INGRID GABRIELLE DO NASCIMENTO CAMARGO

Potencial do emprego de misturas de bioligante e agregados usinadas a quente para revestimentos e bases de pavimentos

São Paulo
2018

INGRID GABRIELLE DO NASCIMENTO CAMARGO

Potencial do emprego de misturas de bioligante e agregados usinadas a quente para revestimentos e bases de pavimentos

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências

São Paulo
2018

INGRID GABRIELLE DO NASCIMENTO CAMARGO

Potencial do emprego de misturas de bioligante e agregados usinadas a quente para revestimentos e bases de pavimentos

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de concentração:
Engenharia de Transportes

Orientadora:
Prof^a. Dra. Titular Liedi Légi Bariani Bernucci

São Paulo
2018

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

camargo, Ingrid

Potencial do emprego de misturas de bioligante e agregados usinadas a quente para revestimentos e bases de pavimentos / I. camargo -- versão corr. - São Paulo, 2018.

137 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Sustentabilidade 2.Pavimentação 3.Reologia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

Dedico este trabalho a Deus e aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por sempre demonstrar sua misericórdia e amor pela minha vida. Aos meus pais José e Martha, pelo amor, incentivo, confiança e por sempre estarem presentes em minha vida. Aos meus queridos avós Eudocia e José (in memorian) pelo carinho sempre demonstrado. À professora Liedi Bernucci pela orientação, incentivo, paciência, oportunidade de aprendizado, confiança depositada, compreensão, carinho, dedicados ao longo do mestrado, principalmente em momentos difíceis e delicados que enfrentei.

Aos amigos do Laboratório de Tecnologia de Pavimentação LTP-USP que conheci ao longo do mestrado especialmente à Professora Rosângela Motta, Professora Kamilla Vasconcelos, Edson de Moura, Diomária, Robson, Vanderlei, Erasmo, Higor, Laura, Domênico, Jennifer, André, Zila, Talita, Iuri, Kazuo, Matheus, Paulo, Lucas, Márcia, José João, João Paulo, Fernanda e Guilherme.

As empresas Copavel, Greca Asfaltos e Quimigel pela cooperação e por compartilhado a responsabilidade na busca por pavimentos mais sustentáveis. Ao CNPq pela bolsa de mestrado.

Por fim agradeço a todos os professores que colaboraram com seu conhecimento para minha formação acadêmica e aos amigos contribuíram de alguma maneira em minha jornada.

RESUMO

A presente dissertação de mestrado visa avaliar e comparar o desempenho de um bioligante, obtido por processamento de material de origem vegetal, frente a ligantes asfálticos derivados do refino de petróleo. Nesse sentido, foram realizados ensaios objetivando a caracterização reológica dos ligantes e análise do comportamento mecânico de misturas usinadas destes ligante com agregados. Com auxílio de um reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) foram realizados os seguintes ensaios reológicos: cisalhamento oscilatório (para determinação do módulo complexo e do ângulo de fase); fluência e recuperação sob múltiplas tensões (MSCR); e varredura de amplitude linear (LAS). Uma avaliação do efeito do envelhecimento dos bioligante em comparação com um ligante convencional CAP 30/45 foi realizada com base em características reológicas e químicas. Dentre os ensaios mecânicos realizados nas misturas de ligantes com agregados usinadas a quente, tem-se: deformação permanente e módulo dinâmico. Os resultados reológicos mostram que o bioligante apresenta elevados módulos de cisalhamento dinâmico em altas frequências, mas é semelhante a um asfalto convencional nas baixas frequências. Os ensaios indicam que o bioligante pode vir a apresentar boa resistência à deformação permanente, semelhante à verificada em ligante asfáltico convencional (CAP 30/45). Tal semelhança de comportamento, entre os dois tipos de ligantes, foi igualmente verificada em ensaios mecânicos de determinação do afundamento em trilha de roda, realizados nas misturas usinadas a quente em laboratório. Os resultados reológicos de LAS indicam que o bioligante deve apresentar menor vida de fadiga. A temperatura do ensaio de envelhecimento de curto prazo interferiu significativamente na rigidez do bioligante, assinalando o expressivo efeito da temperatura de ensaio RTFOT na oxidação e na perda de voláteis do bioligante. Os índices de carbonila e de sulfóxido não se mostraram adequados para análise da oxidação e envelhecimento sofrido pelo bioligante envelhecido em diferentes condições. Os ensaios de módulo dinâmico de misturas usinadas de bioligante com agregados tendem a mostrar elevados valores, maiores que as misturas com asfalto convencional. Baseando-se na análise dos resultados reológicos e nas observações de comportamento mecânico das misturas usinadas a quente de bioligante e agregados é possível, portanto, constatar o potencial do emprego deste material inovador em camadas usinadas e compactadas de pavimentos.

Palavras-chave: Bioligante. Misturas usinadas de bioligante e agregados. Sustentabilidade. Caracterização reológica. Pavimentos.

ABSTRACT

This dissertation aims to evaluate and compare the performance of a biobinder obtained by processing plant material against asphalt binders derived from petroleum refining. Thus, tests were performed aiming at the rheological characterization of the binders and at the analysis of the mechanical behavior of hot mixtures processed with such binders and aggregates. With the use of Dynamic Shear Rheometer (DSR), the following rheological tests were carried out: Oscillatory shear (in order to determine the complex modulus and phase angle); the Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR); and the Linear Amplitude Sweep (LAS). An evaluation of the biobinder aging effect in comparison to a conventional CAP 30/45 binder was performed based on rheological and chemical features. Among the mechanical tests carried out on binder and aggregate hot mixtures, there were: Rutting, and Dynamic Modulus tests. Rheological results show that the biobinder presents high dynamic shear modulus at high frequencies; however, it is similar to conventional asphalt at low frequencies. Tests indicate that the biobinder may present good resistance to permanent deformation, similar to that observed in conventional (CAP 30/45) asphalt binder. Such similarity in behavior in both types of binders was also verified in mechanical rutting tests performed on the hot mixtures in the laboratory. The LAS rheological results indicate that the biobinder must present a lower fatigue life. The temperature of the short-term aging test significantly interfered with the stiffness of the biobinder, pointing out the meaningful effect of the RTFOT test temperature on the oxidation and on the loss of volatiles from the biobinder. The carbonyl and sulphoxide rates were not adequate for the analysis of the oxidation and aging suffered by the biobinder aged under different conditions. Dynamic modulus assays of biobinder and aggregate hot mixtures tend to show higher values, higher than mixes with conventional asphalt. Based on the analysis of the rheological results, and on the observations of the mechanical behavior of biobinder and aggregate hot mixes, it is possible, therefore, to verify the potential of using this innovative material in hot-mix and compacted pavement layers.

Keywords: Biobinder. Biobinder and aggregate hot mixtures. Sustainability. Rheological characterization. Pavements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Custo estimado por etapa para confecção de pavimentos asfálticos.....	21
Figura 2 – Diferentes fontes de biomassa empregadas para obtenção de bioligantes: (a) resíduo de jardim; (b) madeira de pinho; (c) óleo de cozinha modificado.	26
Figura 3 – Esquema simplificado dos testes empregados no Superpave	42
Figura 4 – Contribuição do ligante asfáltico nos principais defeitos no pavimento	42
Figura 5 – Considerações sobre DSR: (a) Esquema de funcionamento; (b) cuidados com a amostra.....	43
Figura 6 – Parâmetros reológicos: (a) defasagem entre tensão e deformação; (b) Relação entre o módulo de cisalhamento dinâmico e o ângulo de fase.....	44
Figura 7 – Dano devido à umidade em pavimentos	51
Figura 8 – Curva mestra: $ E^* $ versus frequência	53
Figura 9 – Defeito por deformação permanente em pavimento rodoviário.....	54
Figura 10 – Mecanismos de deformação permanente: (a) densificação; (b) Cisalhamento vertical	54
Figura 11 – Comparação entre a coloração: (a) Bioligante; (b) CAP 30/45	58
Figura 12 – Diâmetros das amostras para ensaios reológicos no DSR: (a) 25 mm; (b) 8 mm	59
Figura 13 – Fluxograma para ensaios de caracterização reológica dos ligantes	62
Figura 14 – Curvas mestras do módulo de cisalhamento dinâmico (Antes RTFOT) ..	63
Figura 15 – Curvas mestras do módulo de cisalhamento dinâmico (Após RTFOT) ..	64
Figura 16 – Efeito do RTFOT na rigidez dos ligantes: (a) BIO 1; (b) BIO 2; (c) BIO 3; (d) BIO 4; (e) CAP 30/45; (f) Asfalto-borracha.....	65
Figura 17 – Curvas mestras do ângulo de fase (Antes RTFOT)	66
Figura 18 – Curvas mestras do ângulo de fase (Após RTFOT)	66
Figura 19 – Efeito do envelhecimento no ângulo de fase dos ligantes: (a) BIO 1; (b) BIO 2; (c) BIO 3; (d) BIO 4; (e) CAP 30/45; (f) Asfalto-borracha	67
Figura 20 – Valores das compliâncias não recuperáveis: (a) $J_{nr\ 100}$; (b) $J_{nr\ 3200}$	68
Figura 21 – Porcentagens de recuperação elástica dos ligantes: R100.....	71
Figura 22 – Porcentagens de recuperação elástica dos ligantes: R3200.....	71
Figura 23 – Curvas de dano versus integridade.....	74
Figura 24 – Curvas de Fadiga dos ligantes analisados.....	75

Figura 25 – Análise da oxidação de ligantes por FTIR: (a) Espectrofotômetro; (b) Amostra de ligante	84
Figura 26 – Fluxograma da metodologia adotada: estudo do envelhecimento de bioligante	85
Figura 27 – Curvas mestras: estudo do envelhecimento de bioligante	86
Figura 28 – Valores de $J_{nr\ 100}$: estudo do envelhecimento de bioligante.....	87
Figura 29 – Valores de $J_{nr\ 3200}$: estudo do envelhecimento de bioligante	88
Figura 30 – Valores de R_{100} : estudo do envelhecimento de bioligante	89
Figura 31 – Valores de R_{3200} : estudo do envelhecimento de bioligante.....	90
Figura 32 – Curvas de dano versus integridade: estudo do envelhecimento de bioligante	91
Figura 33 – Curvas de Fadiga dos ligantes analisados	92
Figura 34 – Espectros FTIR-ATR: estudo do envelhecimento de bioligante	94
Figura 35 – Detalhamento dos espectros (entre 1830 cm^{-1} e 1670 cm^{-1}).....	94
Figura 36 – Detalhamento dos espectros (grupo funcional sulfóxido).....	95
Figura 37 – Detalhamento dos espectros (entre 1240 cm^{-1} e 990 cm^{-1}).....	96
Figura 38 – Índice de carbonila: estudo do envelhecimento de bioligante	97
Figura 39 – Índice de sulfóxido: estudo do envelhecimento de bioligante.....	97
Figura 40 – Faixa granulométrica obtida	104
Figura 41 – Faixa granulométrica adaptada em campo	105
Figura 42 – Fluxograma da metodologia adotada para caracterização das misturas usadas	107
Figura 43 – Condicionamento das amostras: (a) saturação; (b) congelamento	108
Figura 44 – Amostras controle (à esquerda) e condicionadas (à direita) após ruptura: (a) mistura asfáltica (CAP 30/45); (b) mistura de bioligante com agregados	110
Figura 45 – Junta entre o pavimento obtido a partir de bioligante (à esquerda) e o pavimento asfáltico convencional (à direita).....	111
Figura 46 – Curvas mestras médias das misturas analisadas	111
Figura 47 – Percentual de afundamento versus Número de Ciclos	113

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	12
1.1. Justificativa.....	12
1.2. Objetivos	13
1.3. Organização da Dissertação	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. Sustentabilidade nas rodovias	16
2.1.1. Sistemas de gestão sustentável de rodovias.....	17
2.1.2. Misturas asfálticas mornas	19
2.1.3. Misturas asfálticas recicladas	21
2.1.4. Asfalto Borracha	23
2.2. Bioligantes.....	25
2.2.1. Métodos de obtenção de bioligantes	27
2.2.2. Pesquisas desenvolvidas sobre emprego de bioligantes	29
2.3. Caracterização de ligantes asfálticos	39
2.3.1. Classificação Brasileira de ligantes asfálticos	39
2.3.1. Classificação Norte Americana de ligantes asfálticos.....	40
2.3.2. Curva mestra	45
2.3.3. Ensaio de fluência e recuperação sob múltiplas tensões - Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)	46
2.3.4. Ensaio de varredura de amplitudes - Linear Amplitude Sweep (LAS) ...	48
2.4. Caracterização de misturas asfálticas.....	50
2.4.1. Dano devido à umidade em misturas asfálticas	50
2.4.2. Ensaio de módulo dinâmico em misturas asfálticas	52
2.4.3. Deformação permanente em misturas asfálticas.....	53
3. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE BIOLIGANTE PRODUZIDO A PARTIR DE ÓLEOS VEGETAIS	56

3.1. Introdução	56
3.2. Materiais.....	57
3.3. Métodos	59
3.3.1. Ensaio de varredura de frequências	60
3.3.2. Ensaio de fluência e recuperação sob múltiplas tensões (MSCR)	60
3.3.3. Ensaio de varredura de amplitude linear (LAS)	60
3.4. Resultados e discussões.....	62
3.4.1. Ensaio de varredura de frequências	62
3.4.2. Ensaio MSCR em ligantes envelhecidos a curto prazo	68
3.4.3. Ensaio LAS em ligantes envelhecidos a curto prazo	74
3.5. Conclusões	76
4. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA E QUÍMICA DO EFEITO DA TEMPERATURA NO ENVELHECIMENTO DE CURTO PRAZO DE BIOLIGANTE ..	79
4.1. Introdução	79
4.2. Materiais.....	81
4.3. Métodos	82
4.3.1. Envelhecimento de curto prazo	82
4.3.2. Extração e recuperação do bioligante	83
4.3.3. Ensaio de varredura de frequência.....	83
4.3.4. Ensaio de Varredura de amplitude linear (LAS)	83
4.3.5. Ensaios de fluência e recuperação (MSCR)	84
4.3.6. Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) ..	84
4.4. Resultados e discussões.....	85
4.4.1. Ensaio de varredura de frequências	85
4.4.2. Ensaios de fluência e recuperação sob múltiplas tensões (MSCR).....	87
4.4.3. Ensaio de Varredura de amplitude linear (LAS)	90
4.4.4. Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) ..	93

4.5. Conclusões	98
5. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS DE BIOLIGANTE E AGREGADOS USINADAS A QUENTE PARA EMPREGO EM PAVIMENTOS	101
5.1. Introdução	101
5.2. Materiais.....	102
5.3. Métodos	106
5.3.1. Ensaio de dano por umidade induzida.....	107
5.3.2. Ensaio de módulo dinâmico.....	108
5.3.3. Ensaio de deformação permanente - Simulador de tráfego francês (Tipo LPC) 109	
5.4. Resultados e discussões.....	109
5.4.1. Ensaio de dano por umidade induzida.....	109
5.4.2. Ensaio de módulo dinâmico.....	111
5.4.3. Ensaio de deformação permanente - Simulador de tráfego francês (Tipo LPC) 112	
5.5. Conclusões	116
6. COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES.....	118
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. Justificativa

Nas últimas décadas, visando suprir a crescente demanda mundial por energia, vem se intensificando os investimentos em prol de fontes energéticas renováveis, entretanto, apesar dos esforços na busca por combustíveis mais sustentáveis, de acordo com relatório do World Energy Council (2016), o petróleo ainda lidera como principal fonte de energia, responsável por cerca de 30% do consumo global.

No ano de 2015, a maior parcela da demanda energética brasileira também foi suprida pelo petróleo e por seus derivados, correspondendo a 37,3% da oferta interna de energia (EPE, 2016). Com base nos dados apresentados pela Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2016), em 2015 foram produzidos, diariamente, em média, 2,40 milhões de barris de petróleo, registrando um crescimento da produção brasileira de aproximadamente 8%, em relação ao ano anterior.

Todavia, segundo o mesmo relatório ocorreu uma queda na produção de derivados de petróleo, dentre eles, destaca-se o asfalto que sofreu uma redução de cerca de 40%, o que corresponde à diminuição da oferta de cerca de 1,3 milhões de metros cúbicos desse material, entre 2014 e 2015. Para efeito de valoração desta redução, o consumo interno de asfalto em 2014 foi de 3.294.424 toneladas e em 2015 de 1.901.858 toneladas.

A crise econômica pela qual passa o país é responsável por parte da queda de consumo e o aumento expressivo de preço no ano de 2016 e 2017, contribuindo assim para a diminuição da demanda. Dessa forma, o setor de transporte rodoviário, um dos principais consumidores de asfalto em obras viárias, encontra um impasse quanto à implantação de novas rodovias e a restauração dos pavimentos já existentes.

De acordo com Amann et al. (2016) mais da metade do frete brasileiro é mobilizado por estradas, entretanto uma pequena parcela das rodovias brasileiras é pavimentada. Essa deficiência em infraestrutura rodoviária é um dos principais

gargalos para crescimento econômico brasileiro, pois contribui com aumento nos custos logísticos, o que afeta negativamente a competitividade do país. Dado este panorama, a tentativa de redução de custos de transportes é uma constante preocupação das principais autoridades do país.

O desenvolvimento de fontes alternativas ao ligante asfáltico convencional de petróleo é uma medida estratégica para o desenvolvimento rodoviário brasileiro, afetando diretamente o crescimento econômico do país. Na busca por soluções tecnológicas mais sustentáveis, deve-se priorizar a utilização de matérias-primas renováveis na confecção de ligantes alternativos que venham substituir os ligantes asfálticos convencionais, em parte ou integralmente, visando assim a redução de impactos ao meio ambiente.

Várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas na busca por fontes alternativas que viabilizem a construção de pavimentos com alta qualidade e durabilidade; dentre as principais matérias-primas estudadas, destacam-se as obtidas a partir de fontes renováveis ou que absorvam passivos ambientais. Huang, Salomon e Haddock (2012) mencionam as possíveis fontes com propriedades químicas semelhantes aos ligantes asfálticos, dentre essas, pode-se citar: dejetos de suínos, óleos de origem vegetal, materiais pirolisados, entre outros.

Objetivando suprir as deficiências existentes no setor rodoviário e aproveitando-se da vasta área de cultivo disponível no território brasileiro foi desenvolvido um produto proveniente de óleos vegetais, o qual foi denominado nesta pesquisa como bioligante, a fim de ser empregado como substituto aos ligantes asfálticos convencionais, derivados da destilação do petróleo, na construção de camadas de pavimentos rodoviários.

1.2. Objetivos

O objetivo desta pesquisa de mestrado é analisar laboratorialmente por meio de ensaios reológicos e de propriedades mecânicas a viabilidade da substituição do ligante asfáltico convencional por um produto inovador, de origem vegetal, denominado nesta pesquisa por bioligante, na confecção de misturas usinadas a

quente com agregados, para emprego em camadas de base e de revestimento de pavimentos.

Para este estudo, verificar-se-ão as propriedades reológicas do bioligante e o comportamento mecânico da mistura usinada a quente, composta por bioligante e agregados, em comparação a um ligante asfáltico convencional (CAP 30/45) e a um ligante asfáltico modificado com borracha (Asfalto-borracha), ambos utilizados como ligantes e misturas asfálticas de controle. Espera-se que o trabalho possa fornecer orientações acerca da viabilidade técnica do emprego do bioligante na produção de camadas de pavimentos rodoviários.

1.3. Organização da Dissertação

No capítulo 1 está apresentada a motivação central da dissertação que é a busca de inovações para a maior sustentabilidade das obras de pavimentação; dentro deste contexto, indica-se o objetivo do trabalho que se aplica aos bioligantes de origem vegetal, como insumo na preparação de misturas usinadas, empregadas como revestimentos ou bases de pavimentos.

Para embasar a pesquisa realizada em laboratório, no capítulo 2 apresenta-se uma revisão bibliográfica enfocando os temas centrais da dissertação: sustentabilidade em obras rodoviárias, bioligantes, caracterização reológica de ligantes e as propriedades mecânicas de misturas usinadas para camadas de pavimentos.

No capítulo 3 são apresentados os resultados laboratoriais reológicos dos ligantes asfálticos e dos bioligantes testados, analisando as diferenças entre eles e as potencialidades que podem ser exploradas ou devam ser tratadas ou modificadas.

No capítulo 4 são apresentadas as análises reológicas sobre o efeito da temperatura no envelhecimento de curto prazo do bioligante, visando assim determinar os principais resguardos necessários durante a usinagem das misturas contendo este tipo de ligante com agregados.

No capítulo 5 são apresentados os resultados de ensaios laboratoriais quanto às propriedades mecânicas de misturas usinadas com ligantes asfálticos e bioligantes, de modo a possibilitar a comparação entre as misturas, bem como limitações e possíveis benefícios do uso das misturas usinadas com bioligantes.

No capítulo 6 apresentam-se as considerações finais e conclusões sobre o trabalho realizado, neste capítulo são apresentados os principais avanços alcançados por esta pesquisa em prol da substituição parcial ou total dos ligantes asfálticos por bioligantes para uso em pavimentação.

Ao final do texto, constam as referências bibliográficas pesquisadas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são enfocados os temas centrais da dissertação, quais sejam: a sustentabilidade nas obras de pavimentação rodoviárias como pano de fundo para a opção de substituição parcial ou total de ligantes asfálticos por bioligantes de várias origens, como vegetal ou animal. São abordadas as técnicas e as pesquisas sobre a reologia de ligantes asfálticos e bioligantes, bem como a caracterização de misturas usinadas com ligantes e bioligantes em laboratório de maneira a embasar os estudos realizados neste trabalho.

2.1. Sustentabilidade nas rodovias

Nos últimos anos, diversos países vêm empregando ciência e tecnologia vislumbrando amenizar os transtornos ambientais causados pelo desenvolvimento econômico, por vezes, insustentável, o qual culmina em esgotamento de recursos naturais e poluição ao meio ambiente. Diante dessa problemática, as indagações relativas à ação do homem na transformação do ecossistema terrestre começaram a ganhar destaque a nível mundial, tendo como marco inicial a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente Humano, também conhecida como Conferência de Estocolmo. Neste evento realizado no ano de 1972 na Suécia, foram discutidas questões sobre alterações climáticas, poluição de recursos naturais e desenvolvimento econômico sustentável.

Com a intensificação das discussões sobre a interferência da ação antrópica sobre o meio ambiente, diversos setores da sociedade demonstraram preocupação em minimizar os danos gerados ao meio ambiente. Dentre os subsetores econômicos pode-se destacar a engenharia como uma poderosa ferramenta de transformação de ambientes e matérias-primas, portanto, responsável em trazer desenvolvimento aos países. Todavia, deve-se assegurar que o progresso ocorra sem esgotar os recursos naturais, não comprometendo assim o futuro das próximas gerações.

A exemplo podem ser citar os investimentos no setor de engenharia de infraestrutura rodoviária, que embora sejam fundamentais para garantir a mobilidade espacial e competitividade econômica de uma dada região, podem em contrapartida, causar

sérios danos ao meio ambiente (RIETVELD; BRUINSMA, 2012). Os pesquisadores Trombulak e Frissell (2000) relataram alguns dos vetores pelos quais uma rodovia, durante a sua vida útil, possa contribuir na geração de distúrbios ao meio ambiente, dentre eles têm-se: (i) alterações na migração natural da fauna local; (ii) alteração da compactação do solo próximo às vias, o que interfere no gradiente térmico nestas regiões atraindo algumas espécies de animais que ficam sujeitas a possíveis atropelamentos; (iii) contaminação do solo e de lençóis de água próximos às rodovias, por metais pesados presentes na gasolina.

Diante dos impactos causados pelas rodovias ao meio ambiente, a academia tem intensificado as discussões sobre alternativas e soluções sustentáveis que objetivem pavimentos ecologicamente eficientes, dentre elas, pode-se citar: emprego de sistemas de certificação ambiental voltados para gestão sustentável de rodovias; reutilização e reciclagem de materiais asfálticos; redução da temperatura de trabalho de misturas asfálticas; desenvolvimento de produtos inovadores que substituam integralmente ou parcialmente os ligantes asfálticos convencionais.

Nos próximos tópicos são apresentadas algumas alternativas sustentáveis para aplicação na pavimentação rodoviária, desenvolvidas nos últimos anos, dentre elas, neste trabalho será dada ênfase para medidas correlacionadas com melhoria, modificação e substituição parcial e/ou integral de ligantes asfálticos convencionais.

2.1.1. Sistemas de gestão sustentável de rodovias

De acordo com Weinstein et al. (2009), a partir de 2002, a Federal Highway Administration (FHWA), agência responsável pela administração Rodoviária Federal do Departamento de Transportes Norte-Americano, decretou a gestão ambiental e otimização, como um dos pontos vitais no setor de transporte rodoviário. Desde então, importantes instituições Norte-Americanas, tais como, Environmental Protection Agency (USEPA), American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) e Transportation Research Board (TRB), uniram-se numa iniciativa público/privada voluntária conhecida como Green Highway Partnership (GHP), buscando assim tornar “melhor que antes”, ou seja, melhorar a

sustentabilidade das rodovias norte americanas, desde o projeto executivo até a construção e a reabilitação das mesmas.

Nesse sentido, Anderson e Muench (2013) relatam que, em 2007, iniciou-se uma pesquisa acadêmica sobre um sistema de certificação ambiental para projetos de rodovias, conhecido como Green Roads. De acordo com Söderlund et al. (2008), Green Roads baseou-se no sistema de certificação ambiental Leadership in Energy and Environmental (LEED), que busca valorizar operações sustentáveis na construção civil. Para tanto, foi realizado um estudo para incrementar os benefícios e minorar as desvantagens do LEED, focando-se no desenvolvimento de uma certificação específica para projetos de rodovias.

O Green Roads teve várias versões até a configuração atual; originalmente o sistema focava em 54 créditos divididos em 6 categorias (Design sustentável; materiais e recursos; gerenciamento de águas pluviais; controle ambiental e energético; construção e inovação). A pontuação mínima para obtenção de um selo de certificação é de 40% dos 54 créditos possíveis. Diferentemente do sistema LEED em que os créditos possuem mesmo peso, o Green Roads aplica pesos aos créditos de acordo com o impacto do item avaliado, incentivando assim o aumento de práticas de significativa relevância ambiental, mas que requerem altos investimentos (SÖDERLUND et al., 2008).

Os sistemas de certificação semelhantes ao Green Roads vêm contribuindo para construções de rodovias que causem menos impactos sociais e ambientais e que garantem a melhor relação benefício-custo ao longo de sua vida útil. Porém, é importante que alguns obstáculos sejam superados, dentre eles, um dos mais relevantes é convencer o setor público que embora os projetos certificados possam requer um investimento inicial superior ao observado em projetos convencionais, os ganhos em longo prazo compensam economicamente e ambientalmente o investimento inicial (SÖDERLUND et al., 2008).

A análise do ciclo de vida, Life Cycle Assessment (LCA) é uma ferramenta que pode ser empregada em prol da sustentabilidade, que também vem ganhando destaque na pavimentação rodoviária. Visto que essa ferramenta possibilita a identificação dos

principais impactos que uma rodovia pode gerar ao meio ambiente, com isso é possível optar-se durante o projeto da via por melhores escolhas quanto a materiais e tecnologias, resultando em menos danos ao ambiente durante a vida útil do pavimento.

Muitas ferramentas de análise de ciclo de vida foram desenvolvidas especialmente para o caso da pavimentação. Santos et al. (2017) compararam recursos de análise Norte-Americanos em relação aos utilizados na Europa, tendo como base as fases de construção e de manutenção de uma seção rodoviária localizada na Espanha. Dentre as conclusões obtidas, verificou-se a necessidade de uma melhor padronização das ferramentas empregadas na análise LCA de pavimentos rodoviários.

2.1.2. Misturas asfálticas mornas

O crescente aumento da queima de combustíveis fósseis em conjunto com outros fatores culmina no incremento de emissões de gases poluentes na atmosfera, o que contribui para o desequilíbrio energético do planeta resultando na intensificação de processos naturais como o efeito estufa e a chuva ácida. Estes efeitos provocam sérios danos ao meio ambiente e comprometem a biodiversidade do planeta. Segundo Wasiuddin et al. (2007), diversos países vêm buscando formas de minimizar a emissão desses gases no meio ambiente.

Nesse sentido, a Europa foi a primeira a experimentar a tecnologia conhecida como mistura asfáltica morna, em inglês, Warm Mix Asphalt (WMA). Tal técnica consiste em reduzir para valores entre 140 °C e 145 °C, as temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas, porém mantendo o mesmo desempenho encontrado nas tradicionais misturas asfálticas a quente (RUBIO et al., 2012).

Em relação às misturas asfálticas a quente, o emprego de misturas mornas é mais vantajoso devido a diversos motivos, os mais mencionados são: (i) redução no consumo de energia; (ii) diminuição das emissões de gases do efeito estufa; (iii) menor envelhecimento do ligante asfáltico; (iv) redução do tempo de esfriamento da pista após a sua construção, viabilizando a liberação para tráfego num tempo menor;

(v) melhoria na condição de saúde e segurança dos trabalhadores, dado que os mesmos ficam menos expostos ao fumo, odores e o calor (WASIUDDIN et al., 2007; HURLEY; PROWELL, 2006; DIEFENDERFER; MCGHEE; DONALDSON, 2007).

