



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

MARCELA MARIA TOSCANO KRAU

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO
MODIFICADO COM ADIÇÃO DE ÓLEO VEGETAL RESIDUAL**

CAMPINA GRANDE-PB

2019

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO
MODIFICADO COM ADIÇÃO DE ÓLEO VEGETAL RESIDUAL**

MARCELA MARIA TOSCANO KRAU

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de
Campina Grande – UFCG, para
encerramento do componente curricular e
conclusão da graduação em Engenharia
Civil.

Orientador: Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena

Co-orientador: Paulo Roberto Barreto Torres

CAMPINA GRANDE – PB

2019

MARCELA MARIA TOSCANO KRAU

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DO LIGANTE ASFÁLTICO
MODIFICADO COM ADIÇÃO DE ÓLEO VEGETAL RESIDUAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, para encerramento do componente curricular e conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Aprovada em: ____ de _____ de ____.

BANCA EXAMINADORA

_____ Nota _____

Prof. Dr. Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena - UFCG

(Presidente – Orientador)

_____ Nota _____

Eng^o. Paulo Roberto Barreto Torres

(Coorientador)

_____ Nota _____

Prof. Dra. Carina Silvani- UFCG

(Examinadora Interna)

_____ Nota _____

Msc. Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz

(Examinadora Externa)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao corpo de docentes da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil pelo aprendizado e conteúdo passado ao longo dos anos de graduação.

Aos colegas de laboratório que sempre solícitos me auxiliaram durante os ensaios realizados no LEP.

Ao meu orientador, Adriano Elísio, agradeço por me guiar nessa trajetória acadêmica desde o projeto de pesquisa, passando muito conhecimento e calma durante os períodos de apreensão.

Ao meu co-orientador, Paulo Roberto, por ter me acompanhando nos ensaios laboratoriais e na elaboração deste trabalho.

A minha mãe, que é meu exemplo de força e perseverança, com conselhos e palavras de incentivo me permitiram voar mais alto, mesmo quando pensei que não seria capaz ela me forneceu o apoio e acreditou no meu potencial.

Aos avós maternos, por me acolherem em sua casa como filha durante esses cinco anos.

A meus avós paternos pelo amor incondicional, palavras de carinho e apoio ao longo da minha vida.

A Maria José (Galega), pelo cuidado todos esses anos, sempre preocupada com meu bem-estar, você é um anjo em minha vida.

Aos meus colegas de Campina Grande, um pedaço do meu coração vai ficar nessa cidade com vocês. Muito obrigada por todas as risadas, momentos alegres e tristes que podemos compartilhar nesses cinco anos de curso. Certamente não teria conseguido sem a companhia de vocês. Em especial, agradeço a Marcelo, Sávio, Arthur, Larissa, João e Lázaro. A todos que não foram citados e que sabem do amor que sinto, muito obrigada.

Ao meu grande amigo e amor, Felipe, por seu apoio que foi fundamental para a realização desse trabalho, obrigada por não me deixar desistir e sempre estar presente quando eu mais precisei, obrigada pela compreensão pelos momentos que não pude me fazer presente.

E a todos que colaboraram direta e indiretamente para que este trabalho pudesse ser realizado, meus mais sinceros agradecimentos.

RESUMO

O óleo vegetal residual é obtido em larga escala como um subproduto da indústria alimentícia, porém o excedente ao ser descartado de forma inadequada prejudica o meio ambiente, surgindo interesse na busca de maneiras alternativas para sua destinação. Diante do potencial que o Brasil possui para produção do óleo vegetal residual, e dos resultados satisfatórios da incorporação desse produto na mistura asfáltica, por apresentarem propriedades antioxidantes, e aspirando a redução do descarte no meio ambiente do óleo usado, esta pesquisa propõe um estudo sobre as propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificadas com a adição do óleo vegetal residual, com o intuito de proporcionar: melhoraria no comportamento reológico das misturas asfálticas a fim que estas sejam mais resistentes ao envelhecimento, ao exibir reduzidas deformações permanentes, uma maior vida de fadiga e garantir a sustentabilidade ao reinserir o óleo que já foi utilizado no ciclo produtivo. Assim, esta pesquisa tem o objetivo de estudar a modificação do ligante asfáltico 50/70 com a adição do óleo vegetal residual, nos teores de 1%, 2% e 3%. Nesta pesquisa foram realizados o procedimento de envelhecimento RTFOT, os ensaios físicos convencionais de penetração e ponto de amolecimento, ensaios reológicos de viscosidade rotacional, grau de desempenho (PG), fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR) e varredura linear de amplitude (LAS). Os resultados indicaram aumento da vida de fadiga, a resistência às deformações permanentes e retardaram o processo de envelhecimento, com um destaque positivo para o teor de 2% que apresentou os melhores rendimentos do ponto de vista reológico. Dessa maneira a utilização desse resíduo é uma alternativa viável do ponto de vista reológico, podendo ser também favorável em relação ao meio ambiente por evitar um descarte inapropriado do material e por questões energéticas por reduzir as temperaturas de usinagem e compactação.

Palavras-chave: Óleo vegetal residual. Ligante asfáltico. Reologia.

ABSTRACT

Residual vegetable oil is obtained on a large scale as a by-product of the food industry, but the excess that is improperly disposed of harms the environment, and there is interest in finding alternative ways to dispose of it. Given the potential that Brazil has for the production of residual vegetable oil, and the satisfactory results of incorporating this product in the asphalt mixture, as they have antioxidant properties, and aspiring to reduce the disposal of waste oil in the environment. This research proposes a study on the rheological properties of asphalt binders modified with the addition of residual vegetable oil in order to provide: would improve the rheological behavior of asphalt mixtures so that they are more resistant to aging by exhibiting reduced permanent deformations, longer fatigue life and ensure sustainability by reinserting the oil that has already been used in the production cycle. Thus, this research aims to study the modification of the 50/70 asphalt binder with the addition of residual vegetable oil, in the contents of 1%, 2% and 3%. RTFOT aging procedure, conventional physical penetration and softening point tests, rheological tests of rotational viscosity, degree of performance (PG), creep and multiple stress recovery (MSCR) and linear amplitude scanning (LAS) were performed.). The results indicated increased fatigue life, resistance to permanent deformation and retarded the aging process, with a positive highlight for the 2% content that presented the best rheological yields. Thus, the use of this residue is a viable alternative from a rheological point of view, and may be environmentally friendly as it avoids improper material disposal and due to energy issues as it reduces machining and compaction temperatures.

Keywords: Residual vegetable oil. Asphalt binder. Rheology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processos de mistura da borracha e terminologia.	19
Figura 2. Ligante Puro	27
Figura 3. Óleo de cozinha vegetal residual	28
Figura 4. Sequência de atividades.	29
Figura 5. Agitador Mecânico.....	30
Figura 6. Penetrômetro.....	31
Figura 7. Viscosímetros rotacionais.....	33
Figura 8. RTFOT.	34
Figura 9. Representação esquemática do ensaio de MSCR.....	35
Figura 10. Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFOT.....	39
Figura 11. Resultados do ensaio de ponto de amolecimento antes e após o RTFOT.	41
Figura 12: Índice de susceptibilidade térmica dos ligantes puro e modificados.	42
Figura 13. Resultados do ensaio de viscosidade rotacional antes do RTFOT.	44
Figura 17: Resultados de perda de massa dos ligantes após o RTFOT.	46
Figura 18 : Grau de desempenho para os ligantes puro e modificado.	47
Figura 16: Estimativa de temperatura de falha para os ligantes puro e modificados.	48
Figura 20: Compliância não recuperáveis à 100 e 3200 Pa.	49
Figura 21: Diferença percentual - $J_{nr,diff}$	50
Figura 22: Porcentagem de recuperação à 100 e 3200 Pa.	51
Figura 23: Parâmetro "A" obtido no ensaio LAS.....	52
Figura 24: Parâmetro "B" obtido no ensaio LAS.....	53
Figura 25: Relação entre os valores dos parâmetros "A" e "B".	53
Figura 26: Variação do número de ciclos na ruptura em função da amplitude de deformação para os ligantes asfálticos puro e modificados nos teores de 1, 2 e 3%.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estimativa de teor de óleo de algumas espécies oleaginosas.....	21
Tabela 2: Classificação dos ligantes asfálticos quanto ao valor de Jnr de acordo com a norma AASHTO M320.....	37
Tabela 3: Valores estimados de Jnr para tensão de 3,2 KPa e percentual de recuperação mínimo.....	37
Tabela 4. Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFOT.....	38
Tabela 5. Resultados do ensaio de ponto de amolecimento antes e após o RTFOT.	40
Tabela 6. Resultados do ensaio de viscosidade rotacional antes e após o RTFOT.	43
Tabela 7: Temperatura de Usinagem e Compactação dos ligantes asfálticos puro e modificados.	44
Tabela 8: Resultados de perda de massa dos ligantes após o RTFO.	45
Tabela 9: Estimativa de temperatura de falha para os ligantes puro e modificados.	48
Tabela 10: Valores estimados para vida de fadiga dos ligantes puro e modificados.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%Rec	Percentual de Recuperação
°C	Graus Celsius
AASTHO	American Association of State Highway and Transportation Officials
AMP	Asfaltos Modificados por Polímeros
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
APA	Variação do ponto de amolecimento
ASTM	American Society for Testing and Material
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
Cm	Centímetro
CNT	Confederação Nacional de Transportes
CONAMA	Conselho Nacional do Meio ambiente
Cp	Centipoise
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSR	Reômetro de Cisalhamento Dinâmico
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FHWA	Federal Highway Administration
G	Grama
G'	Módulo de Armazenamento
G''	Módulo de Dissipação
G*	Módulo Complexo de Cisalhamento
G*/senδ	Parâmetro SUPERPAVE para Deformação Permanente
IST	Índice de Suscetibilidade Térmica
Jnr	Complância não recuperável
Kg	Quilograma
kPa	Quilopascal
LAS	Linear Amplitude Sweep
LEP	Laboratório de Engenharia de Pavimentos
MAMs	Misturas Asfálticas Mornas
Mm	Milímetro
MSCR	Multiple Stress Creep Recovery
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora

Nf Número de Ciclos até a Falha
PA Ponto de amolecimento
Pa Pascal
PEN Penetração a 25°C
PG Performance Grade
RET Reactive Elastomeric Terpolymer
Rpm Rotações por Minuto
RTFO Rolling Thin Film Oven Test
SUPERPAVE Superior Performing Asphalt Pavement System
T Temperatura
TC Temperatura de Compactação
TU Temperatura de Usinagem
t Tempo
UFCG Universidade Federal de Campina Grande
VECD Viscoelastic Continuum Damage
 γ_{max} Máxima Deformação
 δ Ângulo de Fase

SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
2. Objetivos.....	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
3. Referencial Teórico.....	16
2.1 Ligante asfáltico.....	16
2.2 Ligante asfáltico modificado	17
2.2.1 Polímeros	18
2.2.2 Borracha.....	19
2.3 Óleo Vegetal.....	20
2.3.1 Produção & Propriedades	20
2.3.2 Destinação Final Pós Uso	21
- Utilização do óleo residual de fritura na produção de resinas	23
- Utilização do óleo residual de fritura na produção de sabões	24
- Utilização do óleo residual de fritura para utilização de ração animal	24
2.3.3 Utilização de óleos vegetais na pavimentação	24
2.3.4 Pesquisas com oleaginosas adicionadas ao Ligante Asfáltico	25
- Guerra (2019).....	25
- Carvalho (2018).....	26
- Portugal (2016).....	26
4. Materiais e métodos.....	27
4.1 Materiais.....	27
4.1.1 Ligante asfáltico.....	27
4.1.2 Óleo de cozinha vegetal residual	27
4.2 Métodos.....	28
4.2.1 Caracterização do ligante puro e ligante + óleo vegetal residual	29

- Ensaio de Penetração	30
- Ensaio de Ponto de Amolecimento	31
- Ensaio de Viscosidade rotacional.....	32
- Procedimento de Envelhecimento a curto prazo (RTFOT).....	33
4.2.2.1. Grau de Performance (PG).....	34
4.2.3.2. Fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR)	35
4.2.3.3 Varredura linear de amplitude de deformação (LAS)	37
5. Resultados e Discussões.....	38
5.1. Reologia Empírica	38
5.1.1 Ensaio de penetração.....	38
5.1.2 Ponto de amolecimento	40
5.2. Reologia Fundamental	42
5.2.1. Viscosidade Rotacional	42
5.2.2. Envelhecimento à curto prazo – RTFO e variação de massa	45
5.2.3. Grau de desempenho– PG.....	46
5.2.4. Fluência e recuperação sob tensões múltiplas - MSCR	48
5.2.5. Varredura linear de amplitude de deformação – LAS.....	51
6. Conclusão.....	56
Referências	57

1. Introdução

O sistema rodoviário é o mais difundido na extensão territorial do Brasil que, atualmente conta com 1.720.700,6 km de extensão, sendo que apenas 213.452,8 km se encontram pavimentados, resultando em 87,6% que ainda carece de pavimentação de acordo com dados obtidos com Confederação Nacional do Transporte (CNT) em novembro de 2018. Este fato evidencia a necessidade de investimentos federais para implantação de novas rodovias, simultaneamente com a requalificação das existentes, principalmente para alcançar a vasta dimensão territorial do país, garantindo acesso e mobilidade a população, reduzindo os acidentes e o desgaste dos veículos.

Priorizar o transporte rodoviário traz várias consequências ambientais para o país, tendo em vista que os pavimentos necessitam de manutenções frequentes devido ao seu desgaste, pois uma vez instalada a rodovia e iniciada a sua operação, começa o processo de deterioração. Pensando-se na otimização desses pavimentos asfálticos, a modificação do ligante com aditivos orgânicos é proposta, buscando prolongar sua vida útil. Aliado a essa busca por uma melhoria do ligante asfáltico com o uso aditivos modificadores, surge a vantagem econômica e ambiental, garantindo a preocupação de se produzir um produto sustentável ao utilizar um material natural reaproveitado que possui vasta disponibilidade no mercado.

O impacto ambiental negativo que a disposição incorreta do óleo vegetal provoca aliado a diversas pesquisas utilizando aditivos orgânicos influenciou na escolha do óleo vegetal residual para ser inserido na mistura asfáltica. Ainda é possível encontrar estudos com produtos naturais associados ao ligante asfáltico, diversas pesquisas já foram desenvolvidas utilizando materiais alternativos em combinação com o ligante asfáltico. A exemplo de Guerra (2019) que utilizou o óleo de canola, Lucena et al. (2018) com o óleo de moringa, Portugal et al. (2017) que com o óleo de milho e soja. Neste contexto, os aditivos naturais (aditivos verdes), notadamente, as oleaginosas, tais como as citadas anteriormente, são agentes modificadores viáveis que proporcionam melhorias nas propriedades do ligante.

De acordo com Oliveira (2014) quando os aditivos orgânicos são misturados ao ligante modificam suas propriedades reológicas, diminuindo a viscosidade do

ligante e permitindo que a mistura asfáltica tenha trabalhabilidade superior quando comparada com a mesma no ponto de fusão.

