

Avaliação das propriedades mecânicas de misturas asfálticas mornas modificadas com adição de óleos vegetais

Priscila Maria Sousa Gonçalves Luz¹, Samir Ferreira Martins², Daniel Beserra Costa³,
Lêda Christiane de Figueiredo Lopes Lucena⁴

¹Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, priscilaluz55@gmail.com

²Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, samirfemartins@gmail.com

³Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, Daniel.beserra@gmail.com

⁴Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, ledach@uol.com.br

Recebido:

19 de fevereiro de 2018

Aceito para publicação:

4 de outubro de 2018

Publicado:

30 de abril de 2019

Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

Palavras-chaves:

Óleo de milho,
Asfaltos,
Misturas asfálticas mornas,
Redução de temperatura,
Óleos vegetais.

Keywords:

Corn oil,
Asphalts,
Warm asphalt mixtures,
Reduction of temperature,
Vegetable oils.

DOI:10.14295/transportes.v27i1.1594



RESUMO

O uso de misturas asfálticas mornas pode vir a diminuir o consumo de energia e da poluição ambiental uma vez que estas misturas possuem temperaturas de compactação e usinagem inferiores às tradicionalmente utilizadas. Esta pesquisa estudou a adição de óleo de milho e de soja, novo e residual, para diminuir as temperaturas de usinagem e compactação das misturas asfálticas. Os corpos de provas foram produzidos em três temperaturas diferentes, a primeira foi à temperatura determinada pelas curvas logarítmicas viscosidade x temperatura e as outras foram 10°C e 20°C inferiores a primeira, respectivamente. Os ensaios mecânicos realizados foram Resistência à Tração, Lottman Modificado, Módulo de Resiliência, Flow Number e Módulo Dinâmico. Os resultados obtidos para os ligantes modificados, com ambos os óleos, foram inferiores aos obtidos para o ligante puro nas mesmas condições de temperatura. Portanto, o uso destes óleos como aditivos só se justifica pela logística reversa do óleo usado.

ABSTRACT

The use of warm asphalt mixtures can decrease energy consumption and environmental pollution since these mixtures have lower compaction and mixing temperatures than traditionally. This research studied the addition of new and residual corn and soybean oil for the production of warm asphalt mixtures. The samples were produced at three different temperatures, the first was at the temperature determined by the rotational viscosity test and the others were 10° C and 20° C lower than the first, respectively. The mechanical tests performed were: Indirect Tensile Strength, Modified Lottman, Resilient Modulus, Flow Number and Dynamic Modulus. The results obtained for the modified binders, with both oils, were lower than those obtained for the pure binder under the same temperature conditions. Therefore, the use of these oils as additives is only justified by the reverse logistics of the used oil.

1. INTRODUÇÃO

Ultimamente tem-se aumentado o uso de ligantes asfálticos com agentes modificadores e.g. polímeros, aditivos e resíduos industriais. A adição destes pode resultar na diminuição dos custos de manutenção do pavimento, na redução do consumo energia e também minimizar a poluição ambiental (MOTHÉ, 2009). Diante desse contexto, o uso de misturas asfálticas mornas (em inglês, Warm Mix(es) Asphalt – WMA) ganhou popularidade nos últimos anos devido sua propriedade singular que permite a redução da temperatura na mistura e compactação dos materiais sem comprometer a qualidade da mistura (MA *et al.*, 2017). Segundo Vaitkus (2016) este tipo

de mistura é produzida, e compactada, em temperaturas inferiores a 20-40°C em relação as misturas à quente convencionais.

Estas misturas vêm sendo utilizadas desde a década de 90 e devem ter resistência, durabilidade e desempenho semelhantes às misturas convencionais, sendo um ponto positivo desta a diminuição das emissões de poluentes e do consumo energético (SOUZA, 2012). Segundo Budny (2012), além dessas vantagens, as misturas mornas ocasionam uma redução significativa do envelhecimento do ligante, uma vez que este é aquecido em temperaturas mais baixa. As misturas WMA também permitem uma maior incorporação de material fresado, uma maior vida de fadiga e apresenta um menor gradiente de temperatura. Além disso promovem uma melhor trabalhabilidade da mistura, já que existe um tempo disponível para a compactação maior, devido à utilização de temperaturas mais baixas, e conseqüentemente menor envelhecimento do ligante asfáltico. Todas essas questões resultam em uma abertura ao tráfego mais rapidamente e uma maior possibilidade de aplicação em climas mais frios.

Existem diferentes tipos de aditivos para as misturas mornas no mercado, variando de produtos químicos e orgânicos, asfalto espuma a ceras orgânicas (MERIGHI, 2017). No entanto, segundo Stimilli (2017) cada tipo de aditivo, empregado na fabricação das misturas WMA, atua com base em mecanismos particulares que fornecem benefícios e desvantagens específicas. Os aditivos químicos tradicionais são tecnologias empregadas na produção de misturas asfálticas para reduzir a temperatura da usina de asfalto, porém eles possuem uma grande quantidade de óleos pesados que podem sofrer alterações durante o processo de envelhecimento do ligante asfáltico. Já os óleos vegetais são ricos em ácidos graxos insaturados e também possuem uma melhor resistência à temperatura, podendo ser utilizados também para a regeneração do ligante asfáltico (JI *et al.*, 2017). Portanto, os comportamentos das misturas não podem ser generalizados e devem ser referidos ao tipo particular de aditivo empregado.

De acordo com Motta (2011) os aditivos orgânicos têm a vantagem de poderem ser introduzidos previamente no ligante ou incorporados durante o processo de usinagem reduzindo a temperatura de mistura em torno de 30°C a 40°C. Depois que a mistura sofre o resfriamento, estes elementos irão se cristalizar de uma maneira dispersa no ligante, aumentando a rigidez deste, e conseqüentemente, da mistura como um todo.

Pesquisas recentes (CHEN *et al.* 2014; AZAHAR *et al.* 2015; SUN *et al.* 2016; GUARIN *et al.*, 2016 AL-OMARI *et al.* 2018) estudaram a influência da adição de óleos vegetais nas propriedades físicas e reológicas dos ligantes asfálticos. Os autores apontam que apesar da adição do óleo favorecer o aparecimento de afundamento de trilha de roda e diminuir a recuperação elástica dos ligantes asfálticos, eles ajudam no alívio das tensões das misturas asfálticas e no melhor comportamento quanto à fadiga e maior resistência ao trincamento térmico. Além disso os autores enfatizam a redução do passivo ambiental gerado pela destinação adequada dos óleos pós-consumo.