Em adicional as vantagens usualmente mencionadas, Kristjánsdóttir et al. (2007) destacam que o emprego de WMA favorece na redução do risco de baixa compactação das misturas (mesmo em condições climáticas adversas), o que contribui para redução da solicitação dos equipamentos compactadores.

Segundo D'angelo et al. (2008), há diversas tecnologias disponíveis para execução de misturas asfálticas mornas, que objetivam a redução da temperatura de usinagem e compactação das misturas, dentre as principais técnicas, pode-se citar: (i) Uso de aditivos orgânicos e ceras; (ii) Processos de formação de espuma: através do emprego de materiais com capacidade de reter de água em sua estrutura, injeção de vapor de água ou uso de agregados úmidos; (iii) Emprego de aditivos químicos e surfactantes.

No Brasil, diversas pesquisas e experimentos foram realizados, dentre os quais se destacam Motta (2011), Merighi (2015) e Rodrigues et al. (2017). Os trabalhos de Motta (2011) e Merighi (2015) verificaram por meio de ensaios realizados em laboratório e em campo, que o desempenho das misturas asfálticas mornas, que empregam aditivos surfactantes, foi semelhante ao verificado em misturas asfálticas quentes, salientando-se ainda a redução de emissões de poluentes e diminuição do uso de combustíveis fósseis, observadas durante a preparação das misturas mornas analisadas. Recentemente, na pesquisa desenvolvida por Rodrigues et al. (2017) constatou-se a viabilidade do emprego de óleo de Moringa como aditivo em misturas asfálticas mornas, visto que a adição do mesmo contribuiu com a melhora das propriedades mecânicas das misturas asfálticas mornas. Diante do exposto, a técnica da mistura asfáltica morna é uma realidade no país e já está presente em várias obras de pavimentação, principalmente com o emprego de aditivos surfactantes.

2.1.3. Misturas asfálticas recicladas

Dentre as principais etapas envolvidas na produção de pavimentos asfálticos, estima-se que a referente à obtenção dos materiais é responsável por cerca de 70% do custo total da obra (COPELAND, 2011). Na Figura 1 é apresentada uma estimativa do custo por cada uma das principais etapas envolvidas durante a execução de pavimentos asfálticos rodoviários:

Figura 1 – Custo estimado por etapa para confecção de pavimentos asfálticos

Fonte: Adaptado de Copeland (2011)

Com a crise do petróleo, na segunda metade da década de 1970, ocorreu um aumento do preço dos barris de petróleo no mercado mundial, o que favoreceu a popularização do uso do material resultante da Reciclagem de Revestimento Asfáltico, em inglês Reclaimed Asphalt Pavement (RAP), para confecção de camadas de revestimento de pavimentos e para reabilitação de rodovias, minimizando assim a utilização de matérias-primas não renováveis e diminuindo as pilhas de materiais fresados de rodovias (TANSKI; HAHN, 1984; MCDANIEL; ANDERSON, 2001).

Diversos fatores contribuíram para consolidação do emprego de RAP nos projetos de construção e reabilitação de pavimentos asfálticos, dentre os principais motivos pode-se destacar: os benefícios econômicos e as vantagens ao meio ambiente, pois seu emprego minimiza a extração de recursos naturais, visto que este material é

comumente utilizado como substituto aos agregados e ao ligante asfáltico na produção de pavimentos rodoviários. Embora o RAP também possa ser utilizado como material granular nas camadas de base ou sub-base do pavimento é altamente recomendável que este material valioso e de alta qualidade, seja principalmente empregado em camadas superficiais de pavimentos asfálticos, pois neste tipo específico de aplicação o ligante presente no RAP reduz o uso de ligante virgem nas misturas asfálticas, configurando assim um de seus usos mais vantajosos economicamente (COPELAND, 2011).

Visando diminuir o envelhecimento do ligante asfalto presente no RAP e aumentar a porcentagem do mesmo em projetos de misturas asfálticas, vem sendo utilizadas técnicas, tais como: (i) o uso de misturas asfálticas mornas, também conhecida como reciclagem morna (GENNESSEAU, 2015; DINIS-ALMEIDA et al., 2016); (ii) emprego de aditivos para reduzir a viscosidade e/ou rejuvenescer o ligante presente no RAP (MOGAWER, 2013; ZAUMANIS et al., 2014). Os aditivos empregados na “recuperação” das propriedades dos ligantes asfálticos, presentes no RAP, podem ser de origem vegetal, por exemplo. Eis mais uma aplicação dos bioligantes e dos bio-óleos na pavimentação asfáltica.

O comportamento de misturas asfálticas mornas contendo 50% de RAP em sua composição, foi avaliado por Lopes et al. (2015), com base nos resultados dos ensaios de dano por umidade e deformação permanente obtidos foi possível verificar que a adoção concomitante de RAP com WMA não comprometeu o desempenho das misturas asfálticas analisadas, em relação aos resultados obtidos para misturas asfálticas quentes.

De acordo com os resultados obtidos na pesquisa realizada por Giani et al. (2015), por meio da análise do ciclo de vida de uma rodovia foi possível verificar que o emprego de RAP em conjunto com a tecnologia WMA resultou na redução da emissão de gases poluentes e na queda no consumo de energia, se comparado com a mistura asfáltica a quente, adotada como referência.

Embora diversas pesquisas apontem que o emprego de RAP resulte em pavimentos com desempenho adequado, é importante salientar que alguns cuidados devem ser

considerados durante o armazenamento e gerenciamento das pilhas onde este material é armazenado. Segundo McDaniel e Anderson (2001), este material apresenta uma grande variabilidade podendo até mesmo estar contaminado com materiais deletérios ou por matérias-primas de outras camadas do pavimento original, o que pode comprometer a qualidade do RAP.

Diante do exposto, o emprego de material asfáltico reciclado na confecção de misturas asfálticas a quente, mornas ou a frio representa grandes vantagens ambientais e econômicas, por isso é crescente o número de pesquisa que visam decifrar o mecanismo de interação entre o RAP e os outros materiais presentes na nova mistura asfáltica, objetivando-se assim a utilização, cada vez maior, de altas porcentagens de RAP. Citam-se no Brasil os trabalhos de Castro Neto (2000) e Da Silva et al. (2013).

2.1.4. Asfalto Borracha

A cada ano é crescente a quantidade de resíduos de pneus de borracha gerados, estima-se que no ano 2030 serão descartados, mundialmente, cerca de 5000 milhões de pneus. Atualmente, grande parte do volume deste resíduo é descartada em locais não apropriados ou queimados a céu aberto, liberando assim várias substancias tóxicas, poluindo o ar e o solo, o que pode gerar diversos danos para o meio ambiente e para saúde do ser humano (THOMAS; GUPTA, 2016).

De acordo com Machin, Pedroso e de Carvalho (2017), por ano no Brasil são descartados cerca de 20 milhões de unidades de pneus, sendo que atualmente aproximadamente 100 milhões de pneus estão acumulados em locais inadequados. Com o final da vida útil dos pneus, há possibilidade de empregar esse resíduo em diversas cadeias produtivas, destacando-se a sua utilização como material elastômero na modificação de ligantes asfálticos, proporcionando ao pavimento asfáltico redução na reflexão de trincas e aumento de sua durabilidade (TAKALLOU; TAKALLOU, 1991; BERTOLLO et al., 2002; CAMARGO, 2016).

Há dois tipos de procedimentos voltados para introdução de partículas de borracha em misturas asfálticas, sendo eles: processo seco e processo úmido. O processo

úmido consiste na dissolução parcial de finas partículas de borracha adicionadas ao ligante asfáltico aquecido, o que resulta no aumento da elasticidade e viscosidade do ligante asfáltico (BERTOLLO et al., 2002; BERTOLLO et al., 2004). Os processos secos não se pautam na absorção de óleos presentes no ligante asfáltico pelas partículas de borracha, mas buscam utilizar fragmentos mais grossos de borracha substituindo parcialmente os agregados minerais (ZANZOTTO; KENNEPOHL, 1996).

Embora o emprego de ligantes asfálticos modificados por borracha apresente diversos aspectos positivos, a combinação desses materiais é instável. Entretanto a adoção de usinas móveis possibilita que o ligante asfáltico modificado por borracha possa ser utilizado logo após sua usinagem, evitando assim a desagregação da mistura asfáltica, porém resultando no incremento do custo final do pavimento relacionado com o transporte, instalação e remoção da usina até o local da obra (HEITZMAN, 1992; CAMARGO; BERNUCCI, 2017).

Em adicional aos inconvenientes econômicos, a produção de ligantes asfálticos convencionais modificados por borracha via processo úmido necessita aquecimento em altas temperaturas (entre 180 °C e 210 °C) e por um longo espaço de tempo, ou seja, demanda alto consumo energético e combustíveis fósseis, culminando dessa forma, em sérias desvantagens ambientais (SIENKIEWICZ et al., 2017).

Entretanto, diversas pesquisas vêm sendo conduzidas a fim de reduzir os impactos econômicos e ambientais, gerados durante obtenção deste material, remanescendo ainda as vantagens ao pavimento como aumento da resistência à deformação permanente, combate a fissuração por fadiga e/ou térmica, se comparado com misturas obtidas por ligante asfáltico convencional.

Nesse sentido, o trabalho desenvolvido por Faxina (2006) verificou a viabilidade do emprego de resíduos de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha, visto que o emprego deste aditivo contribuiu para redução da viscosidade dos ligantes asfalto-borracha, para teores do óleo de xisto entre 0 e 18%, o que pode resultar em maior trabalhabilidade das misturas asfálticas modificadas por

borracha e facilitar o processamento e bombeamento desse tipo de ligante modificado.

Na busca por uma produção mais sustentável em relação a fatores ambientais, pode-se ainda mencionar o trabalho desenvolvido por Motta (2011) que avalia a eficiência da utilização de aditivo surfactante (Gemul XT14) na produção de misturas asfálticas mornas, a partir do emprego de ligante asfáltico convencional e modificado por borracha.

2.2. Bioligantes

A crescente demanda mundial por energia é essencialmente suprida pelo petróleo e seus derivados, e mesmo com a crise energética ocorrida durante a década de 70, o petróleo não perdeu sua supremacia como principal fornecedor na matriz energética global (BILGEN, 2014). Entretanto, o uso de insumos do petróleo na geração de energia, resulta na liberação de altas concentrações de substâncias tóxicas e gases do efeito estufa na atmosfera, culminando assim em sérios prejuízos a saúde pública e em desequilíbrios ambientais (CHEN et al., 2008).

Na busca por tecnologias limpas e fontes energéticas renováveis, diversas pesquisas vêm sendo conduzidas em prol de alternativas sustentáveis para geração de energia, priorizando assim insumos que sejam menos deletérios ao meio ambiente e a saúde humana. Nesta perspectiva, podem-se citar as pesquisas desenvolvidas por Schwab et al. (1988); Macedo, Seabra e Silva (2008); e Ragauskas et al. (2014), que estudaram a exequibilidade técnica e ambiental, da produção de combustíveis a partir processos de transformação de biomassa.

De acordo com Hosseinneshad et al. (2016), os processos termoquímicos são umas das principais formas de obtenção de energia a partir de biomassa. Alguns autores, a exemplo de Dhasmana et al. (2015), verificaram que durante esses processos é possível obter um composto com alto poder adesivo e propriedades químicas semelhantes às encontradas em ligantes asfálticos convencionais, portanto, com promissor emprego como substituto parcial e/ou integral, aos ligantes asfálticos convencionais na produção de pavimentos flexíveis.

A liquefação e a pirólise são os principais processos termoquímicos empregados para obtenção de ligantes alternativos aos ligantes asfálticos, genericamente conhecidos como bioligantes, biobetume, bioasfalto, entre outras possíveis variações. Entretanto, salienta-se que os bioligantes também podem ser obtidos, a partir de tecnologias que não envolvam os processos termoquímicos.

A exemplo pode-se citar os bioligantes obtidos a partir de lignina extraída de madeira, óleo de semente de Colza e óleo de peixe, óleo de feijão, resíduos de óleo de cozinha, e resinas extraídas de seiva (WANG; DEREWECKI, 2013; ÁGÚSTSSON, 2014; GONG et al., 2017; PORTUGAL et al., 2017; SETYAWAN et al., 2017).

Na Figura 2 (a), (b) e (c), é possível observar os bioligantes obtidos por meio de diferentes processos produtivos e biomassas:

Figura 2 – Diferentes fontes de biomassa empregadas para obtenção de bioligantes: (a) resíduo de jardim; (b) madeira de pinho; (c) óleo de cozinha modificado.

(a)

Fonte: Adaptado de Hill (2012)

(b)

Fonte: Adaptado de Mohammad et al. (2013)

(c)

Fonte: Adaptado de Sun et al. (2017)

A diferença entre a coloração dos bioligantes, possivelmente, é decorrente do tipo de processo de obtenção e da biomassa utilizada durante a fabricação do bioligante. A coloração mais clara de alguns tipos de bioligantes pode resultar em pavimentos

que apresentem uma superfície com aspecto mais claro, quando comparado aos pavimentos asfálticos convencionais, o que favorece a reflexão da luz solar e contribui para redução da formação de ilhas de calor.

Nesse sentido, tem-se o trabalho de Merusi e Giuliani (2012), que na busca de soluções em prol de pavimentos com colorações claras, verificou que um bioligante de origem vegetal apresentou melhores propriedades reológicas e características cromáticas, quando comparadas às obtidas por ligantes sintéticos ou ligantes asfálticos sem asfaltenos.

Nesta perspectiva, o tipo de biomassa e o processo de fabricação, além de influenciarem na tonalidade do bioligante, também podem interferir em suas propriedades reológicas e físicas. Fini et al. (2017), constataram que adição de bioligante oriundo da liquefação de dejetos suínos é mais eficaz na redução da viscosidade do ligante asfáltico PG 64-22, quando comparado a bioligantes produzidos por meio de pirólise de fontes vegetais. Em Hosseinnézhad et al. (2016), ressalta-se ainda, que a escolha de alguns parâmetros de produção, tais como: tempo, temperatura e/ou pressão, irá interferir nas características reológicas dos bioligantes obtidos.

2.2.1. Métodos de obtenção de bioligantes

De acordo com Dhasmana et al. (2015) e Hosseinnézhad et al. (2016), a escolha do processo termoquímico empregado na obtenção do bioligante irá depender do tipo de biomassa disponível, visto que a pirólise deve ser feita em matéria-prima livre de umidade, o que em muitos casos pode exigir um pré-tratamento da mesma para redução de sua umidade residual, consumindo assim muita energia. Na Tabela 1 são apresentados alguns tipos de bioligantes, desenvolvidos em pesquisas científicas:

Tabela 1 – Diferentes tipos de bioligantes estudados na literatura com funções diversas

Autores	Fonte(s) de Biomassa	Processo de Obtenção de Bioligante	Emprego	Porcentagem de Bioligante adicionada (%)	Ligante asfáltico convencional
Fini et al. (2011)	Dejetos suínos	Liquefação	Modificador Extensor	2,0; 5,0; 10,0	PG 64-22
Onochie et al. (2013)	Dejetos suínos	Liquefação	Modificador	5,0	PG 58-28
Hill (2012)	Resíduos de jardim urbano	Pirólise	Substituto	100,0	-
Ágústsson (2014)	Óleo de peixe; Óleo de Colza	Não especificado	Modificador	7,5	Não especificado
Aflaki et al. (2014)	Fezes de animais, gramineas e madeira	Liquefação	Modificador Extensor	2,0; 5,0; 10,0	PG 64-22
Yang, Mills-Beale e You (2014)	Resíduo de madeira	Pirólise	Extensor	30,0; 70,0	PG 58-28
Avsenik e Tušar (2016)	Resíduos de plásticos e de pneus automóveis	Pirólise	Extensor	10,0; 50,0	Pen 70/100
Dhasmana et al. (2015)	Alga espirulina, nano alga e dejetos suínos	Liquefação	Extensor	12,5	PG 64-22
Fini et al. (2017)	Grânulos de madeira Miscanthus, palha de milho e fragmentos de madeira	Pirólise	Extensor	10,0	PG 64-22
Al-omari, Khedaymi e khasawneh (2017)	Resíduo de óleo vegetal	Não especificado	Modificador	1,0; 2,0; 4,0; 6,0; 8,0	Pen 60/70
Azahar et al. (2017)	Resíduo de óleo vegetal pré-tratado, Resíduo de óleo vegetal não tratado,	Não especificado	Modificador	5,0	Pen 60/70
Gong et al. (2017)	Óleo de feijão	Não especificado	Modificador	1,0; 2,0; 3,0	Pen 30 Pen 70
Yami et al. (2017)	Resina Damar	Não especificado	Modificador Extensor	2,5; 5,0; 7,5; 10,0	Pen 60/70
Portugal et al. (2017)	Resíduo de óleo de soja	Não especificado	Modificador	1,0; 2,0; 3,0	50/70 55/75-E
He et al. (2017)	Madeiras de pinheiro, de salgueiro e de álamo	Pirólise	Modificador Extensor	5,0; 10,0; 15,0; 20,0	AH-90

Fonte: Própria autora.

De acordo com a Tabela 1, é possível verificar que liquefação é a principal técnica para conversão de dejetos suínos em bioligante, provavelmente, devido elevada quantidade de água neste tipo específico de biomassa, enquanto que, a pirólise é mais mencionada em trabalhos que se utilizam de fragmentos de vegetais e outros tipos de resíduos secos.

A pirólise consiste na decomposição térmica de uma dada biomassa, em ausência de oxigênio, a partir da condensação dos gases voláteis produzidos é possível obter bio-óleos e gases, os quais podem ser utilizados como combustíveis, e um terceiro produto, o carvão mineral (BRIDGWATER, 2012; YANG; MILLS-BEALE; YOU, 2017). O rendimento de cada um dos produtos resultantes da pirólise irá depender da temperatura e do tempo de reação, quando se deseja obter maior fração de carvão mineral, recomenda-se o emprego da pirólise lenta, a qual pode consumir

mais de um dia para ser concluída. Em contrapartida, a pirólise rápida necessita de poucos segundos de reação e altas temperaturas (BRIDGWATER, 2012).

A liquefação se baseia em submeter determinado tipo biomassa a pressões elevadas (5 MPa a 15 MPa) e altas temperaturas (200 °C a 350 °C), favorecendo assim a quebra de ligações e formação de novas moléculas, o que resulta na formação de uma fração gasosa e outra fração líquida. Além da obtenção de bioligante, é importante ressaltar que a liquefação é capaz de produzir energia renovável e material fertilizante com alta concentração de nutrientes (FINI; KALBERE; SHAHBAZI, 2011; DHASMANA et al., 2015).

2.2.2. Pesquisas desenvolvidas sobre emprego de bioligantes

Diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas na busca por ligantes alternativos aos ligantes asfálticos, de acordo com Raouf e Williams (2009) os bioligantes podem ser empregados como substitutos aos ligantes convencionais (100% de substituição), como extensores (substituindo o ligante asfáltico de 75% a 25%), ou como modificadores (substituição inferior a 10%).

Esse aumento do interesse no desenvolvimento de bioligantes favorece o aumento de solicitações de registros de patentes, todavia são raros os relatos de bioligantes comercializados. Dentre as poucas companhias que demonstraram interesse na fabricação de bioligantes, destacam-se Colas S.A e Ecopave Australia, respectivamente responsáveis pelos produtos Vegecol® e GEO320 (LENNOX; MACKENZIE, 2008; NEWMAN et al, 2012).

A cana-de-açúcar e resinas de árvores são umas das possíveis matérias-primas que podem ser empregadas para produção do GEO320, que se mostrou resistente contra a fadiga e deformação permanente de pavimentos asfálticos (MILLS-BEALE et al. (2012); ÁGÚSTSSON, 2014). O bioligante Vegecol® é resultado de uma competição sobre o futuro das rodovias ocorrida na França em 2003, desde então tal produto vem sendo empregado em mais de 450 projetos, como de calçadas e estacionamentos. A possibilidade de confecção de pavimentos coloridos é mais uma das vantagens relacionadas com emprego do Vegecol®, visto que este material é

composto, essencialmente, por resinas e óleos vegetais, não contento assim aditivos petroquímicos em sua composição (CROTEAU; CHAIGNON; STRYNADKA, 2009; CHAILLEUX et al. 2015).

Salientam-se ainda os estudos realizados por renomadas instituições de pesquisas norte americanas, europeias, asiáticas e nacionais, dentre as quais é possível destacar que as pesquisas realizadas pelos seguintes centros científicos: (i) Universidade Agrícola e Técnica do Estado da Carolina do Norte, Universidade Batista da Califórnia e Universidade Tecnológica de Michigan, que objetivam o emprego de um bioligante oriundo da liquefação de dejetos suínos; (ii) Universidade Estadual de Iowa, que busca empregar o produto resultante da pirólise de matérias-primas vegetais como substituto aos ligantes asfálticos; (iii) Universidade de Nottingham e Instituto Francês de Ciência e Tecnologia dos Transportes (IFFSTAR), que embora ainda não tenham publicado muitos artigos científicos, estudam a viabilidade do emprego de bioligante composto por resina de pinho (80%) e óleo de linhaça (20%).

A seguir são apresentados os principais resultados obtidos sobre a viabilidade do emprego de diferentes tipos de bioligantes, para tanto, os resultados são apresentados baseando-se nos 3 principais tipos de matérias-primas estudadas: (i) dejetos de suínos; (ii) madeira; e (iii) resíduos de óleos de cozinhas. Ressalta-se ainda, que grande parcela das pesquisas foca na caracterização reológica e química de ligantes asfálticos modificados por bioligantes, também nomeados como ligantes biomodificados, sendo assim são escassos os trabalhos sobre a caracterização mecânica de misturas usinadas compostas apenas por bioligante, agregados e vazios.

- **Bioligantes oriundos da liquefação de dejetos suínos**

Com intuito de agregar valor e dar uma destinação ambientalmente adequada aos dejetos de animais produzidos na suinocultura, Fini, Yang e Xiu (2010) iniciaram um estudo sobre a viabilidade do emprego de um produto resultante da liquefação de dejetos suínos, como ligante alternativo e/ou modificador de ligantes asfálticos convencionais. Com a produção deste tipo de bioligante, espera-se minimizar a

contaminação dos lençóis freáticos e do ar, relacionada com a destinação dos dejetos suínos em lagoas de armazenamentos.

Concomitantemente a questão ambiental tem-se a redução dos custos gerados na construção de rodovias, dado que o custo de um galão deste tipo de bioligante é quase 4 vezes inferior ao custo de produção da mesma quantidade de ligante asfáltico convencional (FINI; YANG; XIU, 2010). Nos próximos parágrafos serão apresentados os principais resultados relacionados ao emprego de bioligantes confeccionados a partir da liquefação de dejetos suíno.

Em Fini et al. (2011), a partir de análise química elementar verificou-se que este tipo de bioligante apresenta alta concentração de grupos funcionais polares, tais como Oxigênio e Nitrogênio, quando comparado ao ligante asfáltico AAD-1, o que pode favorecer a aderência do ligante com agregados polares, pelo fato de ambos apresentarem a mesma polaridade. Os resultados de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Cromatografia Gasosa-Espectrometria de Massa (CG-MS) e Ressonância Magnética Nuclear (NMR), indicaram este produto contém olefinas em sua composição, o que não é observado em ligantes asfálticos convencionais.

Ainda neste estudo, é possível constatar por meios de ensaios reológicos que a adição de diferentes porcentagens deste bioligante (2%, 5% e 10%), em relação à massa do ligante asfáltico PG 64-22, resulta em um ligante modificado menos viscoso, com menores valores de módulo de cisalhamento dinâmico e inferiores temperaturas críticas de trincamento térmico, indicando a melhora do desempenho do ligante em temperaturas frias.

No trabalho de Mills-Beale et al. (2012), verificou-se novamente o potencial do Bioligante em reduzir a viscosidade e o módulo de cisalhamento dinâmico do ligante asfáltico. Embora não esperado, verificou-se que adição 5% do bioligante, em massa de ligante asfáltico PG 64-22, tanto em amostras envelhecidas como em amostras não envelhecidas, culminou no aumento do parâmetro Superpave ($G^*/\sin \delta$), o que pode indicar bom desempenho do ligante biomodificado em temperaturas altas.

A pesquisa de Onochie et al (2013) verificou que a adição de diferentes porcentagens de partículas de nano-argila (2% e 4%) em ligantes biomodificados (5% de bioligante, em relação à massa do ligante PG 58-28), resulta na melhora do desempenho do ligante asfáltico em temperaturas altas, visto que a nano-argila minimiza a redução da viscosidade do ligante asfáltico trazida pela adição do bioligante, e ainda contribui para o incremento resistência ao envelhecimento do ligante asfáltico.

Como observado em Fini et al. (2011) e Mills-Beale et al. (2012), o emprego de bioligante oriundo de dejetos suínos como modificador se mostrou eficiente na redução da viscosidade de ligantes asfálticos convencionais. Nesse sentido, Fini, Oldham e Abu-Lebdeh (2013) buscaram por meio do emprego deste material favorecer a redução das elevadas temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas produzidas com ligante asfáltico modificado por Borracha.

Ao se comparar o asfalto-borracha modificado com bioligante (BMR) com o Asfalto-borracha tradicional de mercado (CRM), em relação à suscetibilidade térmica e à suscetibilidade ao cisalhamento, foi possível observar que em teores de borracha superiores a 10% de Borracha, a fase oleosa presente no bioligante interage bem com as partículas de borracha, o que contribui para redução da suscetibilidade do BMR ao cisalhamento, traduzindo assim em melhor desempenho ao pavimento quando comparado a aqueles confeccionados a partir de CRM (FINI; OLDHAM; ABU-LEBDEH, 2013).

Em Aflaki et al. (2014), ao se comparar o efeito da adição de distintos modificadores nas propriedades de ligantes asfálticos verificou-se que dentre os aditivos estudados, o bioligante, produzido a partir da conversão termoquímica de dejetos suínos, apresentou a melhor capacidade de dissipação de energia, indicando assim que a adição do mesmo em ligante asfáltico convencional é mais benéfica na melhora do desempenho em baixas temperaturas, do que a adição de modificadores, como fragmentos de borracha de pneus, Gilsonita, estireno-butadieno-estireno (SBS) e ácido polifosfórico (PPA).

Dado os promissores resultados relacionados ao emprego de bioligante, produzido a partir da liquefação de dejetos de suínos, em Dhasmana et al. (2015) estudou-se o emprego de outras fontes de biomassa (nano alga, alga espirulina e dejetos suínos) para a obtenção de ligantes alternativos aos ligantes asfálticos convencionais. A caracterização química desses bioligantes mostrou que os mesmos são compostos por baixa concentração de asfaltenos e saturados, e elevada concentração de compostos polares, indicando assim alta resistência contra a ação deletéria da água. Entretanto, verificou-se por meio dos parâmetros de energia livre de superfície que os ligantes modificados por bioligante são mais sujeitos ao dano por umidade, que os ligantes asfálticos convencionais.

Os resultados ensaios reológicos obtidos por Dhasmana et al. (2015), indicaram que antes do envelhecimento as amostras de ligante asfáltico convencional (PG 64-22), apresentam maiores módulos de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$), do que as amostras de bioligantes puros, destacando ainda que dentre esses, o produzido a partir de dejetos de suínos apresentou os menores de $|G^*|$. Todavia, quando os bioligantes foram adicionados ao ligante asfáltico, na razão de 1:8, verificou-se que após o envelhecimento de curto prazo, o comportamento reológico desses ligantes biomodificados foi semelhante ao observado pelo ligante asfáltico puro envelhecido.

Na pesquisa de Fini et al. (2017), além do emprego distintas fontes de biomassa, buscou-se comparar a liquefação hidrotermal com a pirólise. Nesse sentido, foram considerados quatro tipos de bioligantes, distintos entre si, dentre os quais três deles foram obtidos por pirólise de matéria vegetal (grânulos de madeira *Miscanthus*, palha de milho e fragmentos de madeira) e um deles foi resultado da liquefação de dejetos suínos, seguida de filtração a vácuo, destilação fracionada e, por fim, polimerização.

O ligante biomodificado obtido a partir da adição de 10% de bioligante (oriundo da liquefação de dejetos suínos), em relação à massa do ligante asfáltico convencional (PG 64-22), resultou nos menores valores de viscosidade medidos e menor degradação pelo envelhecimento, quando comparado ao ligante asfáltico de controle. Todavia, ressalta-se que outros tipos de ligantes biomodificados, estudados

por Fini et al. (2017), também apresentaram menores viscosidade que ligante asfáltico puro após envelhecimento.

O trabalho de Hosseinneshad et al. (2016) focou-se em determinar os parâmetros de processamento que resultassem em um melhor rendimento e qualidade do bioligante, obtido por meio da liquefação de dejetos suínos. Ao considerar distintos tempos de reação da liquefação, foi possível verificar que para intervalos de tempo superiores a 120 minutos o rendimento na produção de bioligante começa a decair. O tempo de reação também está relacionado com porcentagem de amidas presentes no bioligante, as quais são fundamentais para as propriedades adesivas.