Diante do potencial que o Brasil possui para pavimentação, e dos resultados satisfatórios da utilização do óleo vegetal na mistura asfáltica e aspirando a redução do descarte no meio ambiente do óleo usado, esta pesquisa propõe um estudo sobre as propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificadas com a adição do óleo vegetal residual, com o intuito de proporcionar: sustentabilidade ao reinserir o óleo que já foi utilizado no ciclo produtivo, redução do consumo de combustível na usina, menor emissão de gases causadores do efeito estufa, melhoria na trabalhabilidade da mistura asfáltica, maior resistência ao envelhecimento.

2. Objetivos

2.1 Objetivo Geral

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

2.2 Objetivos específicos

- Estudar as propriedades físicas e reológicas dos ligantes puro e modificados com óleo vegetal residual;
- Avaliar o envelhecimento a curto prazo dos ligantes modificados com o teor óleo vegetal residual;
- Verificar a viabilidade reológica de incorporação do óleo residual vegetal no ligante asfáltico, a fim de promover um descarte adequado deste resíduo.

3. Referencial Teórico

2.1 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico é um material proveniente do petróleo possui alta viscosidade, com características impermeabilizantes e adesivas, não voláteis e se apresenta na cor preta. Sua composição é basicamente de asfaltenos, resinas e hidrocarbonetos de natureza aromática, solúveis em tricloroetileno e adquiridos por refinação de petróleo, podendo, também, serem encontrados na natureza como depósito natural (gilsonita) ou associados à matéria mineral (asfalto de Trinidad) (PETROBRAS, 2019).

Sua aplicação mais usual é a pavimentação. Para obtenção do asfalto, o material bruto (petróleo) é submetido a destilação fracionada, processo que resulta em frações mais leves como gásóleo, querosene e gasolina e os produtos asfálticos, que são mais pesados, obtidos no fundo da torre. Existem requisitos, definidos por meio de resoluções da ANP, que garantem a qualidade específica do material a depender da necessidade de utilização (ANP, 2019).

Como foi dito por Bernucci et. al (2008), o desígnio intensivo do asfalto à pavimentação se deve às suas propriedades ligantes, garantindo forte união dos agregados, com flexibilidade controlada, sendo também um material impermeabilizante que tem alta resistência à ação dos ácidos, álcalis, e sais. Além das diversas possibilidades de combinação com aditivos.

Também foi conceituado por Bernucci et. al (2008) outras formas para se referir a este material:

- *Betume*: comumente é definido como uma mistura de hidrocarbonetos solúvel no bissulfeto de carbono;

- *Asfalto*: mistura de hidrocarbonetos derivados do petróleo de forma natural ou por destilação, cujo principal componente é o betume, podendo conter ainda outros materiais, como oxigênio, nitrogênio e enxofre, em pequena proporção;

- *Alcatrão*: é uma designação genérica de um produto que contém hidrocarbonetos, que se obtém da queima ou destilação destrutiva do carvão, madeira etc.

Devido ao fato do ligante asfáltico se tratar de um resíduo oriundo da produção do refino de petróleo cru, sua formulação é bastante variável, ele é

basicamente um hidrocarboneto formado por moléculas de hidrogênio e carbono. Como outros materiais, o betume também está sujeito a ação das intempéries e é afetado pela ação do oxigênio, pela radiação ultravioleta e variações de temperatura (WHITEOAK, 1990).

A exposição à temperatura e ao tempo de carregamento de um ligante asfáltico é uma variável importante no seu desempenho, devendo ser quantificada por ensaios reológicos que determinam a forma de escoamento e de deformação dos materiais sob a ação de uma ou mais forças. Isto é, estuda a resposta interna dos materiais quando submetidos a diferentes forças externas. Conseqüentemente, a reologia do ligante asfáltico é definida pela sua resposta à tensão, deformação, tempo e temperatura, (AIREY E BROWN, 1998).

Envelhecimento de um ligante asfáltico pode ser definido como sendo o processo de endurecimento que este sofre durante a estocagem, usinagem, aplicação e em serviço, responsável pela alteração de suas características físicas, químicas e reológicas que causam um aumento na sua consistência (TONIAL, 2001).

2.2 Ligante asfáltico modificado

Inicialmente os ligantes asfálticos não modificados eram capazes de satisfazer as demandas das vias brasileiras, porém, com o aumento da demanda pela expansão da malha rodoviária, causado pela expansão das cidades, acréscimo do número de veículos e conseqüentemente o aumento de carga por eixo em veículos pesados, surge a necessidade de uma elevação da qualidade do pavimento, assim como de seus componentes. Os defeitos que se destacam nos pavimentos brasileiros são trincamento por fadiga e a deformação permanente (PINHEIRO, 2004).

Conforme dito por Spetch (2004), também se pode justificar por meio do alto custo do pavimento não modificado a busca pela introdução de materiais alternativos nestas misturas, conforme se extrai de sua obra:

As camadas de revestimento incluem componentes de alto custo e merecem atenção especial. Dentre os fatores que influenciam o desempenho de uma camada asfáltica pode-se citar: características dos materiais, dosagem, condições de compactação, processo construtivo e plano de manutenção e restauração. Com o aumento do custo dos materiais de construção, notavelmente os derivados de petróleo, e redução da disponibilidade de materiais naturais, aliado às novas exigências/limitações

impostas na construção e manutenção de pavimentos, é imperativo que os pesquisadores busquem materiais que possam apresentar bom desempenho com custo relativamente baixo (SPECHT, 2004).

Devido ao crescimento da exploração de materiais derivados do petróleo e a diminuição da disponibilidade de matéria prima, em conjunto com a necessidade da expansão da malha rodoviária e manutenção da existente, diversas pesquisas estão sendo desenvolvidas com materiais alternativos que apresentem bom desempenho e baixo custo.

2.2.1 Polímeros

Os polímeros utilizados na indústria de modificação de asfaltos são classificados conforme alguns critérios, dentre eles, as categorias nas quais esses polímeros estão inclusos. Segundo Polacco et al. (2015), os polímeros mais utilizados na modificação de ligantes asfálticos estão sub-divididos em três categorias: I) elastômeros termoplásticos, II) termoplásticos e III) reativos.

Cada polímero incorporado ao ligante asfáltico manifesta características positivas e limitadores nas propriedades das misturas asfálticas. Os elastômeros termoplásticos são os mais utilizados, conferem boas propriedades elásticas ao ligante porém, são parcialmente imiscíveis ligante o que acarreta numa separação de fase entre polímero e ligante quando a mistura asfáltica é estocada à altas temperaturas.

Os termoplásticos, por ter um custo reduzido tiveram sua utilização mais difundida, são capazes de elevar a rigidez do ligante, exibindo uma alta resistência inicial. Apesar disso, não apresentam boas respostas elásticas, tendo como ponto negativo uma maior propensão ao trincamento.

A classe de polímeros Reactive Elastomeric Terpolymer (RET), em português que dizer Terpolímero Elastomérico Reativo, foi projetado especificamente para a modificação de asfaltos e tem sido bastante estudada, como em Negrão (2007) e Carvalho (2016), por sua capacidade de melhorar a compatibilidade entre polímero e ligante devido a reação química que ocorre durante a modificação, que proporcionam diversas melhorias ao ligante em propriedades como: facilidade na incorporação no ligante (por meio da agitação física); propriedades viscoelásticas equivalentes aos demais polímeros usados na

pavimentação; “estabilidade” da mistura ao ser estocada, dispensando a agitação contínua.

2.2.2 Borracha

Com a obrigação de reciclagem dos pneumáticos inservíveis imposta pela resolução do CONAMA – Conselho Nacional do Meio ambiente (CONAMA 258), que designou ao produtor e importador a responsabilidade pelo ciclo total da mercadoria, obrigando então que os mesmos colem e deem destino final ao produto (MMA, 2003). Sendo assim, devido a quantidade de resíduos sólidos provenientes da indústria, e a necessidade de pavimentos mais resistentes, correspondente à utilização de veículos mais pesados, viu-se a possibilidade de um melhoramento dos ligantes com a adição de borracha oriunda de pneumáticos.

As misturas asfálticas com borracha são normalmente produzidas com restos ou resíduos de borracha e de acordo com várias técnicas, incluindo o processo seco e úmido. Estas misturas podem conter aditivos ou modificadores adicionais como diluentes, óleos, cales, etc. (RPA, 2000).

A Figura 1 apresenta uma síntese esquemática dos processos de incorporação de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas e os produtos resultantes.

Figura 1. Processos de mistura da borracha e terminologia.



Fonte: Heitzman (1992)

Nesses processos ZANZOTTO (1996) destaca vantagens como: aumento da flexibilidade, aumento da durabilidade, melhor controle da propagação prematura de trincas, diminuição das fissuras por fadiga, melhor aderência dos veículos ao pavimento, redução no nível de ruído provocado pelo atrito pneu-pavimento; propriedades descongelantes. E as desvantagens são: incrementos na quantidade

ótima de cimento asfáltico, aumento na temperatura de usinagem, pagamento de royalties para uso de processos patenteados.

O melhoramento do ligante por meio da incorporação da borracha irá depender da compatibilidade entre esses dois materiais. Buscando uma melhor interação, pode-se utilizar um óleo extensor, que ainda serve para diminuir a viscosidade do ligante Asfalto-Borracha. Com cautela na temperatura de reação, pois temperaturas elevadas podem provocar o envelhecimento precoce do ligante, mudando suas características.

2.3 Óleo Vegetal

2.3.1 Produção & Propriedades

O óleo vegetal é umas substâncias mais versáteis, para fins comestíveis, e antigas utilizadas pelo homem, sua obtenção é oriunda da extração de plantas. Os principais óleos vegetais produzidos são o de soja, algodão, amendoim, girassol, canola, gergelim, palmiste, copra, linhaça e mamona. Pode ser utilizado no preparo de alimentos (óleo de cozinha), lubrificante, fabricação de produtos químicos e combustível (OIL WORLD, 2014). Possui grande potencial econômico por se tratar de um material de fonte renovável.

Quanto a sua produção o processo varia de acordo com a semente, assim como o aproveitamento, cada espécie apresenta um rendimento diferente de óleo, conforme apresentado na tabela 1.

Tabela 1. Estimativa de teor de óleo de algumas espécies oleaginosas

Espécie	Teor de Óleo (%)
Amendoim	40-50
Algodão	15-25
Babaçu	55-65
Canola	40-50
Cártamo	35
Dendê	45-50
Gergelim	50-55
Girassol	35-52
Linhaça	30-48
Mamona	40-50
Nabo Forrageiro	35-50
Soja	18-22
Tungue	30-35
Pinhão manso	38-45

Fonte: (Guerra e Fuchs, 2010)

Óleos vegetais são produtos constituídos principalmente de glicerídeos de ácidos graxos de espécies vegetais. Podem conter pequenas quantidades de outros lipídeos como fosfolipídeos, constituintes insaponificáveis e ácidos graxos livres naturalmente presentes no óleo ou na gordura (ANVISA,2005).

Ao contrário da gasolina e do diesel obtido do petróleo, o óleo vegetal é regenerativo, neutro quanto a emissão de CO₂ e livre de enxofre, metais pesados e radioatividade (GUERRA E FUCHS, 2010).

2.3.2 Destinação Final Pós Uso

A utilização do óleo de origem vegetal está em constante ascensão, uma vez que o consumidor está em busca de produtos cuja matéria prima cause menos danos ao meio ambiente e venha a substituir os derivados do petróleo, os quais são

poluentes. Para suprir essa demanda houve a expansão do mercado oleoquímico, principalmente na produção de biodiesel, alimentos e produtos cosméticos.

Não há um consenso quanto à forma ideal de descarte do óleo vegetal residual. A orientação mais comum quanto ao seu descarte é o acondicionamento do óleo em um recipiente fechado, como uma garrafa pet, seguida do descarte no lixo domiciliar. A desvantagem deste procedimento é a incerteza de que este resíduo não alcance os corpos hídricos e solos, uma vez que a coleta de lixo domiciliar por caminhões compactadores pode causar o rompimento dos recipientes (RABELLO e FERREIRA, 2008).

O fato mais alarmante é que cerca de 90% das residências descartam os resíduos oleosos de maneira inadequada, seja pelo esgoto doméstico (geralmente pelos ralos de pia), no lixo comum ou diretamente no solo (AZEVEDO et al., 2009)

O Ministério do Meio ambiente estima que dos 3 bilhões de litros de óleo comercializados anualmente, 700 milhões apresentem o descarte indevido. Além disso, o óleo ao ser lançado em corpos hídricos impede a troca de oxigênio e mata seres vivos como plantas, peixes e microrganismos, podendo prejudicar a base da cadeia alimentar aquática (fitoplânctons, microalgas), causando desequilíbrio ambiental.

Como foi dito por Oliveira e Aquino (2010) apenas as etapas de produção do produto não são responsáveis pelos problemas ambientais, também se deve considerar as etapas de uso e de descarte. O mesmo serve para os óleos vegetais, consumidos para fins gastronômicos. Cada litro do óleo utilizado em cozinha, para frituras, é capaz de contaminar 25 mil litros de água, e causar uma impermeabilização do solo, evitando que as águas se acumulem no subterrâneo. Por mais que o óleo represente uma pequena parcela da produção total de lixo produzido, deve-se admitir que o dano gerado é impactante.

Logo, uma forma do cidadão contribuir com o meio ambiente é por meio do descarte adequado desse óleo de cozinha utilizado, evitando o despejo do mesmo em lixo comum. Existem diversos pontos de coleta no Brasil, motivados pela nova Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010), preza pela logística reversa de produtos poluentes.

A logística reversa é definida como: instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a

viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2010, Art. 3º XII)

Estes pontos têm como finalidade propiciar o retorno de produtos, possibilitando a reutilização, a recuperação, a reciclagem ou o descarte destes em locais controlados, corretos, que não ocasionam poluições e nem impactos maiores ao meio ambiente.

Empresas que utilizam a logística reversa tendem a agregar valor para seus processos, enriquecendo sua imagem corporativa, visto que, a sociedade está cada vez mais atenta a empresas que possuem atitudes ecologicamente. Logo, como uma forma estratégica de autopromoção por parte das empresas, é interessante que estas desenvolvam e gerenciem programas que incentivem e promovam a reciclagem, o reaproveitamento e a destinação final dos resíduos em locais e de modo adequados. No que diz respeito a sociedade o ganho é substancial e palpável, se manifestando em um meio ambiente menos poluído e na promoção do bem-estar social, propiciam que as gerações futuras usufruam do mesmo (SILVA; ALMEIDA, 2015).

Pensando-se nos malefícios causados pelo descarte descabido desse produto, toda oportunidade de reaproveitamento desse óleo residual de cozinha é benéfica para garantir uma proteção ao uso dos recursos naturais, gerando vantagem tanto para o setor econômico por explorar novamente aquele material, certamente vendido a um custo reduzido, quanto para o setor ambiental, baseando-se na sustentabilidade.

Sendo assim, os óleos vegetais residuais, após sua coleta e reciclagem, podem ser reaproveitados e utilizados em diversas setores, além da pavimentação, gerando novos subprodutos tais como os apresentados:

- Utilização do óleo residual de fritura na produção de resinas

Outra solução para a reciclagem dos óleos residuais é a produção de resinas para serem utilizadas na fabricação de tintas e vernizes. Essas resinas possuem, em comparação aos óleos puros, excelentes propriedades de grande interesse das

indústrias de tintas como: secagem rápida e resistência química às intempéries. (VELOSO et al., 2012).

