, rheology, and physical properties of polymer-modified asphalt binders.** European Polymer Journal, USA, v. 112, p. 766-791, march, 2019. ISSN 0014-3057; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.10.049>. Acesso em: 15 de março de 2020

BERNUCCI, L. B. et al. **Ligantes Asfálticos. In: Pavimentação Asfáltica, Formação para Engenheiros.** 1. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Abeda, 2006. Cap. 02, p. 504. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2018/03/Cap-2-Ligantes-asf%C3%A1lticos.pdf>>. Acesso em: 15 de outubro de 2018.

BESSEN, G. R. et al. **Coleta Seletiva na Região Metropolitana de São Paulo: Impactos da Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Ambiente & Sociedade, São Paulo, v. XVII, n. 3, p. 259-278, 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/asoc/v17n3/v17n3a15.pdf>>. Acesso em: 19 de fevereiro de 2019.

BONAPARTE, M. E. **A indústria automóvel e o caminho para a sustentabilidade.** Instituto Politécnico de Setúbal. Portugal, p. 1-88. 2019. Disponível em: <https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/27758/1/Disserta%c3%a7%c3%a3o%20Marisa%20final%20160327024.pdf>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2020.

BUSATO, A.; STUMM, C. A.; NOVELLO, N. C. **Descarte de Óleo de Cozinha e Gordura Vegetal em Restaurantes Comerciais.** Ciências do Ambiente On-line, São Paulo, v. 10, Dezembro 2014. Disponível em: <<http://sistemas.ib.unicamp.br/be310/nova/index.php/be310/article/view/378/346>>. Acesso em: 28 de janeiro de 2019.

CALANCA, C. G.; GROSSI, S. D. F. **Conscientização popular a partir da reciclagem do óleo de cozinha para a fabricação caseira de sabão em barra.** Revista Interface Tecnológica, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 417-425, 2019. ISSN 2447-0864; Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/index.php/interfacetecnologica/article/view/576>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2020.

CAMARGO, F. F.; BERNUCCI, L. **Case history study: field monitoring and performance prediction of a field-blended rubber asphalt mixture in Brazil.** International Journal of Pavement Engineering, Brasil, v. 20, n. 2, p. 172-182, February 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1279484>. Acesso em: 03 de março de 2020.

CAO, X. et al. **Investigation of rheological and chemical properties asphalt binder rejuvenated with waste vegetable oil.** Construction and Building Materials, China, v. 180, p. 455-463, August 2018. ISSN 0950-0618; Acesso em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.001>. Disponível em: 14 de março de 2020.

CAPELAS JR, Afonso. **Reciclagem de pneus bate recorde no Brasil**. Revista exame, editora e comércio Valongo LTDA, 2014, São Paulo. Disponível em: <https://exame.com/tecnologia/reciclagem-de-pneus-bate-recorde-no-brasil/>. Acesso em: 25 de setembro de 2020.

CAPUANO, D. et al. **Direct use of waste vegetable oil in internal combustion engines**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Italy, v. 69, p. 759-770, March 2017. ISSN 1364-0321; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.016>. Acesso em: 14 de março de 2020.

CARVALHO, J. R. **Estudo do Comportamento do Asfalto Modificado com óleo de Girassol Visando a Obtenção de Misturas Mornas**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande - PB, p. 124. 2018.

CARVALHO, R. et al. **Estudo das Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Contendo Ligante Asfáltico com Adição de óleo de Girassol**. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Gramado, 04-07 Novembro 2018. Disponível em: http://146.164.5.73:30080/tempsite/anais/documentos/2018/Infraestrutura/Ligantes%20e%20Misturas%20Asfalticas%20IV/3_666_AC.pdf. Acesso em: 14 de março de 2019.

CESAN. Companhia Espírito-santense de Saneamento. **Cesan alerta sobre descarte correto de dejetos para evitar retorno de esgoto**, 2016. Disponível em: <https://www.cesan.com.br/noticias/cesan-alerta-sobre-descarte-correto-de-dejetos-para-evitar-retorno-de-esgoto/>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2019.

CHEN, M. et al. **Physical, chemical and rheological properties of waste edible vegetable oil rejuvenated asphalt binders**. *Construction and Building Materials*, China, v. 66, p. 286-298, 15 Setembro 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061814005169>. Acesso em: 24 de fevereiro de 2019.

CHEN, Y.-C. **Evaluating greenhouse gas emissions and energy recovery from municipal and industrial solid waste using waste-to-energy technology**. *Journal of Cleaner Production*, Taiwan, v. 192, p. 262-269, August 2018. ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.260>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2020.