As pesquisas sobre o emprego de bioligantes oriundos da liquefação de dejetos suínos são recentes, portanto, de acordo com Mills-Beale et al. (2012) e Dhasmana et al. (2015), algumas questões técnicas como o controle da variabilidade da biomassa e a atenuação do odor e dos vapores imitados durante o aquecimento deste tipo de bioligante devem ser sanadas a fim de viabilizar a produção em larga escala e comercialidade do material.

Nesse sentido, é verificado que a maioria das pesquisas já publicadas, focou-se na caracterização reológica e química desse tipo de bioligante, possivelmente, porque tais metodologias necessitam de pouca quantidade de materiais. Todavia, destacam-se os trabalhos de Mogawer et al. (2012) e Hill et al. (2013), por consideram o comportamento mecânico de misturas asfálticas.

Por meio de um dispositivo conhecido como Asphalt Workability Device, foi possível verificar em que a adição de bioligante em mistura asfáltica contendo 40% de RAP foi capaz de equiparar a trabalhabilidade dessa mistura, com a encontrada em uma mistura asfáltica composta apenas por materiais virgens. Salienta-se ainda que a combinação do ligante biomodificado com RAP resultou em misturas com adequado desempenho quanto à deformação permanente e à fadiga, visto que a rigidez trazida pelo RAP à mistura é contrabalanceada pela ação do Bioligante (MOGAWER et al., 2012).

O trabalho de Hill et al. (2013) verificou ainda que a inserção de bioligante em misturas contendo 15% e 45% de RAP resulta em misturas asfálticas com grande capacidade de relaxação dos esforços em temperaturas frias, o que é benéfico para resistência das misturas contra o trincamento térmico.

De acordo com os trabalhos publicados entre os anos de 2010 e 2016, é possível verificar que a adição deste tipo específico de bioligante se mostrou eficaz para redução da viscosidade de ligantes asfálticos, indicando assim seu potencial na redução das temperaturas de usinagem e compactação de misturas asfálticas usinadas convencionais, recicladas e modificadas pela adição de fragmentos de borracha. Em adicional, foi possível verificar que a adição deste bioligante em ligante asfáltico poderá ser benéfica para melhorar as suas propriedades reológicas em baixas temperaturas.

- **Bioligantes obtidos a partir de madeira**

A madeira é uma das possíveis fontes de biomassa para produção de bioligante, neste sentido pode-se citar a pesquisa de Raouf e Williams (2009) por ser um dos pioneiros em estudar a viabilidade do emprego de um bioligante como substituto integral ao ligante asfáltico convencional, para tanto considerou-se a pirólise de três tipos de matérias-primas: madeira de carvalho, gramíneas e palha de milho.

Os autores, por meio da análise da viscosidade dos bioligantes em diferentes temperaturas e intervalos de tempo, verificam que há necessidade de um pré-tratamento dos bioligantes analisados, pois, com o aumento do aquecimento, observou-se a formação significativa de vapores, o que indica a presença de água e voláteis nestes bioligantes. Com base nisso, Raouf e Williams (2010) prosseguiram o estudo sobre a viabilidade do emprego de um bioligante oriundo da pirólise rápida da madeira de carvalho, seguida de pré-tratamento (aquecimento a 110 °C, por duas horas), em que foi possível verificar a maior suscetibilidade à variação de temperatura do bioligante, em relação aos outros tipos de ligantes asfálticos convencionais.

No trabalho de Yang, Mills-Beale e You (2014), foram considerados ligantes modificados com altas porcentagens (30% e 70%) de dois tipos de bioligante (com pré-tratamento e sem pré-tratamento), oriundos da pirólise de resíduos de madeira. No geral, foi possível constatar que, antes do envelhecimento de curto prazo, o aumento da porcentagem de bioligante adicionada ao ligante asfáltico (PG 58-28) resulta em uma queda significativa da viscosidade do ligante.

Entretanto, após o envelhecimento, os ligantes biomodificados apresentam viscosidades superiores ao ligante asfáltico puro, salienta-se ainda que tais resultados sejam diferentes dos obtidos por Fini et al. (2017), em relação à modificação por bioligante oriundo de dejetos de suínos, indicando assim que o tipo de biomassa poderá interferir nas propriedades dos ligantes asfálticos biomodificados. Os resultados de viscosidade obtidos por Yang, Mills-Beale e You (2014) foram coerentes com as curvas mestras obtidas, visto que as amostras envelhecidas de ligantes biomodificados tendem a apresentarem maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico, que os obtidos pelo PG 58-28 puro.

No trabalho de Yang e Suciptyan (2016), buscou-se analisar a viabilidade de um bioligante oriundo da pirólise de fragmentos de cedro japonês como modificador (2% e 8% de bioligante) e como extensor (25% e 50% de bioligante), ambas as adições realizadas em relação à massa do ligante asfáltico. As curvas mestras indicaram que dentre as amostras envelhecidas, os ligantes modificados com 50% de bioligante apresentam os maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e ângulo de fase (δ). Por meio do ensaio conhecido como Multiple stress creep and recovery foi possível verificar, que a adição do bioligante contribuiu para aumento da resistência à deformação permanente, evidenciado pela redução dos valores de compliância não-recuperável (J_{nr}).

Em contrapartida, Lei et al. (2017) verificaram que o bioligante produzido partir de madeira, ao ser adicionado em ligante asfáltico, penalizou o potencial do ligante em resistir à formação de defeitos de deformação permanente, visto que os ligantes biomodificados apresentaram maiores valores de (J_{nr}), que os observados em ligantes asfálticos convencionais. Embora a resistência à deformação permanente tenha sido afetada negativamente pela adição deste bioligante, verificou-se a

melhora da resistência à fadiga do mesmo, indicando a viabilidade do emprego do bioligante como agente rejuvenescedor. Outro aspecto favorável em relação ao emprego do bioligante é o aumento do desempenho contra trincamento térmico.

De acordo com os resultados reológicos (com exceção do trabalho de Lei et al., 2017), a adição de bioligantes oriundos de madeira aumenta a rigidez dos ligantes asfálticos, indicando o potencial deste tipo de bioligante como aditivo para melhorar o desempenho do ligante convencional em temperaturas altas, reduzindo assim a formação de trilhas de rodas por deformação permanente. Entretanto, é necessário o estudo sobre o desempenho mecânico de misturas asfálticas contendo bioligante, a fim de verificar o comportamento, dessas misturas, em relação à fadiga, deformação permanente, entre outros possíveis defeitos.

Nesse sentido, no trabalho desenvolvido por Mohammad et al. (2013) verificou-se por meio de ensaios mecânicos em misturas asfálticas produzidas a partir de ligante asfáltico contendo bioligante em sua composição (50% de bioligante obtido a partir da pirólise de madeira de pinho, em relação à massa do ligante asfáltico PG 58-28), que a adição de bioligante foi benéfica em relação a resistência a deformação permanente, pois resultou em menores profundidades quando comparada com as profundidades das misturas asfálticas de controle. No entanto, foi prejudicial para vida de fadiga de misturas asfálticas contendo o este tipo de bioligante.

Em contrapartida, a pesquisa desenvolvida por Yang et al. (2014), verificou que a adição de 5% de um bioligante oriundo da pirólise rápida de resíduos de madeira (em relação à massa do ligante asfáltico PG 58-28), resultou em um incremento na vida de fadiga das misturas asfálticas, entretanto penalizou seu desempenho quanto à deformação permanente. Observe-se que a quantidade adicionada de bioligante nos dois trabalhos comentados é bastante diferente; porém não se sabe se é uma questão quantitativa de adição do produto, ou se a química destes produtos é responsável pelo diferente comportamento. Não são registradas devidamente a miscibilidade dos ligantes convencionais com os biomodificadores, não possibilitando saber se são de fácil interação.

No trabalho de Carrión et al. (2017) foi verificada a viabilidade do emprego de dois tipos distintos de bioligante (o primeiro composto por resina de madeira de pinho e óleo de linhaça e o segundo, patenteado pela Eiffage, contendo matéria-prima vegetal e polímeros) na fabricação de misturas asfálticas de módulo elevado contendo altas porcentagens de RAP. Os autores verificaram que o bioligante foi capaz de diminuir a viscosidade o ligante asfáltico contido no material fresado, sendo assim possível a confecção de misturas asfálticas contendo altas porcentagens de RAP que apresentam valores de módulo dinâmico semelhantes aos por misturas asfálticas compostas apenas por materiais virgens. Ainda se enfatizou a importância do projeto de dosagem de misturas asfálticas que contenham os ligantes alternativos, para evitar riscos de comportamento inadequado devido ao teor de ligante errôneo.

- **Bioligantes obtidos a partir de óleo de cozinha**

A utilização de resíduos de óleo de cozinha como bioligante visa dar uma destinação adequada para os óleos gerados após o preparo de alimentos, nesse sentido tem-se o trabalho de Wen, Bhusal e Wen (2012) que, ao adicionar diferentes porcentagens de bioligante obtido pela polimerização de resíduos de óleos de cozinha em ligantes asfálticos, constatou redução na tendência das misturas asfálticas a sofrerem trincamento térmico, entretanto as resistências à fadiga e à deformação permanente foram inferiores às observadas em misturas asfálticas convencionais.

Em contrapartida, em Sun et al. (2017) ao se considerar um bioligante composto basicamente por resíduo de óleo de cozinha modificado por alguns aditivos (partículas de asfalto, resinas, polietileno reciclado e polímero SBS), foi possível verificar que as misturas usinadas compostas por bioligante e agregados apresentaram melhor desempenho em relação à fadiga e à deformação permanente, quando comparado com os resultados obtidos por misturas asfálticas convencionais. Ressalta-se que em ambas as pesquisas (Wen, Bhusal e Wen, 2012 e Sun et al., 2017), as misturas usinadas de bioligante e agregados apresentaram resistência ao dano por umidade adequada e dentro de limites aceitáveis.

No trabalho de Azahar et al. (2017), verificou-se que ao se tratar o resíduo de óleo de cozinha por meio de transesterificação, este material apresenta uma variação em sua coloração e também em sua polaridade apresentando, portanto, uma coloração clara e características polares. Sendo assim, este bioligante resultante do pré-tratamento de resíduos de óleo de cozinha, ao ser adicionado a um ligante asfáltico convencional (Pen 60/70), resulta em misturas asfálticas modificadas com maiores valores de módulo de resiliência e de resistência à tração, e um melhor desempenho quanto à deformação permanente, quando comparado a misturas asfálticas convencionais.

2.3. Caracterização de ligantes asfálticos

Características como impermeabilidade à água e alta adesividade encontradas em ligantes asfálticos são fundamentais para o seu emprego na construção de camadas de pavimentos flexíveis. Devido às suas características termoviscoelásticas, o comportamento desse material é sensível à condição térmica e à frequência (tempo) do carregamento solicitante, por exemplo, em temperaturas baixas o mesmo se comporta como um sólido e com o aquecimento ele apresenta comportamento semelhante a um fluido (BERNUCCI et al., 2006). Dependendo do contexto que o cimento asfáltico de petróleo (CAP) será empregado, a seleção de determinado tipo de ligante será mais adequada em relação às demais opções disponíveis.

2.3.1. Classificação Brasileira de ligantes asfálticos

Visando a identificação de cada tipo deste material, a especificação brasileira ANP (2005) classifica o CAP convencional por ensaio físico empírico, de acordo com sua penetração. A especificação conta com quatro categorias de CAP convencionais disponíveis no território brasileiro: CAP 30-45; CAP 50-70; CAP 85-100; CAP 150-200.

Para a classificação do ligante, utiliza-se o ensaio de penetração adicionalmente com outros ensaios complementares necessários para determinação das demais propriedades físicas do CAP (ponto de amolecimento, densidade, viscosidade e ponto de fulgor). O ensaio de penetração consiste em determinar a distância que

uma agulha penetra verticalmente à amostra de ligante asfáltico, podendo ser realizado conforme as normas brasileiras DNIT-ME 155/2010 e ABNT NBR 6576 - 2007.

Em determinados contextos as propriedades encontradas no CAP convencional não são suficientes, nestes casos é necessário que esse ligante asfáltico seja modificado. Quando essa alteração é dada pela adição de polímeros, a classificação do ligante asfáltico modificado será dada de acordo com cada tipo específico de agente modificador. Para casos em que a modificação for dada pela adição de polímero elastomérico, de acordo com ANP (2009), a classificação é dada segundo ponto de amolecimento e recuperação elástica a 25 °C do ligante. Outra opção de modificação do ligante asfáltico é pela adição de borracha de pneus via processo úmido, cuja classificação é dada de acordo com a viscosidade Brookfield realizada a 175 °C (ANP, 2008).

De acordo com Zegarra (2007), a classificação dos ligantes asfálticos convencionais, segundo as diretrizes brasileiras, pode ser considerada rudimentar se comparada com o método de classificação Norte-americano, pois a normativa brasileira se pauta no resultado numérico do ensaio de penetração, o que não traduz nenhum comportamento mecânico deste material ou propriedades fundamentais do mesmo.

O autor ainda elenca outras razões que evidenciam as limitações da classificação do ligante asfáltico de acordo com sua penetração; dentre as principais pode-se citar as seguintes: (i) não são consideradas as condições de carregamento dinâmico, sendo assim a variável tempo é desprezada; (ii) o ensaio apenas considera o efeito do envelhecimento de curto prazo, não considerando o envelhecimento de longo prazo; e (iii) a escolha da temperatura de ensaio é realizada de forma arbitrária e limitada, não representando assim as condições deste material em campo.

2.3.1. Classificação Norte Americana de ligantes asfálticos

O atual modelo Norte Americano de classificação dos ligantes asfálticos é um dos principais resultados do ambicioso programa conhecido como Strategic Highway Research Program (SHRP), que visava melhorar o desempenho dos pavimentos

asfálticos, considerando para tanto as condições de tráfego e climáticas a que os mesmos são solicitados. O sistema conhecido Superior Performing Asphalt Pavement (Superpave) é um dos principais produtos do SHRP, nele são encontradas as principais recomendações necessárias para confecção de pavimentos flexíveis pautando-se na previsão do desempenho dos mesmos (GARBER; HOEL, 2014).

Segundo o sistema Superpave, os ligantes asfálticos são classificados de acordo com seu grau de desempenho, em inglês Performance Grade (PG), o qual faz referência às temperaturas mínimas e máximas adotadas no projeto do pavimento. Por exemplo, um ligante asfáltico classificado com PG 64-28, deverá ter suas propriedades físicas adequadas para temperaturas inferiores a 64 °C e superiores a -28 °C (KENNEDY et al., 1994). Para verificar se as temperaturas máxima e mínima do PG são adequadas, são realizados ensaios reológicos no ligante, e os resultados obtidos devem respeitar os requisitos especificados pela norma ASTM D 6323-16.

Dessa forma, os ensaios reológicos empregados no Sistema Superpave visam determinar as propriedades dos ligantes asfálticos e correlaciona-las com o desempenho do pavimento ao longo de sua vida útil (KENNEDY et al., 1994). De acordo com Kim (2009), os ensaios realizados com auxílio de um Reômetro de Cisalhamento Dinâmico (DSR) buscam avaliar a resistência à deformação permanente e à fissuração por fadiga, assim como o emprego do Reômetro de fluência em viga (BBR) e o ensaio de tração direta (DDT) tem como objetivo avaliar a tendência do ligante em sofrer trincamento térmico.

Além dos ensaios reológicos já mencionados, tem-se o ensaio de viscosidade que avalia a trabalhabilidade do ligante e determina as temperaturas em que o ligante possui consistência adequada para usinagem e compactação de misturas asfálticas, a partir da curva viscosidade-temperatura do ligante em questão (KIM, 2009; BERNUCCI et al., 2006).

Na Figura 3, são apresentados de forma esquemática os principais ensaios empregados na metodologia Superpave:

Figura 3 – Esquema simplificado dos testes empregados no Superpave

Fonte: Adaptado de Kim (2009)

Nesse sentido, as especificações do Superpave visam minimizar a contribuição dos ligantes asfálticos em possíveis defeitos que o pavimento possa vir a apresentar (NIKOLAIDES, 2014). Na Figura 4 observa-se que o ligante tem uma grande contribuição no aparecimento de fissuras de fadiga e no trincamento térmico se comparado com sua participação no surgimento de trilhas de rodas, por deformação permanente:

Figura 4 – Contribuição do ligante asfáltico nos principais defeitos no pavimento

Fonte: Adaptado de Kennedy et al. (1994)

O reômetro de cisalhamento dinâmico é um instrumento complexo e fundamental para caracterização do comportamento viscoelástico e das propriedades reológicas do ligante asfáltico. Por meio dele é possível realizar ensaios oscilatórios que

permitem determinar as propriedades viscoelásticas lineares desse tipo de material (AIREY; HUNTER; RAHIMZADEH, 2002).

Os ensaios são realizados em amostras de ligantes originais e amostras que sofreram envelhecimento laboratorial; para tanto se posiciona a amostra de ligante asfáltico entre duas placas paralelas, sendo que uma delas é mantida fixa e a outra fica responsável pela aplicação de movimentos oscilatórios, considerando temperatura e frequência controladas (PAPAGIANNAKIS; MASAD, 2017). Na Figura 5 são apresentadas algumas considerações, sobre a execução de ensaios reológicos conduzidos com auxílio do DSR:

Figura 5 – Considerações sobre DSR: (a) Esquema de funcionamento; (b) cuidados com a amostra

Fonte: Adaptado de Papagiannakis e Masad (2017)

O modo de aplicação de carregamento do equipamento DSR pode ser por meio de tensão controlada ou por deformação controlada. Quando se opta por controlar a tensão, aplica-se um torque fixo com determinada frequência de oscilação, sob o material a ser ensaiado, essa tensão aplicada resulta numa deformação (FERNANDEZ-NIEVES; PUERTAS, 2016). Em casos em que a deformação necessite ser controlada, executa-se um deslocamento angular sob o material, possibilitando assim a determinação da deformação aplicada sobre a amostra e a tensão resultante.

Dentre as principais propriedades viscoelásticas obtidas com auxílio do DSR, destacam-se o módulo de cisalhamento dinâmico ($|G^*|$) e o ângulo de fase (δ). Segundo Airey, Hunter e Rahimzadeh (2002), $|G^*|$ pode ser definido como resistência total de amostra à deformação quando submetida a carregamento cisalhante, tal parâmetro viscoelástico, pode ser subdividido em uma parcela relativa à energia armazenada e outra componente relacionada à energia perdida a cada ciclo,

definidas como Módulo de armazenamento (G') e Módulo de perda (G''), respectivamente (KIM, 2009). Para determinação de $|G^*|$ considera-se a Equação (1), a seguir:

$$|G^*| = \frac{\tau_{\max}}{\gamma_{\max}} \quad (1)$$

Onde:

$|G^*|$ Módulo de cisalhamento dinâmico (Pa);

$\tau_{\max}$ Máxima tensão de cisalhamento aplicada (Pa);

$\gamma_{\max}$ Máxima deformação devido à tensão de cisalhamento aplicada.

O ângulo de fase pode ser definido como o atraso entre o carregamento aplicado e a resposta a esta carga, e está relacionado com o grau de elasticidade de um material, sendo que dependendo da magnitude deste atraso o material poderá apresentar comportamento semelhante a um sólido elástico ($\delta = 0^\circ$) ou a um líquido viscoso ($\delta = 90^\circ$) (LAVIN, 2003). Na Figura 6 (a), pode ser observada essa defasagem entre a tensão aplicada e a deformação medida para um dado carregamento senoidal. A relação entre os dois principais parâmetros viscoelásticos $|G^*|$ e δ é apresentada na Figura 6 (b).

Figura 6 – Parâmetros reológicos: (a) defasagem entre tensão e deformação; (b) Relação entre o módulo de cisalhamento dinâmico e o ângulo de fase

Fonte: Adaptado de Lavin (2003)

Conforme mencionado anteriormente, as propriedades viscoelásticas dos ligantes asfálticos devem ser examinadas tanto na condição original, como na condição

envelhecida. O envelhecimento do ligante asfáltico visa simular a degradação que este material sofre durante a execução e a vida útil do pavimento asfáltico.

O procedimento de envelhecimento a curto prazo, conhecido como Rolling Thin-Film Oven Test (RTFOT), busca reproduzir o efeito da temperatura sobre as propriedades do ligante durante a usinagem da mistura asfáltica a quente. Tal procedimento é realizado de acordo com as recomendações apresentadas em ASTM D 2872-12 e consiste em submeter uma fina película de ligante, sujeita a um movimento rotativo, a um aquecimento constante de 163 °C e jatos de ar consecutivos.

O ensaio denominado como Pressurized Aging Vessel (PAV) ou de longo prazo, apresentado em ASTM D 6521-13, tem por objetivo replicar o envelhecimento que o pavimento asfáltico sofre ao longo de sua vida útil. Para tanto o ligante é colocado em um recipiente e fica sujeito à ação da pressão de ar e temperatura, durante 20 horas.

De acordo com a metodologia Superpave a partir dos valores de $|G^*|$ e (δ) , determinam-se $G^*/\sin\delta$ e $G^*.\sin\delta$, relacionados com os defeitos de deformação permanente e de fadiga do pavimento, respectivamente. A fim de verificar se o ligante possui resistência adequada contra a deformação, o mesmo deve apresentar um valor para $(G^*/\sin\delta)$ mínimo de 1,00 kPa para ligantes originais e igual ou superior a 2,20 kPa para ligantes que foram envelhecidos por meio do procedimento RTFOT. O parâmetro $(G^*.\sin\delta)$ obtido para amostras de ligantes envelhecidos pelo ensaio RTFOT, seguido do procedimento PAV, deve exprimir um valor máximo de 5000 kPa para assegurar que a resistência ao trincamento por fadiga.

2.3.2. Curva mestra

As propriedades reológicas dos ligantes asfálticos podem ser representadas por diferentes configurações, dentre estas, tem-se a curva mestra que apresenta a variação de $|G^*|$ em função do tempo (ou frequência) para uma dada temperatura de referência (KIM, 2009). A curva mestra pode ser determinada aplicando-se o princípio da superposição tempo-temperatura (que correlaciona temperaturas altas

com baixas frequências e vice-versa). Para tanto, com auxílio de um DSR, realiza-se o ensaio de varredura de frequências, em diferentes temperaturas.

A partir da curva $|G^*|$ versus frequência reduzida para cada uma das temperaturas ensaiadas, adota-se uma temperatura de referência e executa-se o deslocamento horizontal ao longo do eixo logarítmico da frequência das demais curvas até encontrarem a curva da temperatura de referência (AKCELRUD, 2007).

Através da curva mestra é possível observar o comportamento reológico típico de ligantes asfálticos quando submetidos a diferentes temperaturas e frequências de carregamento, permitindo assim correlacionar essas combinações de solicitações com os defeitos mais frequentemente observados em pavimentos asfálticos.

Por exemplo, um ligante irá apresentar maior tendência a sofrer deformação permanente quando submetido a uma alta temperatura (equivalente a uma baixa frequência de carregamento), pois nessas condições o valor de $|G^*|$ é baixo (evidenciando a baixa rigidez do material) e o valor de δ é próximo de 90° , revelando natureza viscosa do ligante. À medida que a frequência de carregamento aumenta, o material tende a aumentar o valor de $|G^*|$. Esse incremento da rigidez pode contribuir para queda da resistência do material ao processo de fadiga do material (KIM, 2009).

2.3.3. Ensaio de fluência e recuperação sob múltiplas tensões - Multiple Stress Creep and Recovery (MSCR)

Pesquisas como a desenvolvida por Sherwood, Thomas e Qi (1998) evidenciaram que as especificações Superpave para ligantes asfálticos se mostraram eficazes na previsão do desempenho de pavimentos asfálticos quanto à deformação permanente. Todavia, no trabalho de Stuart, Mogawer e Romero (2000) foi verificado que, embora o parâmetro Superpave ($G^*/\sin\delta$) apontasse que o ligante Styrelf fosse mais resistente à deformação se comparado ao ligante Novophalt, os resultados obtidos a partir do emprego do simulador de tráfego Accelerated Loading Facility (ALF) em misturas asfálticas mostraram que o pavimento confeccionado com Novophalt apresentava melhor desempenho quanto à deformação permanente. Tais

resultados levantaram questionamentos sobre a eficiência do parâmetro Superpave na previsão do desempenho de pavimento asfálticos, confeccionados a partir de ligantes asfálticos modificados.

Diversas pesquisas foram conduzidas a fim de se obter um parâmetro que substituísse as especificações Superpave quanto à previsão do desempenho em relação à deformação permanente para ligantes modificados; dentre os ensaios desenvolvidos com tal objetivo, destaca-se o ensaio conhecido como Repeated creep and recovery test (RCRT), devido sua eficácia em fornecer dados sobre o desempenho de ligantes modificados. Tal ensaio era realizado em ligantes asfálticos com auxílio de um DSR e consistia na aplicação de uma determinada tensão durante 1 segundo, seguido de 9 segundo de repouso (D'ANGELO; DONGRE, 2007).

O RCRT foi aprimorado e contribui para desenvolvimento do ensaio de fluência e recuperação sob múltiplas tensões (MSCR), proposto por D'Angelo et al. (2007). Esse novo procedimento é capaz de mostrar a dependência dos ligantes asfálticos modificados em relação ao nível de tensão aplicado, além de requerer um número inferior de amostras e ciclos para uma determinada tensão de carregamento, quando comparado ao RCRT.

O ensaio MSCR, além de caracterizar o comportamento de ligantes asfálticos modificados, é uma poderosa ferramenta para avaliação da suscetibilidade de ligantes asfálticos à deformação permanente. Tal ensaio pode ser realizado de acordo com a norma americana da ASTM D 7405-15, e consiste na aplicação de um total de 30 ciclos de aplicação de carregamento, sendo que os 20 primeiros ciclos são realizados com uma tensão de 0,1 kPa (os 10 primeiros ciclos são apenas para condicionamento da amostra, portanto não são utilizados na análise dos resultados) e nos 10 últimos ciclos a tensão aplicada aumenta para 3,2 kPa.

Cada ciclo do ensaio é subdividido em um período inicial de aplicação do carregamento à tensão constante durante 1 segundo, seguido pela aplicação de um carregamento nulo por 9 segundos, ao final de 10 segundos inicia-se um novo ciclo de carregamento. A partir dos valores de deformação inicial e final obtidos durante

os ciclos (carregamento-repouso), para cada um dos níveis de tensão aplicada, é possível calcular um valor médio para a compliância não-recuperável (J_{nr}) e recuperação (R). Estes dois parâmetros permitem avaliar o desempenho dos ligantes em temperaturas altas.

2.3.4. Ensaio de varredura de amplitudes - Linear Amplitude Sweep (LAS)

A atual especificação Superpave busca correlacionar o desempenho dos pavimentos, em relação à fadiga, com o parâmetro $|G^*|.sen\delta$, o qual pode ser obtido a partir de ensaios reológicos em ligantes asfálticos. Todavia pesquisas como a realizada por Bahia et al. (2001) mostraram que tal parâmetro revelou-se inadequado quanto à previsão da fadiga de misturas asfálticas.

Diante do criticismo em relação ao emprego deste parâmetro de fadiga, diversas metodologias vêm sendo desenvolvidas a fim de caracterizar a fadiga em ligantes asfálticos. O teste de varredura de tempo, do inglês Time Sweep Test (TS), tem por objetivo simular o processo de fadiga em ligantes asfálticos, considerando o efeito de carregamentos repetidos na integridade do material; entretanto, tal procedimento apresenta sérias desvantagens relacionadas à baixa repetibilidade e o longo tempo necessário para realização do ensaio (HINTZ et al., 2011).

Diante da necessidade de um método que possibilitasse estimar a resistência à fadiga de ligantes asfálticos, de forma mais expedita que o Time Sweep Test, Johnson (2010) propôs uma metodologia conhecida como ensaio de varredura de amplitudes, em inglês Linear Amplitude Sweep (LAS). Tal procedimento é realizado com auxílio de um DSR e consiste na aplicação de carregamento cíclico, considerando um aumento progressivo da amplitude de carregamento, o que contribui para acelerar o processo de degradação do material analisado. Todavia, foi verificado que a máxima amplitude de carregamento empregada no ensaio LAS não era suficiente para danificar determinados tipos de ligantes asfálticos modificados por polímeros.

Sendo assim Hintz et al. (2011) elevaram o nível de deformação aplicada para 30% e verificaram que essa modificação mostrou uma boa correlação entre a vida de

fadiga dos ligantes testados com a fissuração medida em pavimentos. A atual metodologia adotada no ensaio LAS é normatizada provisoriamente pela AASHTO TP 101/2014, e consiste na aplicação de carregamento cíclico, o qual é subdividido em duas etapas:

- (i) Etapa 1 - Teste de varredura de frequência: Consiste na realização de varredura de frequência de 0,2 Hz até 30 Hz, mantendo a deformação constante igual a 0,1%, visando assim obter as propriedades do ligante asfáltico não danificado.
- (ii) Etapa 2 - Teste de varredura de amplitudes: Essa etapa tem por objetivo obter as propriedades do material danificado e resume-se em, para cada estágio de carregamento, incrementar progressivamente em 1% a taxa de deformação aplicada, até que a mesma atinja 30%. A frequência é mantida constante e igual a 10 Hz.