- Utilização do óleo residual de fritura na produção de sabões

Uma proposta prática e viável para a destinação final de resíduos de óleo comestível doméstico e de restaurantes está na confecção de sabão de maneira artesanal (NORRIS, 2000).

O sabão é um produto consumido largamente em nosso cotidiano, item essencial para a higienização de materiais diversos em nosso cotidiano e apresenta-se em variadas formas físicas: em barra, líquido, pó ou pasta.

- Utilização do óleo residual de fritura para utilização de ração animal

Os óleos residuais são fontes de ácidos essenciais e de vitaminas para o organismo animal, com isso os óleos residuais de fritura podem ser utilizados para incorporar a mistura de rações, tanto na indústria como em propriedades rurais. (VELOSO et al., 2012).

Porém esse óleo não deve ser empregado como ração para animais que futuramente venham a servir de alimento ao homem, já que os compostos polares presentes no óleo são possivelmente carcinogênicos e podem afetar a saúde humana (NOGUEIRA, 2009).

2.3.3 Utilização de óleos vegetais na pavimentação

Diante da alta demanda de óleo vegetal para consumo culinário e cogitando o descarte inadequado do resíduo, uma das soluções possíveis para reaproveitamento do mesmo, após o uso, é o emprego em misturas asfálticas com o intuito de aumentar a sua trabalhabilidade e promover uma maior resistência ao envelhecimento.

A dependência mundial pelo petróleo promove o aumento de pesquisas que buscam materiais alternativos para que combinados com o Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) a fim de contingenciar os consumos de recursos naturais e de energia, além de em diversos casos resultar em um aumento da qualidade do pavimento. Por isso, faz-se necessária a pesquisa do uso de aditivos alternativos e

sustentáveis ao CAP, para buscar outras soluções mais vantajosas (PORTUGAL, 2016).

Por possuir ponto de fulgor superior a 220°C, o óleo vegetal residual com é mais seguro para ser usado em misturas asfálticas. Ainda mais por se tratar de um óleo que já enfrentou altas temperaturas, logo, ao ser aquecido novamente não manifestará componentes voláteis, como gases tóxicos (CHEN et al 2014).

Buscando restabelecer as características do ligante envelhecido, estudos mostram que óleos de origem vegetal apresentam grande eficiência, até maior que do que os próprios derivados de petróleo, na recuperação das características do ligante envelhecido. (ZAUMANIS et al., 2014).

Apesar da utilização do óleo vegetal residual em misturas asfálticas ser uma possível solução para atenuar o problema da deposição deste resíduo, cabe salientar que o principal objetivo da inclusão dessa substância é a melhoria das propriedades do ligante asfáltico.

Para que sejam desenvolvidos novos materiais, em qualquer área do conhecimento, é importante que se conheçam as propriedades mecânicas, físicas e químicas das misturas, em seus variados teores. Neste contexto, o presente trabalho pretende contribuir para uma melhor compreensão do comportamento reológico de ligantes, com a adição de óleo vegetal residual.

2.3.4 Pesquisas com oleaginosas adicionadas ao Ligante Asfáltico

Neste item, são expostos trabalhos científicos de análise de ligante asfálticos modificados com óleo vegetal residual, foram destacados três trabalhos a seguir que utilizam o óleo vegetal, apresentados para servirem de base e comparações, se for o caso, com os resultados obtidos na presente pesquisa.

- Guerra (2019)

Guerra (2019) realizou pesquisa utilizando o óleo de canola como aditivo ao CAP 50/70. O estudo objetivou avaliar o potencial de utilização do óleo de canola nas propriedades mecânicas e na redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas.

Em súpula, a autora trabalhou com os teores de 1, 2 e 3% de óleo, realizando um comparativo do comportamento das misturas. Além disso, verificou a

influência das variações dos teores do óleo de canola nos tempos de envelhecimento do ligante, nas temperaturas de compactação e nos possíveis ganhos às propriedades mecânicas do pavimento.

Como resultado, a autora concluiu que as misturas com teor de 1% apresentaram melhor desempenho mecânico. E a de 3% garantiu maior redução das temperaturas de compactação, porém não obteve uma resposta mecânica tão positiva quanto o teor de 1%.

- Carvalho (2018)

Carvalho (2018) estudou a adição do óleo de girassol ao ligante asfáltico nos teores de 1, 2 e 3%. Com o intuito de quantificar a redução das temperaturas de mistura e compactação, avaliar as propriedades mecânicas e propor a utilização de um material de fonte renovável na fabricação de Misturas Asfálticas Mornas (MAMs), contribuindo assim com o desenvolvimento sustentável.

Em conclusão, o teor de 3% apresentou a redução mais expressiva, de 6°C, e o de 2% de óleo de girassol foi o que proporcionou melhor desempenho quanto às propriedades mecânicas e volumétricas em relação aos critérios preconizados pelas normas adotadas.

- Portugal (2016)

Outra pesquisa com oleaginosa foi realizada por Portugal (2016) que avaliou as propriedades reológicas de ligantes asfálticos modificados com óleo de soja e óleo de milho.

A redução da temperatura de usinagem e compactação foi obtida em média de 2,7°C e 5,6°C para 1% de óleo residual de soja e milho, respectivamente, com emprego do ligante asfáltico 50/70 e 3,8°C e 4,10°C para 1% de óleo residual de soja e milho, respectivamente, quando utilizado AMP 55/75, quando considerado apenas o critério da curva de viscosidade.

Nos ensaios reológicos, o autor verificou que a adição de óleo de soja e de milho, interferem no comportamento do ligante diminuindo a viscosidade de acordo com o aumento do teor e da temperatura. Na pesquisa não foi verificada diferença significativa na utilização de óleo novo ou residual, contribuindo assim para o emprego ecologicamente correto do óleo residual.

4. Materiais e métodos

Neste capítulo serão apresentados os materiais e os equipamentos utilizados na pesquisa, bem como a metodologia empregada para a realização dos ensaios laboratoriais. Os ensaios de caracterização e reologia do ligante asfáltico, foram realizados no Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP), do Departamento de Engenharia Civil, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

4.1 Materiais

4.1.1 Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado na pesquisa foi o CAP 50/70 (Figura 2), que é o tipo de ligante asfáltico utilizado na região Nordeste. A amostra foi denominada de “Ligante Puro”.

Figura 2. Ligante Puro

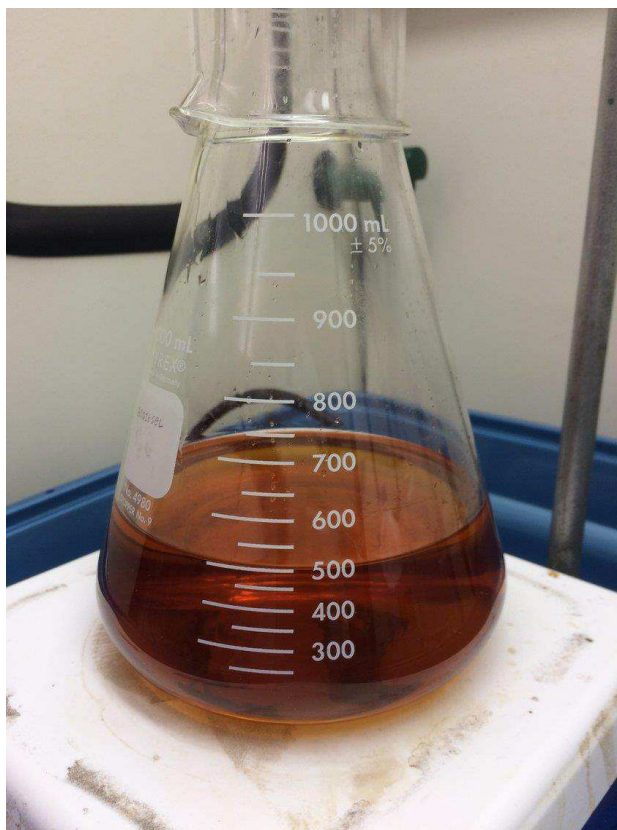


4.1.2 Óleo de cozinha vegetal residual

O óleo de cozinha vegetal residual não segregado (Figura 3) foi obtido da empresa INDAMA, que atua na coleta do óleo de fritura nos estados do Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, Bahia, Ceará, Piauí, Maranhão,

Tocantins e Pará, tendo como principal finalidade a reciclagem de subprodutos de origem animal e vegetal, destacando-se no desenvolvimento de Logística Reversa e Logística Verde.

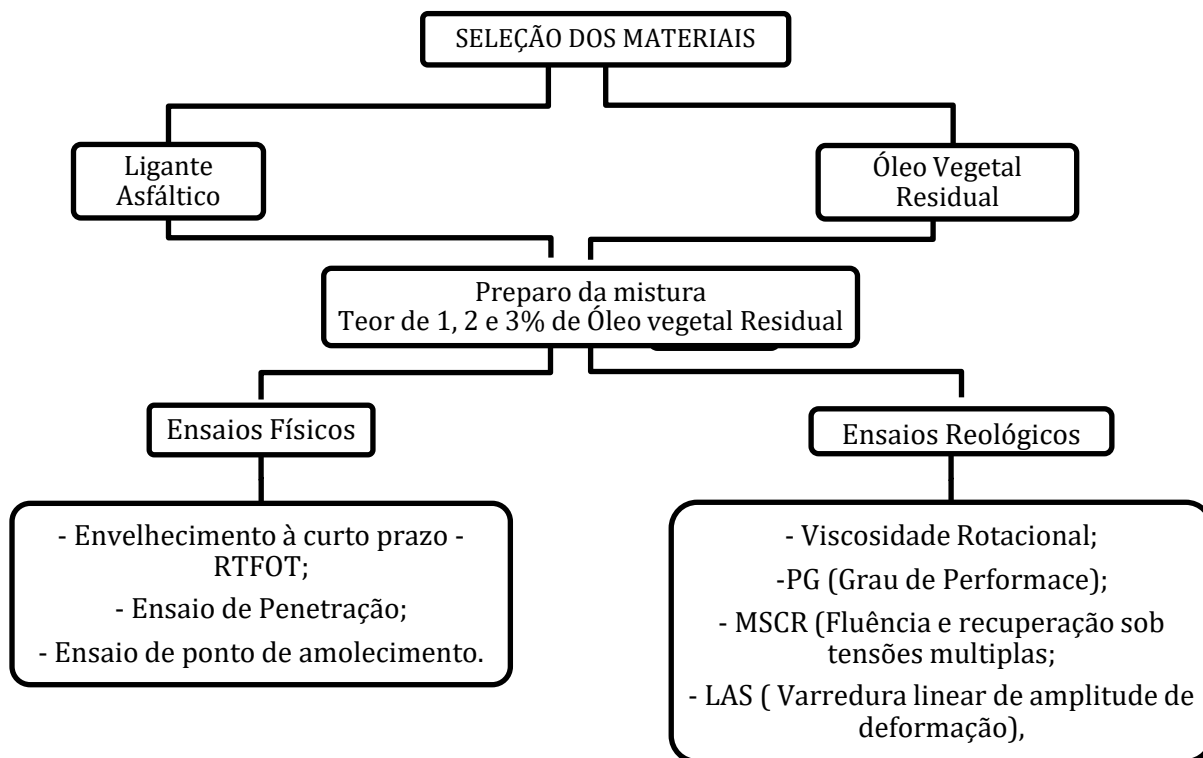
Figura 3. Óleo de cozinha vegetal residual



4.2 Métodos

Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Pavimentos do Bloco CT – UAEC/UFCG. O fluxograma da Figura 4 apresenta a sequência de atividades da pesquisa. O teor de incorporação do óleo vegetal residual foi definido em 1%, 2% e 3%, baseando-se na pesquisa desenvolvida por Guerra (2019) que trabalhou com o óleo de canola e encontrou resultados satisfatórios com esses teores, com o objetivo de garantir os melhores resultados quanto às propriedades reológicas e a redução da temperatura de trabalhabilidade. A execução experimental da pesquisa se dividiu em duas etapas, sendo a primeira de mistura e caracterização física do ligante puro e modificado, e na segunda foi realizada a caracterização reológica.

Figura 4. Sequência de atividades.



4.2.1 Caracterização do ligante puro e ligante + óleo vegetal residual

Antes de dar início aos ensaios foi realizada a homogeneização do ligante puro com os teores de óleo escolhidos, neste caso o de 1, 2 e 3%. Com o auxílio do agitador mecânico (FISATOM, Modelo 722) apresentado na Figura 5, com as condições de temperatura e rotações controladas. Uma vez incorporado os teores ao ligante, o produto final é homogêneo e apresenta uma única fase, isto é, visualmente não se observa o óleo disperso. Na mistura foi empregada os mesmos parâmetros adotados por Portugal (2016), onde a temperatura de 135°C durante 20 minutos a uma velocidade de 406rpm cada teor de óleo foi incorporado ao ligante. Posteriormente, a mistura foi retirada, esfriada à temperatura ambiente e, acondicionada em recipiente fechado para utilização posterior

Figura 5. Agitador Mecânico.



- Ensaio de Penetração

O ensaio de penetração é tido como um meio de classificar o ligante asfáltico, foi realizado conforme o preconizado na norma DNIT-ME 155/2010 que define penetração como profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de material sob condições prefixadas de carga, tempo e temperatura.

O procedimento consistiu na medição da profundidade que uma agulha, de massa padronizada de 100 gramas, penetrou após 5 segundos em uma amostra de ligante a 25°C acondicionada em recipiente cilíndrico. Na Figura 6 é mostrado o Penetrômetro utilizado para a realização deste ensaio.

Cada teor do ligante foi submetido a este ensaio, e para cada teor o ensaio foi repetido três vezes, foi observado se os valores atendiam as condições de dispersão especificados em norma.

Figura 6. Penetrômetro.



- Ensaio de Ponto de Amolecimento

O ponto de amolecimento é usado na definição do ponto de fusão de ligantes asfálticos, onde o ligante é submetido a um aquecimento gradual em banho de água a uma taxa de 5°C/minuto.

O ensaio é regido pela norma DNIT-ME 131/2010. Onde o ligante é despejado em dois anéis metálicos, colocado em béquer com água, sob a carga esferas metálicas são posicionadas no centro dos mesmos (todos os itens com dimensões padronizadas). Devido os equipamentos utilizados o ensaio é conhecido popularmente como ensaio do anel e bola. Com o aquecimento gradual da água o ligante também eleva sua temperatura e começa a escoar até atingir uma placa de referência posicionada a 25,4mm abaixo dos anéis. Neste momento foi aferida a temperatura da água, para cada anel não podendo diferir mais de 1°C entre as amostras.

O ponto de amolecimento foi definido como a média das duas temperaturas lidas, e o ensaio foi realizado tanto para a amostra pura como modificada.

A variação do ponto de amolecimento – APA foi determinado pela diferença entre os valores obtidos do PA de ligantes asfálticos na condição envelhecida a curto

prazo (PAm_{od}) e o PA ligante puro (PA_{puro}), conforme Equação 1. Os valores tendem a ser mais elevados para o ligante modificado indicando maior sensibilidade do ao envelhecimento a curto prazo. O aumento máximo de 8°C (DNIT 095/2006 – EM) é o preconizado para o CAP 50/70. As avaliações do ponto de amolecimento também foram realizadas considerando o grau de modificação obtido pela Equação 1.