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*, China, 234, 10 October 2019. p. 1262-1274. ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.147>. Acesso em: 21 de março de 2020.

CNI, C. N. D. I. **Recuperação energética de resíduos sólidos: um guia para tomadores de decisão**. Brasília, p. 116. 2019. (ISBN: 978 - 85 - 7957 - 219 - 7). Disponível em: https://bucket-gw-cni-static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/filer_public/65/7c/657cbd15-9b11-4431-be28-b1b9f3047e0e/recuperacao_energetica_de_residuos_solidos_um_gui_a_para_tomadores_de_decisao.pdf. Acesso em: 28 de março de 2020.

COLLINS, N. P. et al. **Reutilização de pneus inservíveis: Uma proposta ecológica**. *Revista Multidisciplinar Estácio*, Amazonas, v. 4, n. 2, p. 1-15, 2018. ISSN 2525-8508; Disponível em: <http://revistaadmmade.estacio.br/index.php/pkcroraima/article/view/6238/47965377>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2020.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento, 2016. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/1861-a-producao-de-graos-20162017-esta-entre-2109-e-2151-milhoes-de-toneladas-20161110>. Acesso em: 17 de fevereiro de 2019.

CONKE, L. S. **Barriers to waste recycling development: Evidence from Brazil.** *Resources, Conservation and Recycling*, Brasília, v. 134, p. 129-135, July 2018. ISSN 0921-3449. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.03.007>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2020.

COSTA, D. A. D.; LOPES, G. R.; LOPES, J. R. **Reutilização do óleo de fritura como uma alternativa de amenizar a poluição do solo.** *Monografias Ambientais - REMOA*, Santa Maria, v. 14, n. Especial, p. 243-253, 2015. ISSN 2236 1308.

COSTA, D. B. et al. **Influência da adição do óleo de linhaça nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo.** 44^a RAPv - Reunião Anual de Pavimentação/ 18^o ENACOR - Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Foz do Iguaçu, Agosto 2015. Disponível em: http://sinicesp.org.br/44rapv/trabalhos/TrabalhoFinal_195.pdf. Acesso em: 25 de fevereiro de 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT 155/2010-ME; *Materiais Asfálticos - Determinação da Penetração - Método de Ensaio*. Rio de Janeiro. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO - DETRAN, 2019. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/index.php/estatistica/237-frota-veiculos>. Acesso em: 16 de abril de 2019.

DIAB, A.; YOU, Z. **Small and large strain rheological characterizations of polymer- and crumb rubber-modified asphalt binders.** *Construction and Building Materials*, USA, v. 144, p. 168-177, July, 2017. ISSN 0950-0618; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.175>. Acesso em: 21 de fevereiro de 2020

FARIA, J. S. D. **Incorporação de Resíduo Pó de Borracha de Pneus Inservíveis em Cerâmica Vermelha.** Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF. Campos dos Goytacazes - RJ, p. 137, 2015.

FAXINA, A. L. **Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante tipo asfalto-borracha.** Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 338, 2002.

FRANÇA, C. G. B. D.; GUARNIERI, P.; DINIZ, J. D. D. A. S. **Logística reversa de óleos de gorduras residuais (OGRs) para a produção de biodiesel.** 54^o Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, Alagoas, p. 1-16, agosto, 2016. Disponível em: <http://icongresso.itarget.com.br/tra/arquivos/ser.6/1/6474.pdf>. Acesso em: 15 de março de 2020.

FRANÇA, J. R.; ROSSETO, M. R.; DECKER, A. T. **Reutilização como destinação adequada para pneus usados.** VII Fórum de sustentabilidade, Rio Grande do Sul, p. 1-4, Junho, 2018. Disponível em: <http://200.19.0.178/index.php/trabalhos/article/view/8299/2080>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2020.

GOMES, T. S. et al. **End-of-Life Tire Destination from a Life Cycle Assessment Perspective. New Frontiers on Life Cycle Assessment - Theory and Application**, UK, January 2019. Disponível em: doi: 10.5772/intechopen.82702; Acesso em: 10 de fevereiro de 2020.

GRECA ASFALTOS, **Contabilidade ecológica do ECOFLEX em tempo real. Fatos e Asfaltos**, Araucária, n. 27, Maio, 2020. Disponível em: <http://www.grecaasfaltos.com.br/blog/contabilidade-ecologica-do-ecoflex-em-tempo-real/>. Acesso em: 30 de maio de 2020.