A análise dos resultados obtidos é realizada com base na teoria do dano contínuo viscoelástico, em inglês Viscoelastic Continuum Damage (VECD), viabilizando a determinação dos parâmetros “A” e “B”, empregados na lei de fadiga de ligantes asfálticos, e possibilitando assim estimar a vida de fadiga do material (ZHOU et al., 2012; HINTZ e BAHIA, 2013). Na Equação (2), é apresentada a lei de Fadiga para determinação da vida de fadiga de um material:

$$N_f = A.(\gamma_{m\acute{a}x})^B \quad (2)$$

Onde:

N_f	Parâmetro de fadiga
A	Parâmetro determinado durante ensaio LAS.
B	Parâmetro determinado durante ensaio LAS.
$\gamma_{m\acute{a}x}$	Máxima deformação esperada, sofrida pelo ligante para uma dada estrutura de pavimento, (%).

2.4. Caracterização de misturas asfálticas

Os pavimentos flexíveis são constituídos por distintas camadas, paralelas entre si, pelas quais são distribuídos os esforços solicitantes resultantes dos carregamentos sofridos na camada superficial do pavimento (YODER; WITCZAK, 1975). O tráfego de veículos, as condições climáticas, as características de cada um dos materiais constituintes de cada camada e as manutenções da via são fundamentais no desempenho do pavimento ao longo de sua vida (VON QUINTUS, 2001).

A depender dos esforços solicitantes, os pavimentos podem sofrer progressiva degradação resultando na manifestação de diferentes patologias em sua estrutura, os principais defeitos que um pavimento flexível pode apresentar ao longo de sua vida útil são fissuração por fadiga, deformação permanente e trinca de retração térmica devido às baixas temperaturas (HUANG, 1993). De acordo Romero e Masad (2001), as respostas resultantes de tensões ou deformações aplicadas em corpos de prova de misturas asfálticas, durante ensaios laboratoriais, são capazes de fornecer importantes parâmetros utilizados em modelos de previsão de desempenho de pavimentos quanto à fadiga e à deformação permanente.

O desempenho das misturas asfálticas é estritamente correlacionado com as condições de ensaio consideradas, visto que variações relativas à magnitude do carregamento e a temperatura podem interferir substancialmente no desempenho da mistura analisada (KHOSLA; OMER, 1985; KALOUSH; WITCZAK; SULLIVAN, 2003). Nos próximos parágrafos são apresentados os ensaios, comumente, empregados para determinação de importantes parâmetros das misturas asfálticas.

2.4.1. Dano devido à umidade em misturas asfálticas

Dano por umidade é uma das principais causas aparecimento de defeitos prematuros em pavimentos asfálticos, o que pode contribuir para o aparecimento de outros tipos defeitos (VARVERI; ZHU; KRINGOS, 2015; SOLAIMANIAN, BONAQUIST, TANDON, 2007). De acordo Huang e Di Benedetto (2015) a umidade pode entrar em contato com o pavimento devido à precipitação, pela ação da capilaridade (responsável por transportar a água do subleito até o revestimento

asfáltico) e entre outros fatores. Na Figura 7 é possível observar os prejuízos causados ao pavimento devido à ação da água:

Figura 7 – Dano devido à umidade em pavimentos

Fonte: Varveri, Zhu e kringos (2015)

O dano gerado em pavimentos asfálticos pela ação da umidade pode estar associado com a perda de aderência entre o agregado e o ligante asfáltico, visto que o agregado tem mais afinidade com a água, sendo assim a mesma se aloja entre esta interface agregado-ligante, resultando no descolamento do ligante asfáltico da superfície do agregado. Um segundo mecanismo de dano gerado pela umidade, se dá pela perda de coesão entre os componentes presentes na mistura asfáltica ocasionada pela modificação das propriedades do ligante asfáltico devido à ação da água (HICKS, 1991).

O potencial da mistura asfáltica ser danificada pela ação da umidade pode ser avaliado por meio de diversos testes, geralmente, subdivido em duas categorias: (i) na primeira categoria a mistura asfáltica é imersa em água e o dano é avaliado por meio de inspeção visual do descolamento da película de ligante asfáltico que cobre o agregado; (ii) o segundo tipo de ensaio é realizado em amostras de misturas asfálticas compactadas e a avaliação do dano é realizado comparando-se os resultados de ensaios de compressão diametral realizado em amostras imersas em água em relação aos resultados obtidos para amostras controle (HICKS, 1991).

Dentre os ensaios realizados em amostras compactadas destaca-se o ensaio de dano por umidade Lottman, que consiste em submeter metade das amostras compactadas a imersão em água, saturação a vácuo e congelamento, e assim

comparar os resultados obtidos por meio de ensaio de compressão diametral, realizados em amostras condicionadas e em não condicionadas. Entretanto alguns pesquisadores consideram tais condições muito conservadoras, para determinadas realidades em que o pavimento será aplicado, sendo assim diversas modificações ao ensaio Lottman foram propostas desde que o mesmo foi concebido (RUTH, 1985).

2.4.2. Ensaio de módulo dinâmico em misturas asfálticas

As misturas asfálticas quando submetidas a baixas deformações apresentam um comportamento viscoelástico linear, há diversas possibilidades de ensaios que podem ser considerados na determinação das propriedades viscoelásticas das misturas. No modo de carregamento senoidal, o módulo do material pode ser determinado considerando-se o domínio da frequência, este princípio é aplicado no ensaio de módulo dinâmico.

Tal ensaio consiste em submeter um corpo-de-prova a um carregamento uniaxial de tensões senoidais e a uma dada frequência aplicada, medindo-se assim a deformação senoidal resultante. Com base, nos valores das amplitudes das tensões aplicadas e das deformações medidas é possível calcular o módulo de cisalhamento dinâmico apresentado na Equação (3) (DI BENEDETTO; DE LA ROCHE, 1998).

(3)

$$|E^*| = \frac{\sigma_0 \cdot \sin(\omega t)}{\varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t - \delta)}$$

Onde:

$ E^* $	Módulo de cisalhamento dinâmico
σ_0	Amplitude da tensão.
ε_0	Amplitude da deformação.
t	Tempo (s)
δ	Ângulo de fase, relativo à defasagem entre a tensão solicitante e a deformação resultante (°)
ω	Velocidade angular (rad/s)

O módulo dinâmico é matematicamente igual à norma do módulo complexo (E^*), sendo assim, como o nome indica é um número complexo composto por uma parte imaginária e outra real. A componente imaginária do módulo complexo (E'') é denominada módulo de perda ou viscoso e a parte real do módulo complexo (E') denominada módulo elástico.

O ensaio de módulo dinâmico pode ser conduzido de acordo com a norma da AASHTO T 342/2011, considerando assim cinco diferentes temperaturas de ensaio e para cada uma delas realiza-se o ensaio em seis níveis de frequências distintos (0,1; 0,5; 1,0; 5,0; 10,0 e 25,0 Hz). Com base nos resultados obtidos, com auxílio do princípio de superposição tempo-temperatura é possível construir a curva mestra ($|E^*|$ (MPa) *versus* frequência reduzida (Hz)) (Figura 8), de determinada mistura asfáltica para uma dada temperatura de referência, o que permite avaliar o comportamento da mistura asfáltica em diferentes condições de frequências.

Figura 8 – Curva mestra: $|E^*|$ *versus* frequência

Fonte: Bonaquist (2008)

2.4.3. Deformação permanente em misturas asfálticas

A ação do tráfego de veículos na estrutura de um pavimento asfáltico é um dos fatores que contribui para aparecimento do defeito conhecido por deformação permanente, visível na superfície de alguns pavimentos asfálticos, principalmente na forma de afundamentos em trilhas de roda (Figura 9). Essas depressões na superfície do pavimento dificultam o escoamento de água oriunda de precipitação, o

que segundo Start, Kim e Berg (1998) aumentam as chances de ocorrência de hidroplanagem, comprometendo assim a segurança dos usuários da via.

Figura 9 – Defeito por deformação permanente em pavimento rodoviário

Fonte: Arabani e Mirabdolazimi (2009)

A deformação permanente pode estar relacionada com a compactação das camadas asfálticas dada pelo tráfego de veículos, resultando assim na densificação dessas camadas devido à redução do volume de vazios (Figura 10 (a)). Outro possível gerador deste tipo de defeito é a ruptura pelo cisalhamento vertical nas camadas do pavimento ou por acúmulo de deformação permanente por repetição de carga (Figura 10 (b)).

Figura 10 – Mecanismos de deformação permanente: (a) densificação; (b) Cisalhamento vertical

(a)

(b)

Fonte: Adaptado de Das (2014)

Nesse sentido, algumas medidas devem ser tomadas a fim de minimizar a deformação permanente em pavimentos asfálticos; dentre elas pode-se destacar: (i) seleção de agregados resistentes e que estejam dentro de faixa granulométrica adequada a fim de resistir aos esforços cisalhantes; (ii) compactar e, quando necessário, reforçar o subleito, a sub-base e/ou a base a fim de que as mesmas

tenham rigidez suficiente para não romperem ou deslocarem expressivamente devido ao carregamento solicitante; (iii) escolha de ligante asfáltico adequado à solicitação, considerando as temperaturas máximas que o pavimento poderá ser submetido; e (iv) dimensionar a estrutura de pavimentos e, portanto, as espessuras de camadas de maneira a suportarem adequadamente o tráfego pelo período de projeto (WANG, 2016; LAVIN, 2003; JENNER; UIJTING, 2004).

Costuma-se adotar como critério de ruptura no dimensionamento de pavimento asfálticos, o máximo para deslocamento vertical no topo do subleito, pois tradicionalmente os subleitos são constituídos pelos materiais mais problemáticos (YODER; WITCZAK, 1975).

Segundo Moura (2010), é possível prever o surgimento de trilhas de rodas através de ensaio realizado em misturas asfálticas com auxílio do equipamento simulador de tráfego tipo LPC, desenvolvido na França, pelo Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Tal ensaio é realizado de acordo com a norma europeia a norma europeia EN 2697-22 e consiste em submeter uma placa retangular de mistura asfáltica a sucessivos carregamentos, realizados com auxílio de um pneumático, ao longo do eixo longitudinal da mesma (BERNUCCI et al., 2006).

Dado um número de ciclos de carregamento aplicados são realizadas as medidas do afundamento, em 15 pontos ao longo da placa ensaiada, sendo assim é possível calcular a deformação em cada um desses pontos considerando a altura inicial da placa, o resultado é expresso em relação à média das deformações calculadas (COOLEY et al., 2000). Uma placa de mistura asfáltica quente deverá apresentar no máximo uma deformação permanente média igual a 10%, segundo as diretrizes francesas após 30.000 ciclos (ZHANG et al., 2006).

3. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE BIOLIGANTE PRODUZIDO A PARTIR DE ÓLEOS VEGETAIS

3.1. Introdução

A utilização de diferentes tipos de resíduos e de fontes naturais renováveis como matérias-primas na obtenção de bioligantes mostra-se promissora por, em determinadas circunstâncias, ser uma alternativa economicamente viável e ecologicamente correta. Neste sentido, de acordo com Williams, Peralta e Puga (2015), o elevado custo necessário para produção de ligantes asfálticos, em comparação com o custo envolvido na obtenção de alguns tipos de bioligantes, torna economicamente vantajoso o emprego dos bioligantes, como modificadores ou substitutos dos ligantes asfálticos convencionais, parcialmente ou totalmente.

Entretanto, o emprego de bioligantes na construção de camadas de pavimentos rodoviário representa um grande desafio para o setor de engenharia de transportes, visto que ainda é incerta a eficácia das atuais metodologias, empregadas na previsão do comportamento dos ligantes asfálticos, na caracterização dos diferentes tipos de bioligantes. Sendo assim, é oportuno o desenvolvimento de novas metodologias na determinação de parâmetros confiáveis, sobre importantes características dos bioligantes, relacionadas ao envelhecimento, propriedades reológicas, adesividade, trabalhabilidade, solubilidade à água, odor, entre outras (KLUTTZ, 2012).

Embora os procedimentos atualmente empregados na caracterização de ligantes asfálticos possam não ser adequados para previsão do desempenho dos bioligantes quanto à fadiga e à deformação permanente, a caracterização reológica é válida, pois pode auxiliar na caracterização do comportamento destes materiais. Todavia, salienta-se que a aplicação de limites ou faixas de valores de resultados obtidos na caracterização reológica de ligantes asfálticos pode não ser aplicável aos bioligantes, porém o emprego dos ensaios e princípios teóricos da reologia está acima de limites e de faixas que foram estabelecidas empiricamente para os ligantes asfálticos.

A presente pesquisa, assim como a maioria das pesquisas já desenvolvidas sobre o emprego de bioligantes, como substitutos e/ou modificadores de ligantes asfálticos convencionais, pauta-se na análise dos resultados de ensaios reológicos utilizados na caracterização de ligantes asfálticos, com a devida cautela de olhar os limites aplicáveis aos ligantes asfálticos, e suas restrições para os bioligantes.

3.2. Materiais

A indústria química brasileira Quimigel, em parceria com a empresa Greca Asfaltos, produziu e forneceu, ao longo da pesquisa, quatro tipos de bioligantes, todos produzidos a partir de óleos vegetais. O objetivo da fabricante era desenvolver um bioligante com características reológicas semelhantes ao ligante asfáltico convencional (CAP 30/45), por isso, fez-se necessário o desenvolvimento de quatro remessas de bioligantes consecutivas e distintas entre si, visando assim à obtenção de um produto com grande potencial de substituir integralmente os ligantes asfálticos. As nomenclaturas dos quatro tipos de bioligantes adotadas nesta pesquisa são apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2 – Nomenclaturas adotadas para os bioligantes

<i>Tipo de bioligante</i>	<i>Nomenclatura adotada</i>	<i>Modificação</i>
1	BIO 1	Sem modificação ou adição
2	BIO 2	0,3% XT14
3	BIO 3	0,3% XT14 + Polímero
4	BIO 4	Não especificada pelos fabricantes

Fonte: Própria autora.

Observação:

XT14®: nome comercial de um surfactante produzido pela Quimigel

Polímero: elastomérico adicionado como modificador

Nesta pesquisa foram considerados como controle dois tipos de ligantes asfálticos: (i) ligante asfáltico convencional, nomeado como CAP 30/45; (ii) ligante asfalto modificado por borracha, nomeado com Asfalto-borracha. Ambos, os ligantes asfálticos, foram cedidos pela empresa Greca Asfalto. As propriedades físicas dos ligantes asfálticos e dos bioligantes são apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3 – Especificações dos ligantes analisados

Parâmetros	Un.	Normas de ensaio	CAP 30/45	Asfalto-borracha	BIO 1	BIO 2	BIO 3
Penetração (100 g, 5s, 25 °C)	(0,1 mm)	DNIT-ME 155/2010	25	46	16	30	29
Ponto de amolecimento	(°C)	DNIT-ME 131/2010	58	55	51	53	56,5
Massa específica (25 °C)	(g/cm ³)	DNIT-ME 193/96	1,030	1,018	1,070	1,068	1,031
Viscosidade rotacional Brookfield (135 °C)	(cP)	ABNT NBR 15184/2004	545	-	1400	1000	1300
Viscosidade rotacional Brookfield (150 °C)	(cP)	ABNT NBR 15184/2004	265	-	850	400	500
Viscosidade rotacional Brookfield (177 °C)	(cP)	ABNT NBR 15184/2004	192	-	350	85	250
Viscosidade rotacional Brookfield (175 °C)	(cP)	ABNT NBR 15529/2007	-	1092,5	-	-	-

Fonte: Própria autora.

De acordo com a Figura 11, é possível observar que a tonalidade do bioligante é mais clara que a do ligante convencional CAP 30/45.

Figura 11 – Comparação entre a coloração: (a) Bioligante; (b) CAP 30/45

Fonte: Própria autora.

3.3. Métodos

A caracterização reológica dos ligantes foi feita com auxílio de um reômetro de cisalhamento dinâmico (DSR) da marca TA Instruments (Modelo DHR-3), observando as prescrições fornecidas pela norma ASTM D 7175-15. Para tanto, foram consideradas amostras de ligantes, antes e após o envelhecimento de curto prazo. O envelhecimento dos ligantes foi realizado por meio do ensaio RTFOT, conduzido na temperatura de 163 °C, de acordo com as diretrizes da norma ASTM D 2872-12. Tal procedimento de envelhecimento tem como objetivo simular em laboratório, a degradação sofrida pelo material durante a usinagem, o transporte e a aplicação da mistura asfáltica em campo.

A preparação das amostras consistiu em aquecer determinado tipo de ligante até uma temperatura tal que o mesmo tivesse fluidez suficiente para ser despejado em moldes de silicone, com tamanhos específicos. Salienta-se ainda, que o aumento de temperatura a que o ligante foi submetido, foi realizado gradativamente e de forma monitorada, evitando assim a degradação excessiva do mesmo. Foram utilizados dois tamanhos de amostras, de acordo com as seguintes configurações: (i) amostra com diâmetro igual a 25 mm e altura de 1 mm (Figura 12 (a)); (ii) amostra com diâmetro igual a 8 mm e altura de 2 mm (Figura 12 (b)).

Figura 12 – Diâmetros das amostras para ensaios reológicos no DSR: (a) 25 mm; (b) 8 mm

Fonte: Própria autora.

A distinção entre os diâmetros das amostras, geralmente, é relacionada com a temperatura adotada no ensaio reológico; neste trabalho adotou-se o emprego de amostras com 25 mm de diâmetro e 1 mm de altura para ensaios realizados entre 40

°C até 76 °C. Para os ensaios conduzidos entre 10 °C a 40 °C adotaram-se amostras com 8 mm de diâmetro e 2 mm de altura.

3.3.1. Ensaio de varredura de frequências

No ensaio de varredura de frequência (de 1 rad/s até 100 rad/s) adotou-se uma taxa de deformação de 0,01% (a fim de garantir que o material estivesse dentro da zona viscoelástica linear); as temperaturas ensaiadas variaram de 10 °C a 76 °C (com incremento de 6 °C para cada temperatura).

Os ensaios foram realizados em duas amostras de cada tipo de ligante analisado, e não se observou variabilidade significativa entre os resultados de um mesmo ligante. Sendo assim, com base nos resultados obtidos e no princípio de sobreposição tempo-temperatura, foi possível obter as curvas mestras para cada tipo de ligante, adotando como referência a temperatura de 40 °C.

3.3.2. Ensaio de fluência e recuperação sob múltiplas tensões (MSCR)

No ensaio de fluência e recuperação sob múltiplas tensões (MSCR), foram consideradas as especificações fornecidas pela a norma ASTM D 7405-15. Como inicialmente não se conhecia o PG dos ligantes analisados, foram arbitradas três temperaturas distintas de ensaios (64 °C, 70 °C e 76 °C).

3.3.3. Ensaio de varredura de amplitude linear (LAS)

O ensaio de varredura de amplitude linear (LAS) foi realizado segundo as diretrizes apresentadas na norma provisória da AASTHO TP 101/2014. Os ensaios foram realizados na temperatura de 25 °C, em amostras de ligantes submetidas ao envelhecimento de curto prazo, por meio do ensaio RTFOT realizado na temperatura de 163 °C.

O critério de ruptura adotado nesta pesquisa foi o valor máximo da tensão cisalhante suportada pelo ligante e a análise dos resultados obtidos foi realizada com base no princípio de dano contínuo viscoelástico.

A seguir, será apresentada de forma sucinta a sequência de ensaios realizados para a caracterização reológica dos ligantes estudados:

- Inicialmente, realizaram-se ensaios de varredura de frequência nas amostras de ligantes asfálticos (CAP 30/45 e Asfalto-borracha) e nas amostras do primeiro tipo de bioligante (BIO 1). Com base nas curvas mestras resultantes, foi possível comparar o comportamento reológico dos três tipos de ligantes, e assim propor modificações no BIO 1, em prol da obtenção de um bioligante com características reológicas semelhantes ao ligante asfáltico convencional CAP 30/45.
- As modificações no BIO 1 resultaram em um novo tipo de bioligante, nomeado como BIO 2, o qual foi submetido a ensaios de varredura de frequências. Com base nos resultados e nas observações sobre a trabalhabilidade de misturas usinadas a quente composta por BIO 2 e agregados, fez-se necessário o desenvolvimento de um terceiro tipo de bioligante, o BIO 3.
- O BIO 3 apresentou comportamento reológico semelhante ao ligante asfáltico convencional. Entretanto, foram observadas sérias dificuldades na usinagem a quente, em escala real (em campo) da mistura contendo BIO 3 e agregados, por isso, foi desenvolvido um quarto tipo de bioligante, nomeado como BIO 4, visando assim aumentar ainda mais a trabalhabilidade das misturas usinadas a quente, compostas por bioligante e agregados.
- Por último, com intuito de verificar a tendência do BIO 3, BIO 4, CAP 30/45 e Asfalto-borracha, em resistir à deformação permanente e à fadiga, foram realizados os ensaios MSCR e LAS, respectivamente.

Nesta pesquisa, para todos os ensaios reológicos realizados (ensaio varredura de frequência, ensaio LAS e ensaio MSCR), a determinação do coeficiente de variação foi dada pela razão do desvio padrão pela média.

Na Figura 13, o fluxograma apresenta a metodologia adotada neste estudo, para a caracterização reológica dos ligantes:

Figura 13 – Fluxograma para ensaios de caracterização reológica dos ligantes

(*) Não se realizou ensaio LAS e MSCR em amostras de Bioligantes do tipo BIO 1 e BIO2.

(**) Foram consideradas apenas as amostras de ligantes envelhecidas.

Fonte: Própria autora.

3.4. Resultados e discussões

3.4.1. Ensaio de varredura de frequências

Nesta secção são apresentadas as curvas mestras obtidas, a partir dos resultados dos ensaios de varredura de frequência, conduzidos entre as temperaturas de 10 °C e 76 °C, realizados nos bioligantes (BIO 1, BIO 2, BIO 3 e BIO 4) e nos ligantes asfálticos (CAP 30/45 e Asfalto-borracha). As curvas mestras do módulo de cisalhamento dinâmico dos ligantes antes e após envelhecimento são apresentadas, respectivamente, na Figura 14 e na Figura 15:

Figura 14 – Curvas mestras do módulo de cisalhamento dinâmico (Antes RTFOT)

Fonte: Própria autora.

De acordo com a Figura 14, é possível verificar que, em baixas frequências (altas temperaturas), as amostras não envelhecidas de ligantes, com exceção ao BIO 4 e ao Asfalto-borracha, apresentaram módulos de cisalhamento dinâmico, semelhantes entre si. Nesse sentido, os menores (BIO 4) e os maiores (Asfalto-borracha) valores de módulo de cisalhamento dinâmico observados, indicaram que em baixas frequências (altas temperaturas) o BIO 4 apresenta a menor resistência à deformação permanente, se comparado aos demais ligantes.

Em altas frequências, o Asfalto-borracha e o BIO 1 apresentaram os menores e os maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico, respectivamente, indicando assim que o Asfalto-borracha seja menos suscetível ao trincamento por fadiga que os demais ligantes estudados.

Ainda de acordo com a Figura 14, ao se comparar o comportamento reológico dos bioligantes em relação ao ligante asfáltico convencional é possível verificar que em regiões de baixas frequências, as curvas mestras dos bioligantes (com exceção ao BIO 4, que se mostrou menos rígido) são semelhantes à curva mestra do CAP 30/45. Entretanto, em frequências altas, os bioligantes se mostraram mais rígidos

que o ligante asfáltico convencional, essa alta rigidez e comportamento frágil indicam maior suscetibilidade dos bioligante em sofrer fissuração por fadiga, caso a estrutura não seja dimensionada para que seja evitada a fadiga precoce.

Os bioligantes estudados por Dhasmana et al. (2015) apresentaram comportamento inverso, visto que as amostras não envelhecidas de bioligante se apresentaram menos rígidas do que as amostras não envelhecidas de ligante asfáltico PG 64-22, independente da frequência considerada.

Figura 15 – Curvas mestras do módulo de cisalhamento dinâmico (Após RTFOT)

Fonte: Própria autora.

De acordo com a Figura 15, é possível verificar que após o envelhecimento de curto prazo, em frequências baixas, os bioligantes e os ligantes asfálticos apresentaram valores de módulo de cisalhamento dinâmico semelhantes entre si. Todavia, em frequências altas, verificou-se que o efeito do envelhecimento de curto prazo no aumento da rigidez do ligante foi mais intenso nos bioligantes se comparado ao observado no ligante asfáltico convencional. De maneira análoga, Dhasmana et al. (2015) verificaram que o aumento da rigidez, devido ao envelhecimento de curto prazo, foi mais significativo nos bioligantes do que no ligante asfáltico convencional,

o que evidencia que os bioligantes sejam mais suscetíveis ao envelhecimento, quando comparado aos ligantes asfálticos convencionais.

Salienta-se ainda na Figura 16 (a), (b), (c), (d), (e) e (f), que todos os ligantes analisados neste trabalho apresentaram aumento do módulo de cisalhamento dinâmico após o envelhecimento de curto prazo, mas esse efeito do envelhecimento na rigidez do material foi mais proeminente nos bioligantes, possivelmente devido à intensa oxidação e perda de voláteis, sofrida pelos mesmos.

Figura 16 – Efeito do RTFOT na rigidez dos ligantes: (a) BIO 1; (b) BIO 2; (c) BIO 3; (d) BIO 4; (e) CAP 30/45; (f) Asfalto-borracha

Fonte: Própria autora.

As curvas mestras do ângulo de fase dos ligantes antes e após envelhecimento são apresentadas, respectivamente na Figura 17 e na Figura 18:

Figura 17 – Curvas mestras do ângulo de fase (Antes RTFOT)

Fonte: Própria autora.

Figura 18 – Curvas mestras do ângulo de fase (Após RTFOT)

Fonte: Própria autora.

De acordo com a Figura 17 e a Figura 18, verifica-se que em regiões de baixas frequências, as amostras de bioligantes e as de Asfalto-borracha, apresentaram, respectivamente, os maiores (próximo de 90°) e os menores valores de ângulo de fase, independente do fator envelhecimento. Diante do observado, é possível inferir que o Asfalto-borracha apresentou a maior resposta elástica, em regiões baixas frequências, o que pode indicar sua maior resistência contra deformação permanente, quando comparado aos demais ligantes. Em altas frequências, as amostras de bioligantes envelhecidas apresentaram os menores valores de ângulo de fase quando comparados aos ligantes asfálticos, o que indica que os bioligantes

sejam menos viscosos e mais elásticos que os demais ligantes analisados, em regiões de baixas temperaturas.

Na Figura 19 (a), (b), (c), (d), (e) e (f), para cada um dos ligantes analisados neste estudo, são apresentadas curvas mestras do ângulo de fase do ligante, antes e após o envelhecimento do mesmo.

Figura 19 – Efeito do envelhecimento no ângulo de fase dos ligantes: (a) BIO 1; (b) BIO 2; (c) BIO 3; (d) BIO 4; (e) CAP 30/45; (f) Asfalto-borracha

Fonte: Própria autora.

3.4.2. Ensaio MSCR em ligantes envelhecidos a curto prazo

As compliâncias não-recuperáveis (J_{nr}) obtidas para as amostras, envelhecidas a curto prazo, de ligantes asfálticos (CAP 30/45 e Asfalto-borracha) e de bioligantes (BIO 3 e BIO 4), para os níveis de tensão iguais a 100 Pa e 3200 Pa, são apresentadas na Figura 20(a) e na Figura 20(b), respectivamente:

Figura 20 – Valores das compliâncias não recuperáveis: (a) $J_{nr\ 100}$; (b) $J_{nr\ 3200}$

Fonte: Própria autora.

De acordo com a Figura 20(a) e a Figura 20(b), para ambos os níveis de tensões, o aumento de temperatura de ensaio resultou em um incremento nos valores de J_{nr} obtidos. Tal constatação era esperada, em relação aos ligantes asfálticos convencionais, devido à suscetibilidade dos mesmos à variação de temperatura, visto que ao submetê-los a uma taxa de aquecimento a rigidez dos mesmos decai.

Nesse sentido, segundo Yang, Suciptan e Chang (2013) OS baixos valores de J_{nr} indicam que o ligante asfáltico apresenta elevada rigidez, sendo assim, quanto menor este parâmetro melhor será a resistência do ligante contra a deformação permanente.

Para cada uma das temperaturas ensaiadas, independentemente do nível de tensão aplicada, o Asfalto-borracha e o BIO 4, apresentam, respectivamente, o menor e o maior valor de J_{nr} , indicando assim que em relação aos demais ligantes analisados, o Asfalto-borracha tem menor suscetibilidade em sofrer deformação permanente. Os resultados obtidos estão de acordo com os trabalhos de Santagata et al. (2015) e Kataware e Singh (2015), onde também observou-se a elevada resistência à deformação permanente do ligante asfáltico modificado por borracha, quando comparado a ligantes asfálticos convencionais.