Equação 1: Variação do ponto de amolecimento – APA.

$$APA = PA_{mod} - PA_{puro}$$

Obtidos os resultados dos ensaios de penetração e de ponto de amolecimento é possível calcular o índice de susceptibilidade térmica ou índice de penetração do ligante que indica a sensibilidade da consistência dos ligantes à variação de temperatura (BERNUCCI et al., 2008) representado pela Equação 2.

Equação 2: Índice de susceptibilidade térmica.

$$IST = \frac{(500) \times (\log PEN) + (20) \times (T^{\circ}C) - 1951}{120 - (50) \times (\log PEN) + (T^{\circ}C)}$$

Onde,

(T°C) = Ponto de amolecimento

PEN = Penetração a 25°C, 100 g, 5 seg

- Ensaio de Viscosidade rotacional

O equipamento viscosímetro utilizado foi o Brookfield, modelo DV-III ULTRA, ligado a um condutor de temperatura, conforme a Figura 7. O presente ensaio de viscosidade rotacional seguiu a norma da NBR 15184/2004, constituindo-se na disposição de um cilindro com ranhuras padronizadas (spindle) dentro de uma cubeta com 8 gramas de ligante. Posteriormente, foi realizado um torque com uma haste interligada ao cilindro. Assim, o ligante foi aquecido em temperaturas pré estabelecidas por norma, de 135°C, 150°C e 177°C, a 20, 50 e 100 rpm, respectivamente. Os valores das viscosidades dos ligantes asfálticos puro e

modificados foram medidas antes e após o envelhecimento a curto prazo para todos os teores.

Figura 7. Viscosímetros rotacionais.



- Procedimento de Envelhecimento a curto prazo (RTFOT)

O procedimento Rolling Thin Film Oven - RTFO (ASTM D2872) simula o envelhecimento a curto prazo do ligante. A simulação ocorre por meio do equipamento mostrado na Figura 8 e consiste em uma exposição de amostras do ligante, com 35g do material, em rotação na estufa sob a temperatura de 165°C. Graças a um orifício aberto na jarra, onde o material fica contido, a amostra é submetida a jatos de ar a cada 3 ou 4 segundos de acordo com o especificado em norma.

A execução dos ensaios seguiu as indicações preconizadas pela NBR 15235/2005 e foi realizado para todas os ligantes.

Tal envelhecimento é provocado principalmente pela temperatura e o grau de exposição do ligante ao oxigênio, pode ocorrer no decorrer da usinagem, estocagem e aplicação do material.

Figura 8. RTFOT.



4.2.2.1. Grau de Performance (PG)

Utilizando a norma ASTM D6373/2016, a fundamentação do ensaio se deu na variação de temperatura, com início em 46°C com degrau de 6°C, analisando que para cada degrau o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ não deve ter valores inferiores a 1,00 kPa para ligantes que não tiveram processo de envelhecimento a curto prazo e para os ligantes envelhecidos que passaram pela simulação em estufa RTFO não devem ser menores que 2,20 kPa. Ao serem alcançados os limites impostos pela norma para o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ o ensaio se finaliza. As amostras tomadas como base neste teste foram de ligantes asfálticos puro e modificados, previamente e posteriormente o processo de envelhecimento, tendo como medidas 25 mm de diâmetro com 1 mm de espessura.

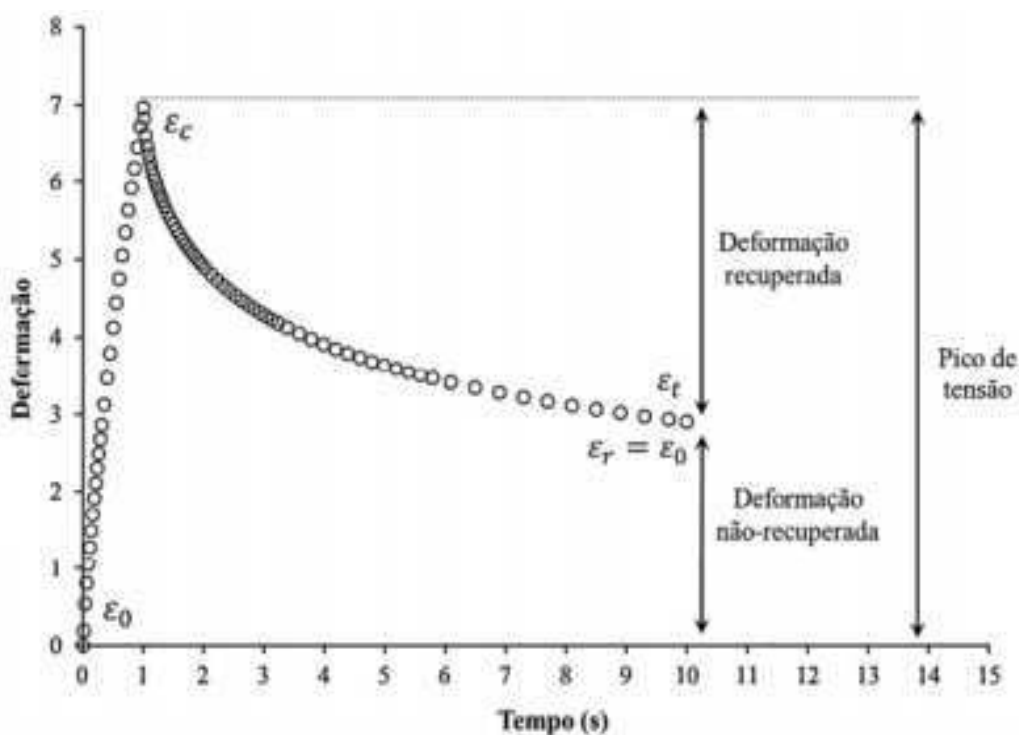
As amostras envelhecidas em RTFO e examinadas no teste de grau de desempenho podem ser observadas segundo o índice de envelhecimento (AI) que utiliza o parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$ antes e após o procedimento de envelhecimento para avaliar o comportamento do ligante. Na lição de Asukar et al. (2016), a taxa de envelhecimento é importante pois mostra a suscetibilidade do material ao envelhecimento e descrever o desenvolvimento do grau de rigidez da amostra em diferentes períodos. Ao final do ensaio, foram gerados relatórios com os parâmetros utilizados para cada degrau de temperatura.

4.2.3.2. Fluência e recuperação sob tensões múltiplas (MSCR)

O ensaio MSCR (Multiple Stress Creep Recovery) surgiu de um aperfeiçoamento dos ensaios de fluência repetida e recuperação (RCRT), desenvolvido pela Administração Rodoviária Federal dos Estados Unidos. Para tal, o MSCR utiliza o reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) que simula a ação do tráfego intenso, com o objetivo de avaliar a capacidade do material em manter sua resposta elástica (DOMINGOS, 2011; SOBREIRO, 2014).

A Figura 9 demonstra a deformação sofrida pelo ligante durante o ensaio em função do tempo de aplicação de carga.

Figura 9. Representação esquemática do ensaio de MSCR.



Fonte: Marinho Filho, 2017.

Para avaliar o comportamento fluência-recuperação do ligante asfáltico, regido pela ASTM D7405-15 foi aplicada uma carga constante durante o período de 1 segundo sobre a amostra do ligante, seguido de um repouso de 9s, permitindo o relaxamento da mesma. Inicialmente, esse ciclo era repetido 10 vezes em 11 níveis controlados de tensão diferentes. Entretanto, posteriormente esse número de tensão foi reduzido a apenas 2, de 100Pa e 3200Pa, mantendo-se 10 ciclos para cada, totalizando 20 ciclos de 20 segundos. A tensão mais baixa representa as condições

normais de tráfego e a mais alta uma situação de tráfego intenso, sendo então possível analisar a capacidade do ligante em conservar sua resposta elástica.

Os valores de deformação registrados durante o teste MSCR foram usados para determinar $R(\sigma, N)$, que é o percentual de recuperação na tensão (para = 100 Pa ou 3.200 Pa) para o ciclo de fluência e recuperação número N (onde $1 < N < 10$), e Jnr (kPa-1). Nas Equações 3 e 4 estão as expressões para calcular os parâmetros R (%) e Jnr, que corresponde a compliança não recuperável (SINGH et al., 2017).

Onde Jnr (σ , N) é a compliança não-recuperável na tensão de Pa e no ciclo de fluência e recuperação número N, para σ e N apresentando os mesmos valores mencionados anteriormente ($\sigma = 100$ ou 3.200 Pa e $1 < N < 10$). De posse de todos os valores individuais de R (σ , N) e Jnr (σ , N) nos 10 ciclos de fluência e recuperação, seus resultados médios são calculados por meio da média aritmética simples dos valores obtidos nestes 10 ciclos (ANDERSON et al., 2010), em cada uma das temperaturas de realização do ensaio de MSCR.

Equação 3. R (σ ,N),

$$R(\sigma, N) = \frac{[(\varepsilon_c - \varepsilon_0) - (\varepsilon_r - \varepsilon_0)] * 100}{(\varepsilon_c - \varepsilon_0)} \times$$

Equação 4. Jnr

$$Jnr = \frac{(\varepsilon_r - \varepsilon_0)}{\sigma}$$

O Jnr se trata de um parâmetro para altas temperaturas obtido no MSCR. A partir desse parâmetro, desenvolve-se uma classificação para os níveis de carregamento no tráfego, classificados como: padrão (*Standard*), pesado (*Heavy*), muito pesado (*Very Heavy*) e extremamente pesado (*Extremely Heavy*).

Os resultados obtidos no ensaio MSCR podem ser utilizados tanto para os ligantes asfálticos puros ou modificados, eliminando assim a necessidade de ensaios adicionais para avaliação de desempenho de ligantes asfálticos modificados para temperaturas altas. Este ensaio permite a eliminação de ligantes muito sensíveis à tensão devido aos critérios propostos pela American Association of State Highway

and Transportation Officials - AASHTO M320 (2017) e a Federal Highway Administration (FHWA, 2010) presentes na Tabela 2, os quais avaliam a susceptibilidade à deformação permanente.

Tabela 2: Classificação dos ligantes asfálticos quanto ao valor de Jnr de acordo com a norma AASHTO M320.

Propriedade	Limite Máximo (kPa⁻¹)	Tipo de Tráfego	Número de passadas de um eixo padrão simples (ESAL)
Jnr a 3200Pa	4,0	Padrão (S)	< 10 milhões
na	2,0	Pesado (H)	> 10 milhões
temperatura	1,0	Muito Pesado (V)	> 30 milhões
do PG	0,5	Extremamente Pesado (E)	> 100 milhões

A FHWA também apresenta valores mínimos recomendados para %Rec de ligantes asfálticos para Jnr de 3,2 kPa (Tabela 3). Os valores se limitam até o valor de %Rec de 2,00 kPa⁻¹ significando que não há recomendação entre o percentual mínimo de recuperação para os ligantes asfálticos com valores de Jnr superiores a 2,0 kPa⁻¹ (DOMINGOS, 2011).

Tabela 3. Valores estimados de Jnr para tensão de 3,2 KPa e percentual de recuperação mínimo.

Complância não-recuperável (Jnr) para tensão de 3,2kPa (kPa-1)	Percentual de recuperação mínimo (%)
1,01 a 2,00	30
0,51 a 1,00	35
0,251 a 0,50	45
0,125 a 0,25	50

4.2.3.3 Varredura linear de amplitude de deformação (LAS)

Este ensaio é regido pela norma ASHTO TP 101:2012 e consiste num método acelerado para avaliar o desempenho à fadiga do ligante asfáltico na temperatura intermediária do pavimento. A execução de deu em duas etapas, realizado em amostras envelhecidas no RTFOT, sendo a primeira: varredura de

frequência, em que a amostra foi submetida a um carregamento de cisalhamento em um nível de amplitude de 0,1% e a frequência foi de 0,1 a 30 Hz, seguida de: amplitudes nas quais a amostra foi sujeita a carga de cisalhamento a um nível de frequência constante de 10 Hz e o nível de amplitude foi variado de 0,1 a 30%. O equipamento utilizado foi um reômetro oscilatório Discovery HR-1 hybrid rheometer.

5. Resultados e Discussões

5.1. Reologia Empírica

5.1.1 Ensaio de penetração

Os resultados obtidos por meio da realização deste ensaio são apresentados na Tabela 4 e no gráfico da Figura 10.

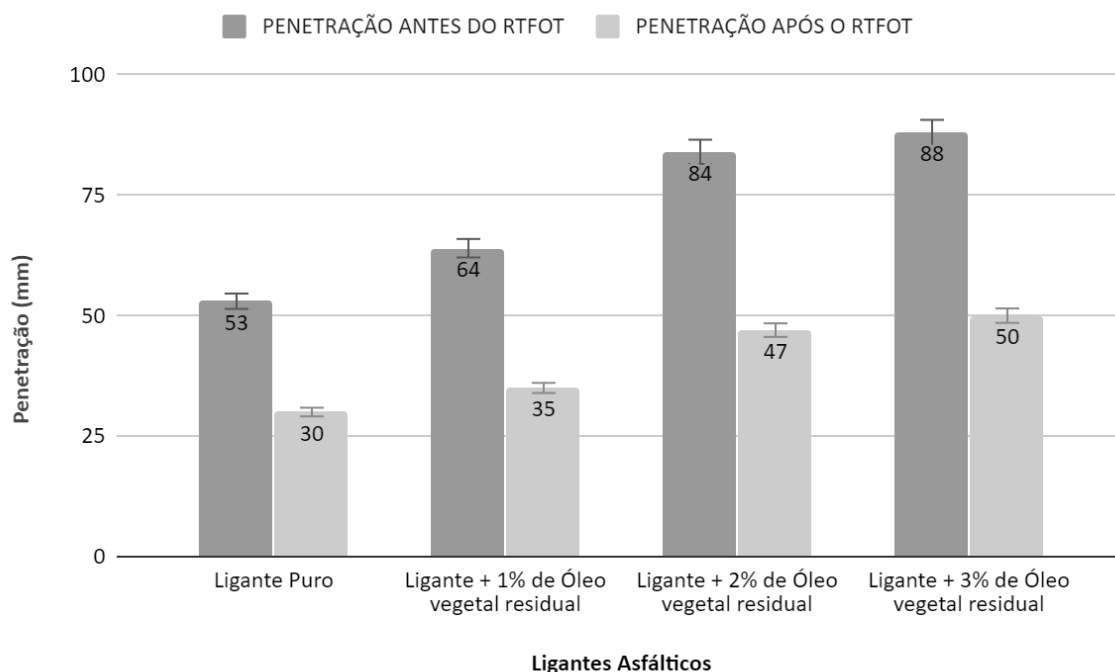
Tabela 4. Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFOT.

Amostra	Penetração antes do RTFOT (mm)	Penetração após O RTFOT (mm)	Penetração Retida (%)
Ligante Asfáltico Puro	53	30	56,60
Ligante + 1% de Óleo vegetal residual	64	35	54,69
Ligante + 2% de Óleo vegetal residual	84	47	55,95
Ligante + 3% de Óleo vegetal residual	88	50	56,82

Observamos que o valor encontrado para o ligante antes do RTFOT se encontra dentro do esperado, de acordo com da Agência Nacional de Petróleo e Gás – (ANP, 2005), cuja resolução ANP nº19/2005 estabelece as especificações dos ligantes asfálticos

A adição do teor do óleo vegetal residual, promoveu aumento considerável na penetração do ligante puro em todos os teores (Figura 10) o que indica uma menor rigidez do ligante modificado na temperatura de 25°C. No entanto, em face do envelhecimento, como era esperado, houve um enrijecimento dos ligantes após o RTFOT resultando em menores valores de penetração.