Os óleos de milho e de soja são oriundos de fontes renováveis e biodegradáveis e são originados de dois grãos populares do mundo. Devido ao alto consumo dos óleos, produzidos com estes grãos, surge a necessidade de procurar alternativas para o reaproveitamento destes com a finalidade de combater o descarte inapropriado do óleo residual como no solo, rios e tubulações de esgoto.

A aplicação dos óleos usados ao ligante asfáltico é uma alternativa ecologicamente correta uma vez que estes apresentam boa estabilidade oxidativa, que tendem a reduzir a elevada

viscosidade dos ligantes asfálticos, reduzindo gastos na usina, além de aumentar a estabilidade à estocagem e a adesividade nas misturas com os agregados (PORTUGAL *et al.*, 2017-a).

O óleo de cozinha residual apresenta ponto de fulgor mais alto que 220°C, e portanto age em favor da segurança quanto ao aquecimento dos ligantes asfálticos. Outro ponto favorável é o fato do óleo de cozinha residual, quando for aquecido novamente, não apresentar elementos voláteis como gases tóxicos, pois ele já passou pelo processo de cocção em elevadas temperaturas (CHEN *et al.*, 2014).

Portugal *et al.* (2017- a; 2017-b) observaram, em seus estudos reológicos de ligantes asfálticos modificados com óleo de soja e de milho, que a utilização desses óleos residuais é viável do ponto de vista físico e reológico. Entretanto os estudos supracitados foram restritos a avaliação reológica de ligantes asfálticos.

Neste estudo foi analisada a redução das temperaturas de produção e aplicação das misturas asfálticas mornas mediante a adição de óleo de soja e de milho, tanto novo como residual, que podem proporcionar benefícios de sustentabilidade evidentes a curto, médio e longo prazo, possíveis de agrupar em vantagens sociais, econômicas e ambientais. Desta maneira, para a confirmação da viabilidade da adição dos óleos de milho e soja, novo e residual, foi realizado o estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com a adição destes. As misturas foram produzidas em três temperaturas diferentes, a primeira foi à temperatura determinada pela curva temperatura x viscosidade e as outras foram 10°C e 20°C inferiores a primeira, respectivamente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. MATERIAIS

2.1.1. Óleo de Soja e de Milho

Os óleos de soja e de milho utilizados na pesquisa foram empregados em duas formas: o óleo novo (adquirido no comércio da cidade de Campina Grande-PB) e o óleo residual (passado por um processo de aquecimento/fritura e depois limpo por processos simples de decantação e filtração). Foi utilizada uma porcentagem de 2% para o óleo de soja (novo e residual) e para o óleo de milho novo e uma porcentagem de 1% para o óleo de milho residual. Estes teores foram adotados baseados nos resultados dos ensaios reológicos apresentados nas pesquisas de Portugal *et al.* (2017-a e 2017-b). As pesquisas dos autores determinaram que, dentre os percentuais estudados (1%, 2% e 3%), os teores supracitados foram os que apresentaram maiores valores de Performance Grade (PG) e menores Compliância não-recuperável (Jnr). Os percentuais de modificação utilizados nas misturas estão na Tabela 1.

Tabela 1: Teores ótimos dos aditivos encontrados em Portugal *et al.* (2017-a e 2017-b)

Característica	Teor ótimo
Adição de óleo de milho novo	2%
Adição de óleo de milho residual	1%
Adição de óleo de soja novo	2%
Adição de óleo de soja residual	2%

2.1.2. Ligante asfáltico

Neste estudo foi utilizado o ligante asfáltico, classificado quanto à penetração como 50/70, obtido pelo processo de destilação do petróleo, cujas especificações estão de acordo com a Agência

Nacional de Petróleo (ANP), a qual define os parâmetros de aceitação e classificação.

Os resultados dos ensaios de penetração (DNIT-ME 155/2010), ponto de amolecimento (DNIT-ME 131/2010) e viscosidade rotacional (ASTM D 4402) encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades físicas dos ligante puro e modificado

Ensaio	Ligante				
	Puro	Óleo de Soja Novo	Óleo de Soja Residual	Óleo de Milho Novo	Óleo de Milho Residual
Ponto de Amolecimento (°C)	46	47	46	47	48
Penetração (0,1 mm)	57	74	75	80	82
Viscosidade Rotacional	135°C	550	310	300	375
	150°C	280	159	150	190
	177°C	110	60,5	60	74

Pode-se observar que os óleos interferem no comportamento do ligante, aumentando a penetração e conseqüentemente, diminuindo a rigidez. Em comparação com o ligante puro verifica-se valores similares ponto de amolecimento, atendendo ao preconizado pela Norma DNIT 095/2006, que estabelece 46°C como valor mínimo para ligantes classificados como 50/70. Em relação ao ensaio de Viscosidade Rotacional as misturas apresentaram valores que obedecem as especificações normativas, DNIT 095/2006, e aos limites estipulados pela metodologia SUPERPAVE. Verifica-se a partir dos dados apresentados que a influência da adição do óleo na consistência do ligante asfáltico é mais significativa na temperatura de 25°C (temperatura do ensaio de penetração) do que em temperaturas mais elevadas (temperaturas dos ensaios de ponto de amolecimento e viscosidade).

A partir das curvas viscosidade x temperatura foi possível determinar, para o ligante puro e para os ligantes modificados, as temperaturas de usinagem e compactação. Segundo Portugal *et al.* (2017-a e 2017-b) e ratificado pelos resultados encontrados nesse estudo, a adição dos óleos ao ligante asfáltico interferiu diretamente na diminuição da temperatura de usinagem e compactação, que nessas condições foram 150°C e 140°C, respectivamente. Entretanto, essa redução foi pouco significativa (máxima de 7°C). Devido a este fato, a partir das temperaturas determinadas para os ligantes, por meio da curva, foram efetuadas as reduções de 10 e 20°C a fim de permitir o enquadramento destas misturas como WMA. Ressalta-se que estas temperaturas não obedecem a viscosidade recomendada pelo órgão regulador, por isso decidiu-se avaliar as propriedades mecânicas das misturas asfálticas para verificar se o não atendimento desta viscosidade pode comprometer o desempenho das misturas.

Portanto foram utilizadas as temperaturas de 150°C (TC), 140°C (TC-10) e 130°C (TC - 20) para a usinagem do ligante com adição de óleos e as temperaturas de 140°C (TC), 130°C (TC-10) e 120°C (TC-20) para a compactação das misturas com os óleos. Os ensaios mecânicos foram realizados nestas três temperaturas.

