

ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MISTURAS ASFÁLTICAS CONTENDO LIGANTE ASFÁLTICO COM ADIÇÃO DE ÓLEO DE GIRASSOL

Jeovanesa Régis Carvalho
Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena
Thamires Dantas Guerra
Rita Flávia Régis Queiroz
Thalita Maria Ramos Porto
Daniel Beserra Costa

Departamento de Engenharia Civil
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Universidade Federal de Campina Grande

RESUMO

A tecnologia de Misturas Asfálticas Mornas (MAMs), se apresenta como um processo alternativo de fabricação das misturas asfálticas, pois as mesmas proporcionam uma redução das temperaturas de mistura e compactação. Este trabalho tem por objetivo estudar as propriedades mecânicas de misturas asfálticas com ligante modificado pela adição do óleo de girassol em teores de 1, 2 e 3% em massa de ligante. Os resultados indicaram a viabilidade técnica da incorporação do óleo de girassol ao ligante asfáltico, pois possibilitou a vantagem de reduzir as temperaturas de mistura e compactação em até 6°C, porém, esta redução, não possibilita a classificação do ligante modificado em uma típica MAM. Quanto ao comportamento mecânico, as misturas asfálticas modificadas obtiveram menor resistência à tração e módulo de resiliência, quando comparadas à mistura de referência.

ABSTRACT

The technology of Warm Mix Asphalt (WMA), is presented as an alternative process of manufacturing asphalt mixtures, as they provide a reduction in mixing and compaction temperatures. This work aims to study the mechanical properties of asphalt mixtures with binder modified by the addition of sunflower oil in contents of 1, 2 and 3% by mass of binder. The results indicated the technical feasibility of the incorporation of sunflower oil to the asphalt binder, as it allowed the advantage of reducing the mixing and compaction temperatures up to 6°C, but this reduction does not allow the classification of the modified binder in a typical WMA. As for the mechanical behavior, the modified asphalt mixtures obtained lower tensile strength and modulus of resilience when compared to the reference mixture.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a preocupação com o meio ambiente tem sido mais evidente. Com isso, o setor rodoviário tem buscado desenvolver novas tecnologias que reduzam os danos ambientais. As rodovias, ao mesmo tempo que trazem benefícios ao usuário, durante o processo de usinagem e compactação da mistura asfáltica, são emitidos gases poluentes proporcionando ainda um grande consumo energético. Desta forma, a indústria da pavimentação vem tentando utilizar como alternativa, para reduzir os impactos ambientais, as Misturas Asfálticas Mornas (MAMs) ou *Warm Mix Asphalt (WMA)* que são produzidas em temperaturas inferiores ao asfalto convencional. As misturas mornas, reduzem as emissões de poluentes, os gastos com combustível e a exposição dos trabalhadores aos fumos e odores que são gerados durante a usinagem e compactação da mistura.

A redução das temperaturas na fabricação das misturas asfálticas mornas em relação às convencionais, é um resultado desejável, uma vez que a redução das temperaturas busca melhores resultados de trabalhabilidade e um menor envelhecimento do ligante, o que possibilita um pavimento de melhor desempenho e mais resistente ao trincamento. Porém, essas novas tecnologias “verdes” ainda são recentes, e no Brasil os estudos de MAMs são desenvolvidos em sua maioria por institutos de pesquisa para fins acadêmicos (OLIVEIRA, 2014; RIBEIRO, 2011; SALES, 2015 E SILVA, 2016). De acordo com Prowell et al. (2012),

as misturas mornas proporcionam um ganho de tempo entre a usinagem e a compactação, pois ocorre uma menor perda de temperatura, permitindo distâncias maiores entre a usina e a obra, uma compactação adequada, e a possibilidade de aplicar em locais de clima frio. Portanto, é necessário um aumento das pesquisas com misturas mornas permitindo encontrar as melhores técnicas e os produtos que se apresentem como melhor opção para sua utilização no Brasil. Dentro desse contexto, foi escolhido para este trabalho o óleo de girassol como aditivo com potencial para ser empregado na fabricação de MAM, devido o mesmo ser um composto oriundo de fonte renovável e ter um custo financeiro mais baixo quando comparado com outros aditivos de MAMs existentes no mercado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Misturas asfálticas

No Brasil, o asfalto é conhecido como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e é definido como um produto semi-sólido a temperaturas baixas, viscoelástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas. A pavimentação é uma das aplicações mais importantes do CAP, e isso se deve ao fato de ser um material aglomerante, com grande adesividade, proporcionando forte união dos agregados e permitindo flexibilidade controlável. Este é impermeável, durável e resiste à ação da maioria dos ácidos, álcalis e sais, podendo ainda ser utilizado com ou sem aditivos (BERNUCCI et al., 2008).