Figura 10. Resultados do ensaio de penetração antes e após o RTFOT.



Os baixos valores de penetração retida são um indicativo de uma maior sensibilidade ao envelhecimento. Os percentuais mínimos preconizados em norma para a penetração retida são 55% (DNIT 095/2006 – EM) para ligante convencional. Logo, a adição do óleo vegetal residual não alteou significativamente os valores de penetração retida, ao se comparar as amostras modificadas com o ligante puro.

Considerando-se a penetração retida como um indicador da sensibilidade dos ligantes asfálticos ao envelhecimento a curto prazo. Por essa perspectiva, quanto mais próximo de 100% menor será a vulnerabilidade e, portanto, maior será a sua resistência a oxidação.

Guerra (2019) avaliou o efeito do óleo de canola incorporado no ligante asfáltico nos teores de 1%, 2%, e 3%, e constatou que a adição do aditivo ocasionou um aumento na penetração em relação ao ligante puro, indicando uma redução na rigidez. Quando o ligante foi submetido ao envelhecimento, a penetração diminuiu consideravelmente. Resultados semelhantes foram obtidos por Portugal (2016) com adição dos óleos de milho e de soja novo e residual e Carvalho (2018) com adição do óleo de girassol.

De acordo com Bulatovic et al., (2014) o aumento de dureza do ligante asfáltico após o processo é proveniente do aumento de asfaltenos do ligante envelhecido, modificando assim a sua composição química.

5.1.2 Ponto de amolecimento

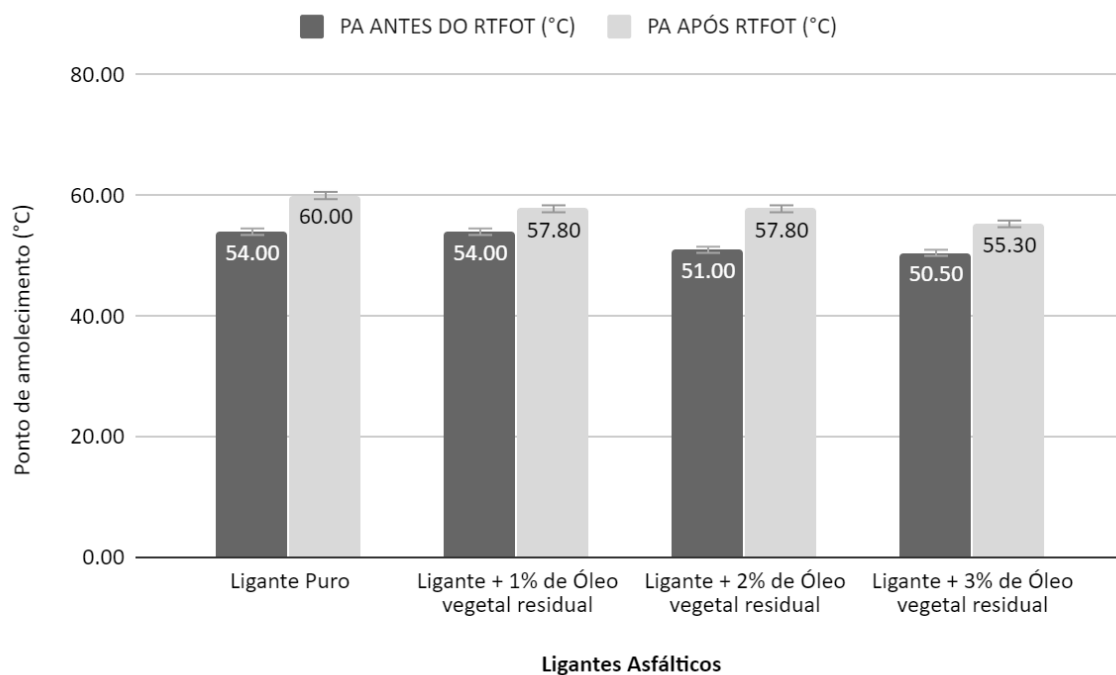
Na Tabela 5 e na Figura 11 constam os resultados médios de ponto de amolecimento para o ligante puro e modificado nas condições antes e após o envelhecimento a curto prazo, bem como, os seus graus de modificação - GM.

Tabela 5. Resultados do ensaio de ponto de amolecimento antes e após o RTFOT.

Amostra	PA antes do RTFOT (°C)	PA após RTFOT (°C)	Variação do P.A (°C)
Ligante Puro	54,00	60,00	6,00
Ligante + 1% de Óleo vegetal residual	54,00	57,80	3,80
Ligante + 2% de Óleo vegetal residual	51,00	57,80	6,80
Ligante + 3% de Óleo vegetal residual	50,50	55,30	4,80

Os resultados indicaram uma pequena diminuição desse parâmetro no ligante asfáltico promovidas pela adição óleo e para a condição antes e após o envelhecimento a curto prazo, indicando assim, uma menor rigidez do ligante. O incremento do aditivo reduziu o ponto de amolecimento para as amostras de 2% e 3% (Tabela 5), porém a maior redução foi de 3,5°C na mistura com 3% de óleo. Comportamento semelhantes ao desta pesquisa foi observado por Carvalho (2018), Lucena et al., (2016) e Portugal (2016) e por Guerra (2019), onde o teor de ligante +1% de óleo de canola apresentou uma redução de 1°C ao se comparar com o ligante puro.

Figura 11. Resultados do ensaio de ponto de amolecimento antes e após o RTFOT.



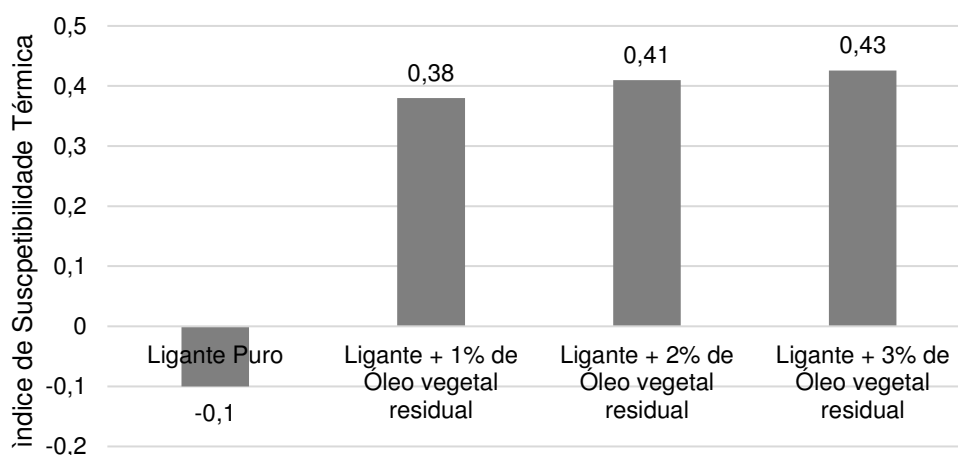
Em Portugal (2016) o autor observou o mesmo comportamento do ligante com aditivos após a adição do óleo de milho e de soja, indicando que tal redução poderia vir a comprometer o comportamento de tais misturas quando aplicadas em campo, pois tornaria o ligante mais susceptível a ação da temperatura do pavimento.

Considerando a diminuição do ponto de amolecimento, ou seja, o incremento em face do processo de envelhecimento após o RTFOT, verificou-se que os valores máximos obtidos de 6,0 °C para o ligante puro e de 6,8 °C para o ligante + 2% de óleo, atendem ao preconizado nas normas que estabelecem aumento de até 8,0 °C (DNIT 095/2006 – EM) para o ligante asfáltico 50/70.

Outro parâmetro que pode ser extraído com os resultados dos ensaios de penetração e ponto de amolecimento é o índice de suscetibilidade térmica (IST), que aponta a sensibilidade do ligante à mudança de temperatura. A resolução da ANP (2005) define uma faixa para o enquadramento dos valores de IST, variando de -1,5 a +0,7 para ligantes sem adições. Segundo Bernucci et al., (2008) valores maiores que +1 representam ligantes oxidados, pouco sensíveis a elevadas temperaturas e quebradiços em temperaturas menores, enquanto que valores menores que -2

indicam ligantes muito suscetíveis a variação de temperatura. A Figura 12 mostra os resultados do IST para os ligantes puros e adicionados com óleo vegetal residual.

Figura 12. Índice de susceptibilidade térmica dos ligantes puro e modificados.



Considerando os resultados contidos na Figura 12, os ligantes puro e modificados obtiveram valores dentro das faixas estabelecidas pela ANP. Os dados obtidos demonstraram que o ligante puro possui mais suscetibilidade térmica que as amostras modificadas, visto que se apresentou mais próximo do limite do que as demais composições, as amostras do ligante modificado com óleo vegetal residual favoreceram a redução das consequências provocadas pela variação de temperatura, fato que pode garantir um melhor desempenho do pavimento em campo (KALANTAR et al., 2012).

5.2. Reologia Fundamental

5.2.1. Viscosidade Rotacional

Os resultados obtidos de viscosidade rotacional estão sendo apresentados em centiPoise (cP), expostos na Tabela 6 e nas Figuras 13, considerando a média obtidas a partir de três amostras para cada uma das temperaturas ensaiadas de 135°C, 150°C e 177°C.

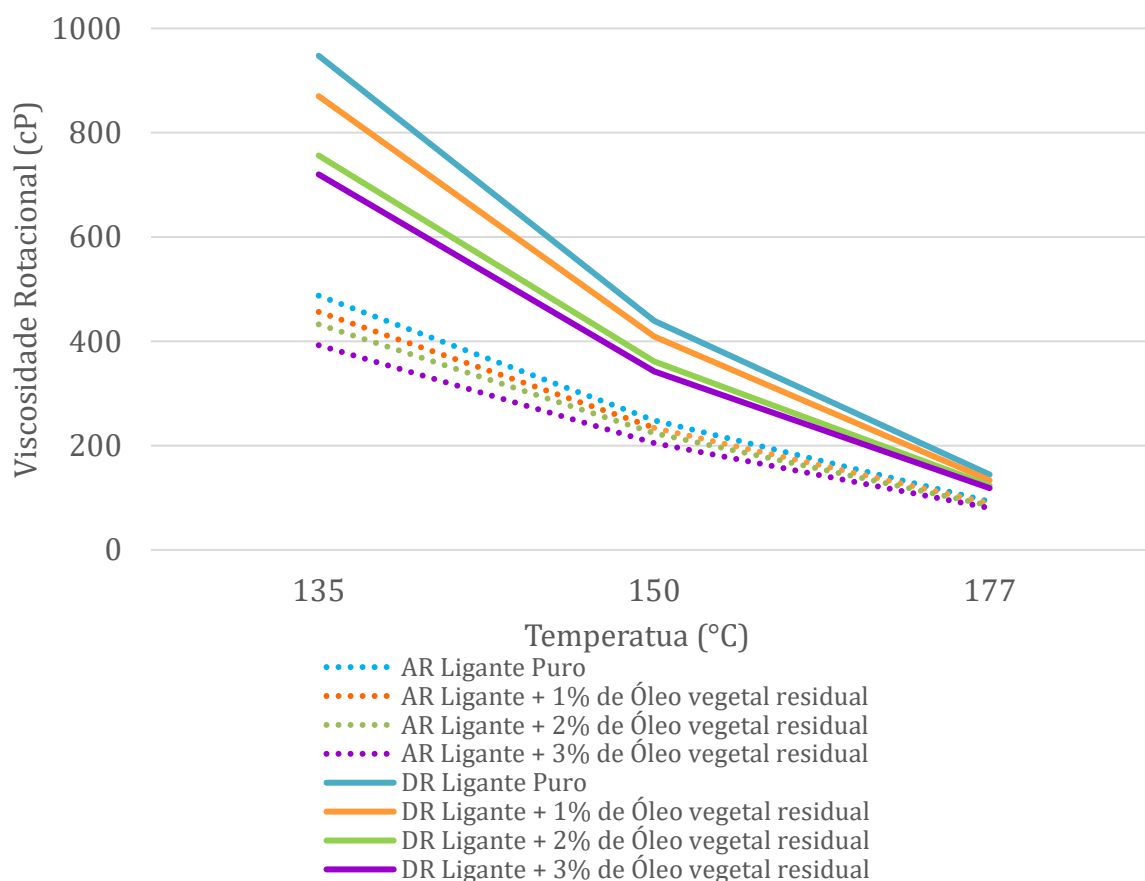
Tabela 6. Resultados do ensaio de viscosidade rotacional antes e após o RTFOT.

Amostra	Antes do RTFOT		
	135°C	150°C	177°C
Ligante Puro	487.50	248.20	92.75
Ligante + 1% de Óleo vegetal residual	456.25	234.00	89.25
Ligante + 2% de Óleo vegetal residual	432.50	224.00	85.00
Ligante + 3% de Óleo vegetal residual	392.50	205.00	80.25
Amostra	Após RTFOT		
	135°C	150°C	177°C
Ligante Puro	947.5	439.0	144.5
Ligante + 1% de Óleo vegetal residual	870.00	409	133.5
Ligante + 2% de Óleo vegetal residual	756.3	361.0	123.5
Ligante + 3% de Óleo vegetal residual	720	342.5	118.5

Após o envelhecimento das amostras em todos os teores foi observado também um aumento significativo da viscosidade. Segundo Lucena et al. (2016) este resultado deve-se a perda de frações leves e oxidação do ligante quando submetido à temperaturas mais elevadas, provocando o endurecimento do material e conseguinte aumento de sua viscosidade.

A Figura 13 apresenta as viscosidades rotacionais dos ligantes asfálticos antes e após o envelhecimento nas temperaturas de 135, 150 e 177°C. Assim como na amostra antes do envelhecimento houve uma diminuição da viscosidade após a adição do óleo vegetal residual. Utilizando a denominação “AR” para as amostras antes do RTFOT, que estão representadas por retas pontilhadas e “DR” para as amostras depois do RTFOT.

Figura 13. Resultados do ensaio de viscosidade rotacional antes do RTFOT.



Uma análise importante foi feita por meio do ensaio de viscosidade, se trata da definição das Temperaturas de Usinagem – TU e Temperaturas de Compactação – TC ideais que vão variar conforme o tipo de ligante asfáltico utilizado. Tais temperaturas TU's e TC's foram calculadas por um método tradicional que determina uma TU na qual o ligante tenha uma viscosidade rotacional de $0,17 \pm 0,02$ Pa.s e uma TC na qual apresente viscosidade rotacional de $0,28 \pm 0,03$ Pa.s. Os valores das TU's e TC's estão disponibilizados na Tabela 7.

Tabela 7. Temperatura de Usinagem e Compactação dos ligantes asfálticos puro e modificados.