2.1.3. Agregados

Neste estudo foram utilizados para a preparação das misturas asfálticas os agregados: brita 19mm, brita 12,5mm e pó de pedra, todos de origem granítica, além de areia e cal hidratada (fíler). As propriedades físicas destes foram encontradas por meio da realização dos ensaios de massa específica do agregado graúdo e miúdo (DNIT-ME 081/98 e DNIT-ME 084/95, respectivamente); abrasão Los Angeles (DNIT 035/98 - ME) e equivalente areia (DNIT 054/97 - ME).

Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 3, e granulometria dos agregados graúdos e miúdos (DNIT-ME 083/98) na Figura 1.

Tabela 3: Propriedades físicas dos agregados

Agregado	Massa Específica Real (g/cm ³)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Abrasão Los Angeles (%)	Equivalente Areia (%)
Brita 19 mm	2,78	2,48	17%	-
Brita 12,5 mm	2,76	2,74	25%	-
Areia	2,53	2,51	-	87%
Pó de Pedra	2,58	2,57	-	60%

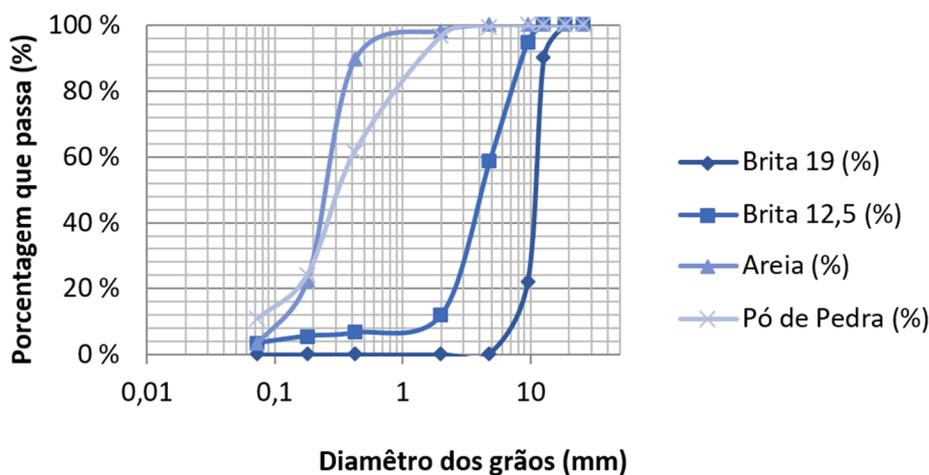


Figura 1. Curva granulométrica dos agregados

2.2. Métodos

As misturas do ligante com os óleos foram realizadas em um agitador mecânico de baixo cisalhamento, de acordo com procedimentos previamente estabelecidos em Faxina (2006) e Souza (2012). Primeiramente aqueceu-se o ligante asfáltico na temperatura de 135°C, após a estabilização da temperatura os óleos foram adicionados na temperatura ambiente e nos teores determinados por Portugal (2016). As misturas foram mantidas na temperatura supracitada por meio de uma manta de aquecimento, controlada por um Thermosel, e foram submetidas a rotação pré-estabelecida em 400 rpm durante 20 minutos para a homogeneização da mistura.

Os agregados foram enquadrados na faixa granulométrica “C” estabelecida pelo DNIT, de acordo com as suas composições, obedecendo aos critérios de pontos de controle e zona de restrição da metodologia SUPERPAVE. Os corpos de provas foram separados em três grupos de acordo com as temperaturas de compactação: 140 °C (temperatura encontrada por meio do ensaio de viscosidade rotacional), 130°C e 120°C. Todos os corpos de prova foram moldados utilizando a mesma composição granulométrica, teor de ligante e número de giros, mudando-se somente o tipo de ligante utilizado. Os corpos de prova, confeccionados tanto com o ligante puro quanto com a mistura com os óleos, apresentaram teores de vazios equivalentes (≈4%) e não foi visualizada exsudação aparente.

Em seguida, foram realizados os ensaios mecânicos com a intenção de verificar a interferência da adição dos óleos ao ligante juntamente com a redução na temperatura de compactação.

2.2.1. Resistência à Tração por Compressão Diametral

O ensaio de Resistência à tração teve por finalidade determinar a tensão máxima que a mistura asfáltica pode suportar até o momento da sua ruptura, e seguiu os métodos da norma DNIT – ME 136/2010, onde forças opostas são aplicadas, diametralmente, no corpo de prova, provocando a geração de tensões de tração uniformes ao seu diâmetro.

2.2.2. Lottman Modificado

O ensaio de Lottman foi utilizado para conhecer o dano por umidade em misturas asfálticas a partir do potencial deslocamento de sua película de asfalto diante da ação da água em ciclos de gelo e degelo. O ensaio seguiu a metodologia determinada pela norma AASHTO T283. Foram moldados seis corpos de prova com volume de vazios $7\% \pm 1\%$ para cada tipo de mistura asfáltica, e depois foram separados em dois grupos: um condicionado e outro não. Após o processo de condicionamento ambos os grupos foram submetidos ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral. A análise é feita pela razão entre as resistências à tração das amostras previamente condicionadas (RTu) e das amostras sem condicionamento (RT). Este valor (em porcentagem) é denominado Resistência Retida à Tração (RRT).

2.2.3. Módulo de Resiliência

O ensaio de Módulo de Resiliência é normatizado pela ABNT 16018/2011 que determina a medição das deformações reversíveis instantâneas geradas por condições cíclicas de carregamento e descarregamento nos corpos de prova.

Para a realização deste ensaio foi utilizado um equipamento formado por um sistema pneumático de carregamento com controle do tempo e frequência de aplicação da carga, um sistema de medição do deslocamento axial do corpo de prova e um software para coleta e análise de dados. Com esses equipamentos foram aplicados ciclos em compressão diametral usando uma carga no valor igual a 10% da Resistência à Tração máxima. Esses ciclos, para os materiais viscoelásticos, são responsáveis por representar o efeito oriundo da passagem dos pneus dos veículos.

2.2.4. Flow Number

O Flow Number é um teste que mede a deformação permanente de misturas asfálticas. Para Budny (2012) as execuções de cargas repetidas são mais indicadas para simular o tráfego contínuo de veículos pesados sobre o pavimento, já que os ensaios que utilizam cargas estáticas não representam as deformações permanentes mostradas em campo.