O bioligante BIO 3 apresentou valores de J_{nr} semelhantes aos observados pelo ligante asfáltico CAP 30/45, para os dois níveis de tensão aplicados. Yang, Suciptan e Chang (2013) ao considerarem um ligante biomodificado contendo um bioligante (resultante da pirólise de cedro japonês), verificaram que a adição de baixa quantidade de bioligante (até 10% em relação à massa do ligante asfáltico) não provocou alterações no ligante quanto a sua resistência à deformação permanente.

Todavia, ao se adicionar uma porcentagem de 50% de bioligante em ligante asfáltico convencional, verificou-se a redução dos valores de J_{nr} do ligante asfáltico. Xu, Wang e Zhu (2017) verificaram que a adição de 10% de lignina de madeira, em relação à massa de ligante asfáltico, culminou em valores de J_{nr} inferiores aos obtidos pelo ligante asfáltico convencional, ou seja, a adição de lignina contribuiu positivamente para resistência do ligante à deformação permanente.

A sensibilidade à variação dos níveis de tensões aplicadas (100 Pa e 3200 Pa), durante o ensaio MSCR é medida por meio do parâmetro $J_{nr, diff}$, o qual segundo as especificações Superpave deve ser inferior a 75%. Os valores de $J_{nr, diff}$, dos ligantes analisados neste estudo são apresentados Tabela 4.

Tabela 4 – Valores de $J_{nr, diff}$ em diferentes temperaturas

<i>Tipo de Ligante</i>	<i>$J_{nr, diff}$</i>		
	<i>64 (°C)</i>	<i>70 (°C)</i>	<i>76(°C)</i>
BIO 3 (RTFOT-163 °C)	6,4	8,9	7,2
BIO 4 (RTFOT-163 °C)	0,8	1,5	1,1
CAP 30/45 (RTFOT-163 °C)	2,3	4,4	4,5
Asfalto-borracha (RTFOT-163 °C)	173,9	227,6	141,6

Fonte: Própria autora.

De acordo com a Tabela 4, independente da temperatura ensaiada o BIO 4 apresentou os menores valores de $J_{nr, diff}$, quando comparado aos demais ligantes analisados, o que pode indicar a baixa sensibilidade à variação dos níveis de tensões aplicadas apresentada por este material. Em contrapartida, o ligante Asfalto-borracha apresentou valores para $J_{nr, diff}$ acima de 75%, para todas as temperaturas ensaiadas.

O ligante asfáltico modificado por borracha estudado por Domingos e Faxina (2016) também apresentou $J_{nr, diff}$ superior a 75%, o que indica que mudanças repentinas de carregamento resultarão em acúmulo demasiado de deformação neste tipo de ligante, sendo assim tais autores recomendam uma avaliação criteriosa dos níveis tensões a que o pavimento asfáltico modificado por borracha será submetido, pois variações de carregamento não previstas poderão favorecer o acúmulo excessivo de deformações permanentes no pavimento asfáltico.

Camargo (2016) menciona que o baixo valor de J_{nr} observado em ligantes asfálticos modificados por borracha possa indicar que a limitação imposta ao parâmetro $J_{nr, diff}$, não seja representativa do real comportamento mecânico das misturas asfálticas modificadas em pista. Nesse sentido, Blazejowski e Dolzycki (2014) observaram que embora os ligantes modificados por SBS apresentassem valores de $J_{nr, diff}$ superiores a 75%, os ensaios mecânicos indicaram o bom desempenho de misturas asfálticas obtidas a partir desses ligantes modificados.

Os percentuais de recuperação elástica dos ligantes analisados, para os níveis de tensões iguais a 100 Pa e 3200 Pa são apresentados na Figura 21 e na Figura 22, respectivamente. Ressalta-se ainda que em todas as temperaturas e níveis de tensões aplicadas, as porcentagens de recuperação elástica observadas para o BIO 4 e o CAP 30/45 foram nulas. No trabalho de Domingos e Faxina (2013), também se observou que um determinado ligante asfáltico apresentou porcentagem de recuperação elástica nula, mas segundo estes autores o emprego de determinados tipos de modificadores pode aumentar este parâmetro.

Figura 21 – Porcentagens de recuperação elástica dos ligantes: R100

Fonte: Própria autora.

Figura 22 – Porcentagens de recuperação elástica dos ligantes: R3200

Fonte: Própria autora.

De acordo com a Figura 21 e Figura 22, em relação ao BIO 3 e ao Asfalto-borracha, é possível constatar que o aumento da temperatura de ensaio resulta na diminuição da porcentagem de recuperação elástica, independentemente do nível de tensão aplicada. Destaca-se ainda, que o ligante modificado por borracha apresentou taxas elevadas de recuperação elástica, quando comparado aos demais ligantes.

Segundo Domingos e Faxina (2015), elevados valores de porcentagem de recuperação elástica obtidos por um determinado ligante indicam que a parcela de deformação plástica (não-recuperável) é menor do que a parcela de deformação recuperada ao final de cada ciclo de carregamento e repouso, ou seja, quanto maior

a porcentagem de recuperação elástica de um ligante, menor será a sua tendência em sofrer deformação permanente.

De acordo com os valores obtidos de J_{nr} e de porcentagem de recuperação elástica, é possível inferir que o Asfalto-borracha possui maior resistência à deformação permanente, se comparado com os outros tipos de ligantes analisados. Em relação aos dois tipos de bioligantes observados é possível inferir que o BIO 3 apresentou menor tendência a sofrer deformação permanente quando comparado ao BIO 4, visto que o BIO 3 apresentou valores de compliância não-recuperável semelhantes ao CAP 30/45 e inferiores que as observadas para BIO 4.

Com base nas especificações presentes na norma AASHTO M 332/2014 (Tabela 5) é possível classificar os ligantes asfálticos quanto ao tipo de tráfego solicitante, considerando para tanto o número de solicitações do eixo padrão de carga equivalente, em inglês Equivalent Standard Axle Load (ESAL) e a velocidade em que o pavimento é solicitado.

Tabela 5 – Especificações e critérios (AASHTO M 332/2014)

Designação de tráfego	Nível de Tráfego (ESALs)	Cond.	Velocidade (Km/h)	Critérios	
				$J_{nr3,2}$ (kPa ⁻¹)	$J_{nr, diff}$ (%)
Standard (S)	$< 1.10^7$	E	>70	$\leq 4,50$	<75
High (H)	$> 1.10^7$	OU	>20	$\leq 2,00$	
	$< 3.10^7$		<70	$\leq 1,00$	
Very high (V)	$> 3.10^7$	OU	<20	$\leq 0,50$	
Extremely high (E)	$> 3.10^7$	E	<20	$\leq 0,50$	

Fonte: Própria autora.

Nesse sentido, com base nos valores de $J_{nr 3,2}$ e $J_{nr, diff}$, obtidos por meio do ensaio MSCR é possível classificar os ligantes estudados em quatro categorias: Standard (S) (Padrão); High (H) (Pesado); Very high (V) (muito pesado) e Extremely high (E) (Extremamente pesado).

Na Tabela 6 é apresentada a classificação para os dois tipos de bioligante (BIO 3 e BIO 4) e para os ligantes asfálticos (CAP 30/45 e Asfalto-borracha) estudados nesta pesquisa.

Tabela 6 – Classificação dos ligantes de acordo com nível de tráfego

Tipo de Ligante	Temperatura de ensaio (°C)	$J_{nr, 3,2}$ (kPa ⁻¹)	$J_{nr, diff}$ (%)	Nível de Tráfego
BIO 3 (RTFOT-163 °C)	64	1,37	6,4	H
BIO 4 (RTFOT-163 °C)		2,66	0,8	S
CAP 30/45 (RTFOT-163 °C)		1,47	2,3	H
Asfalto-Borracha (RTFOT-163 °C)		0,74	173,9	(*)
BIO 3 (RTFOT-163 °C)	70	3,99	8,9	S
BIO 4 (RTFOT-163 °C)		5,93	1,5	(**)
CAP 30/45 (RTFOT-163 °C)		3,69	4,4	S
Asfalto-Borracha (RTFOT-163 °C)		1,5	227,6	(*)
BIO 3 (RTFOT-163 °C)	76	8,46	7,2	(**)
BIO 4 (RTFOT-163 °C)		12,68	1,1	(**)
CAP 30/45 (RTFOT-163 °C)		7,95	4,5	(**)
Asfalto-Borracha (RTFOT-163 °C)		3,31	141,6	(*)

(*) Classificação não se aplica, valor de $J_{nr, diff}$ é superior a 75%.

(**) Classificação não aplica, valor de $J_{nr, 3,2}$ superior a 4,5 kPa⁻¹.

Fonte: Própria autora.

Quanto à classificação relativa ao tipo de tráfego observa-se pelos valores apresentados na Tabela 6, que nas temperaturas de ensaio consideradas, o emprego do CAP 30/45 e do BIO 3 não é indicado para um tráfego extremamente pesado ou muito pesado. Ressalta-se ainda, que o Asfalto-borracha não pôde ser classificado, pois os valores de $J_{nr, diff}$ obtidos para este foram maiores que 75%. Importante realçar que o BIO 3 e o CAP 30/45 são muito similares quanto à classificação, alcançando o objetivo inicial de produzir um bioligante similar ao CAP 30/45.

Outro fator que se deve ressaltar é que não se sabe se os limites empregados para subdividir os ligantes asfálticos para emprego em misturas asfálticas sujeitos a diferentes tráfegos ou condições de solicitação pelo tráfego são aplicáveis a outros produtos como os bioligantes. Há de se observar que os limites foram estabelecidos por observação e correlação com o campo, não por limites fundamentais teóricos. Grande experimento unindo laboratório e campo deveria ser realizado para se obter novos limites aplicáveis a bioligantes.

3.4.3. Ensaio LAS em ligantes envelhecidos a curto prazo

Nesta secção são apresentados os principais resultados relativos ao comportamento quanto à fadiga dos bioligantes (BIO 3 e BIO 4) e dos ligantes asfálticos (CAP 30/45 e Asfalto-borracha). Na Figura 23, são apresentadas as curvas integridade *versus* intensidade de dano para os ligantes analisados, que correlacionam a intensidade de dano com o tempo.

Figura 23 – Curvas de dano *versus* integridade

Fonte: Própria autora.

Os valores máximos de intensidade de dano são obtidos considerando o ponto em que ocorreu a ruptura do ligante, ou seja, onde o valor máximo da tensão cisalhante foi atingido. O Asfalto-borracha foi o material que suportou a maior intensidade de dano (igual a 193) antes de sofrer a fratura, seguido do CAP 30/45 (71), BIO 3 (44) e do BIO 4 (41). A análise é, no entanto, parcial, pois pode-se observar que a perda de integridade inicial dos bioligantes é menor se comparada com o CAP 30/45.

Portanto, novas análises devem ser aplicadas para este novo produto, de maneira a melhor caracterizá-lo e indicar aperfeiçoamentos em sua composição para vencer a ruptura em baixa intensidade de dano e extrair os benefícios de uma queda menor de integridade que os ligantes asfálticos convencionais.

Com base nos valores de “A” e “B” (Tabela 7) obtidos a partir do ensaio LAS e na lei de fadiga descrita na Equação (2), foi possível traçar as curvas de fadiga (Figura 24) para os ligantes analisados.

Tabela 7 – Parâmetros obtidos a partir do ensaio LAS

<i>Ligante</i>	<i>A</i>	<i>CV^(*)</i> (%)	<i>B</i>	<i>CV^(*)</i> (%)
BIO 3 (RTFOT-163 °C)	1,5E+04	8,0	-1,89	6,51
BIO 4 (RTFOT-163 °C)	1,4E+04	7,3	-1,88	1,38
CAP 30/45 (RTFOT-163 °C)	1,5E+05	4,8	-2,63	1,67
Asfalto-borracha (RTFOT-163 °C)	4,8E+06	14,9	-3,08	0,52

(*) Coeficiente de variação

Fonte: Própria autora.

Figura 24 – Curvas de Fadiga dos ligantes analisados

Fonte: Própria autora.

De acordo com a Figura 24, é possível verificar que nas deformações consideradas, o Asfalto-borracha apresentou a maior vida de fadiga, seguido do CAP 30/45, BIO 3 e BIO 4. Dessa forma, é possível verificar que os bioligantes analisados apresentaram menor resistência à fadiga do que os ligantes asfálticos analisados.

Nesta perspectiva, faz-se necessário compreender como empregar os bioligantes e em que condições de deformabilidade na estrutura de um pavimento a fim de extrair o melhor deste novo tipo de ligante.

Segundo Bahia et al. (2013), para análise da vida de fadiga de pavimentos asfálticos são consideradas as deformações aplicadas iguais a 2,5%, em casos de camadas asfálticas superficiais, com espessuras superiores a 10 cm. Enquanto que, as deformações iguais a 5,0%, são indicadas para análise da fadiga em camadas superficiais asfálticas delgadas. Nesse sentido, Tran, Taylor e Willis (2012) observaram que a deformação aplicada de 5% apresentou melhor correlação com o comportamento de fadiga de misturas asfálticas do que a deformação de 2,5%.

Tabela 8 – Vida de fadiga dos ligantes para as deformações de 2,5% e 5,0%

Ligante	Vida de fadiga			
	ϵ 2,5%	CV^(*) (%)	ϵ 5,0%	CV^(*) (%)
BIO 3 (RTFOT-163 °C)	2,7E+03	3,2	7,4E+02	11,7
BIO 4 (RTFOT-163 °C)	2,4E+03	5,0	6,6E+02	3,2
CAP 30/45 (RTFOT-163 °C)	1,4E+04	8,8	2,2E+03	11,8
Asfalto-borracha (RTFOT-163 °C)	2,9E+05	13,5	3,4E+04	12,4

(*) Coeficiente de variação

Fonte: Própria autora.

De acordo com a Tabela 8 é possível verificar que nos dois níveis de deformações considerados, o Asfalto-borracha apresentou a maior vida de fadiga quando comparado aos demais ligantes analisados. A média de vida de fadiga observada pelo o CAP 30/45 foi 5,0 vezes superior que a observada para o BIO 3 e 5,5 vezes superior à observada pelo BIO 4, na deformação de 2,5%. Considerando a deformação de 5%, o CAP 30/45 apresentou, em média, 3,0 e 3,3, maior que vida de fadiga que a observada para BIO 3 e BIO 4, respectivamente.

Mais uma vez ressalta-se que a aplicabilidade dos bioligantes precisam ser discutidas à luz de sua posição na estrutura de pavimento e rigidez do conjunto. Análises simplistas são muito perigosas para usar como fonte de comparação para esses novos produtos.

3.5. Conclusões

Por meio de caracterização reológica dos bioligantes foi possível comparar comportamento dos mesmos com o observado pelos ligantes asfálticos, em relação

à fadiga e à deformação permanente, sob a perspectiva empregada normalmente para ligantes de fontes de petróleo. As principais conclusões indicam que:

- Ao se considerar as amostras de ligantes não envelhecidas, em regiões de altas frequências das curvas mestras, foi possível observar que os bioligantes apresentaram maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico quando comparados aos valores observados pelo ligante asfáltico convencional e o pelo ligante asfáltico modificado por borracha. Enquanto que, em baixas frequências, foi possível verificar que os módulos dos bioligantes e do ligante asfáltico convencional foram semelhantes, com exceção ao BIO 4 e ao Asfalto-borracha.
- Após o envelhecimento de curto prazo, observou-se um significativo aumento dos módulos de cisalhamento dinâmico para todos os bioligantes, quando comparado ao observado para os ligantes asfálticos analisados. O que pode indicar que os bioligantes sejam mais suscetíveis ao envelhecimento que os ligantes asfálticos, pelo menos a temperaturas empregadas para análise de envelhecimento. Não se sabe se a temperaturas mais baixas o comportamento é diferenciado. Foi fixada a temperatura em 163 °C para envelhecimento, como indica os procedimentos para ligantes asfálticos convencionais.
- Os ângulos de fase dos bioligantes, em regiões da curva mestra de baixas frequências, ficaram próximos de 90°, o que indica que nestas regiões de frequências, os bioligantes sejam mais viscosos que os demais ligantes analisados.
- Nos dois níveis de tensões considerados (100 Pa e 3200 Pa), para uma dada temperatura de ensaio, o Asfalto-borracha apresentou os menores valores de compliância não recuperável (J_{nr}), o que indica sua melhor resistência à deformação permanente, se comparado aos demais ligantes analisados. Nas mesmas condições, é possível observar que o BIO 3 apresentou valores de J_{nr} semelhantes aos obtidos pelos CAP 30/45. Enquanto que o BIO 4 obteve os maiores valores de J_{nr} , indicado assim que dentre os ligantes, ele seja o menos resistente à deformação permanente, pelo menos se o emprego dos limites existentes para ligantes asfálticos possa ser aplicado para bioligantes.

- Em todas as temperaturas ensaiadas, os bioligantes e o ligante asfáltico convencional apresentaram valores de $J_{nr, diff}$ inferiores a 10%, respeitando assim, o limite de 75% imposto a este parâmetro. Entretanto, se observou que os valores de $J_{nr, diff}$, registrados pelo Asfalto-borracha, são superiores ao limite estabelecido, o que pode indicar que este ligante apresente alta sensibilidade ao carregamento. Vale ressaltar que o menor $J_{nr, diff}$ foi observado para o BIO 4, o que pode mostrar pouca alteração de comportamento em diferentes tensões, fato que pode vir a ser melhor explorado em trabalhos futuros.
- O Asfalto-borracha apresentou a maior vida de fadiga e suportou maior dano antes de fraturar. O CAP 30/45 apresentou a segunda maior vida de fadiga e o dano necessário para fraturar o CAP 30/45 foi superior ao observado pelos bioligantes BIO 3 e BIO 4. Mais uma vez, ressalta-se que a análise é feita para asfaltos e não se sabe sua aplicabilidade aos bioligantes. Deve-se observar que a taxa de queda de integridade dos bioligantes testados é menor que para o ligante asfáltico convencional CAP 30/45, fato este que deve ser melhor explorado.
- É possível verificar que os bioligantes tendem a apresentar uma resistência à deformação permanente semelhante a encontrada pelo CAP 30/45. Todavia, em relação à fadiga é possível verificar que os bioligantes apresentaram uma menor vida de fadiga que os ligantes asfálticos convencionais, empregando as mesmas análises e limites estabelecidos empiricamente para analisar o comportamento de asfaltos derivados de petróleo.

4. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA E QUÍMICA DO EFEITO DA TEMPERATURA NO ENVELHECIMENTO DE CURTO PRAZO DE BIOLIGANTE

4.1. Introdução

Durante a vida útil de um pavimento, o ligante presente nas misturas asfálticas sofre diferentes processos de envelhecimento o que pode alterar suas características reológicas, cooperando assim para formação de microfissuras que podem evoluírem e contribuir assim para o colapso do pavimento.

O envelhecimento do asfalto é usualmente subdivido em duas fases: (i) a primeira conhecida como envelhecimento de curto prazo, que ocorre durante as etapas de usinagem, transporte, espalhamento e compactação das misturas asfálticas; e (ii) a segunda, conhecida como envelhecimento de longo prazo, que ocorre no restante da vida útil do pavimento, causado pelas condições ambientais e solicitações de tráfego (ABBAS et al., 2002).

A degradação sofrida pelo ligante asfáltico é significativamente severa, durante o envelhecimento de curto prazo, pois as elevadas temperaturas as quais a mistura asfáltica é submetida, durante sua fabricação, transporte e compactação, contribuem para intenso processo de oxidação e perda de voláteis do ligante. No envelhecimento de longo prazo, a oxidação é o principal mecanismo de degradação do ligante asfáltico (ABBAS et al., 2002; READ; WHITEOAK, 2003).

O envelhecimento de curto prazo sofrido pelos ligantes asfálticos convencionais pode ser simulado, em laboratório, por meio do ensaio conhecido como Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT), todavia, quando são considerados determinados tipos de ligantes modificados, tal ensaio deve ser adaptado quanto ao tempo e/ou à temperatura de ensaio (AIREY, 2003).

Em algumas pesquisas sobre o emprego de bioligantes, a exemplo as desenvolvidas por Metwally e Williams (2010), Silva et al. (2014) e Williams, Peralta e Puga (2015), verificou-se a necessidade de modificação do ensaio RTFOT, considerando para

tanto, temperaturas inferiores à recomendada pela norma norte americana da ASTM D 2872-12.

Nesse sentido, Metwally e Williams (2010) analisaram um bioligante que não podia ser aquecido a temperaturas superiores a 120 °C, visto que em temperaturas acima deste limite poderia ocorrer a volatilização de alguns componentes e mudança da estrutura química do bioligante. Por isso foram propostas algumas modificações quanto à temperatura e ao tempo de duração dos ensaios que simulam em laboratório o envelhecimento (curto e longo prazo) do pavimento. Nesta mesma perspectiva, Silva et al. (2014) reduziram a temperatura de ensaio do ensaio RTFOT para a temperatura de 140 °C.

O envelhecimento causado pela oxidação dos ligantes asfálticos pode ser avaliado quimicamente por meio da espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), a partir da verificação da formação de determinados grupos funcionais, como carbonila e sulfóxidos após o envelhecimento do ligante (Lu e Isacson, 2002). Nesta pesquisa, foi considerada a análise química da oxidação dos ligantes, por meio da técnica de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier de Refletância Total Atenuada (FTIR-ATR), de acordo com Karlsson e Isacson (2003), tal técnica se destaca por sua fácil exequibilidade e por dispensar o emprego de solventes, os quais poderiam interferir nos resultados dos espectros obtidos.

No ensaio, a radiação infravermelha é direcionada para um meio com alto índice de refração (cristal opticamente denso), considerando ainda um dado o ângulo de incidência. Nessas condições a radiação incidente é totalmente refletida na interface amostra-cristal, culminando assim no surgimento da onda evanescente que penetra alguns microns além da superfície da amostra que está em contato com o cristal. Portanto, a partir da interação entre o onda evanescente e a amostra, é possível obter o espectro de infravermelho (KHOSHESAB, 2012).

A partir do espectro de uma amostra de ligante asfáltico é possível calcular o índice de carbonila e o índice de sulfóxido, relacionados com a oxidação de grupos funcionais presentes na amostra (LAMONTAGNE et al., 2001). De acordo com

Marsac et al. (2014), o índice de carbonila e o índice de sulfóxido podem ser obtidos a partir da Equação (4) e da Equação (5).

$$I_{C=O} = \frac{\text{Área}_{(C=O)}}{\text{Área}_{(CH_2)} + \text{Área}_{(CH_3)}} \quad (4)$$

$$I_{S=O} = \frac{\text{Área}_{(S=O)}}{\text{Área}_{(CH_2)} + \text{Área}_{(CH_3)}} \quad (5)$$

Onde:

- $\text{Área}_{(C=O)}$ Área relativa ao grupo funcional carbonila (região próxima a 1700 cm⁻¹)
- $\text{Área}_{(S=O)}$ Área relativa ao grupo funcional sulfóxido (região próxima a 1030 cm⁻¹)
- $\text{Área}_{(CH_3)}$ Área relativa ao grupo funcional metil (região próxima a 1375 cm⁻¹)
- $\text{Área}_{(CH_2)}$ Área relativa ao grupo funcional etileno (região próxima a 1460 cm⁻¹)

Ainda de acordo com Marsac et al. (2014), foram consideradas as áreas relativas aos grupos funcionais metil e etileno, devido a não alteração das áreas relativas a esses grupos em razão da oxidação sofrida pelo ligante considerado.

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo verificar por meio de ensaios reológicos e químico se a atual temperatura adotada no ensaio RTFOT (igual a 163 °C) é capaz de simular o envelhecimento sofrido pelo bioligante, durante a usinagem de misturas compostas por bioligante e agregados.

4.2. Materiais

Nesta pesquisa considerou-se como controle o ligante asfáltico convencional CAP 30/45, cedido pela empresa Greca Asfalto, cujas propriedades físicas são apresentadas na Tabela 9:

Tabela 9 – Especificações do ligante asfáltico (CAP 30/45)

Parâmetros	Unidade	CAP 30/45
Penetração (100 g, 5s, 25 °C)	(0,1 mm)	25
Ponto de amolecimento	(°C)	58
Massa específica (25 °C)	(g/cm ³)	1,030
Viscosidade rotacional Brookfield (135 °C)	(cP)	545
Viscosidade rotacional Brookfield (150 °C)	(cP)	265
Viscosidade rotacional Brookfield (177 °C)	(cP)	192

Fonte: Própria autora.

O segundo ligante analisado foi bioligante (BIO 3), obtido a partir de óleos vegetais, produzido e fornecido pela indústria química brasileira Quimigel, em parceria com a empresa Greca Asfaltos. Salienta-se ainda, que devido a provável degradação que o bioligante poderia vir a sofrer durante seu aquecimento, foi restringida pelos fabricantes do bioligante a temperatura máxima de trabalho em 150 °C.

4.3. Métodos

4.3.1. Envelhecimento de curto prazo

O envelhecimento de curto prazo foi realizado de acordo com os protocolos da ASTM D 2872-12, que consiste em submeter uma película fina de 35 gramas de amostra de asfalto contida no interior de um recipiente cilíndrico de vidro, a um movimento giratório constante durante 85 minutos a 163°C, considerando ainda a injeção de ar no interior dos frascos.

O envelhecimento de curto prazo do ligante asfáltico (CAP 30/45) foi realizado na temperatura recomendada pela norma da ASTM. No caso do bioligante, além da temperatura normatizada, foram consideradas outras duas temperaturas de ensaio, sendo elas 150 °C e 180 °C. A temperatura de 150 °C foi adotada, pois foi a temperatura adotada durante a usinagem da mistura de bioligante e agregados. Considerou-se ainda a temperatura de 180 °C, visto que a temperatura de 163 °C talvez não fosse suficiente para simular o envelhecimento de curto prazo do ligante.

4.3.2. Extração e recuperação do bioligante

O bioligante presente na mistura composta por BIO 3 e agregados, usinada na temperatura de 150 °C foi extraído por meio do procedimento de extração por refluxo, descrito no método B, apresentado na norma norte americana ASTM D 2172-17, utilizando o tricloroetileno como solvente. A recuperação do bioligante, presente na solução de solvente e BIO 3, resultante do processo de extração, descrito anteriormente, foi realizada de acordo com o método Abson, conforme as recomendações descritas na norma da ASTM D 1856-09.

4.3.3. Ensaio de varredura de frequência

Para avaliar o comportamento viscoelástico dos ligantes estudados nesta pesquisa, foram realizados testes de varredura de frequência, utilizando o reômetro de cisalhamento dinâmico, da marca TA Instruments, Modelo Discovery (HR-3). Para a construção das curvas mestras dos ligantes analisados, foram consideradas amostras de ligante com diâmetro igual a 25 mm e altura de 1 mm.

A varredura de frequência variou de 1 rad/s até 100 rad/s, com uma taxa de deformação igual a 0,01%. As temperaturas ensaiadas variaram de 40 °C a 76 °C (com incremento de 6 °C para cada temperatura). Com base nos resultados obtidos no ensaio de varredura de frequências e no princípio de sobreposição tempo-temperatura, foi possível obter as curvas mestras do bioligante (BIO 3) e do ligante asfáltico, considerando a temperatura de referência igual a 40 °C.

4.3.4. Ensaio de Varredura de amplitude linear (LAS)

A análise do comportamento dos ligantes estudados em relação à fadiga foi realizada por meio do ensaio de varredura de amplitude linear, de acordo com as diretrizes da AASHTO TP 101-14. Tal ensaio foi realizado na temperatura 25 °C, em amostras de ligantes envelhecidas com 8 mm de diâmetro e 2 mm de altura.

4.3.5. Ensaios de fluência e recuperação (MSCR)

Com intuito de verificar a suscetibilidade dos ligantes à deformação permanente, foi realizado o ensaio de fluência e recuperação, de acordo com a norma da ASTM D 7405-15, em amostras envelhecidas de 25 mm de diâmetro e 1 mm de altura. A temperatura de ensaio adotada foi igual a 64 °C.

4.3.6. Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

O espectro de cada um dos ligantes considerados neste trabalho, foi obtido com auxílio do espectrofotômetro de infravermelho com transformada de Fourier associado ao módulo de ATR, da marca Perkin Elmer, modelo Frontier, conforme apresentado na Figura 25 (a). Foram realizados 20 varreduras por amostra, com resolução de 4 cm^{-1} , considerando para tanto amostras sólidas de ligante (Figura 25 (b)).

Figura 25 – Análise da oxidação de ligantes por FTIR: (a) Espectrofotômetro; (b) Amostra de ligante

Fonte: Própria autora.

Na Figura 26, o fluxograma apresenta a metodologia empregada neste estudo, que tem como objetivo principal avaliar do efeito da temperatura do ensaio RTFOT no envelhecimento do bioligante:

Figura 26 – Fluxograma da metodologia adotada: estudo do envelhecimento de bioligante

(*) O CAP 30/45, foi envelhecido pelo procedimento RTFOT, considerando apenas a temperatura de ensaio normalizada pela norma norte americana (163 °C).