GUIMARÃES, M. E. **Efeito da adição de resíduos de polietileno de alta densidade e borracha de pneus em ligante asfáltico 50/70**. Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Foz do Iguaçu, p. 97. 2019. Disponível em em: https://dspace.unila.edu.br/bitstream/handle/123456789/5212/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Marcio_Evandro_Guimar%C3%A3es.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Acesso em: 15 de junho de 2020.

GUIMARÃES, M. E.; SOUZA, R. O. D. **Ligantes asfálticos modificados com resíduos: uma revisão de literatura**. Simpósio de transportes do Paraná, Curitiba, PR, v. 1º STPR, p. 141-151, Março, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/1stpr2018.artcomp14p141-151>. Acesso em: 20 de março de 2019.

HAININ, M. R. et al. **Performance of Modified Asphalt Binder with Tire Rubber Powder**. Jurnal Teknologi, Malaysia, v. 73, n. 4, p. 55-60, January, 2015. ISSN 2180-3722; Disponível em: <https://jurnalteknologi.utm.my/index.php/jurnalteknologi/article/view/4288/3002>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2020.

HASAN, M. R. M.; YOU, Z. **Ethanol based foamed asphalt as potential alternative for low emission asphalt technology**. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), USA, v. 3, n. 2, p. 116-126, April, 2016. ISSN 2095-7564; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2016.03.001>. Acesso em: 09 de março de 2020.

HIRATO, T.; HIMENO, K.; MURAYAMA, M. **A Study of Longitudinal Crack Which Occurs to the Surface of Asphalt Pavement by Wheel Tracking Test**. 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements, Japan, v. 13, p. 81-87, May, 2016. ISSN 978-94-024-0867-6; Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-024-0867-6_12. Acesso em: 10 de maio de 2020.

ITEGO, R. **Caderno Didático de Borracheiro. Cadernos da Rede**. Goiás, p. 697-739. 2018. Disponível em: <http://www.ead.go.gov.br/cadernos/index.php/CDP/article/view/264>. Acesso em: 20 de março de 2020.

Jl, et al. **Effectiveness of Vegetable Oils as Rejuvenators for Aged Asphalt Binders**. Special Collection on Emerging Applications of Computational Fluid Dynamics in Water Treatment, Beijing, 2017. Disponível em: [https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001769](https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001769). Acesso em: 14 de março de 2020.

Jl, J. et al. **Effectiveness of Vegetable Oils as Rejuvenators for Aged Asphalt Binders**. Journal of Materials in Civil Engineering, October 2016. V. 29 n. 3; ISSN 0899-1561. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001769](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001769). Acesso em: 15 de abril de 2019.

KASANAGH, S. H. et al. **Rheological properties of asphalt binders modified with recycled materials: A comparison with Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)**. Construction and Building Materials, Turkey, V. 230; ISSN: 0950-0618; Janeiro, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117047>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2020.

KHANDELWAL, H. et al. **Application of life cycle assessment in municipal solid waste management: A worldwide critical review**. Journal of Cleaner Production, India, v. 209, p. 630-654, February 2019. ISSN 0959-6526. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.233>. Acesso em: 09 de março de 2020.

KONRAD, O.; CALDERAN, T. B. **A preservação ambiental no visão política nacional dos resíduos sólidos**. Âmbito Jurídico, Rio Grande, Junho 2011. Disponível em: <http://www.ambito-juridico.com.br/site/index.php?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=9750>. Acesso em: 17 de março de 2019.

KUMAR, P.; YADAV, H. I. **Behavior of Concrete Using Copper Slag As A Strength Parameter in Low Cost Construction Work.** International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD), India, 5 August 2019. V. 3; p. 1290-1297; Issue-5. Disponível em: <https://www.ijtsrd.com/papers/ijtsrd26689.pdf> . Acesso em: 10 de março de 2020.

LAGARINHOS, C. A.; TENORIO, J. A. S. **Tecnologias Utilizadas para a Reutilização, Reciclagem e Valorização Energética de Pneus o Brasil.** Polímeros, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 106-228, Junho 2008. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0104-14282008000200007>>. Acesso em: 15 de outubro de 2018.

LI, G. et al. **Development of waste tire modified concrete.** Cement and Concrete Research, USA, v. 34, n. 12, p. 2283-2289, December, 2004. ISSN 0008-8846; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.013>. Acesso em: 13 de março de 2020.

LUCENA, C. D. F. L.; SILVEIRA, I. V. D.; COSTA, B. D. **Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera Lam para uso em misturas mornas.** Matéria, v. 21, n. 01, p. 72-82, 2016. ISSN 1517-7076. Acesso em: 24 de março de 2019.