O *Flow Number* retrata a quantidade de ciclos aplicados ao corpo de prova no momento em que se começa a verificar o cisalhamento a volume constante, isto é, o número de ciclos de cargas tolerados pelo pavimento até a fluência. Os corpos de prova para realização deste ensaio mediam 150mm de altura, diâmetro de 100mm e volume de vazios de $7\% \pm 0,5$. O ensaio consiste na aplicação de cargas repetidas de 204kPa em corpos de prova condicionados a uma temperatura de 60°C.

2.2.5. Módulo Dinâmico

Segundo Ponte *et al.* (2014) tanto o módulo dinâmico quanto o módulo resiliência medem a rigidez da mistura asfáltica. O segundo, porém, não permite uma modelagem apropriada dos fenômenos comumente associados aos pavimentos por não considerar suas deformações não

elásticas, além de apresentar limitações para contabilizar os efeitos de diferentes temperaturas e frequências de carregamento (BERNUCCI *et al.*, 2008).

O ensaio seguiu o método da AASHTO TP-62/2009 que mediu a deformação axial recuperável utilizando para isso um sistema de medição do deslocamento axial do corpo de prova. O ensaio foi realizado na temperatura de 37,8 °C e em seis frequências de carregamento (0,1; 0,5; 1; 5; 10 e 25Hz).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os ensaios mecânicos e de sensibilidade à ação da água foram realizados para verificar o comportamento das misturas asfálticas com a adição dos óleos. Todos os ensaios foram realizados com, no mínimo, três corpos-de-prova para cada situação (tipo de óleo adicionado e temperatura de compactação), e os resultados apresentados nos itens a seguir são a média dos valores obtidos.

3.1. Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

Os valores referentes ao ensaio de resistência à tração estão apresentados na Figura 2.

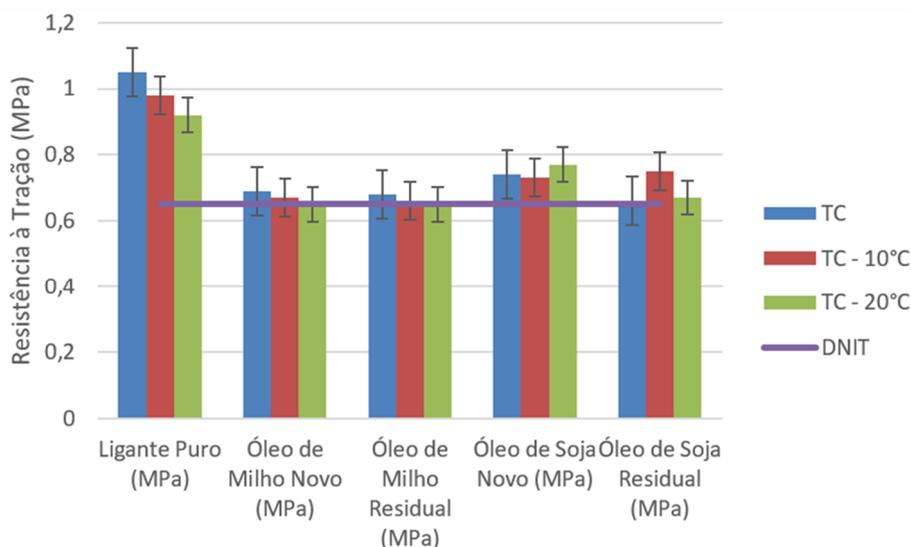


Figura 2: Resultado do ensaio de resistência à tração diametral para as misturas investigadas neste estudo

Observa-se na Figura 2 que as misturas com ligantes modificados com o óleo de soja novo e residual obtiveram maior resistência à tração, em todas as temperaturas, em comparação aos ligantes modificados com óleo de milho novo e residual, ou seja entre os dois tipos de óleo, a adição o óleo de soja novo promove menor redução de resistência do que o óleo de milho (em torno de 15%).

Motta (2009) menciona que o controle de temperatura de moldagem pode levar a uma diferença significativa de volume de vazios das misturas e ter impacto sobre a RT, promovendo assim uma variação de seus valores. Nestes resultados não foram observadas variações significativas entre os valores de RT para as diferentes temperaturas e nota-se que apesar da redução da RT, em relação ao ligante puro, os valores médios das resistências das misturas foram superiores ao mínimo exigido pela norma ME 136/2010 do DNIT que é de 0,65 MPa. Alguns corpos-de prova apresentaram valores de RT próximo a 0,60MPa, ou seja inferiores ao limite mínimo

permitido. Ou seja, apesar da adição dos óleos promoverem a diminuição da resistência da mistura asfáltica, a temperatura na qual os materiais são misturados não exerce influência significativa neste parâmetro, evidenciando que a RT é mais afetada pela viscosidade do ligante asfáltico na temperatura de serviço do que de compactação.

O ensaio de tração indireta fornece um estado biaxial de tensões (horizontais de tração e verticais de compressão) que se aproxima bastante bem das condições produzidas na base das camadas de rolamento por uma carga de roda, e está relacionado à viscosidade do ligante (GAMA, 2016). Portanto, o que se pode observar é que nestes termos, a amostra utilizando o óleo de soja, quando comparado ao óleo de milho, apresentou maior resistência, propriedade essencial para que o pavimento mantenha seu desempenho diante da intensidade de aplicação e cargas de tráfego.

Sangard *et al.* (2012) avaliou a aplicação de misturas asfálticas mornas (com adição de Aspha-min, Sasobit e Evotherm) em trechos experimentais em Ohio e comparou com resultados alcançados com a mistura asfáltica convencional. Os resultados de RT, obtidos em corpos-de-prova extraídos, mostraram que apesar da mistura convencional ter apresentado RT maior, após três meses de uso, do que as demais misturas, as misturas WMA apresentaram aumento do parâmetro RT mais expressivo.

Os resultados supracitados mostram o benefício do uso do óleo residual, uma vez que este apresentou comportamento similar ao óleo novo, sendo mais evidente com o óleo de milho, o que evidencia o ganho ambiental com o descarte adequado destes materiais. Entretanto, destaca-se que os ligantes puros, em todas as temperaturas estudadas, apresentaram comportamento superior ao modificados.

3.2. Ensaio de Lottman Modificado

O ensaio Lottman modificado verifica a susceptibilidade de misturas asfálticas à umidade. Geralmente, a resistência à ação deletéria da água das misturas asfálticas é influenciada por fatores diversos, como as propriedades dos agregados, as propriedades do ligante asfáltico e as propriedades da mistura. Sendo assim, o fator determinante no desempenho das misturas no ensaio de dano por umidade induzida é o ligante asfáltico, já que os agregados, a faixa granulométrica e os demais condicionantes foram mantidos constantes.