Temperaturas de Usinagem e Compactação						
	Compactação (°C)			Usinagem (°C)		
	Intervalo	Valor Médio		Intervalo	Valor Médio	
Ligante Puro	146	150	148	161	167	164
Ligante + 1% de Óleo vegetal residual	144	149	147	159	165	162
Ligante + 2% de Óleo vegetal residual	144	148	146	157	165	161
Ligante + 3% de Óleo vegetal residual	142	146	144	153	162	158

Os resultados indicam que o acréscimo do óleo vegetal residual influencia na redução da viscosidade do ligante e, portanto, na diminuição das temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas estudadas. A menor viscosidade assim como a menor temperatura de trabalhabilidade foi encontrada no teor de 3% quando comparado ao ligante puro, (Tabela 6). Comportamento semelhante foi encontrado por Guerra (2019), que constata que por mais que a redução da temperatura não seja tão significativa, ainda assim foi possível se garantir uma redução positiva de energia durante o processo de usinagem do asfalto. Em Portugal (2016) foi verificado que as adições dos óleos de soja e de milho alteraram o comportamento dos ligantes, diminuindo a viscosidade com relação ao ligante puro.

Considerando-se a temperatura máxima de aquecimento do ligante asfáltico modificado, estabelecida pela norma DNIT - ME 385/1999, de 180°C, temos que todas as amostras se encontram abaixo do valor preconizado por norma.

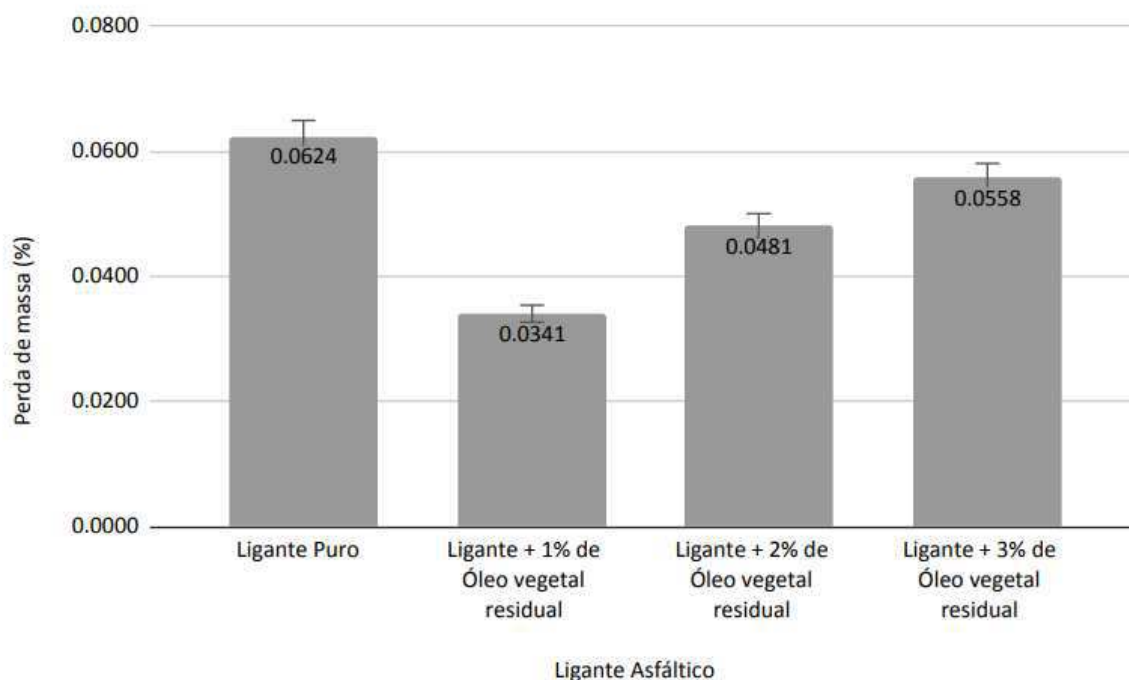
5.2.2. Envelhecimento à curto prazo – RTFO e variação de massa

Os resultados de perda de massa após o ensaio de RTFOT estão apresentados na Tabela 8 e na Figura 14. Constata-se que todos os ligantes modificados com óleo vegetal residual apresentaram menores perdas de massa em comparação ao ligante puro. Todas as amostras atenderam ao estabelecido em norma DNIT 095/2006 – EM 03/2005, cujo variação máxima permitida é de 0,5%.

Tabela 8. Resultados de perda de massa dos ligantes após o RTFO.

AMOSTRA	Antes RTFOT (g)	Após RTFOT (g)	Varição de Massa (%)
Ligante Puro	215.98	215.85	0.063%
Ligante + 1% de Óleo vegetal residual	220.23	220.15	0.034%
Ligante + 2% de Óleo vegetal residual	218.51	218.41	0.048%
Ligante + 3% de Óleo vegetal residual	219.45	219.33	0.056%

Figura 14. Resultados de perda de massa dos ligantes após o RTFOT.

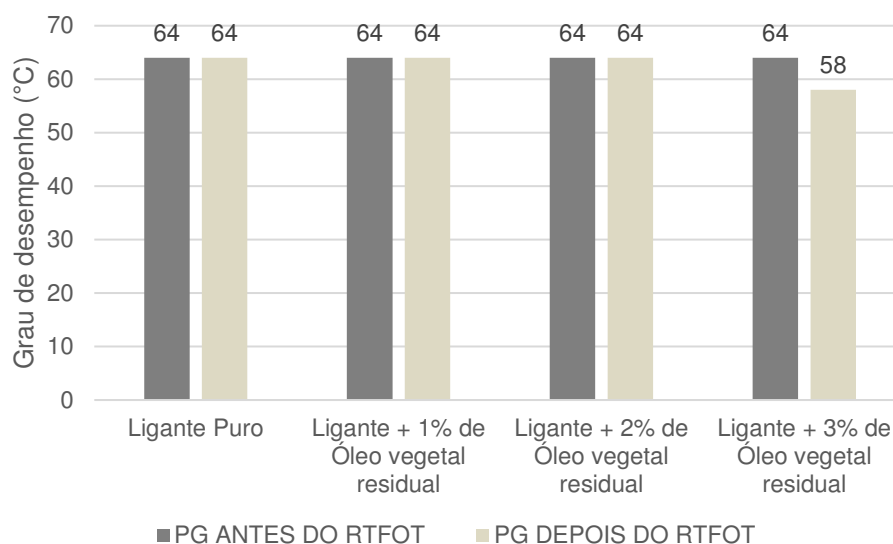


5.2.3. Grau de desempenho– PG

O grau de desempenho - PG de um ligante é definido por dois números representativos da faixa de temperatura (máxima e mínima) em que o ligante poderá ser utilizado. Sendo essas duas temperaturas aquelas que possibilitam o ligante ser utilizado mantendo seu desempenho satisfatório. O grau de desempenho – PG dos ligantes asfálticos foram obtidos com base nos valores do parâmetro $G^*/\text{sen}\delta$, isto é, a temperatura máxima do PG foi definida como a temperatura na qual os valores do $G^*/\text{sen}\delta$ são superiores a 1,0 kPa e a 2,2 kPa, respectivamente para as amostras antes e após o envelhecimento a curto prazo.

A Figura 15 apresenta as temperaturas de PG dos ligantes asfálticos avaliados. Os resultados mostraram que a adição do óleo vegetal residual não alterou a temperatura de PG em relação ao ligante puro, exceto no teor de 3% onde a amostra após o envelhecimento falhou antes dos 64°C.

Figura 15. Grau de desempenho para os ligantes puro e modificado.



O ensaio de PG também fornece a temperatura estimada de falha dos ligantes, definida como a temperatura na qual o parâmetro $G^*/\sin\delta$ atinge um valor menor que 1,0 kPa. As estimativas obtidas para esse valor estão apresentadas na Figura 16 e Tabela 9.

Os resultados de todas as amostras mostraram que, de maneira geral, a adição do óleo vegetal residual ao ligante puro causou aumento das temperaturas de falha, o que ocorreu também após o procedimento de envelhecimento à curto prazo para as amostras com 1% e 2% de aditivo, indicando que o acréscimo do óleo aumentou a resistência do material ao envelhecimento, resultado semelhante ao encontrado por Luz (2019) que analisou o ligante modificado com lignina das madeiras pinus e eucalipto nos teores de 3%, 6% e 9% para cada aditivo. No entanto ao analisar o teor de 3% temos que após o envelhecimento essa amostra apresentou grau de desempenho 2,94% menor que o ligante puro, indicando que sofreu uma provável oxidação, perdendo mais voláteis que as demais amostras com menor porcentagem de aditivo.

Figura 16. Estimativa de temperatura de falha para os ligantes puro e modificados.

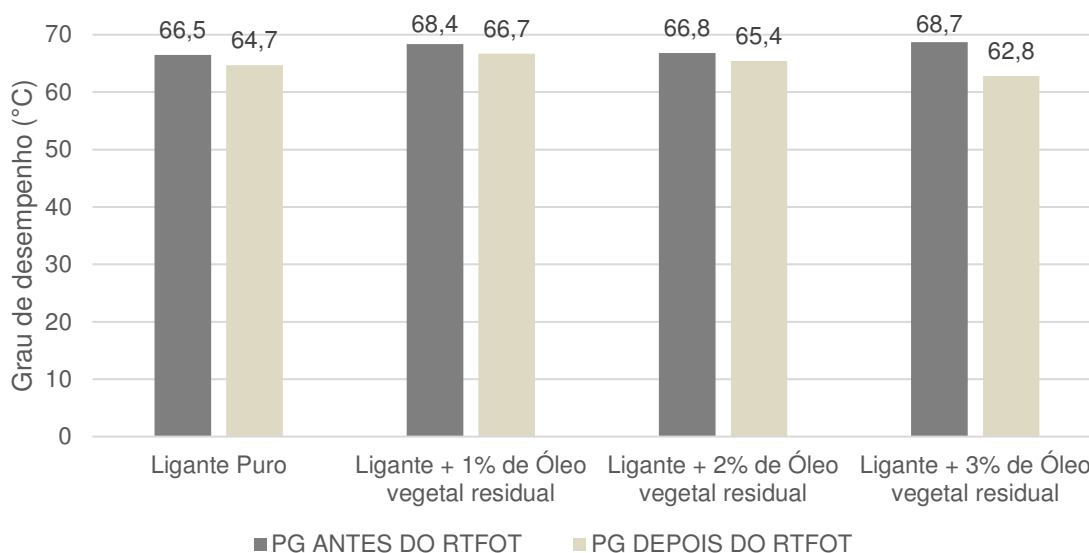


Tabela 9. Estimativa de temperatura de falha para os ligantes puro e modificados.

Amostra	Grau de desempenho (°C)	
	PG ANTES DO RTFOT	PG DEPOIS DO RTFOT
Ligante Puro	66,5	64,7
Ligante + 1% de Óleo vegetal residual	68,4	66,7
Ligante + 2% de Óleo vegetal residual	66,8	65,4
Ligante + 3% de Óleo vegetal residual	68,7	62,8

5.2.4. Fluência e recuperação sob tensões múltiplas - MSCR

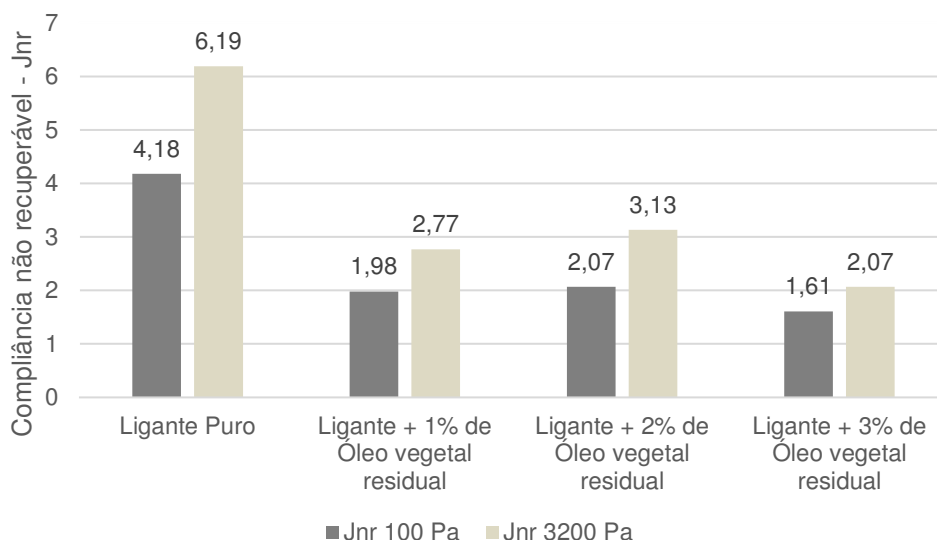
O ensaio de MSCR é reconhecido como representativo para avaliação de aumentos significativos na suscetibilidade à deformação permanente. Os parâmetros analisados neste teste são a compliância não recuperável e a recuperação elástica recuperada pelo ligante sob tensões de cisalhamento aplicadas (DOMINGOS et al, 2013).

As Figuras 17 e 18 apresentam os resultados de Jnr para o ligante puro e do ligante modificado com os teores de 1%, 2% e 3%, para as tensões aplicadas de 100 Pa e 3200 Pa. D'angelo et al. (2007) explicam que o Jnr é utilizado na avaliação das propriedades reológicas de ligantes modificados sob altas temperaturas, relacionando este parâmetro à deformação permanente do ligante. Altos valores de

Jnr indicam elevada suscetibilidade do ligante à deformação permanente, enquanto que menores valores indicam maior resistência do ligante a este defeito.

Nos resultados, verifica-se que os ligantes modificados obtiveram valores menores para compliância não recuperável quando comparados ao ligante puro. Um indicador positivo para a modificação do ligante asfáltico puro com óleo vegetal residual.

Figura 17. Compliância não recuperáveis à 100 e 3200 Pa.

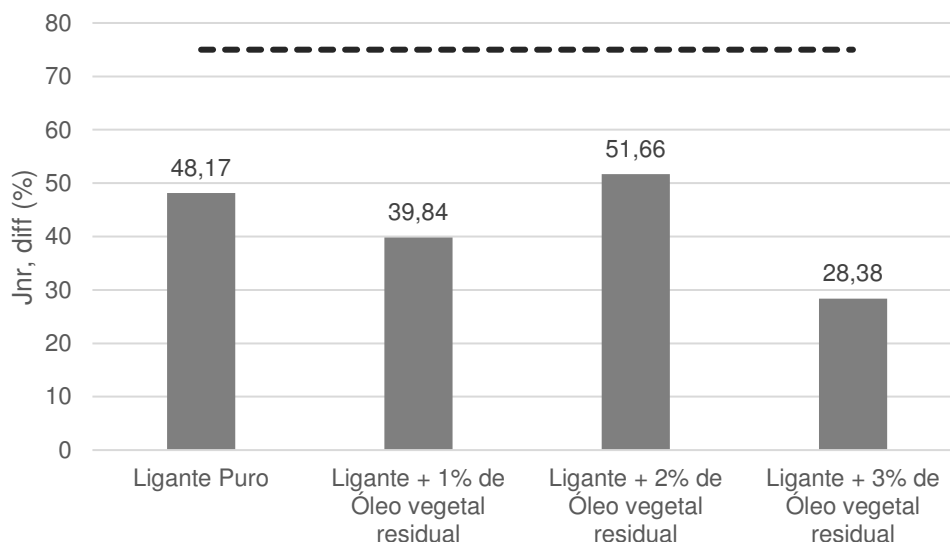


Para avaliação do tráfego a que estes teores de ligantes poderiam suportar segundo a classificação da AASHTO M320 (2016), apresentada na tabela 2, verificou-se que apenas os ligantes modificados se enquadravam no limite máximo de $4,0 \text{ kPa}^{-1}$, desta forma estariam classificados a suportar tráfego padrão (S), já o ligante puro ultrapassou o valor máximo estabelecido pela AASHTO e mesmo após a repetição do ensaio três vezes o resultado se manteve acima de $4,0 \text{ kPa}^{-1}$, impedindo a classificação do mesmo.