Um dos tipos de misturas mais empregados no país são as misturas asfálticas betuminosas à quente, mais conhecidas como Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ). Segundo Engelke et al. (2016), tratando-se de rodovias, o gás que sai do escapamento dos automóveis não é o único que causa prejuízos ao meio ambiente, uma vez que para a produção das misturas asfálticas à quente, exige-se normalmente temperaturas de 150°C, podendo atingir 180°C, contribuindo desta forma, para a emissão de gases do efeito estufa. Nestas misturas os agregados são aquecidos a elevadas temperaturas, liberando compostos orgânicos voláteis e fumaça ao serem misturados ao ligante, causando danos ao meio ambiente e à saúde do trabalhador. Já as MAMs são misturas produzidas em temperaturas pelo menos 28°C menores do que as misturas à quente (BONAQUIST, 2011).

Segundo Bernucci et al. (2010), as misturas asfálticas são classificadas como misturas a quente, mornas, semi-mornas e a frio. As misturas à quente são usinadas a temperaturas consideradas bastante elevadas, são aquelas em que o agregado é aquecido cerca de 10 a 15 °C acima da temperatura do ligante, que não deve ser superior a 177°C.

As misturas asfálticas a frio, também chamadas de pré-misturados a frio (PMF) consistem na mistura entre agregados pétreos e Emulsão Asfáltica de Petróleo (EAP) realizadas à temperatura ambiente. O uso de EAP se deve basicamente ao fato de que os ligantes asfálticos se encontram no estado semi-sólido à temperatura ambiente, não sendo possível sua mistura com agregados nestas condições (BERNUCCI et al., 2008). Entretanto, as misturas a frio não possuem o mesmo desempenho das misturas usinadas a quente, e são geralmente utilizadas no revestimento de rodovias de baixo tráfego.

As misturas semimornas e mornas são preparadas em temperaturas intermediárias das misturas à quente e à frio, geralmente são executadas com aquecimento parcial dos agregados. As

misturas semimornas diferem da mistura morna pela temperatura de mistura, se a temperatura de mistura na usina é abaixo de 100°C a mistura é semimorna (D'ANGELO et al., 2008). Merighi (2015) reuniu algumas das vantagens da produção de misturas mornas, tais como: habilidade de incorporar maior quantidade de material reciclado, devido a redução da temperatura de mistura, que proporciona menor envelhecimento do ligante, neutralizando a rigidez do ligante do material reciclado; redução do consumo de combustível, como a mistura morna requer aquecimento a temperaturas menores, o consumo de energia no aquecimento é reduzido, diminuindo conseqüentemente o consumo de combustíveis fósseis; e redução do envelhecimento do ligante asfáltico, devido ao menor aquecimento do ligante na produção das misturas.

De acordo com o Departamento de Transportes do Colorado foi empregado as misturas mornas para a pavimentação em montanhas muito altas. Pois, estas misturas possibilitam maiores distâncias de transporte entre a usina e a obra, devido ao menor potencial de resfriamento, permitindo uma melhor compactação e aplicação em regiões de clima frio, em que durante o dia o tráfego intenso impossibilitava os serviços de pavimentação e à noite há a desvantagem das baixas temperaturas (ASCHENBRENER et al., 2011).

Com relação à saúde do trabalhador, os trabalhos executados a altas temperaturas exigem cuidados, uma vez que estudos desenvolvidos pela *Health Effects of Occupational Exposure to Asphalt* apontam os ricos de desenvolver doenças como câncer de pele, leucemia câncer de pulmão entre outros, uma vez que o trabalhador é exposto à voláteis liberados durante a pavimentação da via. Assim, a aplicação de misturas asfálticas mornas traz benefícios para a empresa, uma vez que, as manifestações de tais problemas de saúde nos trabalhadores podem acarretar problemas jurídicos. Logo, a redução das temperaturas diminui a exposição do trabalhador aos compostos voláteis, e a incidência de tais problemas de saúde (ENGELKE et al., 2013).

Segundo Austroads (2012), deve ser levado em consideração que as propriedades das misturas mornas sofrem variações de acordo com diversos fatores, como por exemplo, o tipo de aditivo adotado que interfere nas propriedades mecânicas da mesma, a temperatura de secagem do agregado que afeta a resistência aos danos causados por umidade, e as diferenças de temperatura na mistura podem interferir na durabilidade e desempenho do pavimento.

2.2. Aditivos

Existe uma vasta gama de aditivos disponíveis no mercado para a produção de misturas asfálticas mornas, a escolha desse aditivo de acordo com Cheng et al. (2011), depende de diversos fatores, como por exemplo, a quantidade de mistura que será produzida e o custo do aditivo, além da temperatura de projeto, uma vez que dependendo do tipo de aditivo, as reduções de temperatura irão variar.

As tecnologias existentes para a fabricação de misturas mornas, podem ser derivadas de processos químicos (aditivos surfactantes), orgânicos e de processos como espumejo do asfalto. Cada um desses processos ajuda a melhorar a capacidade de trabalho da mistura a temperaturas mais baixas de diferentes maneiras. Em geral, junto desses elementos para reduzir as temperaturas de usinagem, se faz uma redução da temperatura dos agregados também, o que já implementa uma redução nas temperaturas de usinagem.