Na Figura 3 estão apresentados os resultados obtidos a partir dos ensaios de resistência ao dano por umidade induzida (RRT), para cada temperatura de compactação, contendo as médias dos corpos de prova para cada óleo.

A metodologia desenvolvida pelo projeto SUPERPAVE estabelece o valor de RRT deve ficar acima de oitenta por cento (80%-linha amarela), enquanto a MP 8-01 da AASHTO estabelece o limite mínimo para RRT de setenta por cento (70%-linha verde) e o DNIT o limite de setenta e cinco (75%). Observa-se que as misturas utilizando o ligante modificado com óleo de milho novo e residual apresentaram RRT acima de 70%, exceto para a menor temperatura de compactação, enquanto que as de ligante modificado com o óleo de soja novo e residual atingiram uma RRT muito inferior a 70%, provavelmente em razão da quebra das cadeias de hidrocarbonetos insaturados quando submetidos ao processo de condicionamento. A diminuição da resistência à tração após o condicionamento – indução de umidade na amostra – é dado como um parâmetro para identificar a susceptibilidade da mistura ao deslocamento da película asfáltica do agregado (perda de adesividade), considerando o efeito deletério da água (GAMA,2016). Neste ca-

os, a utilização dos óleos nas misturas asfálticas fica condicionada a adição de um melhorador de adesividade (dope).

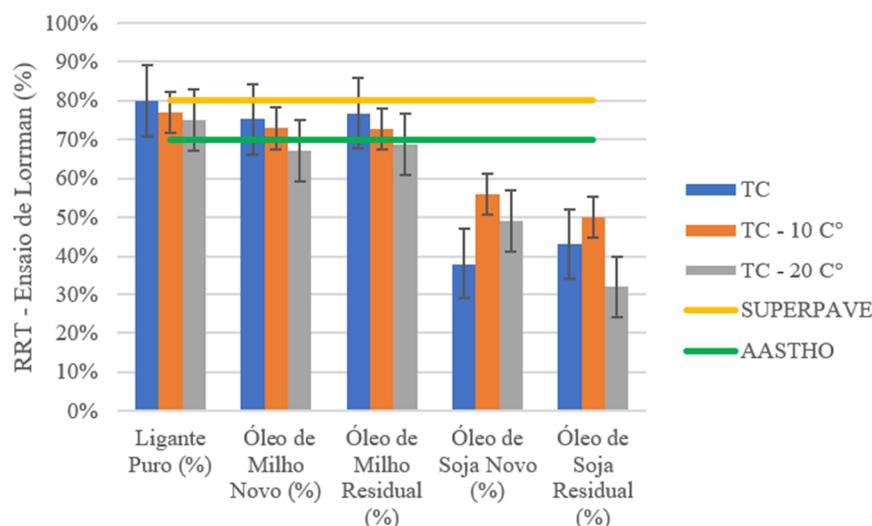


Figura 3: Resultados de RRT do ensaio de Lorrman modificado para as misturas investigadas neste estudo.

Observa-se que a mistura com o óleo de milho foi mais resistente à perda de adesividade, com uma pequena diferença entre o óleo de milho novo e residual, ambos enquadrando na faixa mínima da AASTHO, exceto a última temperatura que ficou um pouco abaixo do mínimo exigido. Conforme esperado, a redução da temperatura de compactação, para todas as misturas estudadas, promoveu diminuição na RRT pois diminui a evaporação da água contida nos agregados, aumentando a presença de água na interface ligante/agregado e conseqüentemente a adesividade ligante/agregado. Além disso, corroborando o observado nos ensaios de RT, não há diferença no comportamento das misturas quanto da utilização do óleo novo e residual, o que viabiliza a utilização dos óleos pós-consumo. Novamente, esse comportamento foi mais evidente para o óleo de milho e os ligantes modificados apresentaram comportamento inferior ao ligante puro em todas as temperaturas estudadas.

3.3. Ensaio de Módulo de Resiliência

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos a partir dos ensaios de Módulo de Resiliência (MR) para as diferentes adições e temperaturas de compactação. Novamente, nestes resultados não foram observadas variações significativas entre os valores de MR entre os óleos novos e residuais, apenas entre os tipos de óleos utilizados. Os valores obtidos nesta pesquisa encontram-se na mesma ordem de grandeza do observado por Rodrigues *et al.* (2017) ao estudar o uso do óleo da moringa na fabricação de misturas mornas, entretanto os resultados deles mostram que o óleo se sacrifica para proteger o ligante asfáltico, fato não observado nesta pesquisa.

Observa-se que os valores MR das misturas estudadas sofrem uma influência da redução da temperatura de compactação. Os resultados indicam que os maiores resultados de MR são encontrados na temperatura de 130°C, onde houve uma redução de 10°C da temperatura inicial, mostrando que ocorre um aumento da rigidez quando diminui-se as temperaturas de usinagem e compactação.

Segundo Silva (2011) a análise do Módulo de Resiliência não pode ser feita de forma direta, uma vez que ele está relacionado à rigidez da mistura. Valores maiores ou menores podem ser aceitos, dependendo da estrutura do pavimento, devendo ser considerada a compatibilidade de deformações entre as camadas que o constituem, principalmente a camada de base.

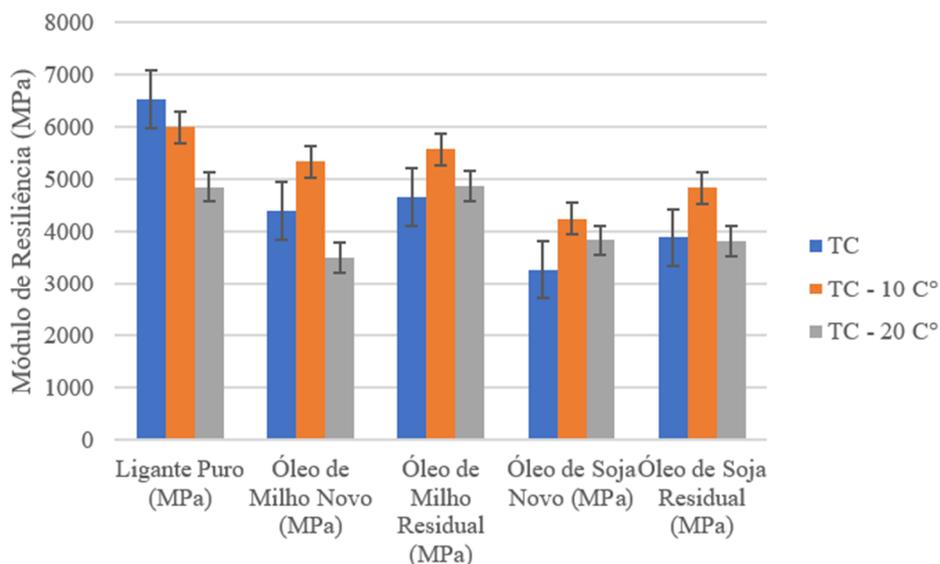


Figura 2. Módulos de resiliência realizados para as misturas investigadas neste estudo (Norma Brasileira) na temperatura de 25°C