A redução dos valores do Jnr é benéfica, significando menor suscetibilidade do ligante à deformação permanente. A partir da Figura 17, constatou-se que os ligantes modificados com 1% e 3%, além de terem reduzido o Jnr, também obtiveram recuperações elásticas maiores que o ligante puro. O teor de 2%, não acompanhou o comportamento dos demais, apesar disso os resultados foram satisfatórios, tendo em vista que esse aumento da sensibilidade não interfere no desempenho do ligante, uma vez que nenhum dos valores chegou próximo do limite estabelecido por norma.

Apesar dos ligantes modificados apresentarem melhor recuperação elástica e menor suscetibilidade a deformações permanentes, os dados do gráfico apresentado na Figura 18 demonstram que o ligante modificado também se torna mais sensível a mudanças de tensões inesperadas que possam acontecer na superfície do pavimento.

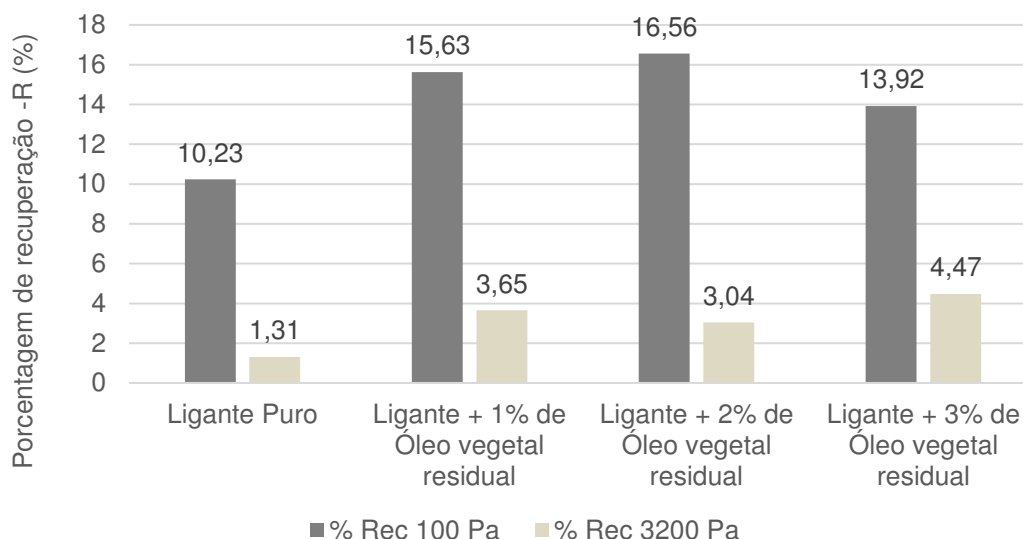
Figura 18. Diferença percentual - Jnr,diff.



Sobreiro (2014) aborda a diferença percentual entre as compliâncias não-recuperáveis a 100 Pa e a 3.200 Pa (Jnr,diff) e cujo limite não deve ultrapassar 75%, pois dessa maneira se garante que o material não seja altamente sensível a alterações nos níveis de tensão e propensos ao surgimento de deformações permanentes. Sendo assim, todas as amostras se encontraram abaixo do limite de 75%.

A Figura 19 apresenta os resultados de percentagem de recuperação, outro parâmetro estudado por meio do ensaio de MSCR, o dado foi obtido após a aplicação de carga para os ciclos de tensão de 100Pa e 3200 Pa durante 9 segundos, e indica a capacidade de retorno elástico da amostra após submetida a esses períodos de tensão e relaxamento.

Figura 19: Porcentagem de recuperação à 100 e 3200 Pa.



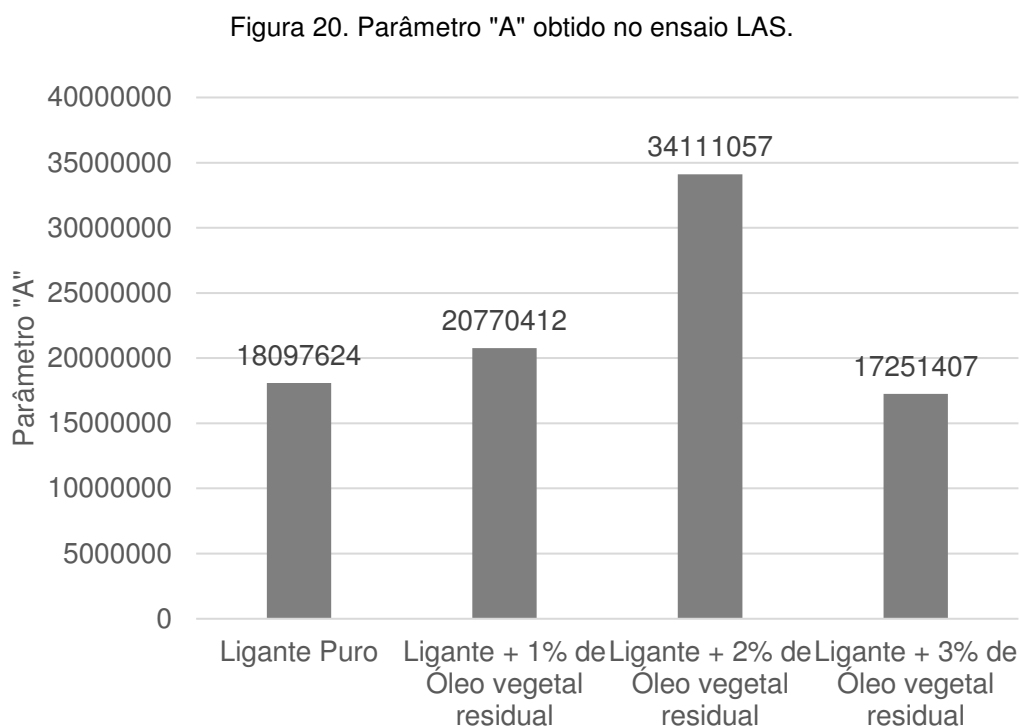
Logo, constatou-se que os ligantes modificados, além de terem reduzido o Jnr, também obtiveram recuperações elásticas maiores que o ligante puro, indicando que o óleo vegetal e o ligante podem formar um ligante modificado com características mais elásticas do que o ligante sem modificação. De acordo com Domingos e Faxina (2015), as maiores porcentagens de recuperação indicam que o ligante asfáltico pode recuperar uma parcela maior de sua deformação total ao final de cada ciclo de carga-descarga, o que favorece a resistência do material a deformação permanente.

Nenhuma das amostras se enquadrou na classificação proposta por FHWA (2010) na Tabela 3, que recomenda os valores mínimos de percentual de recuperação. O teor que atingiu maior recuperação elástica foi o de 3% de óleo vegetal residual, alcançando o valor de 4,47% de recuperação para 3200 Pa. A incorporação do óleo residual ao ligante e o aumento do parâmetro de elasticidade, significa dizer que, esse aditivo vegetal de alguma forma melhorou as interações existentes no ligante asfáltico.

5.2.5. Varredura linear de amplitude de deformação – LAS

Neste subitem estão apresentados os resultados do ensaio de Varredura de Amplitude Linear (LAS) para o ligante puro e modificado nos três teores estudados.

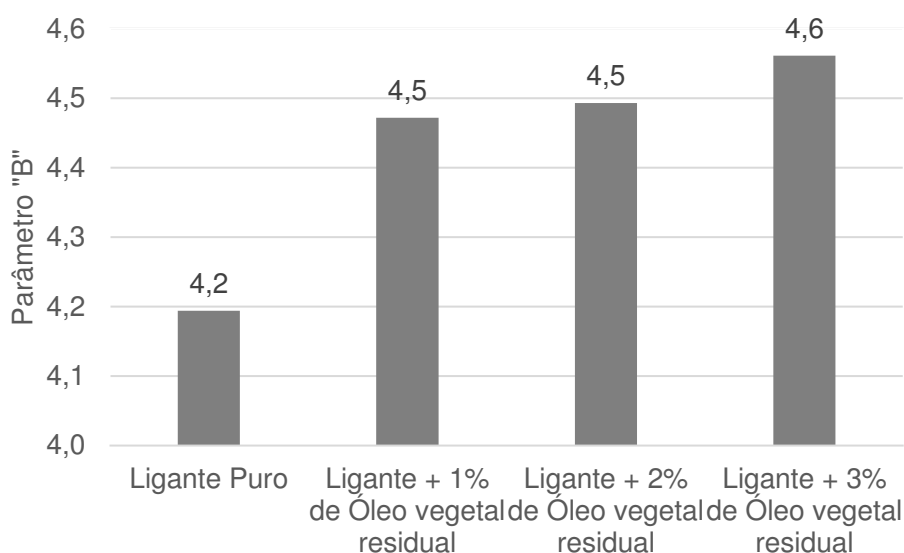
Foram traçados os gráficos das Figuras 20 e 21 que apresentam os resultados dos parâmetros A e B, respectivamente.



Dado que o parâmetro A está relacionado à mudança da integridade do material provocada pelo dano acumulado, valores maiores de A significam dizer que a amostra manteve sua integridade inicial. Desta maneira, pode-se analisar que o teor de ligante modificado com 2% de óleo vegetal residual apresentou integridade da amostra muito superior comparando ao ligante puro que em percentagem foi um aumento de 88,48%. Os demais teores apresentaram variações pouco significativas, onde a amostra de 1% de óleo vegetal obteve aumento de apenas 14,76%, enquanto a amostra de 3% de aditivo apresentou uma redução de 4,67%.

Os valores do parâmetro "B" obtidos para cada amostra ensaiada estão ilustrados na Figura 21, Para Kodrat et al. (2007) maiores valores absolutos desse parâmetro indicam que a vida de fadiga do material decresce a uma taxa maior quando a amplitude de deformação aumenta, do mesmo modo, menores valores absolutos de "B" indicam que a vida de fadiga do ligante decresce a uma taxa menor quando a amplitude de deformação aumenta.

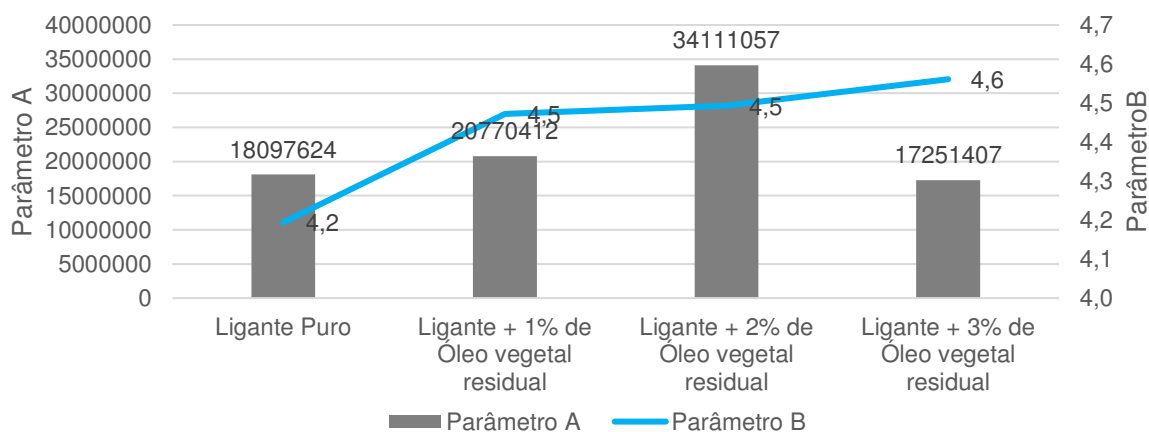
Figura 21. Parâmetro "B" obtido no ensaio LAS.



A análise do parâmetro B, que está relacionado à inclinação da reta da frequência versus módulo de armazenamento (G'), demonstrou que a modificação do ligante asfáltico óleo vegetal residual aumentou os valores de "B", indicando aumento da sensibilidade à variação do nível de deformações no ligante asfáltico apesar de ter garantido maior resistência ao dano, o que não é positivo para os ligantes asfálticos já que indica maior suscetibilidade a deformações sob variações de temperaturas.

A Figura 22 apresenta uma correlação entre a variabilidade dos parâmetros "A" e "B" com o objetivo de verificar a influência no comportamento desses parâmetros simultaneamente

Figura 22. Relação entre os valores dos parâmetros "A" e "B".

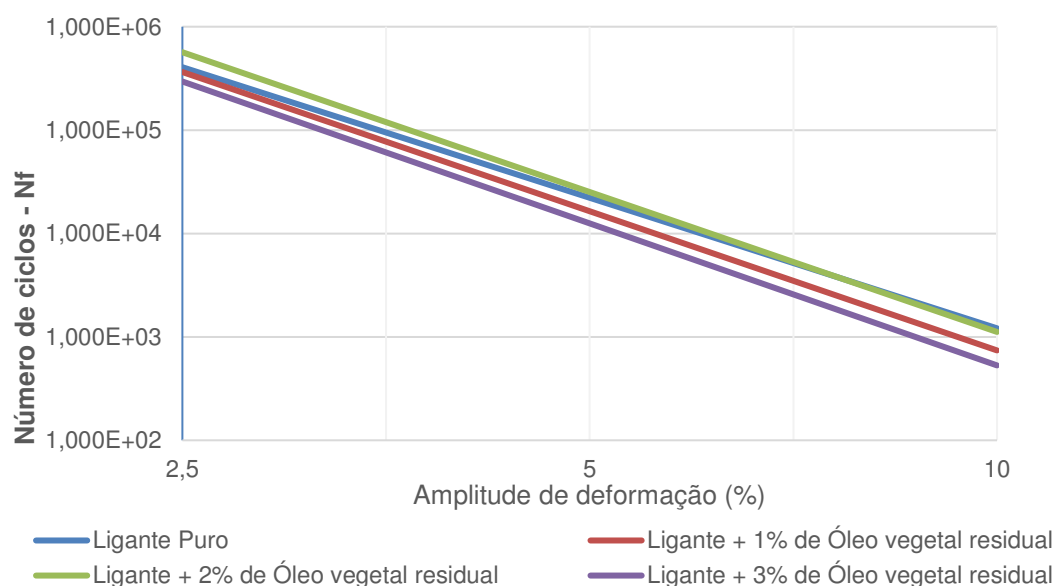


Com o aumento do teor de óleo vegetal residual, o parâmetro “A” aumentou exceto para o teor de 3% de aditivo. O parâmetro “B” seguiu a mesma tendência de crescimento com a maior quantidade de aditivo incorporado, as amostras de 1% e 2% de óleo incorporado ao ligante apresentaram valores superiores ao do ligante puro. Dessa maneira concluiu-se que o aumento desses componentes induz positivamente na melhora da integridade do ligante diante do acúmulo de danos, no entanto influenciam negativamente na melhoria da sensibilidade do ligante ao aumento da amplitude de deformações.