Os aditivos surfactantes podem ser introduzidos no ligante ou na forma de emulsão que possui um grande teor de resíduo asfáltico. De acordo com Prowell e Hurlley (2007), os mesmos auxiliam o recobrimento do ligante, atuando na relação do agregado com o ligante e podendo proporcionar melhoras na adesividade. De acordo com Motta (2011) os aditivos surfactantes não alteram a consistência do asfalto, medida nos ensaios de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade, e as reduções de temperatura são na ordem de 30 a 40 °C. Alguns exemplos de aditivos surfactantes são o Evotherm®, Gemul XT14, Rediset™ WMX, Revix™ e Cecabase RT®.

Os aditivos orgânicos, são outra tecnologia de misturas mornas que podem ser misturados ao ligante asfáltico modificando suas propriedades reológicas, quando esses aditivos são submetidos a temperaturas acima do seu ponto de amolecimento, interferem no ligante, reduzindo a viscosidade do mesmo. Segundo Motta (2011), os aditivos orgânicos podem ser inseridos antes ao ligante ou durante a usinagem, podendo reduzir a temperatura da mistura cerca de 30 a 40°C. Segundo Prowell e Hurlley (2007) a escolha do aditivo orgânico e sua proporção, segundo o ponto de amolecimento do aditivo e a temperatura de serviço do pavimento, busca reduzir a possibilidade de deformação permanente e o aparecimento de trincas em baixas temperaturas. Alguns dos exemplos dessa tecnologia são Sasobit., CCBit 113AD, Asphaltan B, óleo de mamona e o óleo de girassol utilizado na presente pesquisa.

De acordo com Prowell e Hurlley (2007), a tecnologia do espumejo do asfalto é obtida quando a água é introduzida no processo de usinagem, quando esta se dispersa no asfalto quente e se transforma em vapor, ocorre a expansão do ligante, ocasionando na redução da viscosidade. Segundo Motta (2011), é possível através do emprego dessa tecnologia reduzir a temperatura de usinagem em até 50°C. Alguns exemplos dessa tecnologia são as zeólitas, Low Energy Asphalt (LEA), Double Berrel Green, Aquablack WMA e WAM-Foam.

Além disso, diversas pesquisas foram realizadas (Asli *et al.*, 2012; Yu *et al.*, 2014; Nayak e Sahoo, 2015 e Ji *et al.*, 2016) com o emprego de aditivos orgânicos a base de óleos vegetais para atuar no rejuvenescimento do RAP. A avaliação reológica sobre o efeito dos rejuvenescedores no ligante envelhecido proporcionou uma diminuição da viscosidade e da rigidez do ligante asfáltico. Segundo essas pesquisas o ligante envelhecido apresentou um comportamento semelhante ao ligante novo em termos de penetração e ponto de amolecimento e ainda possibilitou um aumento da quantidade de RAP dentro das misturas asfálticas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A figura 1 apresenta o fluxograma dos ensaios realizados a partir da mistura do ligante com o óleo de girassol. Previamente foi realizado o ensaio de viscosidade, em seguida os ensaios mecânicos foram os ensaios de: Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral e Módulo de Resiliência.

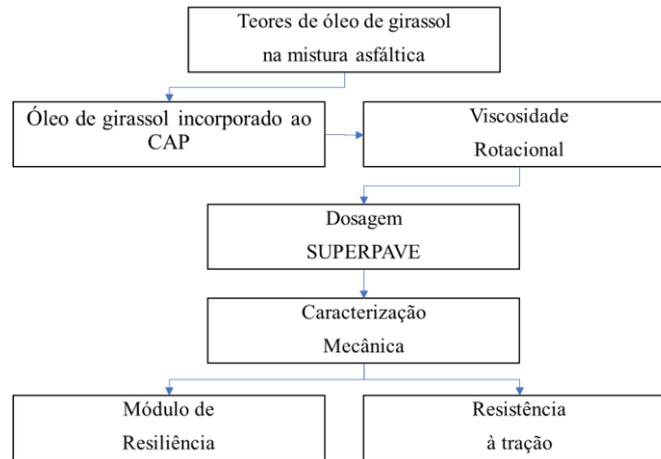


Figura 1: Fluxograma da caracterização mecânica

3.1. Materiais

3.1.1. Ligante asfáltico

O ligante asfáltico utilizado nesta pesquisa foi o CAP 50/70.

3.1.2. Óleo de girassol

O aditivo utilizado foi o óleo de girassol da marca Liza e foi adotado devido ao seu potencial como aditivo orgânico redutor de viscosidade. Além disso, o óleo de girassol é um material de fácil acesso no país e possui um custo mais baixo, principalmente, quando comparado com outros aditivos orgânicos já utilizados para a produção de misturas mornas, como o CCBit, Asphaltan-B e o Sasobit.

3.1.3. Agregados

Os agregados graúdos utilizados nessa pesquisa foram a brita 19mm e a brita 12,5mm. Os agregados miúdos empregados foram o pó de pedra e areia. O filer utilizado foi a cal hidratada da marca MegaO.