(**) Ensaios realizados apenas em amostras de ligantes envelhecidas.

Fonte: Própria autora.

4.4. Resultados e discussões

4.4.1. Ensaio de varredura de frequências

As curvas mestras na temperatura de referência de 40 °C dos ligantes nas condições antes do envelhecimento e após o envelhecimento, são apresentadas na Figura 27. De acordo com as curvas mestras obtidas é possível constatar que o aumento da temperatura de ensaio RTFOT, resultou em bioligantes com maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico.

Dentre os bioligantes envelhecidos, o BIO 3 (RTFOT-150 °C) e o BIO 3 (RTFOT-180 °C), apresentaram, os menores e os maiores valores de $|G^*|$, respectivamente. Esse aumento da rigidez do bioligante após ensaio de envelhecimento pode ser devido à

diversas razões dentre elas têm-se a oxidação e a saturação química das ligações químicas presentes no bioligante, ocorridas durante o ensaio RTFOT.

Figura 27 – Curvas mestras: estudo do envelhecimento de bioligante

Fonte: Própria autora.

Ainda é possível verificar que antes do envelhecimento, o bioligante apresentou módulos de cisalhamento dinâmico inferiores aos observados pelo ligante asfáltico convencional; entretanto, após o ensaio RTFOT (conduzido na temperatura de 163 °C), o bioligante e o CAP 30/45 apresentaram valores de módulo de cisalhamento dinâmico similares entre si. Com base nestas observações, é possível inferir que o bioligante seja mais suscetível ao envelhecimento do que o ligante asfáltico convencional, pois a variação dos módulos de cisalhamento dinâmico, após o envelhecimento do ligante, foi mais expressiva no Bioligante.

O bioligante estudado por Yang, Mills-Beale e You (2014) também se mostrou mais suscetível ao envelhecimento quando comparado ao ligante asfáltico convencional; tal constatação foi formulada após se comparar os valores de módulo de

cisalhamento dinâmico do ligante biomodificado com ligante asfáltico convencional, antes e após envelhecimento RTFOT. De maneira semelhante, Fini et al. (2017) verificaram que ligantes biomodificados apresentaram aumento significativo dos valores de módulo de cisalhamento dinâmico, devido ao envelhecimento, quando comparado ao ligante asfáltico convencional PG 64-22.

Os ensaios com ligantes envelhecidos em temperaturas crescentes mostraram que houve o aumento progressivo do módulo de cisalhamento dinâmico do bioligante demonstrando seu envelhecimento progressivo com o aumento da temperatura.

O ligante recuperado de uma mistura asfáltica usinada à temperatura de 150 °C mostrou que o bioligante estava envelhecido como no teste de envelhecimento à temperatura de 163 °C. Não se sabe se a usinagem é mais deletéria que o ensaio de envelhecimento do ligante no RTFOT, ou se a etapa de recuperação não consegue extrair perfeitamente o ligante envelhecido e causa uma modificação complementar de envelhecimento devido ao próprio processo.

4.4.2. Ensaios de fluência e recuperação sob múltiplas tensões (MSCR)

Os valores de compliância não-recuperável (J_{nr}), para os dois níveis de tensões aplicados durante o ensaio, 100 Pa e 3200 Pa, são apresentados na Figura 28 e na Figura 29, respectivamente:

Figura 28 – Valores de J_{nr100} : estudo do envelhecimento de bioligante

Fonte: Própria autora.

Figura 29 – Valores de $J_{nr\ 3200}$: estudo do envelhecimento de bioligante

Fonte: Própria autora.

Para fins de comparação, de acordo com a Figura 28 e a Figura 29, o ligante asfáltico (CAP 30/45) e o bioligante (BIO 3), envelhecidos nas mesmas condições (RTFOT conduzido na temperatura de 163 °C), apresentaram valores de J_{nr} semelhantes entre si, para os dois níveis de tensões considerados. Na pesquisa de Yang e You (2015), ao se considerar amostras de ligantes, previamente envelhecidas por meio de ensaio RTFOT, os valores de J_{nr} obtidos por amostras de ligantes modificados por bio óleo, obtido a partir da pirólise rápida de resíduos de madeira, eram inferiores aos obtidos pelo ligante asfáltico convencional, ou seja, a modificação pela adição de bio óleo contribuiu para aumento da resistência do ligante asfáltico à deformação permanente.

Ao se considerar o efeito de diferentes níveis de envelhecimento no desempenho do bioligante em temperaturas altas, é possível inferir que o aumento da temperatura do ensaio RTFOT resultou em bioligantes com menores valores de J_{nr} , independentemente do nível de tensão aplicada. Essa redução nos valores de J_{nr} observada para os bioligantes indica que quanto mais severo (exposição às maiores temperaturas) o procedimento de envelhecimento, mais rígido será o bioligante resultante. Diante do exposto, é possível inferir, que o envelhecimento do bioligante contribui para aumento da resistência à deformação permanente do mesmo, como também ocorre também com ligantes asfálticos de petróleo.

O efeito positivo do envelhecimento no desempenho de ligante em altas temperaturas, também foi verificado em relação a determinados tipos de ligantes

modificados por polímeros, como mostram as pesquisas de Bernie, Zofka e Yut (2012) e de Yan et al. (2017), ambos os estudos verificou-se que a adição de ligante extraído de material asfáltico reciclado (RAP), contribuiu para redução dos valores de J_{nr} de determinados tipos de ligantes modificados por polímeros.

Em relação ao efeito do envelhecimento na sensibilidade à variação dos níveis de tensões aplicadas durante ensaio MSCR, verificou-se que os bioligantes envelhecidos apresentaram valores do parâmetro $J_{nr,diff}$, inferiores ao limite de 75%, estabelecido pelas especificações Superpave (Tabela 10).

Tabela 10 – Valores de $J_{nr,diff}$: estudo do envelhecimento de bioligante

Tipo de Ligante	$J_{nr,diff}$
CAP 30/45 (RTFOT-163 °C)	2,35
BIO 3 (RTFOT-150 °C)	8,18
BIO 3 (RTFOT-163 °C)	6,36
BIO 3 (RTFOT-180 °C)	5,20
BIO 3 (Recuperado)	3,93

Fonte: Própria autora.

Na Figura 30 e na Figura 31, são apresentados os valores de porcentagem de recuperação elástica, considerando os níveis de tensões iguais a 100 Pa e 3200 Pa, respectivamente:

Figura 30 – Valores de R_{100} : estudo do envelhecimento de bioligante

Fonte: Própria autora.

Figura 31 – Valores de R_{3200} : estudo do envelhecimento de bioligante

Fonte: Própria autora.

Segundo a Figura 30 e a Figura 31, é possível verificar que a porcentagem de recuperação elástica do ligante asfáltico (CAP 30/45) envelhecido é nula, independentemente do nível de tensão aplicado. Em relação ao efeito da temperatura considerada no envelhecimento do bioligante, é possível inferir o bioligante envelhecido a 150 °C tem menor recuperação elástica que o bioligante recuperado e os bioligantes envelhecidos nas temperaturas iguais a 163 °C e 180 °C, respectivamente.

No trabalho de Xu, Wang e Zhu (2017), foi verificado que a adição de 10% de lignina em ligante asfáltico, contribuiu para aumento da porcentagem da recuperação elástica verificada a partir do ensaio MSCR, o que segundo esses autores indica que a modificação pela adição de lignina culmina no aumento da recuperação das deformações sofridas, visto que o material tem um ganho em suas propriedades elásticas.

4.4.3. Ensaio de Varredura de amplitude linear (LAS)

O efeito do envelhecimento na vida de fadiga do bioligante foi avaliado por meio do ensaio de varredura de amplitude linear. A análise dos resultados obtidos foi feita com base na teoria do dano contínuo viscoelástico, o que permitiu avaliar o comportamento à fadiga do bioligante em diferentes graus de envelhecimento e do ligante asfáltico convencional (CAP 30/45) envelhecido. Na Figura 32, são apresentadas as curvas integridade versus dano dos ligantes analisados. Neste

estudo, é possível inferir que o ligante asfáltico suportou a maior intensidade de dano antes de romper, quando comparado aos demais ligantes analisados. Enquanto que, o BIO 3 (recuperado) foi o material que menos resistiu ao dano acelerado promovido durante o ensaio LAS.

Figura 32 – Curvas de dano versus integridade: estudo do envelhecimento de bioligante

Fonte: Própria autora.

Ao considerar o efeito de diferentes condições de envelhecimento no bioligante é possível verificar que o bioligante envelhecido em uma temperatura do ensaio RTFOT abaixo da normatizada pela norma da ASTM foi mais resistente ao dano, se comparado ao bioligante envelhecido na temperatura adotada pela norma norte americana e na temperatura de 180 °C. Salienta-se ainda que o bioligante recuperado apresentou uma perda de integridade mais intensa, se comparado aos demais ligantes analisados, o que indica que mesmo à temperatura igual a 180 °C, já consideravelmente excessiva, não foi suficiente para igualar a degradação sofrida pelo bioligante durante a usinagem a quente do mesmo com agregados.

Mais uma vez, a temperatura de usinagem do bioligante é um ponto crucial em seu desempenho, demonstrado neste estudo. Quanto à recuperação do bioligante, não se pode garantir que os procedimentos de extração e recuperação não influenciaram nos resultados, levando a um comportamento que indica maior envelhecimento na usinagem com agregados, o que pode não ser real.

Os resultados obtidos por meio do ensaio LAS, em conjunto com a teoria do dano contínuo viscoelástico, tornou possível a determinação da vida de fadiga dos ligantes analisados para diferentes níveis de deformações. Nesse sentido, na Tabela 11 são apresentados os parâmetros “A” e “B”, empregados na determinação das curvas vida de fadiga dos ligantes, apresentadas na Figura 33.

Tabela 11 – Parâmetros obtidos a partir do ensaio LAS: estudo do envelhecimento de bioligante

<i>Ligante</i>	<i>A</i>	<i>CV^(*)</i> (%)	<i>B</i>	<i>CV^(*)</i> (%)
BIO 3 (RTFOT-150°C)	1,6E+04	10,2	-1,82	0,64
BIO 3 (RTFOT-163°C)	1,5E+04	8,0	-1,89	6,51
BIO 3 (RTFOT-180°C)	2,1E+04	13,1	-2,35	0,41
BIO 3 (Recuperado)	9,1E+03	1,0	-1,93	3,87
CAP 30/45 (RTFOT-163°C)	1,5E+05	4,8	-2,63	1,67

(*) Coeficiente de variação dos resultados obtidos

Fonte: Própria autora.

Figura 33 – Curvas de Fadiga dos ligantes analisados

Fonte: Própria autora.

De acordo a Figura 33 é possível verificar que o ligante asfáltico apresentou maior vida de fadiga, se comparado à observada pelo bioligante (BIO 3). Todavia, deve-se atentar que o aumento do nível de deformação culminou na aproximação entre os valores de número de ciclos obtidos pelo ligante asfáltico e os observados pelo bioligante (envelhecidos pelo ensaio RTFOT, nas temperaturas de 150 °C e 163 °C), indicando assim que o ligante asfáltico seja mais sensível à variação da taxa de deformação aplicada do que o bioligante.

A maior suscetibilidade do ligante asfáltico à taxa de deformação aplicada pode ser verificada a partir do parâmetro “B” (obtido a partir da análise dos resultados do ensaio LAS). De acordo com Elkashef e Williams (2017), este parâmetro está correlacionado com a intensidade da variação do dano sofrida pelo ligante, devido a altas taxas de deformação aplicadas. De fato, de acordo Tabela 11, o ligante asfáltico CAP 30/45 apresentou o menor valor do parâmetro “B”, sendo assim o ligante responsável pela curva com maior coeficiente angular, o que indica a sua maior suscetibilidade a variação da deformação aplicada.

Ainda segundo a Figura 33, o bioligante envelhecido na temperatura de 180 °C apresentou maior vida de fadiga que o bioligante envelhecido nas outras duas temperaturas consideradas neste estudo, quando se considerou baixas taxas de deformação. Todavia, à medida que se elevaram as deformações aplicadas, o bioligante envelhecido na temperatura de RTFOT igual a 180 °C passa a apresentar a pior vida de fadiga, em comparação ao bioligante envelhecido considerando menores temperaturas de ensaio. De maneira semelhante, Hintz (2011) verificou que quanto mais envelhecido o ligante melhor irá ser seu desempenho quanto à fadiga em baixas deformações, todavia, o envelhecimento penaliza o desempenho do ligante asfáltico quando são consideradas taxas elevadas de deformações.

Reitera-se aqui que o procedimento tem sido empregado para análises de ligantes asfálticos e pode ser limitado para bioligantes. Novos procedimentos devem ser buscados para caracterizar propriedades e previsão de desempenho de misturas com bioligantes.

4.4.4. Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

Os espectros de reflexão total atenuada no infravermelho por transformada de Fourier dos ligantes, considerados neste estudo, são apresentados na Figura 34 e na Figura 35:

Figura 34 – Espectros FTIR-ATR: estudo do envelhecimento de bioligante

Fonte: Própria autora.

Figura 35 – Detalhamento dos espectros (entre 1830 cm^{-1} e 1670 cm^{-1})

Fonte: Própria autora.

De acordo com a Figura 34 e a Figura 35, é possível verificar que o bioligante (em diferentes condições de envelhecimento) apresentou elevada concentração de bandas entre as frequências 1800 e 1680 cm^{-1} , o que não foi tão significativo em relação ao ligante asfáltico CAP 30/45.

Segundo Hanson (2003) e Schrader (2008), a região do espectro no infravermelho entre as bandas 1850 a 1650 cm^{-1} , corresponde ao grupo funcional carbonila; nesse sentido é possível inferir que o bioligante, mesmo antes de sofrer envelhecimento, já apresentava elevada concentração de grupos funcionais contendo oxigênio.

De forma análoga, o espectro do bioligante (produzido a partir de óleo de feijão) analisado por Gong et al. (2017) apresentou bandas de grupos funcionais nas frequências iguais a 1745, 1710 e 1164 cm^{-1} , o que não foi observado nos demais ligantes asfálticos utilizados como controle, assinalando a maior concentração de moléculas de oxigênio no bioligante, quando comparado aos ligantes asfálticos.

O bioligante estudado por Zhang et al. (2017a) também apresentou elevada presença de diferentes grupos funcionais, que incluem em sua composição moléculas de oxigênio, revelando assim que o bioligante produzido, a partir da pirólise rápida de pó de madeira serrada, apresentou maior quantidade de oxigênio em sua composição que o ligante asfáltico de penetração 70 (0,1 mm).

A região do espectro relativa ao grupo sulfóxido é detalhada na Figura 36, a seguir:

Fonte: Própria autora.

De acordo com a Figura 36 o bioligante apresentou maior concentração do grupo funcional sulfóxido quando comparado ao ligante asfáltico convencional (CAP 30/45).

Figura 37 – Detalhamento dos espectros (entre 1240 cm^{-1} e 990 cm^{-1})

Fonte: Própria autora.

Com base nos espectros apresentados na Figura 37, é possível verificar que entre os intervalos de bandas de 1230 até 1089 cm^{-1} e 998 até 992 cm^{-1} , ocorreu a maior absorção de grupos funcionais presentes nos bioligantes quando comparado ao ligante asfáltico convencional, indicando assim as que ambos ligantes são distintos, entre si. O bioligante analisado por Fini et al. (2011) também apresentou um espectro distinto em relação ao ligante asfáltico convencional, de acordo com estes autores a grande variedade de grupos funcionais presentes no bioligante aponta a complexidade deste material, em relação ao ligante asfáltico convencional.

O efeito do envelhecimento do ligante asfáltico na variação da composição química do material, pode ser avaliado por meio do índice de carbonila e o índice de sulfóxido, visto que a oxidação tende a culminar no aumento deste grupos funcionais. Na Figura 38 e Figura 39 são apresentados os índices de carbonila e de sulfóxido, respectivamente, calculados para os ligantes considerados neste estudo:

Figura 38 – Índice de carbonila: estudo do envelhecimento de bioligante

Fonte: Própria autora.

Figura 39 – Índice de sulfóxido: estudo do envelhecimento de bioligante

Fonte: Própria autora.

Como esperado, ocorreu um aumento do índice de carbonila e do índice de sulfóxido após o envelhecimento do ligante asfáltico CAP 30/45. Entretanto, o mesmo aumento não foi observado para o bioligante, visto que as amostras de bioligante envelhecidas a curto prazo apresentaram índices de carbonila inferiores ao observado pela amostra de bioligante não envelhecida. Entretanto, ao contrário das amostras envelhecidas pelo ensaio RTFOT, o bioligante recuperado apresentou índice de carbonila maior que o verificado para bioligante não envelhecido.

Em relação ao índice de sulfóxido, é possível verificar que, com exceção ao bioligante envelhecido na temperatura de 150 °C, o envelhecimento resultou em índices iguais ou inferiores ao observado pelo bioligante não envelhecido. Diante do verificado, é possível inferir que os índices de carbonila e de sulfóxido não se mostraram adequados para análise do efeito do envelhecido em bioligante, dado que não foi possível estabelecer uma relação entre estes parâmetros e a oxidação deste material.

De forma semelhante, nos trabalhos de Xu, Wang e Zhu (2017) e Fini et al. (2017) foi observada a redução dos índices de carbonila e de sulfóxido após o envelhecimento do ligante modificado por lignina e do bioligante oriundo de dejetos de suínos, respectivamente, o que indica que tais índices não são efetivos para avaliar a oxidação de ligantes modificados por determinados tipos de bioligantes. Xu, Wang e Zhu (2017) sugeriram que a lignina atue como agente retardador da oxidação no ligante asfáltico, o que contribui para redução dos índices de carbonila e de sulfóxido.

Outra possível explicação para a não aplicabilidade dos índices de carbonila e de sulfóxido na análise da oxidação de bioligante reside no fato que as bandas frequentemente adotadas para o cálculo de tais índices, para os ligantes asfálticos, podem não ser corretas para análise da oxidação de bioligantes. Nesse sentido, Yang, You e Mills Beale (2014) verificaram que na análise do bioligante, a banda relativa ao grupo funcional sulfóxido deslocou-se de 1030 cm^{-1} para 1035 cm^{-1} .

4.5. Conclusões

Por meio de ensaios reológicos e estudo químico, foi possível avaliar o efeito da temperatura e da variação da temperatura de ensaio de envelhecimento de curto prazo nas propriedades mecânicas do bioligantes. Dentre as principais conclusões deste estudo, destacam-se:

- A temperatura do ensaio de envelhecimento de curto prazo interferiu significativamente na rigidez do bioligante, visto que os ensaios RTFOT conduzidos em temperaturas acima (180 °C) e abaixo (150 °C), da normatizada

(163 °C) pela norma norte americana, ASTM D 2872, resultaram em um bioligante com maiores e menores módulos de cisalhamento dinâmico, respectivamente. Essa variação da rigidez assinala o expressivo efeito da temperatura de ensaio RTFOT na degradação do bioligante. Ainda de acordo com as curvas mestras obtidas é possível inferir que o bioligante seja mais suscetível ao envelhecimento quando comparado ao ligante asfáltico convencional.

- Os maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico observados nas curvas mestras para os ligantes analisados mostraram-se coerentes com os resultados do ensaio de fluência e recuperação sob múltiplas tensões, visto que o bioligante envelhecido pelo ensaio RTFOT, conduzido na temperatura de 180 °C apresentou a curva mestra com maiores módulos e os menores valores de compliância não recuperável, quando comparado às observadas para os demais ligantes considerados. Essa correlação entre a rigidez do ligante e o valor de J_{nr} obtido foi observada para todos os ligantes analisados neste estudo. Nesse sentido, quanto mais elevada a temperatura considerada no ensaio RTFOT, mais rígido e elástico o bioligante e menor valor de J_{nr} observado para o mesmo, o que indica que o aumento da degradação do bioligante resulta em um material mais resistente à deformação permanente.
- Em relação à fadiga, verificou-se que o ligante asfáltico apresentou uma maior resistência à fadiga que os demais bioligantes analisados, todavia este material se mostrou mais suscetível à variação da taxa de deformação aplicada. Dentre os bioligantes analisados, foi possível verificar que embora o bioligante recuperado tenha se mostrado menos degradado pela análise das curvas mestras e resultados do ensaio MSCR, este material apresentou o pior desempenho quanto à fadiga, o que indica que a degradação do bioligante durante a usinagem é mais severa que a simulada por ensaio RTFOT na temperatura de 180 °C, em relação à resistência à fadiga do material. Fica aqui um alerta que não se sabe se o procedimento de extração e recuperação não se sobrepõe ao envelhecimento real dada pela usinagem.

- Os índices de carbonila e de sulfóxido não se mostraram adequados para análise da oxidação e envelhecimento sofrido pelo bioligante envelhecido em diferentes condições.

5. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS DE BIOLIGANTE E AGREGADOS USINADAS A QUENTE PARA EMPREGO EM PAVIMENTOS

5.1. Introdução

A caracterização reológica apresentada em diversas pesquisas indica potencial do emprego de bioligante como substitutos parciais e total aos ligantes asfálticos convencionais, entretanto ainda é reduzida a quantidade de estudos publicados, que considerem a caracterização mecânica de misturas usinadas a partir de agregados e bioligante ou ligantes asfálticos modificados por bioligante.

Embora de acordo Kennedy et al. (1994) o ligante asfáltico contribuía de forma significativa na formação de defeitos em pavimentos asfálticos, o estudo do comportamento de misturas asfálticas é significativamente relevante para previsão do desempenho do pavimento, pois considera a contribuição do ligante e da matriz pétreia em resistir às solicitações de carregamento sofridas pelo pavimento.

A caracterização química dos bioligantes estudados por Dhasmana et al. (2015), sem considerar a interação do bioligante com o agregado, indicou que os bioligantes apresentavam alto poder adesivo devido à alta concentração de moléculas polares em sua composição. Mas o ensaio de energia livre de superfície mostrou que embora a ligação entre os bioligantes e os agregados seja elevada, se comparada à observada em ligantes asfálticos convencionais, essa ligação é facilmente afetada pela ação da água, visto que é favorável termodinamicamente a troca da camada de bioligante que envolve o agregado, pela água.

Diante do exposto, apesar de os estudos reológicos e químicos realizados em ligantes fornecerem importantes previsões sobre o desempenho de um determinado pavimento, a caracterização das misturas usinadas a partir de ligante e agregados, fornece relevantes informações relativas à contribuição dos agregados nos principais defeitos que o pavimento pode vir a apresentar durante sua vida útil. Nesse sentido o presente estudo tem por objetivo avaliar o desempenho em relação ao dano por umidade e deformação permanente, de misturas usinadas a quente, obtidas a partir de bioligante de origem vegetal e agregados, frente a misturas asfálticas.

5.2. Materiais

Os agregados empregados na confecção das misturas usinadas são provenientes da pedreira EGP Pires Belo, coletados em campo durante a execução de trecho experimental usando o bioligante (BIO 3), localizado na rodovia BR-050-GO. As especificações técnicas sobre os agregados empregados são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Especificações técnicas dos agregados adotados.

<i>Parâmetros</i>	<i>Noras de ensaio</i>	<i>Valores</i>
Adesividade	DNIT-ME 078/94	Satisfatória
Índice de Forma	DNIT-ME 086/94	0,76
Equivalente de Areia (%)	DNIT-ME 054/97	71,00
Índice de Degradação (%) (com ligante)	DNIT-ME 401/99	2,50
Índice de Degradação (%) (sem ligante)	DNIT-ME 401/99	4,50
Densidade real da mistura dos agregados	-	2,663

Fonte: Própria autora.

O bioligante considerado na preparação dos corpos de prova foi coletado em campo e foi fabricado pela indústria química brasileira Quimigel, em parceria com a empresa Greca. Os outros dois ligantes asfálticos (CAP 30/45 e o Asfalto-borracha), utilizados na confecção das misturas asfálticas controles, foram cedidos pela empresa Greca Asfaltos.

O projeto de dosagem das misturas asfálticas e da mistura de bioligante e agregados, foi realizado de acordo com metodologia Marshall. Na Tabela 13 são apresentadas as especificações de dosagem, para cada uma das misturas consideradas. Ressalta-se ainda que o BIO 1 (Tabela 2) foi o ligante considerado durante no projeto de dosagem da mistura de bioligante e agregados, entretanto, os ensaios reológicos (apresentados no Capítulo 3, do presente estudo), indicaram que dentre os 3 primeiros tipos de bioligantes fabricados, o BIO 3 (Tabela 2) apresentava comportamento reológico mais similar ao observado pelo ligante asfáltico convencional CAP 30/45, que constituía a meta original da pesquisa.

Tabela 13 – Resumo da dosagem para cada uma das misturas dosadas

<i>Parâmetros</i>	<i>Unidade</i>	<i>Normas de ensaio</i>	<i>CAP 30/45</i>	<i>Asfalto-Borracha</i>	<i>Bioligante (BIO 1)</i>
Teor ótimo de ligante	%	DNIT-ME 053/94	4,8	5,0	5,9
Massa específica aparente da mistura compactada	g/cm ³	DNIT-ME 117/94	2,335	2,240	2,305
Massa específica máxima (RICE)	-	ASTM D 2041M/2011	2,447	2,446	2,430
Volume de Vazios	%	DNIT-ME 043/95	4,5	5,0	5,3
Vazios do agregado Mineral	%	DNIT-ME 043/95	16,5	20	18,0
Relação ligante / vazios	-	DNIT-ME 043/95	72,9	75	70,6
Estabilidade Marshall	N	DNIT-ME 043/95	10787,3	9218,3	54525,0
Fluência	0,01"	DNIT-ME 043/95	12,4	10,5	4,7
Relação filler/betume	-	DNIT-ME 043/95	1,41	1,41	0,00
Resistência à tração por compressão diametral (25 °C)	MPa	DNIT-ME 136/2010	2,06	2,06	2,77
Temperatura de usinagem	°C	-	165	165	150
Temperatura de compactação	°C	-	150	150	135

Fonte: Própria autora.

Nesse sentido, ao invés de se executar o trecho experimental a partir do BIO 1, fez-se a escolha pelo BIO 3, visando assim à confecção de um pavimento mais durável. Todavia, por motivos de cronograma, não foi possível elaborar a dosagem para o BIO 3. Sendo assim, para execução do trecho experimental e dos corpos de provas produzidos em laboratório, foi considerado o teor de bioligante e granulometria obtidos a partir da dosagem realizada para o BIO 1, embora o ligante utilizado tenha sido o BIO 3.

Na Figura 40 são apresentadas as curvas granulométricas limites adotadas pela faixa III do Dersa e a curva granulométrica inicialmente adotada neste estudo, para confecção de cada um dos 3 tipos de misturas usinadas consideradas:

Figura 40 – Faixa granulométrica obtida

Fonte: Própria autora.

Contudo, durante a usinagem preliminar da mistura de bioligante e agregados em escala real, para execução de um segmento teste, foram observadas algumas dificuldades relacionadas à baixa trabalhabilidade e à deficiência de lubricidade da mistura, que contribuíram para travamento da usina volumétrica, a qual precisou ter seu misturador e elevador desmontados e limpos, para prosseguir com as usinagens.

Neste cenário, se fez necessário o ajuste da granulometria da mistura composta por bioligante (BIO 3) e agregados, para tanto se reduziu a quantidade de finos e se retirou a cal, visto que a mesma contribuía para que a mistura sofresse uma rápida redução da temperatura após a usinagem, dificultando assim a compactação da mesma em campo.

O controle das misturas ajustadas em campo indicou que apenas duas dessas misturas apresentaram trabalhabilidade adequadas. As propriedades das mesmas são apresentadas na Tabela 14:

Tabela 14 – Parâmetros de misturas de BIO 3 e agregados ajustadas em campo

Parâmetros	Unidade	Mistura 1	Mistura 2
Teor ótimo de ligante	%	5,10	5,70
Massa específica aparente da mistura compactada	kN/m ³	21,51	22,67
Massa específica máxima (RICE)	-	2,413	2,457
Teor de vazios	%	9,10	5,90
Vazios do agregado mineral	%	19,70	18,20
Relação ligante / vazios	-	53,70	67,60
Estabilidade Marshall	N	27850,9	29910,28
Fluência	0,01"	7,10	7,90
Resistência à tração por compressão diametral (25 °C)	MPa	2,15	1,62

Fonte: Própria autora.

De acordo com a Tabela 14, é possível verificar que entre as duas misturas ajustadas, a mistura 1 apresentou o maior valor de resistência à tração por compressão diametral, e por esta razão foi a mistura escolhida para o estudo em laboratório, que teve como objetivo determinar a resistência ao dano pela ação da água e as características mecânicas da mistura de bioligante e agregados. A faixa granulométrica da mistura 1, adaptada em campo, é apresentada na Figura 41:

Figura 41 – Faixa granulométrica adaptada em campo

Fonte: Própria autora.