3.4. Ensaio Flow Number

O ensaio de Flow Number (*FN*) é usado como um indicador de desempenho para a deformação permanente, resistência da mistura ou como comparativo da resistência ao cisalhamento de várias misturas asfálticas, o *Flow Number* indica o ciclo onde a taxa de deformação plástica é mínima. A Figura 5 apresenta os números de ciclos observados. Quanto maior o FN menores serão as deformações sofridas pelo pavimento e menor a tendência de formação de trilhas de roda (WITCZAK *et al.*, 2002).

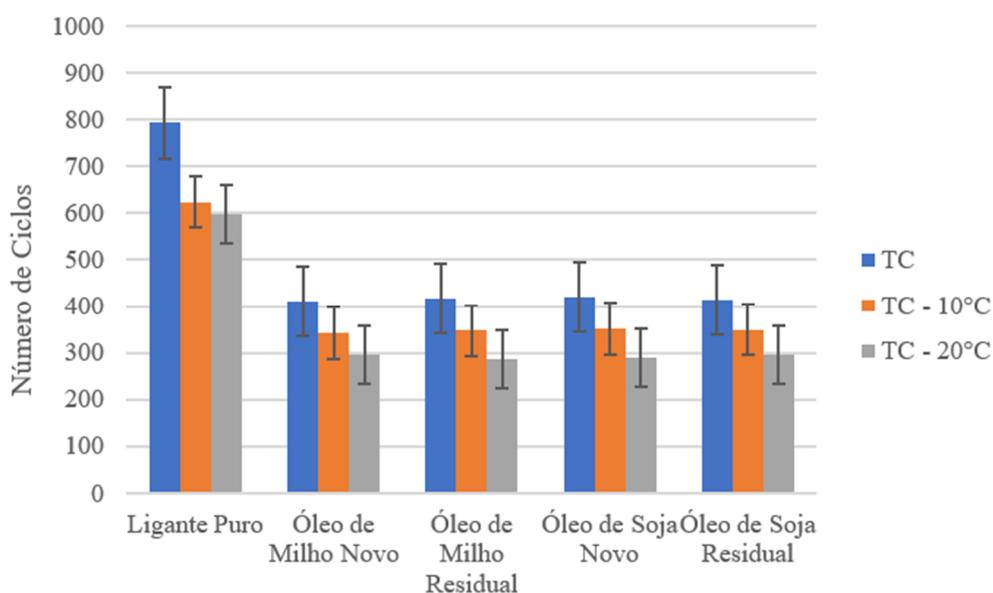


Figura 5. Resultado dos ensaios de Flow Number a 60°C para as misturas investigadas neste estudo

A resistência à deformação permanente, conforme já relatado, é uma das grandes preocupações no que se refere a misturas mornas, visto que as menores temperaturas de usinagem e compactação resultam em uma menor rigidez inicial da mistura (FILHO, 2013).

Nas misturas estudadas verificou-se que a mistura composta por ligante puro apresentou resultados superiores de FN, suportando, portanto, um maior número de ciclos de carregamento até a ruptura, o que indica uma maior resistência à deformação permanente. Portanto, pelos resultados pode-se inferir que as misturas com a adição dos óleos têm um maior potencial à deformação permanente. Estes resultados já eram esperado em razão dos dados de Jnr obtidos no ensaio de Multiple Strees Creep Recovery (MSCR) apresentado por Portugal *et al.* (2017-a) e Portugal *et al.* (2017-b), nos quais a adição dos óleos estudados acarretaram aumento do parâmetro Jnr, caracterizando maior deformação plástica em razão da diminuição da viscosidade dos ligantes.

Jia *et al.* (2015) observaram comportamento análogo ao supracitado ao estudar a adição de óleo de motor em misturas asfálticas, ou seja os autores verificar uma maior tendência a deformação permanente e o aparecimento de afundamento de trilha de roda. Azarar *et al.* (2016) também relatam que misturas asfálticas confeccionadas com ligantes modificados com óleos vegetais apresentam maior tendência ao aparecimento de deformações plásticas do que as misturas convencionais em razão do enfraquecimento da ligação química do ligante com o agregado quando da adição dos óleos.

Ainda assim, o número de ciclos até a fluência das amostras TC e TC-10°C se enquadraram no valor recomendado por Nascimento (2008) para rodovias de tráfego médio que deve ser superior a 300 ciclos.

3.5. Ensaio de módulo Dinâmico

O módulo dinâmico (MD), simbolizado por $|E^*|$, de misturas asfálticas é uma medida de rigidez, assim como o MR. A principal diferença está no fato de que no MD a carga é aplicada de forma senoidal, enquanto que no MR, em pulsos de carga e descarga. Observa-se nas Figuras 6 e 7 os gráficos linearizados de módulo dinâmico em função da frequência para a temperatura 37,8°C para o ligante puro (LP) e para os ligantes modificados com óleo de milho novo (ON) e residual (OR) e óleo de soja novo (ON) e residual (OR), respectivamente.

A rigidez de uma mistura asfáltica é dependente do tempo de carregamento (relacionado a velocidade de circulação dos veículos pesados) e também da temperatura que o asfalto é submetido. A rigidez é mais elevada em baixas temperaturas e em curtos prazos de carregamento, em contrapartida, a rigidez é reduzida em altas temperaturas e longos tempos de carregamento.

A partir das curvas mestras do módulo dinâmico verifica-se que à medida que se eleva a frequência, o módulo dinâmico aumenta. Além disso a variação das temperaturas de compactação diminui o valor do módulo dinâmico em frequências baixas, mas que não correspondem a uma grande alteração em altas frequências.