3.2. Métodos

3.2.1. Mistura do CAP com o óleo de girassol

Para o processo de produção do CAP modificado com óleo de girassol, foi utilizado um agitador mecânico FISATOM, Modelo 72. Onde foi adicionado o óleo em teores de 1,0; 2,0 e 3,0% em massa de ligante a uma temperatura de 135°C e uma velocidade máxima de 410 rpm durante 20 minutos. Os componentes foram misturados com agitação frequente, tomando-se cuidado para não exceder a temperatura e o tempo de reação. A escolha destes teores foi baseada em uma análise das conclusões de Silva (2016).

Após a mistura do CAP com o aditivo foi executado o ensaio de viscosidade rotacional. Este ensaio foi realizado em viscosímetro *Brookfield*, modelo DVII com controlador de temperatura THERMOSEL. O ensaio caracteriza as propriedades reológicas dos ligantes convencionais e modificados durante manuseio do asfalto, nas temperaturas de 135, 155 e 170°C, a partir do torque necessário para rotacionar um *splindle* imerso na amostra de aproximadamente 8 gramas

de asfalto à velocidade de 20, 50 e 100 rpm respectivamente. O ensaio foi realizado segundo a norma NBR 15184/2007.

3.2.2. Dosagem SUPERPAVE

A dosagem *SUPERPAVE* (*SUPERior PERforming asphalt PAVEMENTs*) foi realizada com o CAP puro visando a determinação do teor de ligante asfáltico e de agregados de projeto. O primeiro passo da dosagem compreendeu a escolha de três composições granulométricas com os agregados disponíveis (brita 19, brita 12,5, areia, pó de pedra e filer), uma superior, uma intermediária e uma inferior dentro da Faixa C de granulometria do DNIT, incluindo os conceitos de Pontos de Controle e Zonas de Restrição.

3.2.3. Mistura do CAP com o óleo de girassol

A compactação dos corpos de provas foi realizada por amassamento com o auxílio do compactador giratório (Figura 2) segundo a norma ASTM D 6925-09 (Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Hot Mix Asphalt Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor).



Figura 2: Compactador Giratório SUPERPAVE

Após a definição das composições granulométricas das três curvas de *Fuller* superior, intermediária e inferior e a partir das proporções de agregados associado às características físicas dos agregados, obteve-se o teor inicial de ligante de 5%. Foram moldados 18 corpos de prova, para fazer a verificação do volume de vazios obtido, sendo 6 corpos-de-prova para cada curva granulométrica, divididos em dois CPs para Ni, dois para Np e dois para Nm. Na Tabela 1 estão listados os teores de ligantes iniciais, bem como uma síntese dos resultados iniciais, os quais foram essenciais para a definição da curva de projeto (Curva Inferior), a qual teve os parâmetros volumétricos mais próximos dos critérios da dosagem *SUPERPAVE*. A determinação do teor inicial de ligante foi realizada apenas para o ligante CAP 50/70 puro.

Tabela 1: Parâmetros volumétricos obtidos em função dos Teores de ligantes iniciais calculados

Mistura	Ligante %	% Gmm N _{INICIAL}	% Gmm N _{PROJETO}	% Gmm N _{MÁXIMO}	VAM (%)	Vv(%)
Inferior	5,0	92,83	95,73	97,27	14,82	4,27
Intermediária	5,0	93,12	97,37	97,89	13,70	2,63
Superior	5,0	88,66	94,24	95,21	17,37	5,76
Critérios da dosagem	-	<89%	96%	<98%	13 mín	4%

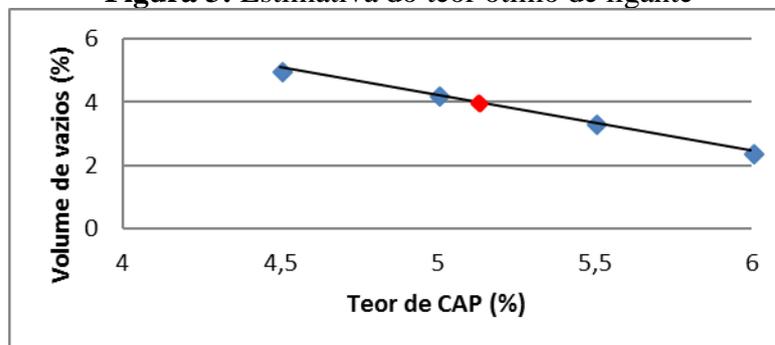
Posteriormente foram compactados os corpos de prova com os parâmetros da curva inferior, que foi a curva escolhida em virtude dos seus volumes de vazios ser o mais próximo de 4% como demonstra a Tabela 1. Com variação sobre teor inicial de 5,0 % nas seguintes proporções: $\pm 0,5\%$ e $+1\%$, ou seja: 4,5%; 5,0%; 5,5% e 6,0%. Na Tabela 2 são apresentados os resultados dos parâmetros volumétricos da Segunda Fase da Dosagem. Estes parâmetros permitiram a definição do teor de projeto, o qual foi usado na composição das misturas para a avaliação das propriedades mecânicas.