MAJIDIFARD, H.; TABATABAEE, N.; BUTTLAR, W. **Investigating short-term and long-term binder performance of high-RAP mixtures containing waste cooking oil.** Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), USA, v. 6, p. 396-406, August 2019. ISSN 2095-7564; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2018.11.002>. Acesso em: 20 de março de 2020.

MASHAAN, N.; REZAGHOLILOU, A.; NIKRAZ, H. **Review on Using Waste Polymer as Additive in asphalt Mixture; International Journal of Advances in Science, Engineering and Technology.** International Journal of Advances in Science, Engineering and Technology , Australia, v. 7, n. 2, p. 58-60, November 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/333445659_Review_on_Using_Waste_Polymer_as_Additive_in_asphalt_Mixture_International_Journal_of_Advances_in_Science_Engineering_and_Technology_IJASEAT_Vol_7_issue_p58-60. Acesso em: 15 de fevereiro de 2020.

MASSON, T. J. et al. **Asfalto-Borracha: Incorporação de Pneus no Asfalto.** XVIII Safety, Health and Environment World Congress, Vila Real, Portugal, 09-12 July, 2017. Disponível em: <http://copec.eu/shewc2017/proc/works/14.pdf> . Acesso em: 18 de Janeiro de 2019.

MENEGAKI, M.; DAMIGOS, D. **A review on current situation and challenges of construction and demolition waste management.** Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, Greece, v. 13, p. 8-15, October 2018. ISSN 2452-2236; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.02.010>; Acesso em: 14 de março de 2020.

MENG, G.; AMIT, B.; YIQIU, T. **Effect of mineral fillers adsorption on rheological and chemical properties of asphalt binder.** Construction and Building Materials, Chna, v. 141, p. 152-159, Junho, 2017. ISSN 0950-0618; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.051>. Acesso em: 04 de março de 2020.

MENG, Y.; LING, T.-C.; MO, K. H. **Recycling of wastes for value-added applications in concrete blocks: An overview.** Resources, Conservation and Recycling, China, v. 138, November, 2018. ISSN 0921-3449; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.029>, p. 298-312. Acesso em: 04 de março de 2020.

MIRÓ, R. et al. **Effect of ageing and temperature on the fatigue behaviour of bitumens.** Materials & Design, Sapin, Dezembro, 2015. p. 129-137. ISSN: 0264-1275; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.076>. Acesso em: 28 de março de 2020.

MUCKE, J. D. S.; RIBEIRO, V. F.; TUBINO, R. M. C. **Coprocessamento: Estudo de caso da utilização de pneus inservíveis na fabricação de cimento**. Forum Internacional de Resíduos Sólidos, João Pessoa, p. 1-9, Junho, 2019. Disponível em: www.firs.institutoventuri.org.br. Acesso em: 14 de fevereiro de 2020.

NAYAK, P.; SAHOO, U. C. **A rheological study on aged binder rejuvenated with Pongamia oil and Composite castor oil**. *International Journal of Pavement Engineering*, Bhubaneswar, India, November 2015, p. 595-607. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10298436.2015.1103851>. Acesso em: 14 de abril de 2019.

NIKFEKR, M. **Investigation of crude oil emulsion stability**. *Universiti Teknologi Petronas*. Tronoh, Perak, p. 1-37. 2015. Disponível em: <http://utpedia.utp.edu.my/16853/1/Mehdi%20Nikfekr%2015744%20PE%20%20FYP%20II%20.pdf>. Acesso em: 14 de março de 2020.

ODA, S. **Análise da Viabilidade Técnica da Utilização do Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação**. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 280. 2000. Disponível em: DOI: 10.11606/T.18.2018.tde-30012018-151928. Acesso em: 15 de abril de 2019.

OIL WORLD ANNUAL. **Enciclopédia única d previsões e estatísticas mundiais para todas as principais sementes oleaginosas, óleos e gorduras**. ISTA Mielke GmbH. Hamburgo, p. 680. 2018. Disponível em: <https://www.oilworld.biz/p/annual-2019-cd-rom>. Acesso em: 20 de abril de 2019.

OLIVEIRA, D. D. C. et al. **Identificação de manifestações patológicas em pavimentos asfálticos na cidade de Santa Margarida - MG**. *Pensar Acadêmico*, Munhuaçu, v. 17, n. 1, p. 33-42, 2019. ISSN 1808-6136. Disponível em: <https://doi.org/10.21576/rpa.2019v17i1.703>. Acesso em: 19 de abril de 2019.