Valores de frequência baixos correspondem a velocidades baixas, assim como os valores de frequência maiores indicam velocidades superiores. Desta forma, a frequência de 3Hz (valor que se aproxima da velocidade de 40km/h) (VAITIKUS *et al.*, 2016) é representa o tráfego em vias urbanas e não sofre variações para os óleos novos e usados nas três temperaturas de compactação. Embora, o óleo de soja novo apresente sempre resultados superiores de MD a partir da frequência de 1Hz (equivalente a 20km/h), o óleo de soja residual apresenta resultados bem semelhantes ao do óleo de soja novo.

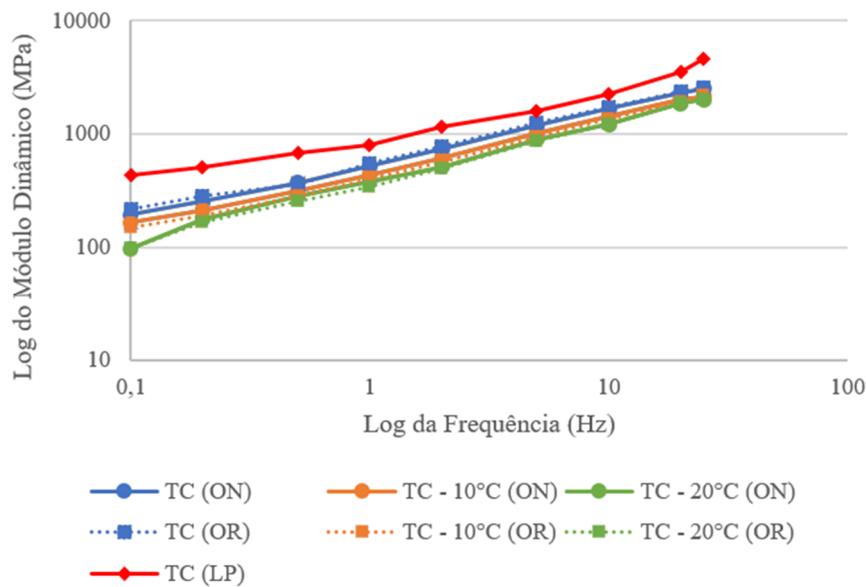


Figura 6. Módulos dinâmicos para o óleo de milho novo (ON) e residual (OR) e o ligante puro (LP)

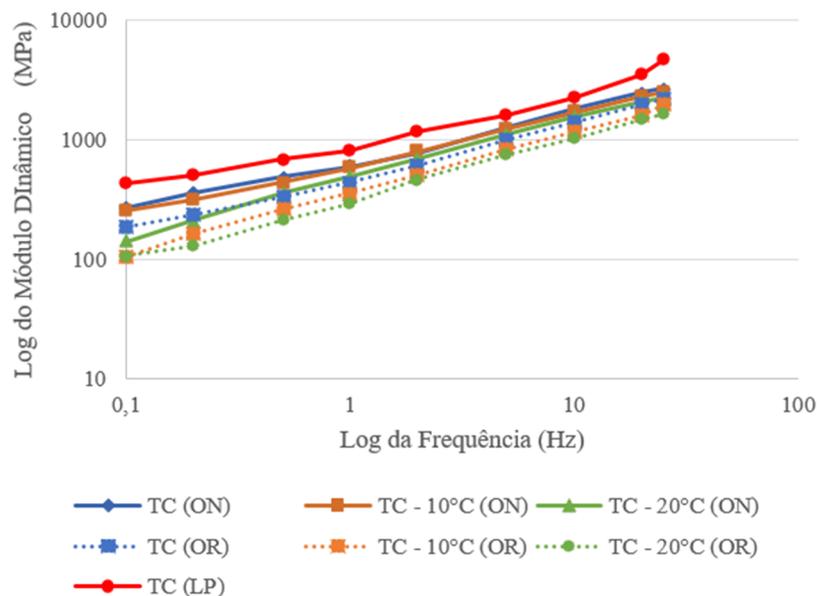


Figura 7. Módulos dinâmicos para o óleo de soja novo (ON) e residual (OR) e o ligante puro (LP)

4. CONCLUSÕES

As misturas asfálticas mornas produzidas em temperaturas inferiores as tradicionalmente utilizadas podem apresentar benefícios econômicos e ao meio ambiente, embora apresentem comportamento mecânico inferior ao obtido para as misturas compactadas nas temperaturas determinadas pelo gráfico viscosidade x temperatura.

Os valores médios dos resultados encontrados nos ensaios mecânicos para os corpos prova, compactados em temperaturas inferiores a dada pela viscosidade rotacional, obedeceram aos limites preconizados por norma, entretanto a utilização da temperatura 20°C abaixo da determinada por norma apresentou valores próximos ao limite mínimo necessário. Apesar disso o

ganho energético que haverá na redução de 20°C da temperatura usual da compactação é mais significativo.

O comportamento das misturas asfálticas produzidas com os óleos residuais, de soja ou de milho, foi equivalente ao apresentado pelas misturas produzidas com os óleos novos, possibilitando uma logística reversa adequada dos óleos. Este fato proporciona uma ação sustentável, melhorando o meio ambiente pois irá resultar em um descarte adequado evitando ser despejado na natureza.

Entretanto, verifica-se que o comportamento das misturas com adição dos óleos é inferior ao obtido para as misturas sem aditivo para as três temperaturas estudadas. Ou seja, a adição dos óleos, com exceção da logística reversa para os óleos residuais, não se traduz em ganhos ambientais significativos. A simples redução da temperatura no ligante permite ganhos econômicos já que há redução da temperatura de compactação que levará a uma economia energética fazendo com que diminua os custos efetivos para a produção e a execução da mistura na pista.