Tabela 2: Parâmetros volumétricos obtidos em função dos Teores de ligantes iniciais calculados

Ligante %	%GMM N _{PROJETO}	VAM (%)	VV (%)	RBV (%)	Massa específica(G/CM ³)
4,5	94,95	14,52	5,05	72,04	2,565
5,0	96,12	14,47	3,88	73,47	2,536
5,5	96,62	14,75	3,38	73,09	2,514
6,0	97,58	14,29	2,42	72,60	2,503
Crítérios da dosagem	96	13 mín	4,00	65 a 75	-

Nesta etapa ainda não foi possível encontrar o volume de vazios de 4%, então, a partir da curva Teor de ligante em função do volume de Vazios (Figura 3), foi estimado um novo teor de 5,1% que atendesse a este critério, e novamente foram moldados seis corpos de prova, desta vez, todos no Np com 100 giros, para a verificação das propriedades volumétricas da mistura compactada e confirmação do valor de 4% de Volume de Vazios.

Figura 3: Estimativa do teor ótimo de ligante



Para realização dos ensaios mecânicos ficou definido que a partir da dosagem encontrada para o ligante CAP 50/70 puro, esta também seria utilizada para a moldagem dos corpos de prova com os diferentes teores de aditivo nos ligantes, ou seja, que o teor de aditivo foi incorporado na porcentagem encontrada pela dosagem para o ligante CAP 50/70 puro. Assim pode-se comparar as características mecânicas do ligante puro e com a presença do aditivo para a mesma porcentagem de ligante na mistura. A compactação das misturas asfálticas foi realizada segundo a metodologia *SUPERPAVE*, com energia de 100 giros.

3.2.4. Caracterização Mecânica

Os ensaios mecânicos foram os ensaios de Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral (RT) e os ensaios de Módulo de Resiliência (MR). Para realização destes ensaios foram moldados corpos-de-prova com teor de ligante obtido por meio da dosagem

SUPERPAVE e com a incorporação do óleo de girassol nos teores de 1, 2 e 3% em massa de ligante. Os ensaios de caracterização mecânica na presente pesquisa seguiram as normas descritas na Tabela 3.

Tabela 3: Caracterização mecânica

Característica	Métodos
Resistência à Tração Indireta	DNIT ME 138/94
Módulo de Resiliência	NBR 16018/2011

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Caracterização do ligante asfáltico

4.1.1. Viscosidade Rotacional

Verifica-se através da Figura 4 a redução da viscosidade do ligante, diante do aumento do teor de óleo de girassol. A menor viscosidade apresentada pelo ligante modificado ocorre para o maior teor de óleo de girassol (3,0%). Este comportamento indica uma redução nas temperaturas de mistura e compactação. Ribeiro (2011) obteve resultados semelhantes quando estudou a incorporação do Líquido da Castanha de Caju (LCC) ao ligante nos seguintes teores: 0,5%, 1,0%, 1,5% e 2,0%, obtendo as maiores reduções da viscosidade para a adição de 2% do líquido.

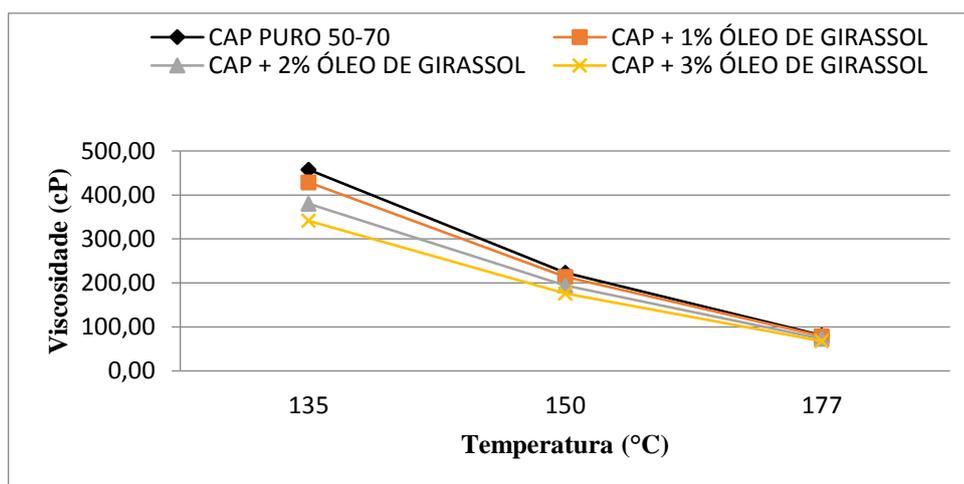


Figura 4: Viscosidade rotacional

A maior variação de temperatura (Tabela 4) ocorreu entre o ligante puro e com adição de 3,0% de óleo de girassol chegando a reduzir 6°C nas temperaturas de mistura e de compactação. Mesmo não sendo uma redução significativa, ainda assim possibilita uma economia de energia durante o aquecimento do ligante asfáltico e dos agregados na usina de asfalto. Desse modo, como a viscosidade do ligante modificado não reduziu substancialmente, as misturas asfálticas estudadas não se classificam em misturas asfálticas mornas.