OLIVEIRA, R. B. **Estudo sobre o efeito do ccbt-113ad no comportamento mecânico de misturas asfálticas**. *Universidade Federal de Sergipe*. São Cristóvão, p. 96. 2014. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/5008>. Acesso em: 14 de março de 2019.

OSMARI, P. H. **Caracterização química, reológica e de morfologia superficial de ligantes asfálticos modificados por diferentes agentes rejuvenescedores**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 133. 2016.

OSMARI, P. H.; ARAGÃO, T. S. **Avaliação do resíduo de óleo vegetal como agente rejuvenecedor de ligantes a partir de análises reológicas e de morfologia de superfície**. *Transportes*, Ouro Preto - MG, v. 24, n. 3, 2016. ISSN 2237-1346. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/transportes.v24i3.1147>. Acesso em: 25 de janeiro de 2019.

OZTURK, H. I.; KUTAY, M. E. **Sensitivity of Nozzle-Based Foamed Asphalt Binder Characteristics to Foaming Parameters**. *Sage Journals*, East Lansing, Michigan, v. 2444, n. 1, p. 120-129, January 2014. ISSN Disponível em: <https://doi.org/10.3141/2444-14>. Acesso em: 14 de março de 2020.

PARRA, C. V.; NASCIMENTO, A. P. B. D.; FERREIRA, M. L. **Reutilização e reciclagem de pneus, e os problemas causados por sua destinação incorreta**. XIV Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e X Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, Paraíba, 2010. 5. Disponível em: http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2010/anais/arquivos/0908_0988_01.pdf. Acesso em: 26 de abril de 2019.

PATIL, S. B. et al. **Use of waste tyres in road construction. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, India, december, 2016. p. 525-528. ISSN: 2395 -0056; Disponível em: <https://www.irjet.net/archives/V3/i12/IRJET-V3I1296.pdf>. Acesso em: 14 de abril de 2019.

PENNA, L. F. D. R. et al. **Destino final de pneus inservíveis: estudo de caso - Governador Valadares - MG. VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Campo Grande/MS**, p. 1-8, novembro, 2017. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2017/III-026.pdf>. Acesso em: 20 de março de 2020.

PEREIRA, F. D. S. **Impermeabilização de lajes de cobertura com manta asfáltica**. Uninorte - Departamento de Ciências Exatas, Manaus, Amazonas, p. 1-24, 2018. ISSN 2236-6717; Disponível em: https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_impermeabilizacao_em_lajes_de_cobertura_com_manta_asfaltica.pdf. Acesso em: 14 de março de 2019.

PIMENTEL, U. H. O. **Análise da Geração de Resíduos da Construção Civil da Cidade de João Pessoa/PB**. Universidade Federal da Bahia. Salvador, BA, p. 190. 2013.

PIYATHILAKA, A.; RANAWEERA, S.; SEWWANDIKA, N. **Pyrolysis as a Sustainable Waste Management Solution to Dispose Discarded Waste Tires**. Department of Forestry and Environmental Science, University of Sri Jayewardenepura, Citrus Waskaduwa, Waskaduwa. Sri Lanka, p. 137. 2018. ISSN: 2235-9427; Disponível em: <http://dr.lib.sjp.ac.lk/handle/123456789/8239>. Acesso em: 15 de março de 2020.

PIZZORNO, B. D. S. **Efeito do Solvente e da Temperatura na Morfologia Superficial do Cimento Asfáltico de Petróleo**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 120. 2010.

POKORSKI, ; RADZISZEWSKI, ; SARNOWSKI,. **Fatigue Life of Asphalt Pavements on Bridge Decks. Procedia Engineering, Warsaw**, Poland , v. 153, p. 556-562, 2016. ISSN 1877-7058; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.191>. Acesso em: 17 de março de 2019.

POLACCO, G. et al. **A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility**. Advances in Colloid and Interface Science, Italy, october, 2015. p. 72-112. ISSN: 0001-8686. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2015.07.010> . Acesso em: 17 de março de 2020.

POOVANESHVARAN, S.; HASAN, M. R. M.; JAYA, R. P. **Impacts of recycled crumb rubber powder and natural rubber latex on the modified asphalt rheological behaviour, bonding, and resistance to shear**. Construction and Building Materials, Malaysia, february, 2020. v. 234; ISSN: 0950-0618. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117357>. Acesso em: 20 de março de 2020.

PORTUGAL, A. C. X. **Avaliação Reológica de Cimentos sfálticos de Petróleo Modificados com Óleo de Soja e de Milho**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande - PB, p. 126. 2016.