REFERÊNCIAS

- AASHTO (2007) T 283/2007 – *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage*. American Association of State Highway and Transportation Officials, EUA.
- AASHTO (2009) TP 62 – *Determining modulus of hot mix asphalt (HMA)*. American Association of State Highway and Transportation Officials, EUA.
- ABNT (2009) NBR 15235/09 – *Materiais asfálticos - Determinação do efeito do calor e do ar em uma película delgada rotacional*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo.
- ABNT (2011) NBR 16018/11 – *Materiais asfálticos - Misturas asfálticas – Determinação da rigidez por compressão diametral sob carga repetida*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo.
- Al-Omari, A. A.; S. K. Khedaywi.; M. Khasawneh. (2018). Laboratory characterization of asphalt binders modified with waste vegetable oil using SuperPave specifications. *Internacional. Journal of pavement research and technology*. v. 11, n. 1, p. 68-76. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.09.004.
- ASTM (2013) D 4402 – *Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. American Society for Testing and Materials, EUA
- Azhar, W; R. P. Jaya; M. Bujang; D. Jayanti. (2016) The potential of waste cooking oil as bio-asphalt for alternative binder – An overview. *Journal Technology*. DOI: 78. 10.11113/jt.v78.8007.
- Bernucci, L. B.; L. M. G. da Motta; J. A. P. Ceratti; J. B. Soares. (2010) *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA.
- Budny, J. (2012) *Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas morna*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Chen, M.; F. Xiao; B. Putman; B. Leng; S. Wu. (2014a) High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils. *Construction and Building Materials*. China. n. 59, p. 10-16, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.032.
- DNIT (1995) ME 084/95 – *Agregado miúdo – determinação da densidade real*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (1997) ME 054/97 – *Equivalente areia*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (1998) ME 035/98 – *Agregados: Determinação da abrasão "Los Angeles"*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (1998) ME 081/98 – *Determinação da absorção e da densidade do agregado graúdo*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (1998) ME 083/98 – *Agregados – Análise Granulométrica*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (1999) ES 385/99 – *Pavimentação - concreto asfáltico com asfalto polímero*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (2006) ME 031/2006 – *Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de serviço*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (2010) ME 131/2010 – *Material asfáltico – Determinação do ponto de amolecimento – Método anel e bola*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (2010) ME 136/2010 – *Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.

- DNIT (2010) *ME 155/2010 – Material asfáltico – Determinação da penetração*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- DNIT (2011) *ME 129/2011– Cimento asfáltico de petróleo modificado por polímero elastomérico – Especificação de material*. Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte, Rio de Janeiro.
- Filho, N. W. (2013) *Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Gama, D. A. (2016) Efeito da adição de polímeros reativo, não-reativo e ácido polifosfórico e suas combinações nas propriedades de ligantes asfálticos. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- Guarin, A.; A. Khan; A. Butt; B. Birgisson e N. Kringos (2016) An extensive laboratory investigation of the use of bio-oil modified bitumen in road construction. *Construction and Building Materials*, v. 106, p. 133-139. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.009
- Jia, X.; B. Huang; J. Moore e S. Zhao (2015) Influence of Waste Engine Oil on Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*. v. 27, n. 12.
- Ji, J.; H. Yao; Z. Shuo; Z. You; H. Li; S. Xu; L. Sun. (2017) Effectiveness of vegetable oils as rejuvenators for aged asphalt binders. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, n. 3.
- Ma, T.; H. Wang; Y. Zhao; X. Huang e S. Wang (2017) Laboratory Investigation of Crumb Rubber Modified Asphalt Binder and Mixtures with Warm-Mix Additives. *International Journal of Civil Engineering* v. 15, n. 2, p. 185-194. DOI: 10.1007/s40999-016-0040-3.
- Merighi, C. F.; C. Y. Suzuki (2017) Estudo do comportamento do revestimento de pavimento utilizando mistura asfáltica morna com adição de borracha moída de pneu na SPA-248/055. *Revista Transporte*, v. 25, n. 7, p. 136-146. DOI: 10.14295/transportes.v25i4.1055.
- Mothé, M. G. (2009) *Estudo do comportamento de ligantes asfálticos por reologia e análise térmica*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.
- Motta, L. M. G. (2009) *Contribuição para a Estimativa do Módulo Resiliente de Misturas Asfálticas*. 14^o Encontro de Asfalto, IBP, Rio de Janeiro, RJ
- Motta, R. S. (2011) Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para a redução de emissão de poluentes e consumo energético.. 229 p. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transporte, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). São Paulo, SP.
- Nascimento, L. A. H. (2008) *Nova Abordagem da Dosagem de Misturas Asfálticas Densas com Uso do Compactador Giratório e Foco na Deformação Permanente*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Nynas (2009). *Asfalto templado, semi-templado y frío: el caso a favor de lasostenibilidad*. Nynas Bitumen Magazine: Performance.
- Osmari, P. H e F. T. S. Aragao. Avaliação do resíduo de óleo vegetal como agente rejuvenecedor de ligantes a partir de análises reológicas e de morfologia de superfície. *Revista Transportes*, v. 24, n.3. 2016. DOI: 10.14295/transportes.v24i3.1147.
- Portugal, A. C. X. (2016) *Avaliação Reológica de Cimentos Asfálticos de Petróleo Modificados com Óleo de Soja e de Milho*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande.
- Portugal, A. C. X.; L. C. F. L. Lucena; A. E. F. L. Lucena e D. B. Costa (2017-a) Rheological performance of soybean in asphalt binder modification. *Road Materials and Pavement Design*, v. 19, n. 4, p. 768-782. DOI: 10.1080/14680629.2016.1273845.
- Portugal, A. C. X.; L. C. F. L. Lucena; A. E. F. L. Lucena; D. B. Costa; K. A. Lima (2017-b) Rheological properties of asphalt binder prepared with maize oil. *Construction and building materials*. v. 152, p. 1015-1026. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.077.
- Rodrigues, Y. O.; D. B. Silva; L. C. F. L. Lucena e M. Lopes (2017) Performance of warm mix asphalt containing Moringa oleifera Lam seeds oil: Rheological and mechanical properties. *Construction and building materials*. v. 154, p. 137-143. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.194.
- Sangard, S.; M. Nazzal; A. Al-Rawashde e D. Powers (2012) Field Evaluation of Warm-Mix Asphalt Technologies. *Journal of Materials in Civil Engineering*. v. 24, n. 11.
- Silva, H. M. R. D (2006). Caracterização do Mástique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mástique. Contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal.
- Souza, L. J. S. (2012) *Estudo das propriedades mecânicas de misturas asfálticas com Cimento Asfáltico de Petróleo modificado com óleo de mamona*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, Brasil.
- Stimilli, A.; A. Virgili e F. Canestrari. (2017) Warm recycling of flexible pavements; Effectiveness of Warm Mix Asphalt additives on modified bitumen and mixture performance. *Journal of Cleaner Production*, v. 156, p. 911-922. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.235.
- Sun, Z.; J. Yi; H. Feng e C. Guo (2016). Properties of asphalt binder modified by bio-oil derived from waste cooking oil. *Construction and Building Materials*, v. 102, p. 496-504. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.173.

- Vaitkus, A; D. Cygas; A. Laurinavicius; V. Vorobjovas e Z. Perveneckas (2016) Influence of warm mix asphalt technology on asphalt physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 800-806, 2016. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.212.
- Witczak, M. W.; K. Kaloush e T. Pellinen (2002) *Simple performance test for Superpave mix design*. National Cooperative Highway Research Program – NCHRP, Report 465. Washington, D.C., EUA.
- .