Tabela 4: Temperaturas de mistura e compactação.

Temperatura	CAP puro	CAP + 1% de óleo de girassol	CAP + 2% de óleo de girassol	CAP + 3% de óleo de girassol
Mistura (°C)	157,3	156,3	154,0	151,3
Compactação (°C)	145,5	144,5	141,5	139,5

Em estudo realizado por Souza (2012) a adição do óleo de mamona no teor de 5,0% a mistura reduziu a viscosidade do ligante, e conseqüentemente possibilitou uma redução das temperaturas de mistura e de compactação em média de oito graus centígrados (8°C). Lima *et al.* (2009) adicionaram o LCC ao ligante e verificaram resultados semelhantes aos valores apresentados na Tabela 2, pois constataram uma redução das temperaturas de mistura e compactação em relação ao ligante convencional de 8°C para amostras de CAP + 4,5% SBS + 1% LCC se comparado ao ligante convencional.

Mesmo a presença do óleo de girassol não tendo proporcionado mudanças significativas nas viscosidades das amostras, alguns aditivos de MAMs têm apresentado outros benefícios, como o aumento da lubricidade do ligante asfáltico. Apesar desta propriedade não ser medida no ensaio de viscosidade, a mesma pode ser verificada a partir do aumento da trabalhabilidade do ligante em temperaturas mais baixas que as obtidas com o ensaio de viscosidade. Ribeiro (2011) verificou o aumento da lubricidade a partir da utilização do aditivo de MAM. Ainda assim, a presente pesquisa adotou o método tradicional de determinação das temperaturas de mistura e compactação que utiliza a viscosidade de referência para misturas à quente, por não existir um ensaio normatizado que determine as temperaturas de produção que considere a lubricidade, possivelmente existente em alguns aditivos de MAMs.

Além disso, diversos autores relataram (Mallick *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2012; Genesseeux, 2015 e Li e Gibson, 2016) que alguns aditivos de MAMs contribuíram para a redução da viscosidade e ainda possibilitaram a reposição de compostos aromáticos. Essa reposição consiste em devolver ao asfalto as características originais de consistências perdidas pelo envelhecimento do ligante ao longo do tempo de serviço do pavimento.

4.2. Caracterização Mecânica

4.2.1. Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral

Pelo gráfico da Figura 5 é possível visualizar que a perda de resistência à tração dos corpos de prova está relacionada à diminuição da temperatura de moldagem. As amostras do ligante CAP 50/70 puro foram produzidas sob temperatura mais elevada demonstrando valores mais elevados de resistência à tração.

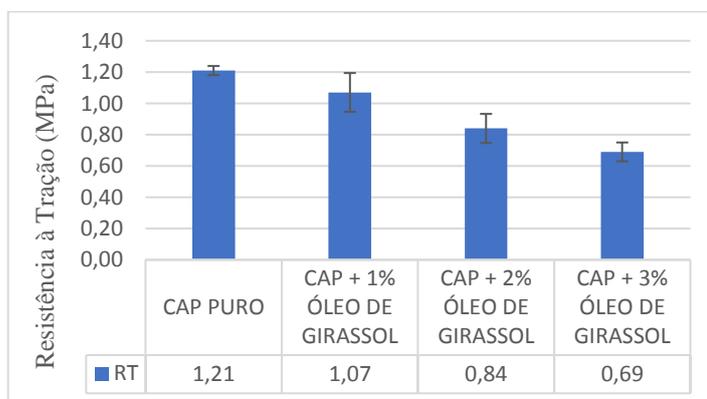


Figura 5: Resultados do Ensaio de Resistência à Tração Indireta por Compressão Diametral

Souza (2012) encontrou resultados de resistência à tração similares ao deste trabalho, pois a presença do aditivo também proporcionou uma diminuição da RT. O autor apresentou uma RT mínima de 0,70 MPa para a adição de 9% de óleo de mamona adicionado ao ligante. Portanto, os valores obtidos são maiores que os estabelecidos pelas especificações.

Pilati (2008) analisou os efeitos do resíduo de óleo de xisto sobre algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas e verificou que a tendência da adição do óleo de xisto sobre a resistência à tração é de reduzi-la linearmente. Onde, a maior redução é apresentada pela mistura com adição de 14% de óleo, nos teores de 6,0% e 6,5%, onde o valor dessa propriedade é reduzido em 57%, aproximadamente, em relação a mistura de referência.

4.2.2. Módulo de Resiliência

Os resultados indicaram que com o acréscimo do teor de girassol utilizado houve uma diminuição dos valores de MR, expressando perda de rigidez. Logo, existe um teor considerado ótimo de aditivo a ser adicionado ao ligante puro, a ser estabelecido por meio de parâmetros que não proporcione aumento significativo na rigidez da mistura asfáltica e assim alcance as características desejadas. Nos resultados apresentados na Figura 6, percebe-se que a adição no teor de 3% de óleo de girassol proporcionou uma maior perda de rigidez a mistura.