PORTUGAL, A. C. X. et al. **Rheological properties of asphalt binders prepared with maize oil. Construction and Building Materials**, Campina Grande, 152, 15 July 2017. p. 1015-1026. Disponível em: ["https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2Fdx.doi.org%2F10.1016%2Fj.conbuildmat.2017.07.077" \t "_blank"](https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2Fdx.doi.org%2F10.1016%2Fj.conbuildmat.2017.07.077) 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.077 . Acesso em: 14 de março de 2020.

PRESTI, D. L.; IZQUIERDO, ; CARRIÓN, A. J. D. B. **Towards storage-stable high-content recycled tyre rubber modified bitumen.** *Construction and Building Materials*, Reino Unido, v. 172, p. 106-111, 2018. ISSN 0950-0618; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.22>. Acesso em: 17 de março de 2019.

QASIM, G. J.; TAYH, S. A.; YOUSIF, R. A. **Influence of Tire Crumb Rubber on Properties of Asphalt.** *Materials Science and Engineering*, Bagdad, Iraq, 05 June 2019. 1-8. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/518/2/022066> Acesso em 22 de março de 2020.

RAHMAN, M. T.; HAININ, M. R.; BAKAR, W. A. A. **Use of waste cooking oil, tire rubber powder and palm oil fuel ash in partial replacement of bitumen.** *Construction and Building Materials*, Malaysia, v. 150, p. 95-104, september, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.216> . Acesso em: 26 de janeiro de 2019.

RAMADHANSYAH, P. J. et al. **Waste Cooking Oil as Bio Asphalt Binder: A Critical Review.** *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Malaysia, v. 712, July 2019. ISSN 012040; Disponível em: doi: 10.1088/1757-899X/712/1/012040. Acesso em: 23 de março de 2020.

REIS, P.; SOUZA, R. O. D. **Ligante asfáltico modificado com látex reciclado: uma revisão.** 21º ENACOR - Encontro Nacional de Conservação Rodoviária, Brasília, Novembro 2019.

RIBEIRO, D. R. S. et al. **O impacto da reforma de pneus no ciclo de vida e logística reversa do pneus no Brasil: Um modelo Dinâmico.** Congresso Internacional de Administração, Bolívia, p. 1-15, Agosto 2018. Disponível em: https://admpg2018.com.br/anais/2018/arquivos/06022018_190655_5b1313d36b682.pdf. Acesso em: 24 de março de 2020.

RODACOSKI, J. L.; OLIVEIRA, D. D.; ANDRADE, C. F. S. **Reciclagem do óleo de Cozinha Usado na Costa Verde do Rio de Janeiro - Emissões Evitadas.** *Ciências do Ambiente On-line*, São Paulo, v. 10, n. 2, Dezembro 2014. ISSN 2179-9962. Disponível em: <http://sistemas.ib.unicamp.br/be310/nova/index.php/be310/article/download/437/356>. Acesso em: 02 de abril de 2019.

ROSA, A. P. G. et al. **Análise comparativa entre asfalto modificado com borracha reciclada de pneus e asfalto modificado com polímeros.** *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, Mato Grosso, n. 20, p. 31-38, Novembro 2012. Disponível em: http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art4_N20.pdf. Acesso em: 18 de janeiro de 2019.

RUMSEY DEBORAH. **Estatística II para leigos.** Rio de Janeiro, 2014. Edição I. ISBN 978-85-7608-636-9. 408p.

SABESP. Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Programa de Reciclagem de Óleo de Frituras da SABESP**, 2015. Disponível em: http://site.sabesp.com.br/uploads/file/asabesp_doctos/programa_reciclagem_oleo_completo.pdf . Acesso em: 10 de fevereiro de 2019.

SAMARAKOON, S. M. S. M. K. et al. **Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste.** *Case Studies in Construction Materials*, Norway, v. 11, p. e00259, December 2019. ISSN 2214-5095; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00259>. Acesso em: 14 de março de 2020.

SANTOS, N. G. D. **A logística envolvida no ciclo do revestimento asfáltico**. Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL, Florianópolis, p. 22, 2017. Disponível em: <http://www.riuni.unisul.br/handle/12345/4241>. Acesso em: 12 de março de 2020.

SILVA, Antonio Cleiron Lopes da. **Comportamento mecânico de compósito asfáltico com argila calcinada sob flexão a quatro ponto**. Universidade Federal do Amazonas (UFAM) – Programa de pós-graduação em engenharia de recursos da Amazônia. 129 p. Manaus, 2014. Disponível em: <http://tede.ufam.edu.br/handle/tede/4618>. Acesso em: 28 de setembro de 2020.