O gráfico da Figura 23 apresenta a estimativa da vida de fadiga do ligante puro e do modificado com óleo vegetal residual obtidas nas análises do dano contínuo viscoelástico (VECD). Por meio do modelo de fadiga foi possível obter informações sobre o comportamento do ligante asfáltico com relação ao dano em temperaturas intermediárias, para uma ampla faixa de deformações e de ciclos de carregamentos (HINTZ, 2012).

Pode-se dizer que o número de ciclos até a falha (N_f) está relacionado ao volume de tráfego suportado pelo material em função das deformações aplicadas, que são um indicador da estrutura do pavimento, ou das deformações admissíveis no pavimento. Isto representa as condições que o material pode ser submetido, segundo Nuñez et al. (2014).

Figura 23. Variação do número de ciclos na ruptura em função da amplitude de deformação para os ligantes asfálticos puro e modificados nos teores de 1, 2 e 3%.



De acordo com as Figura 23 notou-se que apenas o teor de 2% apresentou número de ciclos superior ao ligante puro, exceto na amplitude de 10%. Os demais teores, se mostraram com valores inferiores ao ligante asfáltico puro, sendo a amostra com 3% de aditivo a que apresentou os menores valores dentre os 3 teores analisados.

A Tabela 10 apresenta a estimativa da vida de fadiga (Nf) dos ligantes modificados para diferentes níveis de deformação: 1%, 2,5%, 5% e 10%. A partir desta Tabela foi possível analisar melhor os resultados da estimativa da vida de fadiga para este ligante modificado. Segundo Nascimento (2015), níveis baixos de deformação em torno de 3% representam pavimentos com baixos níveis deflectométricos, cujo comportamento se assemelha ao de um pavimento rígido, enquanto que altos níveis de deformação, representam pavimentos com altos níveis deflectométricos, cujo comportamento se assemelha ao de um pavimento flexível.

Tabela 10. Valores estimados para vida de fadiga dos ligantes puro e modificados.

Amplitude de deformação (%)	1	2,5	5	10
Ligante Puro	635789,6	405680	22164	1211
Ligante + 1% de Óleo vegetal residual	573207,6	364413	16422	740
Ligante + 2% de Óleo vegetal residual	891047,2	566330	25148	1117
Ligante + 3% de Óleo vegetal residual	464723,8	295141	12503	530

Os resultados mostram que para todos os níveis de deformação, o ligante modificado com 2% de óleo vegetal residual apresenta maiores valores para Nf. Este comportamento já era de se esperar, uma vez que este mesmo teor foi o que forneceu maior integridade ao material para diferentes níveis de deformação, em que o parâmetro A coincide com o valor da amplitude de deformação de 1%.

6. Conclusão

Os resultados dos ensaios físicos mostraram que os ligantes modificados com a óleo vegetal residual apresentaram maior penetração, menor ponto de amolecimento, reduções nas temperaturas de usinagem e compactação e menor susceptibilidade ao envelhecimento à curto prazo, mostrando suportar maiores temperaturas em campo e contribuindo de maneira positiva na resistência a deformação.

A reologia dos ligantes modificados mostrou que a incorporação do óleo vegetal diminuiu a viscosidade do ligante. Estes também alcançaram maiores temperaturas de falha no grau de desempenho onde não ocorreu alterações significativas após o procedimento RTFOT corroborando com as características antioxidantes do óleo vegetal residual. Diante dos resultados da pesquisa, a modificação do ligante asfáltico 50/70 com óleo vegetal residual foi benéfica pois retardou envelhecimento, resultados observados nos ensaios de MSCR e LAS, melhorando sua resistência quanto à deformação permanente e à fadiga. Baseado nas análises físicas e reológicas realizadas foi possível validar a hipótese testada neste estudo.

De maneira ampla, a incorporação do óleo vegetal residual se apresentou como uma alternativa viável do ponto de vista reológico em relação ao ligante asfáltico 50/70, pois atribuiu a este uma maior vida útil e propriedades reológicas superiores ao ligante puro. Pode ser viável também do ponto de vista ambiental considerando os problemas que o descarte incorreto desse resíduo pode acarretar ao meio-ambiente, e por questões energéticas por reduzir as temperaturas de usinagem e compactação.

A adição de óleo vegetal residual no teor de 2% destacou-se, mostrando ser o meio mais eficaz de incorporação desse aditivo ao ligante asfáltico. Portanto a incorporação de óleo vegetal residual em ligantes asfálticos proporcionou benefícios como diminuição da deformação permanente, aumento da vida de fadiga, e ainda forneceu ao ligante, menor susceptibilidade ao envelhecimento precoce à curto prazo.

Referências

AASHTO M 320:2017 Standard Specification for Performance-Graded Asphalt Binder. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2017.

AASHTO TP 101:2012 Standard method of test for estimating fatigue resistance of asphalt binders using the linear amplitude sweep. Test Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. Washington, DC. 2012.

ABNT NBR 15184. Materiais Betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP, 2007.

ABNT NBR 15235 – Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional. Associação Brasileira de Normas técnicas, Rio de Janeiro, 2005.

AIREY, G. D.; BROWN, S. F. Rheological Performance of Aged Polymer Modified Bitumens Proceedings. Association of Asphalt Paving Technologists, vol. 67, p. 66-87, 1998.

ANDERSON, M. et al. MSCR: a better tool for characterizing high-temperature performance properties. Asphalt – The magazine of the Asphalt Institute. Lexington, KY, v.25, p.16-16, 18.21-23. ISSN 0004-4594.

ANP. Agência Nacional do Petróleo. Rio de Janeiro: ANP, 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em setembro de 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 720/1982: Termologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 1982.

ASTM D2872 (1997) Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling ThinFilm Oven Test). American Society for Testing and Materials.

ASTM D6373-16 Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

ASTM D7405-15 Standard Test Method for Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR) of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASUKAR, S. D.; BEHL, A.; GUNDALIYA, P. J. Utilization of Lignin as an Antioxidant in Asphalt Binder. International journal of innovative research in technology, IJIRT, v. 2, n. 12, p. 198-207, 2016.

AZEVEDO, O.A.; RABBI A.M.; NETO, D.M.C. & HARTUIQ, M.H. (2009). Fabricação de Sabão a Partir do Óleo Comestível Residual: Conscientização e Educação Científica. XVIII Simpósio Nacional de Ensino de Física, Vitória, ES.

BERNUCCI, Liedi Bariani; MOTTA, Laura Maria Goretti da; CERATTI, Jorge Augusto Pereira; SOARES, Jorge Barbosa Soares. Pavimentação asfáltica: Formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro, 2008.

BRASIL, PNRS. Lei n 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei, v. 9, 1998.

BRASIL. Resolução RDC/ANVISA/MS nº 270, de 22 setembro de 2005. Regulamento técnico para óleos vegetais, gorduras vegetais e creme vegetal. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil,. Brasília, DF, 23 set. 2005.

BULATOVIC, V. O.; REK, V.; MARKOVIC, J. Rheological Properties of Bitumen Modified with Ethylene Butylacrylate Glycidylmethacrylate. Polymer Engineering & Science, v. 54, n. 5, p. 1056–1065, 201.

CARVALHO, J. R. Estudo do comportamento do asfalto modificado com óleo de girassol visando à obtenção de misturas mornas. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2018.

CARVALHO, T. U. da S. Estudo da obtenção de pavimento asfáltico a partir da mistura de bioasfalto e polímero do tipo RET. Trabalho de Conclusão de Curso - UNIFESSPA. Marabá - PA, 2016.

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

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT. Impactos dos Projetos de Integração Nacional do Plano CNT de Transporte e Logística 2018 na infraestrutura de transporte. Brasília: CNT: SEST SENAT. Disponível em: < [http://cms.cnt.org.br/Imagens CNT/PDFs CNT/Transporte em Movimento/Transporte_em_Movimento_Novembro_2018.pdf](http://cms.cnt.org.br/Imagens/CNT/PDFs/CNT/Transporte_em_Movimento/Transporte_em_Movimento_Novembro_2018.pdf).> Acesso em: 19 abr. 2019.

COSTA, C. J. B. Aplicação de Técnicas de Reciclagem de Pavimentos, como Forma de Minimizar os Impactos Ambientais Causados em Obras Rodoviários no Brasil. Revista ABPv, Associação Brasileira de Pavimentação, Ano V, nº 16, p. 38-49, Jan/Fev/Mar de 2010.

D'ANGELO, J.; KLUTTZ, R.; DONGRE, R.; STEPHENS, K.; ZANZOTTO, L. Revision of the superpave high temperature binder specification: The multiple stress creep recovery test. J. Assoc. Asphalt Pavement Technol., v. 76, 123-162. 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA ESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNITME 155/2010: Material asfáltico - Determinação da Penetração. 7p. 2010.

DNIT (2010) ME 131/2010 –Material asfáltico – Determinação do ponto de amolecimento – Método anel e bola. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.

DOMINGOS, M. D. I. (2011) Caracterização do comportamento fluênciarecuperação de ligantes asfálticos modificados virgens e envelhecidos. Dissertação de Mestrado. Engenharia de Transportes da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. Avaliação do Comportamento FluênciaRecuperação de Ligantes Asfálticos com SBS e Ácido Polifosfórico. Revista Transportes, v. 21, p. 51-58. 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA SOJA. Cultivo de Girassol. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/producaogirassol/index.htm>> Acesso em outubro de 2019.

FHWA. Superpave Binder Specification. Federal Highway Administration. Washington. 2002.

GUERRA, E. P.; FUCHS, W. Biocombustível Renovável: Uso do Óleo Vegetal em Motores. Revista Acadêmica de Ciências Agrárias e Ambientais, v. 8, n. 1, p.103-112, Curitiba, PR, Janeiro/Março 2010.

GUERRA, T. D. Utilização do óleo de canola para redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas. 2019. 105 p. Dissertação (Mestrado EM Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal de Campina Grande, 2019.

HINTZ, C. Understanding mechanics leading to asphalt binder Fatigue. Dissertation. University of Wisconsin-Madison. 2012.

KALANTAR, Z, N.; KARIM, M. R.; MAHREZ, A. A review of using waste and virgin polymer in pavement. Construction and Building Materials, Volume 33, 2012, p. 55-62.

KODRAT, I.; SOHN, D.; HESP, S. Comparison of Polyphosphoric Acid– Modified Asphalt Binders with Straight and Polymer-Modified Materials. Transportation Research Board, v. 1998, p. 47–55, 2007.

LUCENA, L. C. F. L.; SILVEIRA, I. V.; COSTA, D. B. Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera Lam para uso em misturas mornas. Revista Matéria, Brasil, v. 21, n. 01, p. 72-82, 2016.

LUZ, P. M. S. G. Avaliação reológica do ligante asfáltico 50/70 modificado com lignina das madeiras pinus e eucalipto. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2018.

MARINHO FILHO, P. G. T. Avaliação reológica de ligantes asfálticos modificados com nanopartículas de dióxido de titânio. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2017.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Brasília, 2003. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/conama>>. Acesso em outubro de 2019.

NASCIMENTO, T. C. B. Efeito Dos Envelhecimentos Termo-Oxidativo E Foto-Oxidativo Sobre Propriedades Reológicas De Ligantes Asfálticos Modificados. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

NEGRÃO, D. P. Estudo de Asfaltos Modificados por Polímeros do Ripo RET para Aplicação em Pavimentos. Dissertação de Mestrado – USP. São Paulo – SP, 2006.

NOGUEIRA, G. Proposta de metodologia para o gerenciamento de óleo vegetal residual oriundo de frituras. Arati, UNICENTRO. 2009.

NORRIS, S R; Joseph A. Brik Jr. - Indústrias de processos químicos - 4º edição Ed. Guanabara, Rio de Janeiro. 2000.

NUÑEZ, J. Y. M.; DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. Susceptibility of lowdensity polyethylene and polyphosphoric acid-modified asphalt binders to rutting and fatigue cracking. *Construction and Building Materials*, v. 73, p. 509–514, 2014.

OIL WORLD. Ista Mielke GmbH: Forecasting and Information Service for Oilseeds, Oils and Meals. Hamburg – Germany. Disponível em: <http://www.oilworld.biz/home>. Acesso em agosto de 2019.

OLIVEIRA, J. A. B.; AQUINO, K. A. S. Óleo residual de frituras: impactos ambientais, educação e sustentabilidade no biodiesel e sabão; X Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão da Universidade Federal Rural de Pernambuco - Jopex 2010.

OLIVEIRA, R. B. Estudo sobre o efeito do ccbt-113ad no comportamento mecânico de misturas asfálticas. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil. 2014

PETROBRAS. Asfalto - Informações Técnicas. Disponível em; <http://sites.petrobras.com.br/minisite/assistenciatecnica/public/downloads/Asfalto-Informacoes_Tecnicas.pdf> Acesso em: julho de 2019.

PINHEIRO, J. Incorporação de Borracha de Pneu em Misturas Asfálticas de Diferentes Granulometrias (Processos Úmido e Seco). Dissertação do Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, 2004.

POLACCO, G.; FILIPPI, S.; MERUSI, F.; STASTNA, G. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science*, v. 224, p. 72–112, 2015.

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

RABELO, A. R.; FERREIRA, M. O. Coleta seletiva de óleo residual de fritura para aproveitamento industrial. Universidade Católica de Goiás, Goiânia, p. 1-19, jun. 2008.

RUBBER PAVEMENT ASSOCIATION – RPA. Noise reduction with asphalt-rubber. Phoenix, 2000. 4p. Disponível em: <<http://www.rubberpavements.org/library/SILVA>, M. C. L.; ALMEIDA, M. L. Logística reversa e destinação correta do óleo residual vegetal: uma análise do programa mundo limpo vida melhor. In: SEMINÁRIOS EM ADMINISTRAÇÃO, 18., nov. 2015. Anais. SemeAD, 2015.

SOBREIRO, F. P. Efeito da adição de ácidos fosfóricos no comportamento reológico de ligantes asfálticos puros e modificados com copolímero SBS. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo/USP, São Paulo/SP, 2014.

SPECHT, L. P. Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneus. Porto Alegre. Tese (Doutorado em Engenharia) – PPGEC/UFRGS. 2004. 279p

TONIAL, I.A. Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na Vida de Fadiga de Pavimentos. Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro/RJ, 2001.

VELOSO, Y.M.S., LIMA E FREITAS, L.F., et al., “Rotas para reutilização de óleos residuais de fritura”, Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 1, n.15, p. 11-18, 2012.

VELOSO, Y.M.S., LIMA E FREITAS, L.F., et al.,. “Rotas para reutilização de óleos residuais de fritura”, Cadernos de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas, v. 1, n.15, p. 11-18, 2012.

WHITEOAK, D. SHELL Bitumen Handbook. SHELL, Inglaterra, 1990.

ZANZOTTO, L., SVEC, O. Utilization of Recycled Tire Rubber in Asphalt Pavement. Ottawa: Transportation Association of Canada, 1996.

ZAUMANIS M., MALLICK R.B., FRANK R. Determining Optimum Rejuvenator Dose for Asphalt Recycling Based On Superpave Performance Grade Specifications, Construction and Building Materials, v.69, p. 159-166. 2014.