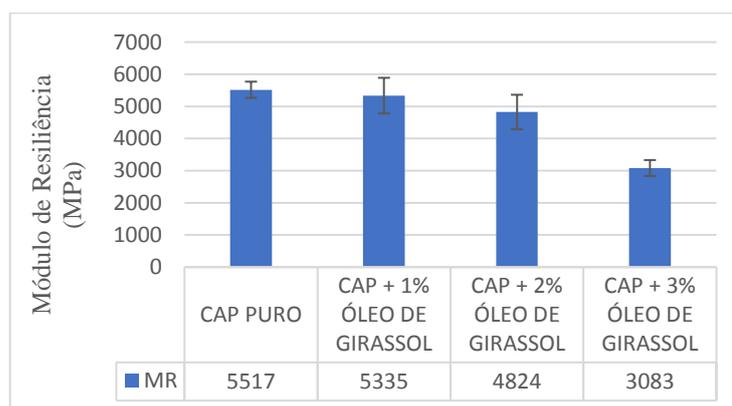


Figura 6: Resultados do Ensaio de Módulo de Resiliência

Pilati (2008) também observou que as misturas com adição de óleo de xisto apresentaram a tendência de redução do módulo de resiliência das misturas, com efeito, aproximadamente linear. O aumento de 7% para 14% de óleo proporcionou uma redução significativa no valor da propriedade.

De acordo com Oliveira (2014) e com os dados apresentados em sua pesquisa é possível perceber que o MR decresce com a diminuição da temperatura e compactação, pois o MR diminuiu 18% da mistura pura de referência para a mistura modificada com uma temperatura 20°C mais baixa. Da mistura modificada, cuja diferença é de 40°C para a mistura pura, esse decréscimo do MR foi de 21%. Logo, a redução dos resultados de MR da mistura produzida a uma temperatura de 20°C para as misturas produzidas a 40°C foi de apenas 3°C. Não se sabe ao certo se o decréscimo do módulo de resiliência teve a ver somente com a adição do ligante ou uma combinação deste com a diminuição da temperatura. Logo, o autor que utilizou o CCBIT 113 AD como aditivo para produção de MAM e realizou uma comparação com a utilização do mesmo aditivo e no mesmo teor a uma temperatura mais baixa, percebeu que é possível

diminuir ainda mais a temperatura da mistura com ligante modificado mantendo-se assim suas características físicas praticamente inalteradas.

Em estudo realizado por Souza (2012) não foi possível observar a mesma tendência de diminuição de MR diante do aumento do teor de óleo de mamona. Segundo o autor, os valores de MR situaram-se entre 2.000 a 4.000 MPa. Porém, a presente pesquisa obteve valores de MR situados numa faixa entre 3.000 e 6.000 MPa. De acordo com Bernucci *et al.* (2008), os valores típicos de misturas asfálticas a 25°C estão situados na faixa de 2.000 a 8.000 MPa. Os valores encontrados neste trabalho para as misturas asfálticas com ligante puro e com o aditivo permaneceram dentro do intervalo citado.

5. CONCLUSÕES

As temperaturas de mistura e de compactação reduziram linearmente de acordo com o aumento do teor de aditivo estudado, a maior redução de temperatura ocorreu para o teor de 3% de óleo de girassol com uma diminuição de 6°C nas temperaturas de produção, propiciando uma economia de energia durante o aquecimento do ligante asfáltico e dos agregados na usina de asfalto. Porém, como a viscosidade do ligante modificado não reduziu substancialmente, as misturas asfálticas estudadas não se classificaram em misturas asfálticas mornas.

As misturas asfálticas modificadas com o óleo de girassol obtiveram menor resistência à tração indireta, comparando à mistura de referência, bem como o módulo de resiliência também foi inferior. Mesmo com esta redução, todos os resultados de RT e MR apresentaram valores dentro dos critérios preconizados pelas normas adotadas. Apesar do teor de 3% de óleo de girassol ter proporcionado maior redução de temperatura, ele foi o que apresentou maior perda de rigidez. Portanto, dentre os teores estudados, o teor de 2% de óleo de girassol foi o que proporcionou maior redução de temperatura sem maiores perdas de desempenho quanto as propriedades mecânicas.

Agradecimentos

- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECA/ UFCG; e
- aos colegas do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) do Departamento de Engenharia Civil, onde este trabalho foi desenvolvido, por todo o apoio e contribuição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 15184 (2004) Materiais Betuminosos – *Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando viscosímetro rotacional*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo – SP.
- ASCHENBRENER, T.; SCHIEBEL, B.; WEST, R. *Three-year of the Colorado Department of Transportation's warm mix Asphalt experimental feature on I-70 in Silverthorne*, Colorado. National Center of Asphalt Technology, Auburn, Alabama. 2011.
- ASLI, E. AHMADINIA, M. ZARGAR, M. R. KARIM. *Investigation on physical properties of waste cooking oil – Rejuvenated bitumen binder*, Constr. Build. Mater., vol. 37, pp. 398-405, 2012.
- AUSTROADS. *Review of overseas trials of warm mix asphalt pavements and current usage by Austroads members*. Austroads. Sydney, 2012.
- BERNUCCI L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI J. A. P., SOARES J. B. (2008) *Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros*. 1ed. Rio de Janeiro: ABEDA, 501p.
- BONAQUIST, R. *Mix design practices for warm mix Asphalt*. NCHRP report 691. National Cooperative Highway Research Program. Transportation Research Board. Washington D. C. 2011.
- CHENG, D.; HICKS, R. G.; TEESDALE, T. *Assessment of warm mix technologies for use with asphalt rubber paving applications*. In: Transportation Research Board Annual Meeting, 2011. Washington D.C.