SILVA, G. G. **Estudos Reológicos de Aditivos Utilizados na Fabricação de Misturas Mornas**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, p. 125, 2016.

SILVA, L. D.; BENTA, A.; PICADO, L. S. **Asphalt rubber concrete fabricated by the dry process: Laboratory assessment of resistance against reflection cracking**. *Construction and Building Materials*, Portugal, January, 2018. v. 160 p. 539-550. ISSN: 0950-0618; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.081>. Acesso em: 14 de março de 2020.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2019. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-residuos-solidos/diagnostico-rs-2017>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2019.

SOMÉ, C. et al. **Rheological behavior of vegetable oil-modified asphaltite binders and mixes**. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress, Prague, Czech Republic, June 2016. 1-8. Disponível em: [Doi: dx.doi.org/10.14311/EE.2016.222](https://doi.org/10.14311/EE.2016.222). Acesso em: 22 de maio de 2020.

SOUZA, G. R. D.; RIBEIRO, A. G. C. **Waste Cooking Oil Management at Three Gastronomic Establishments in Lavras, Minas Gerais, Brazil: Problems, Prospects and Solutions**. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, Brasil, v. 45, n. 4, p. 403-409, November, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5276/JSWTM/2019.403>. Acesso em: 14 de março de 2020.

SOUZA, R. O. D. **Modification of asphalt mixtures by recycled tire crumbed rubber to achieve their higher performance**. Chuo University - Graduate School of Science. [S.l.], p. 154. 2006.

SOUZA, R.; HIMENO, K. **Efeito do envelhecimento de curto e longo prazo em ligantes asfalto-borracha Japonêses**. XX ANPET, Brasília, 2006.

STATISTA. **Production of major vegetable oils worldwide from 2012/13 to 2018/2019, by type (in million metric tons)**. The Statistics Portal, 2019. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/263933/production-of-vegetable-oils-worldwide-since-2000/>. Acesso em: 10 de abril de 2019.

SUN, D. et al. **Evaluation of optimized bio-asphalt containing high content waste cooking oil residues**. *Fuel*, China, v. 202, p. 529-540, August, 2017. ISSN 0016-2361; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.069>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2019.

SUN, Z. et al. **Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil**. *Construction and Building Materials*, China, 15 Janeiro 2016. v. 102; p. 496-504. ISSN: 0950-0618. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.173>. Acesso em: 14 de abril de 2019.

THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C. **A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, India, v. 54, p. 1323-1333, February 2016. ISSN 1364-0321; Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.092>. Acesso em: 28 de março de 2019.

THUVES, L. P. et al. **Influência do tipo de asfalto base no desempenho mecânico de misturas com asfalto borracha**. XVI CILA - Congresso Ibero-Latinoamericano do Asfalto, Rio de Janeiro, 2011. n. 4; p. 1-8. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/55616162.pdf> . Acesso em: 15 de abril de 2019.

TRIOLA, MARIO F. **Introdução à estatística**. 12. ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2017. ISBN: 978-85-216-3374-1. Disponível em: <http://appcatnov.grupogen.com.br/public/uploads/eaafc798688ba13ce8863e8190d430435.pdf>. Acesso em: 30 de junho de 2020.

TSOUTSOS, T. D. et al. **The Used Cooking Oil-to-biodiesel chain in Europe assessment of best practices and environmental performance**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Greece, v. 54, p. 74-83, February 2016. ISSN 1364-0321; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.039>. Acesso em: 20 de abril de 2020.

VASCONCELOS, M.; SABAINI, M. S. **Avaliação da viscosidade do asfalto modificado com resíduo de óleo de cozinha**. 32º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, Gramado, 07 Novembro 2018. p. 1554-1565. Disponível em: http://146.164.5.73:30080/tempsite/anais/documentos/2018/Infraestrutura/Ligantes%20e%20Misturas%20Asfálticas%20II/6_14_AC.pdf . Acesso em: 17 de março de 2020.

VIVIAN JUNIOR, D. V.; FERREIRA, A. E.; OLIVEIRA, J. C. S. D. **Comparative analysis for viability of paving between rubber and conventional asphalt**. Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications, Manus, v. 05, n. 18, Abril 2019. ISSN 2447-0228; Disponível em: <https://dx.doi.org/10.5935/2447-0228.20190040>. Acesso em: 25 de março de 2020.