A escolha pela mistura 1 foi feita com base em vantagens mencionadas em estudos como o desenvolvido por Tayfur, Ozen e Aksoy (2007), em que se relaciona a elevada resistência à tração indireta de uma mistura asfáltica, com uma melhor eficiência da mesma em resistir esforços de tração, evitando a fissuração prematura do material e contribuindo assim para maior durabilidade do pavimento. Ainda é possível destacar, de acordo com Christensen Jr e Bonaquist (2002), que os resultados de resistência à tração indireta também se correlacionam com a deformação permanente. Nessa perspectiva, Khosla e Harikrishnan (2007) verificaram que quanto menor a resistência à tração de uma mistura asfáltica, maior será a deformação permanente e a fissuração à fadiga sofrida pelo material.

Embora existam significativos indícios sobre os benefícios que uma mistura com elevada resistência à tração possa fornecer a um pavimento, durante a escolha do tipo de mistura a ser empregada em campo deve-se também atentar para questões práticas considerando a estrutura em que a mesma estará inserida. Por exemplo, se a mistura com elevada rigidez e pequena espessura for aplicada sobre uma camada de base granular, a camada que trabalha à flexão trincar-se-á rapidamente, visto que nesses casos a rigidez é diretamente proporcional à tensão de tração na fibra inferior da camada de mistura com elevada rigidez. Portanto, o projeto de dimensionamento deve prever estas características particulares para extrair o melhor deste comportamento.

5.3. Métodos

Após a usinagem, cada uma das misturas foi armazenada em estufa por 2 horas, a fim de simular o envelhecimento de curto prazo. Em seguida, as misturas foram compactadas para obtenção de determinados tipos de corpos de prova. Para a moldagem dos corpos de prova, foram utilizados os seguintes equipamentos: (i) Compactador Marshall (para os ensaios de dano por umidade induzida); (ii) Prensa de cisalhamento giratório (PCG) (para os ensaios de módulo dinâmico); (iii) Mesa compactadora francesa (para os ensaios de deformação permanente).

Na Figura 42, o fluxograma apresenta a metodologia empregada na caracterização das misturas usinadas a quente produzida a partir de bioligante e agregados e da mistura asfáltica:

Figura 42 – Fluxograma da metodologia adotada para caracterização das misturas usinadas

Fonte: Própria autora.

5.3.1. Ensaio de dano por umidade induzida

O estudo do dano por umidade induzida foi realizado de acordo com as diretrizes apresentadas na norma ASTM D4867. Para tanto, foram consideradas a mistura asfáltica (CAP 30/45) e a mistura de bioligante com agregados usinada a quente. Neste ensaio é possível avaliar de forma simplificada a adesividade entre o agregado e o ligante.

Para tanto, foram considerados seis corpos de prova cilíndricos com vazios de $7 \pm 1\%$, sendo que metade dessas amostras foi condicionada, ou seja, as mesmas foram submetidas à saturação (Figura 43 (a)), seguida de congelamento (-18°C) (Figura 43 (b)), e por banho maria a 60°C por 24 horas. Por fim, ambos os tipos de amostras foram imersos em banho Maria a 25°C , a fim de climatização das mesmas à temperatura de ensaio de compressão diametral.

O ensaio de compressão diametral foi conduzido até a ruptura da amostra, com isso foi possível obter a resistência à tração indireta, para cada um dos corpos de prova ensaiados.

Figura 43 – Condicionamento das amostras: (a) saturação; (b) congelamento

Fonte: Própria autora.

Com base nos valores obtidos foi possível estabelecer uma relação entre a resistência das amostras condicionadas e das amostras não condicionadas. Essa relação expressa o dano por umidade induzida, também conhecida como resistência à tração retida (RRT), calculada de acordo com a Equação (6), a seguir:

$$RRT = \frac{RT_c}{RT} \times 100\% \quad (6)$$

Onde:

- RT_c Média da resistência à tração indireta das três amostras que sofreram condicionamento (MPa)
- RT Média da resistência à tração indireta das três amostras que não sofreram condicionamento (MPa)

5.3.2. Ensaio de módulo dinâmico

O ensaio de módulo dinâmico foi realizado de acordo com a norma AASHTO T 342/2011. O procedimento do ensaio consiste em aplicar um carregamento senoidal, axialmente no topo de corpos de provas cilíndricos, com 100 milímetros de diâmetro e 150 milímetros de altura, visando assim se medir o correspondente deslocamento.

O ensaio foi conduzido em 4 temperaturas, 4,4 °C; 21,1 °C; 37,8 °C e 54,0 °C, e em 6 diferentes frequências (25 Hz; 10 Hz; 5 Hz; 1 Hz; 0,5 Hz e 0,1Hz). Com base no princípio da superposição tempo-temperatura, no modelo sigmoidal e nos resultados

obtidos foi possível obter a curva mestra, considerando a temperatura de referência igual a 21,0 °C.

5.3.3. Ensaio de deformação permanente - Simulador de tráfego francês (Tipo LPC)

O ensaio de deformação permanente foi conduzido de acordo com a norma europeia EN 2697-22 conduzido na temperatura de 60 °C. Para tanto foram utilizadas duas placas por tipo de misturas usinadas, cujas dimensões são iguais a 180 mm x 500 mm x 50 mm. O ensaio foi conduzido até 30.000 ciclos, mas ao decorrer do mesmo foram realizadas algumas interrupções na aplicação do carregamento, para medições do afundamento da mistura. Para um determinado número de ciclos de carregamento, a partir das profundidades medidas, calculou-se a deformação considerando a altura inicial da placa. O afundamento por deformação permanente foi dado pela média das 15 deformações medidas.

5.4. Resultados e discussões

5.4.1. Ensaio de dano por umidade induzida

De acordo com os valores de resistência à tração retida, apresentados na Tabela 15, foi possível verificar que ambas as misturas analisadas enquadraram-se dentro do valor limite de 70% estabelecido pela norma da ASTM D 4867. Todavia, a mistura é possível verificar que a mistura asfáltica (CAP 30/45) mostrou-se menos suscetível a sofrer degradação devido à ação da umidade quando comparada à mistura de bioligante com agregados.

Tabela 15 – Resistências à tração retidas por umidade induzida

	Tensão (MPa)		RRT (%)
	Condicionada	Controle	
Mistura com Bioligante	1,63	2,28	71,5
Mistura com CAP 30/45	2,04	2,28	89,5

Fonte: Própria autora.

De maneira semelhante, Zhang et al. (2017b) verificaram que ao se modificar o ligante asfáltico convencional com diferentes porcentagens de bioligante (obtido a

partir da pirólise rápida de serragem), os valores de RRT para misturas com bioligante e agregados foram superiores a 75%, embora a adição de bioligante resultasse na redução da resistência ao dano por umidade da mistura asfáltica em relação à de controle.

De acordo com Fini (2016), a combinação de bioligante (oriundo da liquefação de dejetos suínos) com ligante asfáltico modificado por borracha, culminou em misturas com elevada resistência ao dano por umidade quando comparada à observada pela mistura asfáltica de controle, de acordo com estes autores, a mistura contendo bioligante resultou em valores de RRT superiores em 17% aos observados para ligante asfáltico PG 64-22.

Na Figura 44 (b) é possível observar que houve mudança expressiva na aparência externa dos corpos de prova após imersão em água, o que não foi observado para os corpos-de-prova para a mistura asfáltica com CAP 30/45 (Figura 44(a)). Dentre os trabalhos consultados, não foi mencionada a variação da coloração dos corpos de provas produzidos a partir de bioligante e agregados.

Figura 44 – Amostras controle (à esquerda) e condicionadas (à direita) após ruptura: (a) mistura asfáltica (CAP 30/45); (b) mistura de bioligante com agregados

Fonte: Própria autora.

Na Figura 45 é possível verificar a junta entre pavimento asfáltico e pavimento produzido a partir de bioligante, a imagem foi capturada após 12 meses de construção de ambos os trechos, é possível verificar que em campo houve variação

de coloração entre os dois tipos de misturas considerados, ficando aquela com bioligante bem mais clara.

Figura 45 – Junta entre o pavimento obtido a partir de bioligante (à esquerda) e o pavimento asfáltico convencional (à direita)

Fonte: Própria autora.

5.4.2. Ensaio de módulo dinâmico

Na Figura 46, tem-se as curvas mestras na temperatura de referência de 21 °C, das misturas analisadas neste estudo, considerando a média dos resultados obtidos para os corpos de prova ensaiados, para cada um dos três tipos de misturas analisadas:

Figura 46 – Curvas mestras médias das misturas analisadas

Fonte: Própria autora.

Com base na Figura 46 é possível verificar que as misturas analisadas apresentam comportamento reológico distinto, entre si. Apesar de os corpos de prova da mistura com bioligante apresentarem maior porcentagem média de vazios (6,40%), quando comparado à porcentagem média de vazios observada pela mistura com CAP 30/45 (5,00%) e pela mistura com Asfalto-borracha (5,50%), pela Figura 46 é possível verificar que a mistura com bioligante, mesmo assim apresentou os maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico ($|E^*|$), quando comparado aos valores observados pelas misturas asfálticas.

De maneira semelhante, os estudos desenvolvidos por Williams, Peralta e Pulga (2015) e Yang et al. (2014) verificaram que as misturas que continham ligante asfáltico modificado por um determinado tipo de bioligante apresentaram maiores módulos de cisalhamento quando comparadas às misturas asfálticas. Comportamento oposto foi verificado nas pesquisas de Wen, Bhusal e Wen (2012) e Mogawer et al. (2012), em que se constatou que adição de determinado tipo de bioligante, reduz a rigidez da mistura asfáltica. Diante do exposto, é possível verificar que assim como os ligantes asfálticos convencionais, o tipo e o teor de bioligante irão determinar o comportamento mecânico desenvolvido pela mistura do mesmo com agregado.

Ainda é possível verificar que a classificação quanto à rigidez dos ligantes, observada no Capítulo 3 deste trabalho, foi coerente com a classificação obtida para as misturas analisadas neste tópico. Tal constatação indica que a rigidez da mistura de agregados e bioligante e das misturas asfálticas é significativamente determinada pelo ligante adotado.

5.4.3. Ensaio de deformação permanente - Simulador de tráfego francês (Tipo LPC)

Na Figura 47 são apresentadas as deformações permanentes em diferentes números de ciclos solicitantes, referentes às misturas usinadas compostas por agregados e ligante (bioligante, ligante asfáltico CAP 30/45 e ligante asfáltico modificado por borracha).

Figura 47 – Percentual de afundamento versus Número de Ciclos

Fonte: Própria autora.

As deformações permanentes médias aos 30.000 ciclos obtidas para a mistura usinada a partir de bioligante e agregados, para mistura asfáltico de CAP 30/45 e para mistura asfáltica obtida a partir de ligante asfáltico modificado por borracha, foram iguais a 5,4%, 5,6% e 4,6%, respectivamente. Os três tipos de misturas ensaiadas respeitaram o limite de 10% imposto pelas normativas francesas, todavia, apenas a mistura asfáltica modificada por borracha, respeitou o limite máximo de 5,0% de deformação permanente, adotado pelas diretrizes do grupo COST 333.

De acordo com os resultados obtidos é possível verificar que os valores de deformação permanente aos 30.000 ciclos, observados pela mistura com bioligante e pela mistura com ligante asfáltico CAP 30/45, são semelhantes entre si, embora a mistura usinada com bioligante contenha maior teor de ligante (o que deveria causar maior tendência à deformação) e ter maior volume de vazios, o que também levaria à maior deformação, não foi constatada esta tendência, o que demonstra elevada contribuição do bioligante na resistência ao afundamento em trilha de roda.

No estudo de Fini et al. (2011), o ensaio de deformação permanente utilizando a roda de Hamburgo indicou que a modificação de ligante asfáltico (PG 64-22) pela adição de 2% de bioligante (produzido a partir da liquefação hidrotermal de dejetos de suínos), não resultou em diferenças significativas quanto à profundidade de trilha de roda, em relação à profundidade observada na mistura asfáltica convencional. Mas os autores recomendaram a verificação do efeito da adição maiores porcentagens de bioligante em ligante asfáltico, no desempenho das misturas em altas temperaturas.

No estudo desenvolvido por You et al. (2012), com auxílio do Asphalt Pavement Analyser (APA), foi constatado que o tipo e a porcentagem de bioligante adicionado ao ligante asfáltico interferem diretamente na resistência da mistura à deformação permanente.

Ainda de acordo com a Figura 47, é possível verificar que cada uma das três misturas analisadas apresentou uma curva específica da evolução da profundidade da trilha de roda versus o número de ciclos. De acordo com Brousseau, Delorme e Hiernaux (1993), essas curvas são lineares em coordenadas (log-log). Por conseguinte, de acordo com Aschenbrener (1994), tais curvas podem ser calculadas por regressão linear através da Equação (7):

$$Y = A \cdot \left(\frac{X}{1.000} \right)^B \quad (7)$$

Aplicando logaritmo em ambos os membros na equação, obtém-se a Equação (8), representando uma reta na escala dilog.

$$\log Y = \log A + B \cdot \log \left(\frac{X}{1.000} \right) \quad (8)$$

Onde:

Y: Porcentagem de deformação permanente;

X: número de ciclos.

A: Interceptação da deformação permanente aos 1.000 ciclos.

B: Inclinação da curva (coeficiente angular).

Na Tabela 16 são apresentadas as equações obtidas para a mistura de agregados com o Bioligante, para mistura asfáltica obtida a partir do ligante asfáltico CAP 30/45 e para a mistura confeccionada a partir do ligante Asfalto-borracha.

Tabela 16 – Coeficientes da curva de deformação permanente

<i>Tipo de mistura</i>	<i>Equação</i>	<i>A</i>	<i>B</i>
Misturas com Bioligante	$y = 0,0143 \cdot x^{0,1293}$	0,0143	0,1293
Misturas com CAP 30/45	$y = 0,0042 \cdot x^{0,2522}$	0,0042	0,2522
Misturas com Asfalto-borracha	$y = 0,0071 \cdot x^{0,1824}$	0,0071	0,1824

Fonte: Própria autora.

De acordo com Tabela 16, é possível verificar de dentre as misturas analisadas a obtida a partir do bioligante apresentou menor coeficiente “B”, seguida da mistura com Asfalto-borracha e da mistura asfáltica com CAP 30/45. No estudo desenvolvido por Aschenbrener (1994), com base no ensaio de deformação permanente conduzido na temperatura de 60 °C, realizado com auxílio do simulador de tráfego francês, foi apresentada uma relação entre deformação permanente percentual e o parâmetro “B”.

Para fins de ilustração, na Tabela 17 são apresentados os valores do coeficiente “B” determinados no estudo conduzido por Aschenbrener (1994), onde é possível verificar que à medida que a mistura resiste a um número maior de ciclos, o coeficiente “B” tende a diminuir, indicando que quanto menor for este parâmetro menor será a deformação permanente sofrida.

Tabela 17 – Coeficiente angular da curva de deformação permanente

<i>Localização na pista em que mistura foi extraída</i>	<i>Coeficiente angular (B)</i>	<i>Deformação permanente aos 30.000 ciclos ou número de ciclos ao atingir uma deformação permanente de 10%</i>
9	0,34	4.80%
21	0,33	5.50%
11	0,22	5.70%
13	0,41	7.90%
27	0,41	20000 ciclos
19	0,37	12000 ciclos
15	0,45	9000 ciclos
3	0,55	7000 ciclos
5	0,71	7000 ciclos
30	0,6	4000 ciclos
7	0,49	4000 ciclos
34	0,84	3000 ciclos
12	1,06	800 ciclos
23	0,86	600 ciclos
35	1,02	600 ciclos
4	0,73	500 ciclos
20	0,96	400 ciclos
8	0,89	400 ciclos
10	0,73	300 ciclos
6	0,74	300 ciclos
28	1,02	200 ciclos
14	0,92	200 ciclos
24	0,86	100 ciclos

Fonte: Adaptado de Aschenbreber (1994)

Diante dos dados apresentados na Tabela 16 e na Tabela 17, é possível inferir que a mistura usinada com bioligante e agregados apresentou o menor valor do parâmetro “B”, se comparado o valor obtido para a mistura com CAP 30/45 e para mistura asfáltica de Asfalto-borracha, indicando que a mistura usinada a partir de bioligante e agregados resiste sensivelmente melhor ao defeito de deformação permanente, se comparada às demais misturas analisadas.

5.5. Conclusões

Neste estudo foi possível comparar a resistência ao dano pela umidade induzida, a rigidez e resistência à deformação permanente de determinada mistura usinada a

partir de bioligante e agregados em relação às misturas asfálticas. Dentre as principais constatações deste estudo, destacam-se:

- Durante usinagem teste realizada em campo, verificou-se que a cal, inicialmente considerada durante a dosagem de mistura usinada de bioligante com agregados, prejudicou a trabalhabilidade deste tipo de mistura.
- O ensaio de dano por umidade induzida, sem uso de cal, indicou que a mistura obtida a partir de bioligante e agregados é menos resistente à umidade que a mistura asfáltica convencional. Ainda, foi possível verificar que a ação do dano pela umidade resultou mudança significativa da coloração, da superfície externa dos corpos de prova, o que não foi mencionado em estudos anteriores.
- A mistura usinada a partir de bioligante e agregados se mostrou mais rígida que as demais misturas analisadas. Indicando assim que este tipo de mistura seja menos propenso a sofrer deformação permanente quando comparada às misturas asfálticas controle.
- A mistura obtida a partir de ligante asfáltico modificado por borracha apresentou a menor porcentagem de afundamento em trilha de roda aos 30.000 ciclos do ensaio de deformação permanente, enquanto que a mistura obtida a partir de bioligante e agregados e a mistura asfáltica apresentaram resistência à deformação permanente, similares entre si. A mistura com bioligante mostra a menor tendência ou taxa de aumento de afundamento com a progressão dos ciclos de solicitação, demonstrando seu uso promissor para reduzir este tipo de defeito, comum em locais sujeitos a temperatura elevadas, aclives, repetição de esforços, como em corredores de ônibus e pedágios.

6. COMENTÁRIOS FINAIS E CONCLUSÕES

Acredita-se que o presente estudo, pioneiro no Brasil, possa contribuir para o fomento de novos tipos de tecnologias empregadas para a construção de pavimentos sustentáveis. Nesse sentido, intentou-se avaliar o emprego de um Bioligante, produzido a partir de recursos naturais renováveis, como substituto total ao ligante asfáltico convencional na confecção de camadas usinadas com agregados para pavimentos rodoviários.

Para tanto, buscou-se em primeiro lugar estudar os resultados de ensaios de caracterização reológica, realizados em ligantes asfálticos convencionais e modificados por borracha, em comparação com bioligantes, para compreender se por meio destes ensaios poder-se-ia prever comportamento mecânico desses novos tipos de ligantes. A seguir são apresentadas as observações relevantes obtidas quanto ao estudo reológico comparativo de ligantes e de seu envelhecimento:

- De acordo com as curvas mestras dos ligantes na condição não envelhecida, em regiões de altas frequências, os bioligantes apresentaram maiores valores de módulo de cisalhamento dinâmico quando comparados aos módulos apresentados pelo ligante asfáltico convencional (CAP 30/45) e o pelo ligante asfáltico modificado por borracha (Asfalto-borracha). Todavia, em baixas frequências (altas temperaturas), os módulos dos bioligantes foram semelhantes aos observados pelo ligante asfáltico convencional (CAP 30/45).
- Dada uma determinada temperatura de ensaio e para ambos os níveis de tensões considerados durante o ensaio MSCR, o Asfalto-borracha apresentou os menores valores de compliância não recuperável (J_{nr}), indicando assim sua melhor resistência à deformação permanente, se comparado aos bioligantes e ao ligante asfáltico convencional (CAP 30/45), salienta-se ainda que o BIO 3 apresentou valores de J_{nr} semelhantes aos obtidos pelos CAP 30/45.
- Os resultados obtidos a partir do ensaio de varredura de amplitude linear (LAS) mostraram que o Asfalto-borracha teve maior vida de fadiga, quando comparado

aos demais ligantes analisados. Enquanto que dentre os ligantes analisados os bioligantes (BIO 3) e (BIO 4) apresentaram as menores vidas de fadiga. Todavia, é recomendável que tais resultados sejam analisados de forma cautelosa, visto que não se pode afirmar que a metodologia de análise comumente adotada para ligantes asfálticos se aplica aos bioligantes estudados. Ressalta-se ainda que o ensaio LAS indicou que a taxa de queda de integridade dos Bioligantes testados é menor que para o ligante asfáltico convencional CAP 30/45, fato este que deve ser melhor explorado.

- A análise reológica e química do efeito da temperatura de envelhecimento de curto prazo revelou que a rigidez dos bioligantes foi significativamente afetada pela temperatura de ensaio RTFOT, visto que os ensaios RTFOT conduzidos em temperaturas acima (180 °C) e abaixo (150 °C), da normatizada (163 °C) pela norma norte americana, ASTM D 2872, resultaram em um bioligante com maiores e menores módulos de cisalhamento dinâmico, respectivamente. Tais observações revelaram que o expressivo efeito da temperatura de ensaio RTFOT na degradação do bioligante quando comparado ao ligante asfáltico convencional.
- Ainda de acordo com as curvas mestras obtidas é possível inferir que o bioligante seja mais suscetível ao envelhecimento quando comparado ao ligante asfáltico convencional. Os índices de carbonila e de sulfóxido não se mostraram adequados para análise da oxidação e envelhecimento sofrido pelo bioligante envelhecido em diferentes condições.

A partir dos resultados de caracterização dos ligantes procurou-se estudar a previsibilidade de comportamento das misturas usinadas compostas por bioligante e agregados. Foram relacionados principalmente com os resultados de ensaios mecânicos de deformação permanente e de módulo dinâmico, uma vez que não foi possível realizar ensaios de fadiga por indisponibilidade do equipamento. Dentre os principais resultados obtidos por meio da caracterização mecânica das misturas, destacam-se:

- A mistura usinada a partir de bioligante e agregados se mostrou mais rígida que as demais misturas analisadas. Indicando assim que este tipo de mistura seja menos propenso a sofrer deformação permanente quando comparada às misturas asfálticas controle.
- O ensaio de afundamento em trilha de roda francês demonstrou o esperado em ensaios reológicos, mostrando uma similaridade de comportamento do bioligante com o CAP 30/45. Observe-se que a progressão ou taxa de deformação com o aumento de solicitação é bastante menor nas misturas com bioligante, o que a torna promissora para alguns usos.
- Apesar da mistura de Bioligante estudada tenha apresentado bom comportamento quanto à deformação permanente, é importante salientar que em somatório ao tipo e/ou teor de ligante empregado, outros fatores devem ser considerados para ponderação deste defeito no pavimento. Nessa perspectiva, Moura (2010) elenca outros fatores que interferem no defeito de trilha de roda no pavimento, dentre os citados têm-se: distribuição granulométrica; forma e textura superficial dos agregados empregados; excesso de carga; temperatura; tráfego e grau de compactação da mistura de agregados com ligante.
- Diante do exposto, é importante que a resistência à deformação permanente das misturas usinadas com bioligante e agregados, seja avaliada frente a diferentes faixas granulométricas e fontes minerais dos agregados. Com bases nestas avaliações será possível verificar qual configuração culminará num pavimento menos propenso à formação de trilhas de rodas, minimizando assim os custos operacionais com manutenção e reabilitação da via.

Com base nos resultados reológicos e na caracterização das misturas é possível verificar a necessidade de novas modificações na composição do bioligante, antes da comercialização do mesmo, objetivando assim aumentar a resistência à fadiga, reduzir a suscetibilidade dos mesmos ao envelhecimento e aumentar a resistência ao dano por umidade das misturas usinadas a partir desse bioligante, todavia sem comprometer a resistência à deformação permanente observada pelos mesmos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBAS, A.; CHOI, B. C.; MASAD, E.; PAPAGIANNAKIS, T. The influence of laboratory aging method on the rheological properties of asphalt binders. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 30, n. 2, p. 171-176, 2002.

AFLAKI, S.; HAJIKARIMI, P.; FINI, E. H.; ZADA, B. Comparing effects of biobinder with other asphalt modifiers on low-temperature characteristics of asphalt. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 3, p. 429-439, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Resolução ANP Nº 19, de 11.7.2005 DOU 12.7. 2005. 2005.

_____. Resolução ANP Nº 39, de 24.12.2008 DOU 26.12. 2008. 2008.

_____. Resolução ANP Nº 32, de 14.10.2009 DOU 15.10. 2009. 2009.

_____. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2016. 2016. Disponível em:<http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/publicacoes/Anuario_Estatistico_ANP_2016.pdf>

Acesso em 05 de julho de 2017.

ÁGÚSTSSON, A. **Fish oil in Icelandic road constructions**: A case study of bituminous binder mixtures modified with bio-oil. 2014. Master of Science Thesis - KTH Civil and Architectural Engineering. 2014.

AIREY, G. D.; HUNTER, A. E.; RAHIMZADEH, B. The influence of geometry and sample preparation on dynamic shear rheometer testing. **Performance of bituminous and hydraulic materials in pavements**, p. 3-12, 2002.

AIREY, G. D. State of the art report on ageing test methods for bituminous pavement materials. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 4, n. 3, p. 165-176, 2003.

AKCELRUD, L. **Fundamentos da ciência dos polímeros**. Editora Manole Ltda, 2007.

AL-OMARI, A. 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**, 2017.

AMANN, E.; BAER, W.; TREBAT, T.; LORA, J. V. Infrastructure and its role in Brazil's development process. **The Quarterly Review of Economics and Finance**, v. 62, p. 66-73, 2016.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. AASHTO T 342-11. Standard method of test for determining dynamic modulus of hot mix asphalt (HMA). 2011.

_____. AASHTO M 332-14. Standard specification for performance-graded asphalt binder using multiple stress creep recovery (mscr) test. 2014.

_____. AASHTO T 101-14: Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. 2014.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1856 - 09(2015). Standard Test Method for Recovery of Asphalt From Solution by Abson Method. USA, 2009.

_____. ASTM D2041M – 11. Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. USA, 2011.

_____. ASTM D2872-12. Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test). USA, 2012.

_____. ASTM D6521 – 13. Standard Practice for Accelerated Aging of Asphalt Binder Using a Pressurized Aging Vessel (PAV). USA, 2013.

_____. ASTM D4867-14. Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures. USA, 2014.

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

_____. D7175-15. Standard Test Method for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer. USA, 2015.

_____. ASTM D6323-16. Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder. USA, 2016.

_____. ASTM D2172-17. Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures. USA, 2017.

ANDERSON, J.; MUENCH, S. Sustainability trends measured by the greenroads rating system. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2357, p. 24-32, 2013.

ARABANI, M.; MIRABDOLAZIMI, S. M. Evaluation of Creep Compliance of Rubberized Asphalt in Compare with Conventional Hot Mix Asphalt. In: **Advanced Testing and characterization of bituminous materials**, Taylor and Francis Group, 2009.

ASCHENBRENER, T. Comparison of results obtained from the LCPC rutting tester with pavements of known field performance. **Transportation Research Record**, n. 1454, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR15184-2004: Materiais betuminosos - determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional. Brasil, 2004.

_____. ABNT NBR 6576-2007: Materiais asfálticos - Determinação da penetração. Brasil, 2007.

_____. ABNT NBR 15529-2007: Asfalto borracha - Propriedades reológicas de materiais não newtonianos por viscosímetro rotacional. Brasil, 2007.

AVSENIK, L.; TUŠAR, M. Analysis of possible use of pyrolytic products as binders in asphalt mixes. **Gradevinar**, v. 3, p. 191-198, 2016.

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

BAHIA, H. U.; HANSON, D. I.; ZENG, M.; ZHAI, H.; KHATRI, M. A.; ANDERSON, R. M. **Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design** (No. Project 9-10 FY'96). 2001.

BAHIA, H.; TABATABAEE, H. A.; MANDAL, T.; FAHEEM, A. **Field evaluation of Wisconsin modified binder selection guidelines-Phase II**. Wisconsin Highway Research Program, 2013.

BERNIER, A.; ZOFKA, A.; YUT, I. Laboratory evaluation of rutting susceptibility of polymer-modified asphalt mixtures containing recycled pavements. **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 58-66, 2012.

BERNUCCI, L.L.B; MOTTA, L.M.G; CERATTI, J.A.P; SOARES, J.B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA. 2006. 504 p.

BERTOLLO, S. A. M.; JÚNIOR, J. L. F.; BERNUCCI, L. B.; DE MOURA, E. Avaliação laboratorial de mistura asfáltica densa modificada com adição de borracha. **TRANSPORTES**, v. 10, n. 1, 2002.

BERTOLLO, S. M.; BERNUCCI, L. B.; FERNANDES, J. L.; LEITE, L. M. Mechanical properties of asphalt mixtures using recycled tire rubber produced in Brazil—A laboratory evaluation. In: **Proceedings of the TRB Annual Meeting**. 2004.

BILGEN, S. Structure and environmental impact of global energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 890-902, 2014.

BLAZEJOWSKI, K.; DOLZYCKI, B. Relationships between asphalt mix rutting resistance and MSCR test results. In: **Design, Analysis, and Asphalt Material Characterization for Road and Airfield Pavements**, p. 202-209. 2014.

BONAQUIST, R. F. Refining the simple performance tester for use in routine practice. **Transportation Research Board**. (Vol. 614). 2008.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and bioenergy**, v. 38, p. 68-94, 2012.