- D'ANGELO, J., HARM, E., BARTOSZEK, J., BAUMGARDNER, G., CORRIGAN, M., COWSERT, J., HARMAN, T., JAMSHIDI, M., JONES, W., NEWCOMB, D., PROWELL, B., SINES, R. AND YEATON, B. *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. 2008.
- ENGELKE, D. C.; KLAGENBERG, K. E.; JOHNSTON, M. G.; BRITO, L. A. T.; CERATTI, J. A. P.; RIBEIRO, R. Z. *Análise dos Benefícios das Misturas Mornas com Aditivo Surfactante Líquido*. Revista Fundações e Obras Geotécnicas. Pag. 48 - 52. Editora Rudder, setembro 2016.
- GENNESSEAU, M. M. L. *Avaliação da Durabilidade de Misturas Asfálticas a Quente e Mornas Contendo Material Asfáltico Fresado*. Tese de doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2015.
- JI, H. YAO; Z. SUO; Z. YOU; H. LI; S. XU; L. SUN. *Effectiveness of Vegetable Oils as Rejuvenators for Aged Asphalt Binders*. Journal of Materials in Civil Engineering, D4016003, 2016.
- LI, X., & GIBSON, N. *Comparison of asphalt mixture performance tester fatigue characteristics with full scale pavement cracking for recycled and warm mix asphalts*. Washington, DC: Transportation Research Board Compendium. 2016
- LIMA, A. P. D.; RODRIGUES, F. O.; AMONI, B.; BRINGEL, R. M.; SOARES, J. B.; SOARES, S. A.; RICARDO, N. M. P. S. *Efeito da Adição de Organovermiculita e Líquido da Castanha de Caju (LCC) na Estabilidade de Estocagem de Cimento Asfáltico de Petróleo Modificado por SBS*. In: X Congresso Brasileiro de Polímeros (CBPOL), Foz do Iguaçu, PR. 2009.
- MALLICK, R. B.; KANDHAL, P.S.; BRADBURY, R. L., *Using Warm-Mix Asphalt Technology to Incorporate High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement Material in Asphalt Mixtures* - Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2008.
- MERIGHI, C. F. *Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimento com adição de borracha moída de pneu*. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil. 2015.
- MOTTA, R. S. *Estudo de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos para redução de emissões de poluentes e de consumo energético*. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, Brasil, 2011.
- NAYAK, U.; C. SAHOO. *A rheological study on aged binder rejuvenated with Pongamia oil and Composite castor oil*. Int. J. Pavement Eng., pp. 1-13, 2015.
- OLIVEIRA, R. B. *Estudo sobre o efeito do ccbt-113ad no comportamento mecânico de misturas asfálticas*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil, 2014.
- PILATI, F. *Análise dos Efeitos da Borracha Moída de Pneu e do Resíduo de Óleo de Xisto sobre Algumas Propriedades Mecânicas de Misturas Asfálticas Densas*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, SP, 2008.
- PROWELL, B. D.; HURLEY, G. C.; FRANK, B. *Warm-mix asphalt: Best practices. 3rd edition. National Asphalt Pavement Association*. Quality Improvement Publication, 125, 3rd edition. Lanham, 2012.
- RIBEIRO, E.A. *O efeito da modificação de ligante asfáltico com o líquido da castanha de caju (LCC) na resistência ao dano por umidade em misturas asfálticas*. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.
- SALES, P. de M. *Avaliação das Características Físicas e Mecânicas de Misturas Asfálticas Modificadas com Adição do CCBIT*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2015.
- SILVA, G. G. da. *Estudos Reológicos de Aditivos Utilizados na Fabricação de Misturas Mornas*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, 2016.
- YU, M. ZAUMANIS, S. DOS SANTOS, L. D. *Poulikakos. Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders*. Fuel, vol. 135, pp. 162-171, 2014.

Jeovanesa Régis Carvalho (jeovanesaregis@gmail.com)

Adriano Elísio de Figueiredo Lopes Lucena (lucenafb@uol.com.br)

Thamires Dantas Guerra (thamires_guerra@hotmail.com)

Rita Flávia Régis Queiroz (flaviarq18@gmail.com)

Thalita Maria Ramos Porto (thalita_porto8@hotmail.com)

Daniel Beserra Costa (daniel.beserra@gmail.com)

LEP - Laboratório de Engenharia de Pavimentos, Departamento de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande

Av. Aprígio Veloso, 882 - Bloco CT - CEP 58.429-140 - Bairro Universitário - Campina Grande - PB - Brasil