WANG, C. et al. **Laboratory investigation on chemical and rheological properties of bio-asphalt binders incorporating waste cooking oil**. Construction and Building Materials, China, v. 167, p. 348-358, April 2018. ISSN 0950-0618; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.038>. Acesso em: 28 de fevereiro de 2020.

WOOLLEY, E.; LUO, Y.; SIMEONE, A. **Industrial waste heat recovery: A systematic approach. Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Reino Unido, v. 29, p. 50-59, October 2018. ISSN 2213-138. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.07.001>. Acesso em: 16 de abril de 2020.

XIAO, F. et al. **Physical and chemical properties of plasma treated crumb rubbers and high temperature characteristics of their rubberised asphalt binders**. Road Materials and Pavement Design, China, 16 Aug 2018. p. 587-606. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1507922> . Acesso em: 17 de março de 2020.

XINXIN, C. et al. **Investigation on Possibility of Waste Vegetable Oil Rejuvenating Aged Asphalt**. Applied Sciences, China, 11 May, 2018. Disponível em: ["https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.3390%2Fapp8050765"](https://www.researchgate.net/deref/http%3A%2F%2Fdx.doi.org%2F10.3390%2Fapp8050765) \t "_blank" 10.3390/app8050765 . Acesso em: 14 de abril de 2020.

XU, G.; WANG, H. **Molecular dynamics study of oxidative aging effect on asphalt binder properties**. Fuel, United States, v. 188, p. 1-10, January 2017. ISSN 0016-2361; Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.10.021>. Acesso em: 19 de março de 2020.

XU, J. et al. Study on the **Effect of Microwave Processing on Asphalt-Rubber**. Materials, China, January 2020. 1-13. Disponível em: doi: 10.3390/ma13020411. Acesso em: 17 de março de 2020.

XU, O. et al. **High temperature rheological properties of crumb rubber modified asphalt binders with various modifiers**. Construction and Building Materials, China, 01 June, 2016. 49-58. ISSN: 0950-0618; Disponível em: HYPERLINK "https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.069" \o "Persistent link using digital object identifier" \t "_blank" https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.069 . Acesso em: 15 de abril de 2020.

YADAV, J. S.; TIWARI , S. K. **The impact of end-of-life tires on the mechanical properties of fine-grained soil: A Review**. Environment, Development and Sustainability, India, n. 21, p. 485–568, April 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10668-017-0054-2. Acesso em: 16 de março de 2020.

YAN, K.; XU, H.; YOU, L. **Rheological properties of asphalts modified by waste tire rubber and reclaimed low density polyethylene**. Construction and Building Materials, China, 15 May 2015. 143-149. ISSN 0950-0618. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.092 . Acesso em: 22 de março de 2020.

YIN, J.; WANG, S.; LV, F. **Improving the short-term aging resistance of asphalt by addition of crumb rubber radiated by microwave and impregnated in epoxidized soybean oil**. Construction and Building Materials, China, December 2013. ISSN 0950-0618; p. 712-719. Disponível em: DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.067. Acesso em: 04 de abril de 2019.

YU, X. et al. **Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders**. Fuel, USA, v. 135, p. 162-171, November 2014. ISSN 0016-2361; Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.038 . Acesso em: 30 de março de 2019.

ZANI, L.; GIUSTOZZI, F.; HARVEY, J. **Effect of storage stability on chemical and rheological properties of polymer-modified asphalt binders for road pavement construction**. Construction and Building Materials, Italy, v. 145, p. 326-335, August 2017. ISSN 0950-0618; Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.014. Acesso em: 17 de março de 2020.

ZHANG, L. et al. **Using DSR and MSCR tests to characterize high temperature performance of different rubber modified asphalt**. Construction and Building Materials, China, v. 127, p. 466-474, November 2016. ISSN 0950-0618; Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.010. Acesso em: 22 de março de 2019.

ZIEGLER , C. R. et al. **Avaliação da adição do óleo de algodão bruto nas propriedades reológicas do cimento asfáltico de petróleo**. XXXI Congresso Nacional de Pesquisa em Transportes da ANPET, Campina Grande, p. 1-13, Outubro 2017. Disponível em: http://146.164.5.73:30080/tempsite/anais/documentos/2017/Infraestrutura/Ligantes%20e%20Misturas%20Asfálticas%20II/7_508_AC.pdf. Acesso em: 29 de janeiro de 2020.

APÊNDICES

<https://drive.google.com/file/d/1EsaLAdv5M4z4LG5VaPc6VWX77BQ1I8z/view?usp=sharing>