BROUSSEAUD, Y.; DELORME, J. L.; HIERNAUX, R. Use of LPC wheel-tracking rutting tester to select asphalt pavements resistant to rutting. **Transportation Research Record**, v.1384, p. 59, 1993.

CAMARGO, F. F. **Field and laboratory performance evaluation of a field-blended rubber asphalt**. 2016. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

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**, p. 1-11, 2017.

CARRIÓN, A. J. B.; LO PRESTI, D.; POUGET, S.; CHAILLEUX, E.; AIREY, G. D. **Toward Non-Petroleum-Derived Asphalt Mixes: Using Biobinders for High-Modulus Asphalt Mixes with High Reclaimed Asphalt Content** (No. 17-04239). 2017.

CASTRO NETO. A. M. **Proposta de Projeto de Dosagem de Concreto Betuminoso Reciclado a Quente**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

CHAILLEUX, E.; AUDO, M.; GOYER, S.; QUEFFELEC, C.; MARZOUK, O. Y. Advances in the development of alternative binders from biomass for the production of biosourced road binders. In: **Huang, Di Benedetto (Eds) Advances in Asphalt Materials, Road and Pavement Construction**. 2015.

CROTEAU, J.; CHAIGNON, F.; STRYNADKA, T. Sustainability: Carrier of Innovations in the Development of Pavement Materials. In: **2009 Annual conference and exhibition of the transportation association of canada-transportation in a climate of change**. 2009.

CHEN, C. S.; HSEU, Y. C.; LIANG, S. H.; KUO, J. Y.; CHEN, S. C. Assessment of genotoxicity of methyl-tert-butyl ether, benzene, toluene, ethylbenzene, and xylene to human lymphocytes using comet assay. **Journal of hazardous materials**, v. 153, n. 1, p. 351-356, 2008.

COOLEY, L. A.; KANDHAL, P. S.; BUCHANAN, M. S.; FEE, F.; EPPS, A. **Loaded wheel testers in the United States: State of the practice**. Transportation Research Board, National Research Council, 2000.

COPELAND, A. **Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: state of the practice** (No. FHWA-HRT-11-021). 2011.

CHRISTENSEN JR, D. W.; BONAQUIST, R. Use of strength tests for evaluating the rut resistance of asphalt concrete. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 71, 2002.

D'ANGELO, J. A.; HARM, E. E.; BARTOSZEK, J. C.; BAUMGARDNER, G. L.; CORRIGAN, M. R.; COWSERT, J. E.; HARMAN, T. P.; JAMSHIDI, M.; JONES, H.

W.; NEWCOMB, D. E.; PROWELL, B. D.; SINES, R. A.; YEATON, B. A. **Warm-mix asphalt: European practice** (No. FHWA-PL-08-007). 2008.

D'ANGELO, J. A.; DONGRE, R. N. Creep and recovery. **Public roads**, v. 70, n. 5, 2007.

D'ANGELO, J.; KLUTTZ, R.; DONGRE, R. N.; STEPHENS, K.; ZANZOTTO, L. Revision of the superpave high temperature binder specification: the multiple stress creep recovery test (With Discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 76. Revision of the superpave high temperature binder specification: the multiple stress creep recovery test (With Discussion). **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 76, 2007.

DAS, A. **Analysis of pavement structures**. CRC Press, 2014.

DA SILVA, M.; HELENA, A.; VASCONCELOS, K. L.; ARANHA, A. L., BERNUCCI, L. B.; CHAVES, J. M. Laboratory and Field Evaluation of Cold-in-Place RAP Recycling. In: **Transportation Research Board 92nd Annual Meeting**. 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT-ME 053/94: Misturas betuminosas - percentagem de betume. 1994.

_____. DNIT-ME 117/94: Mistura betuminosa - determinação da densidade aparente. 1994

_____. DNIT-ME 078/94: Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso. 1994.

_____. DNIT-ME 086/94: Agregado - determinação do índice de forma. 1994.

_____. DNIT-ME 043/95: Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall. 1995.

_____. DNER-ME 193/96: Produtos betuminosos líquidos e semi-sólidos - determinação da densidade e da massa específica. 1996.

_____. DNIT-ME 054/97: Equivalente de areia. 1997.

_____. DNIT-ME 401/99: Agregados – determinação do índice de degradação de rochas após compactação Marshall, com ligante – IDML e sem ligante - IDM. 1999.

_____. DNIT-ME 136/2010: Pavimentação asfáltica - Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. 2010.

_____. DNIT-ME 155/2010: Material asfáltico - Determinação da penetração. 2010.

_____. DNIT-ME 131/2010: Materiais asfálticos - Determinação do ponto de amolecimento - Método do Anel e Bola. 2010.

DHASMANA, H.; OZER, H.; AL-QADI, I. L.; ZHANG, Y., SCHIDEMAN, L.; SHARMA, B. K.; ZHANG, P. Rheological and chemical characterization of biobinders from different biomass resources. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2505, p. 121-129, 2015.

DI BENEDETTO, H; DE LA ROCHE, C. State of the art on stiffness modulus and fatigue of bituminous mixtures. **Rilem Report**, p. 137-180, 1998.

DIEFENDERFER, S. D.; MCGHEE, K. K.; DONALDSON, B. M. **Installation of warm mix asphalt projects in Virginia**. (No. FHWA/VTRC 07-R25). 2007.

DINIS-ALMEIDA, M.; CASTRO-GOMES, J.; SANGIORGI, C.; ZOOROB, S. E.; AFONSO, M. L. Performance of warm mix recycled asphalt containing up to 100% RAP. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 1-6, 2016.

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. Avaliação do comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados com SBS e ácido polifosfórico. **Transportes**, v. 21, n. 1, p. 51-58, 2013.

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. Comportamento fluência-recuperação de ligantes asfálticos modificados com copolímero SBR e ácido polifosfórico. **Transportes**, v. 23, n. 2, p. 56-64, 2015.

DOMINGOS, M. D. I.; FAXINA, A. L. Ensaios MSCR segundo as normas ASTM D7405-10a e AASHTO T350-14: um estudo de caso envolvendo ligantes asfálticos modificados. **Transportes**, v. 24, n. 3, p. 38-47, 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço energético nacional 2016: Ano base 2015. 2016. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2016.pdf>. Acessado em 05 de julho de 2017.

ELKASHEF, M.; WILLIAMS, R. C. Improving fatigue and low temperature performance of 100% RAP mixtures using a soybean-derived rejuvenator. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 345-352, 2017.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 12697-22: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt – Part 22: Wheel tracking, 2003.

FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso do resíduo de óleo de xisto como óleo extensor em ligantes asfalto-borracha**. 2006. 308 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos-EESC, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FERNANDEZ-NIEVES, A; PUERTAS, A. M. **Fluids, Colloids and Soft Materials: An Introduction to Soft Matter Physics** (Vol. 7). John Wiley & Sons, 2016.

FINI, E. H.; YANG, S.; XIU, S. Characterization and application of manure-based bio-binder in asphalt industry. In: **Transportation Research Board 89th Annual Meeting**. (No. 10-2871). 2010.

FINI, E. H.; KALBERER, E. W.; SHAHBAZI, A.; BASTI, M.; YOU, Z., OZER, H.; AURANGZEB, Q. Chemical characterization of biobinder from swine manure: Sustainable modifier for asphalt binder. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 11, p. 1506-1513, 2011.

FINI, E. H.; KALBERER, E. W.; SHAHBAZI, C. Application of Bio-Binder from Swine Manure in Asphalt Binder. In: **Transportation Research Board 90th Annual Meeting. Washington: DC**. 2011.

FINI, E. H.; OLDHAM, D. J.; ABU-LEBDEH, T. Synthesis and characterization of biomodified rubber asphalt: Sustainable waste management solution for scrap tire and swine manure. **Journal of Environmental Engineering**, v. 139, n. 12, p. 1454-1461, 2013.

FINI, E. H. **Producing a Sustainable, Bio-Based Alternative to Petroleum-Based Asphalt Binder**. (No. NCHRP IDEA Project 171). 2016.

FINI, E. H.; HOSSEINNEZHAD, S.; OLDHAM, D. J., CHAILLEUX, E.; GAUDEFROY, V. Source dependency of rheological and surface characteristics of bio-modified asphalts. **Road Materials and Pavement Design**, v. 18, n. 2, p. 408-424, 2017.

GARBER, N. J.; HOEL, L. A. **Traffic and highway engineering**. Cengage Learning, USA, 2014.

GENNESSEAU, M. M. L. Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado. 2015. 182 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

GIANI, M. I.; DOTELLI, G.; BRANDINI, N.; ZAMPORI, L. Comparative life cycle assessment of asphalt pavements using reclaimed asphalt, warm mix technology and cold in-place recycling. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 104, p. 224-238, 2015.

GONG, M.; ZHU, H.; PAULI, T.; YANG, J.; WEI, J.; YAO, Z. Evaluation of bio-binder modified asphalt's adhesion behavior using sessile drop device and atomic force microscopy. **Construction and Building Materials**, v. 145, p. 42-51, 2017.

HANSON, J. R. **Natural products: the secondary metabolites**. Royal Society of Chemistry, 2003.

HE, M.; TU, C.; CAO, D. W.; CHEN, Y. J. Comparative analysis of bio-binder properties derived from different sources. **International Journal of Pavement Engineering**, p. 1-9, 2017.

HEITZMAN, M. Design and construction of asphalt paving materials with crumb rubber modifier. **Transportation Research Record**, v. 1339, 1992.

HICKS, R. G. Moisture damage in asphalt concrete. **Transportation Research Board**, No. 175, 1991.

HILL, D. R. **Bioasphalt and Biochar from Pyrolysis of Urban Yard Waste**. Tese (Doutorado). Case Western Reserve University. 2012.

HILL, B.; OLDHAM, D.; BEHNIA, B.; FINI, E.; BUTTLAR, W.; REIS, H. Low-temperature performance characterization of biomodified asphalt mixtures that contain reclaimed asphalt pavement. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2371, p. 49-57, 2013.

HINTZ, C.; VELASQUEZ, R.; JOHNSON, C.; BAHIA, H. Modification and validation of linear amplitude sweep test for binder fatigue specification. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2207, p. 99-106, 2011.

HINTZ, C.; VELASQUEZ, R.; LI, Z.; BAHIA, H. Effect of oxidative aging on binder fatigue performance. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 80, 2011.

HINTZ, C.; BAHIA, H. Simplification of linear amplitude sweep test and specification parameter. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2370, p. 10-16, 2013.

HOSSEINNEZHAD, S.; JOHNSON, C.; OLDHAM, D.; FINI, E. H. Investigating the Effect of Processing Parameters on Bio-binder Characteristics. In: **Transportation Research Board 95th Annual Meeting** (No. 16-5535). 2016.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. Prentice Hall, 1993.

HUANG, S.; DI BENEDETTO, H. **Advances in asphalt materials: Road and pavement construction**. Woodhead Publishing, 2015.

HUANG, S.; SALOMON, D.; HADDOCK, J. E. Workshop Introduction. In: **Transportation Research Circular: Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements**, v. E-C165, 2012.

HURLEY, G. C.; PROWELL, B. D. Evaluation of potential processes for use in warm mix asphalt. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 75, n. 4, 2006.

JENNER, C. G. J.; UIJTING, B. G. J. Asphalt reinforcement for the prevention of cracking in various types of pavements: long term performance and overlay design procedure. In: **Fifth International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements**. RILEM Publications SARL, p. 459-466, 2004.

JOHNSON, C. M. **Estimating asphalt binder fatigue resistance using an accelerated test method**. 2010. Tese (Doutorado) - University of Wisconsin--Madison. 2010.

KALOUSH, K. E.; WITCZAK, M. W.; SULLIVAN, B. W. Simple performance test for permanent deformation evaluation of asphalt mixtures. In: **Performance testing and evaluation of bituminous materials PTEBM'03. Proceedings of the 6th international RILEM symposium, Zurich, Switzerland.** p. 14-16. 2003.

KARLSSON, R.; ISACSSON, U. Application of FTIR-ATR to characterization of bitumen rejuvenator diffusion. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 15, n. 2, p. 157-165, 2003.

KATAWARE, A. V.; SINGH, D. Performance of polymer and crumb rubber modified asphalt binders subjected to high stresses in multiple stress creep recovery test. In: **Bituminous Mixtures and Pavements VI**, v. 97, 2015.

KENNEDY, T. W.; HUBER, G. A.; HARRIGAN, E. T.; COMINSKY, R. J.; HUGHES, C. S.; VON QUINTUS, H.; MOULTHROP, J. S. **Superior performing asphalt pavements (Superpave):** The product of the SHRP asphalt research program. (No. SHRP-A-410). Washington, DC, USA: Strategic Highway Research Program, National Research Council, 1994.

KHOSHHEBAB, Z. M. Reflectance IR spectroscopy. In: **Infrared Spectroscopy-Materials Science, Engineering and Technology**. InTech, 2012.

KHOSLA, N. P.; OMER, M. S. Characterization of asphaltic mixtures for prediction of pavement performance. **Transportation Research Record**, v. 1034, p. 47-55, 1985.

KHOSLA, N. P.; HARIKRISHNAN, K. I. **Tensile Strength-A Design and Evaluation Tool for Superpave Mixtures** (No. FHWA/NC/2006-24). 2007.

KIM, Y. R. **Modeling of asphalt concrete**. New York : McGraw-Hill, 2009.

KLUTTZ, R. Considerations for Use of Alternative Binders in Asphalt Pavements. In: **TRB 91st Annual Meeting, Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements, Washington, DC.** p. 2-6. 2012.

KRISTJÁNSDÓTTIR, Ó; MUENCH, S.; MICHAEL, L.; BURKE, G. Assessing potential for warm-mix asphalt technology adoption. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2040, p. 91-99, 2007.

LAMONTAGNE, J.; DUMAS, P.; MOUILLET, V.; KISTER, J. Comparison by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques: application to road bitumens. **Fuel**, v. 80, n. 4, p. 483-488, 2001.

LAVIN, P. **Asphalt pavements: A practical guide to design, production and maintenance for engineers and architects**. CRC Press, 2003.

LEI, Z.; BAHIA, H.; YI-QIU, T.; LING, C. Effects of refined waste and bio-based oil modifiers on rheological properties of asphalt binders. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 504-511, 2017.

LENNOX, R.; MACKENZIE, M. Eco-Road Building for Emerging Economies: An Initial Scan for Promising Alternative Technologies. **Geneva: Global Transport Knowledge Partnership**, 2008.

LOPES, M., GABET, T., BERNUCCI, L., MOUILLET, V. Durability of hot and warm asphalt mixtures containing high rates of reclaimed asphalt at laboratory scale. **Materials and Structures**, v. 48, n. 12, p. 3937-3948, 2015.

LU, X.; ISACSSON, U. Effect of ageing on bitumen chemistry and rheology. **Construction and Building materials**, v. 16, n. 1, p. 15-22, 2002.

MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and bioenergy**, v. 32, n. 7, p. 582-595, 2008.

MACHIN, E. B.; PEDROSO, D. T.; DE CARVALHO, J. A. Energetic valorization of waste tires. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 306-315, 2017.

MARSAC, P.; PIÉRARD, N.; POROT, L.; BERGH, W. V. D.; GRENFELL, J.; MOUILLET, V.; POUGET, S.; BESAMUSCA, J.; FARCAS, F.; GABET, T.; HUGENER, M. Potential and limits of FTIR methods for reclaimed asphalt characterisation. **Materials and structures**, v. 47, n. 8, p. 1273-1286, 2014.

MCDANIEL, R.; ANDERSON, R. M. **Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method: technician's manual** (No. Project D9-12 FY'97). 2001.

MERIGHI, C. F. **Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu**. 2015. 201 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

MERUSI, F.; GIULIANI, F. Chromatic and rheological characteristics of clear road binders. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2293, p. 114-122, 2012.

METWALLY, M.; WILLIAMS, R. C. **Development of non-petroleum based binders for use in flexible pavements**. 2010.

MILLS-BEALE, J.; YOU, Z.; FINI, E.; ZADA, B.; LEE, C. H.; YAP, Y. K. Aging influence on rheology properties of petroleum-based asphalt modified with biobinder. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 26, n. 2, p. 358-366, 2012.

MOGAWER, W. S.; FINI, E. H.; AUSTERMAN, A. J.; BOOSHEHRAN, A.; ZADA, B. **Performance characteristics of high RAP bio-modified asphalt mixtures**. (No. 12-2411). 2012

MOGAWER, W. S.; BOOSHEHRAN, A.; VAHIDI, S.; AUSTERMAN, A. J. Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP,

RAS, and RAP/RAS mixtures. **Road Materials and Pavement Design**, v. 14, n. sup2, p. 193-213, 2013.

MOHAMMAD, L. N.; ELSEIFI, M. A.; COOPER, S. B.; CHALLA, H.; NAIDOO, P. Laboratory evaluation of asphalt mixtures containing biobinder technologies. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2371, p. 58-65, 2013.

MOTTA, S. **Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissão de poluentes e de consumo energético**. 2011. 229 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MOURA, E. **Estudo de deformação permanente em trilha de roda de misturas asfálticas em pista e em laboratório**. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 2010.

NEWMAN, P.; HARGROVES, C.; DESHA, C.; KUMAR, A.; WHISTLER, L.; FARR, A.; WILSON, K.; BEAUSON, J.; MATAN, A.; SURAWSKI, L. **Reducing the environmental impact of road construction**. 2012

NIKOLAIDES, A. **Highway Engineering: Pavements, Materials and Control of Quality**. CRC Press, 2014.

ONOCHIE, A.; FINI, E.; YANG, X.; MILLS-BEALE, J.; YOU, Z. Rheological characterization of nano-particle based bio-modified binder. In: **Transportation Research Board 92nd Annual Meeting**. 2013.

PAPAGIANNAKIS, A. T.; MASAD, E. A. **Pavement design and materials**. John Wiley & Sons, 2017.

PORTUGAL, A. C. X.; LUCENA, L. C. D. F. L.; LUCENA, A. E. D. F. L.; BESERRA DA COSTA, D. Rheological performance of soybean in asphalt binder modification. **Road Materials and Pavement Design**, p. 1-15, 2017.

RAGASKAS, A. J.; BECKHAM, G. T.; BIDDY, M. J.; CHANDRA, R.; CHEN, F.; DAVIS, M. F.; DAVISON, B. H.; DIXON, R. A.; GILNA, P.; KELLER, M.; LANGAN, P.; NASKAR, A. K.; SADDLER, J. N.; TSCHAPLINSKI, T. J.; TUSKAN, G. A.; WYMAN, C. E. Lignin valorization: improving lignin processing in the biorefinery. **Science**, v. 344, n. 6185, p. 1246843, 2014.

RAOUF, M. A.; WILLIAMS, R. C. Determination of pre-treatment procedure required for developing bio-binders from bio-oils. In: **Proc., 2009 Mid-Continent Transportation Research Symposium**. 2009.

RAOUF, M.; WILLIAMS, R. Temperature and shear susceptibility of a nonpetroleum binder as a pavement material. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2180, p. 9-18, 2010.

READ, J.; WHITEOAK, D. **The shell bitumen handbook**. Thomas Telford, 2003.

RIETVELD, P.; BRUINSMA, F. Is transport infrastructure effective?: transport infrastructure and accessibility: impacts on the space economy. **Springer Science & Business Media**, 2012.

RODRIGUES, Y. O.; DA SILVA, D. B.; LUCENA, L. C. D. F. L.; LOPES, M. C. Performance of warm mix asphalt containing Moringa oleifera Lam seeds oil: Rheological and mechanical properties. **Construction and Building Materials**, v. 154, p. 137-143, 2017.

ROMERO, P.; MASAD, E. Relationship between the representative volume element and mechanical properties of asphalt concrete. **Journal of materials in civil engineering**, v. 13, n. 1, p. 77-84, 2001.

RUBIO, M. C.; MARTÍNEZ, G.; BAENA, L.; MORENO, F. Warm mix asphalt: an overview. **Journal of Cleaner Production**, v. 24, p. 76-84, 2012.

RUTH, B. E. **Evaluation and Prevention of Water Damage to Asphalt Pavement Materials**: A Symposium. No. 899. ASTM International, 1985.

SANTAGATA, E.; BAGLIERI, O.; ALAM, M.; DALMAZZO, D. A novel procedure for the evaluation of anti-rutting potential of asphalt binders. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 16, n. 4, p. 287-296, 2015.

SANTOS, J. M. O.; THYAGARAJAN, S.; KEIJZER, E.; FLORES, R. F.; FLINTSCH, G. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2646, p. 28-38, 2017.

SCHRADER, B. **Infrared and Raman spectroscopy: methods and applications**. John Wiley & Sons, 2008.

SCHWAB, A. W.; DYKSTRA, G. J.; SELKE, E.; SORENSON, S. C.; PRYDE, E. H. Diesel fuel from thermal decomposition of soybean oil. **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 65, n. 11, p. 1781-1786, 1988.

SETYAWAN, A.; IRFANSYAH, P. A.; SHIDIQ, A. M.; WIBISONO, I. S.; FAUZY, M. N.; HADI, F. N. Design and Properties of Asphalt Concrete Mixtures Using Renewable Bioasphalt Binder. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, vol. 176, No. 1. IOP Publishing. 2017.

SHERWOOD, J.; THOMAS, N.; QI, X. Correlation of superpave $G^*/\sin \delta$ with rutting test results from accelerated loading facility. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1630, p. 53-61, 1998.

SIENKIEWICZ, M.; BORZĘDOWSKA-LABUDA, K.; WOJTKIEWICZ, A.; JANIK, H. Development of methods improving storage stability of bitumen modified with ground tire rubber: A review. **Fuel Processing Technology**, v. 159, p. 272-279, 2017.

SILVA, H. M. R. D. D.; PERALTA, J.; COSTA, L.; FERNANDES, S.; OLIVEIRA, J.; PEREIRA, P. A. **Desenvolvimento e estudo de ligantes modificados inovadores para infraestruturas de transporte**. 2014.

SÖDERLUND, M.; MUENCH, S. T.; WILLOUGHBY, K.; UHLMAYER, J.; WESTON, J. Green Roads: A sustainability rating system for roadways. In: **Proceedings of the 87 TRB Annual Meeting**, Washington DC. 2008.

SOLAIMANIAN, M.; BONAQUIST, R. F.; TANDON, V. Improved conditioning and testing procedures for HMA moisture susceptibility. **Transportation Research Board**, 2007.

START, M.; KIM, J.; BERG, W. Potential safety cost-effectiveness of treating rutted pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1629, p. 208-213, 1998.

STUART, K. D.; MOGAWER, W. S.; ROMERO, P. **Validation of asphalt binder and mixture tests that measure rutting susceptibility using the accelerated loading facility**. No. FHWA-RD-99-204, 2000.

SUN, D.; SUN, G.; DU, Y.; ZHU, X.; LU, T.; PANG, Q.; DAI, Z. Evaluation of optimized bio-asphalt containing high content waste cooking oil residues. **Fuel**, v. 202, p. 529-540, 2017.

TAKALLOU, M. B.; TAKALLOU, H. B. Benefits of Recycling Waste Tires in Rubber Asphalt Paving. **Transportation Research Record**, v. 1310, p. 87-92, 1991.

TANSKI, J. H.; HAHN, K. C. **Recycling reclaimed asphalt pavement**. Research Report. (No. NY-84/116). 1984.

TAYFUR, S.; OZEN, H.; AKSOY, A. Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 2, p. 328-337, 2007.

THOMAS, B.S.; GUPTA, R. C. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 1323-1333, 2016.

TRAN, N. H.; TAYLOR, A.; WILLIS, R. Effect of rejuvenator on performance properties of HMA mixtures with high RAP and RAS contents. **NCAT Report**, p. 12-05, 2012.

TROMBULAK, S. C.; FRISSELL, C. A. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. **Conservation biology**, v. 14, n. 1, p. 18-30, 2000.

VARVERI, A.; ZHU, J.; KRINGOS, N. Moisture damage in asphaltic mixtures. In: **Advances in asphalt materials: Road and pavement construction**. Woodhead Publishing, 2015.

VON QUINTUS, H. L. Hot-Mix Asphalt Layer Thickness Designs for Longer-Life Bituminous Pavements. **Transportation research circular**, v. 503, p. 66-78, 2001.

XU, G.; WANG, H.; ZHU, H. Rheological properties and anti-aging performance of asphalt binder modified with wood lignin. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 801-808, 2017.

WANG, G. C. **The Utilization of Slag in Civil Infrastructure Construction**. Woodhead Publishing, 2016.

WANG, H.; DEREWECKI, K. Rheological Properties of Asphalt Binder Partially Substituted with Wood Lignin. In: **Airfield and Highway Pavement 2013: Sustainable and Efficient Pavements**. p. 977-986. 2013.

WASIUDDIN, N.; SELVAMOHAN, S.; ZAMAN, M.; GUEGAN, M. Comparative laboratory study of sasobit and aspha-min additives in warm-mix asphalt. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1998, p. 82-88, 2007.

WEINSTEIN, N.; PAWLISH, M.; ENGLISH, A.; BITTING, J.; LUKES, R.; KLOSS, C. Green Highways. In: **Low Impact Development for Urban Ecosystem and Habitat Protection**. p. 1-7, 2009.

WEN, H.; BHUSAL, S.; WEN, B. Laboratory evaluation of waste cooking oil-based bioasphalt as an alternative binder for hot mix asphalt. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 10, p. 1432-1437, 2012.

WILLIAMS, R. C.; PERALTA, E. J. F.; PUGA, K. N. N. **Development of Non-Petroleum-Based Binders for Use in Flexible Pavements—Phase II**. 2015.

WORLD ENERGY COUNCIL. World Energy Resources – 2016. 2016. Disponível em: <https://worldenergy.org/wp-content/uploads/2016/10/World-Energy-Resources_Report_2016.pdf>. Acessado em: 05 de julho de 2017.

YAMI, M. A. D.; NASUTION, M. F.; SETYAWAN, A. Design and Properties of Renewable Bioasphalt for Flexible Pavement. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 1413-1420, 2017.

YAN, Y.; ROQUE, R.; COCCONCELLI, C.; BEKOE, M.; LOPP, G. Evaluation of cracking performance for polymer-modified asphalt mixtures with high RAP content. **Road Materials and Pavement Design**, v. 18, n. sup1, p. 450-470, 2017.

YANG, X.; MILLS-BEALE, J.; YOU, Z. Chemical characterization and oxidative aging of bio-asphalt and its compatibility with petroleum asphalt. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 1837-1847, 2017.

YANG, S.; SUCIPTAN, T.; CHANG, Y. Investigation of rheological behavior of Japanese cedar based bio-binder as partial replacement for bituminous binder. In: **Transportation Research Board 92nd Annual Meeting**. 2013.

YANG, X.; MILLS-BEALE, J.; YOU, Z. Asphalt binders blended with a high percentage of biobinders: aging mechanism using FTIR and rheology. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 4, p. 04014157, 2014.

YANG, S.; SUCIPTAN, T. Rheological behavior of Japanese cedar-based biobinder as partial replacement for bituminous binder. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 127-133, 2016.

YANG, X.; YOU, Z.; DAI, Q.; MILLS-BEALE, J. Mechanical performance of asphalt mixtures modified by bio-oils derived from waste wood resources. **Construction and Building Materials**, v. 51, p. 424-431, 2014.

YANG, X.; YOU, Z. High temperature performance evaluation of bio-oil modified asphalt binders using the DSR and MSCR tests. **Construction and Building Materials**, v. 76, p. 380-387, 2015.

YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. **Principles of pavement design**. John Wiley & Sons, 1975.

YOU, Z.; MILLS-BEALE, J.; YANG, X.; DAI, Q.; UNIT-C&T, C. P. **Alternative materials for sustainable transportation**. Michigan Technological University, 2012.

ZANZOTTO, L.; KENNEPOHL, G. Development of rubber and asphalt binders by depolymerization and devulcanization of scrap tires in asphalt. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1530, p. 51-58, 1996.

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

ZEGARRA, J. R. E. Avaliação de misturas produzidas com ligantes asfálticos peruanos convencional PEN 60/70 e modificados por polímero SBS tipo I 60/60 e PG 76-22. 2007. 234 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

ZHOU, F.; MOGAWER, W.; LI, H.; ANDRIESCU, A.; COPELAND, A. Evaluation of fatigue tests for characterizing asphalt binders. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 5, p. 610-617, 2012.

ZHANG, J.; BROWN, E. R.; KANDHAL, P. S.; WEST, R. An overview of fundamental and simulative performance tests for hot mix asphalt. In: **Performance Tests for Hot Mix Asphalt (HMA) Including Fundamental and Empirical Procedures**. ASTM. 2006

ZHANG, R.; WANG, H.; YOU, Z.; JIANG, X.; YANG, X. Optimization of bio-asphalt using bio-oil and distilled water. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 281-289, 2017a.

ZHANG, R.; WANG, H.; GAO, J.; YANG, X.; YOU, Z. Comprehensive Performance Evaluation and Cost Analysis of SBS-Modified Bioasphalt Binders and Mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 12, p. 04017232, 2017b.