

Efeitos do uso da cera de carnaúba como aditivo redutor de temperaturas de mistura e compactação no desempenho mecânico de misturas asfálticas

Effects of the use of carnauba wax as a reducing additive mixing and compaction temperatures on the mechanical performance of asphalt mixtures

Thalita Maria Ramos Porto de Moraes¹, Adriano Elísio de Figueirêdo Lopes Lucena¹, Osires de Medeiros Melo Neto¹, Tássila Ramos Porto¹, Daniel Beserra Costa¹, Flávia do Socorro de Sousa Carvalho¹

¹Universidade Federal de Campina Grande, Departamento de Engenharia Civil, Laboratório de Engenharia de Pavimentos. Rua Aprígio Veloso, 882, 58428-830, Campina Grande, PB, Brasil.
e-mail: thalita_porto8@hotmail.com, lucenafb@uol.com.br, osiresdemedeiros@gmail.com, tassilaporto@gmail.com, daniel.beserra@gmail.com, flaviasousa.ec@hotmail.com

RESUMO

A fim de minimizar o impacto ambiental ocasionado pelas misturas asfálticas a quente surgiram as chamadas misturas asfálticas mornas. Este trabalho investigou o uso da cera de carnaúba tipo 1, nos teores de 1, 2 e 3% por peso de ligante asfáltico classificado com penetração 50/70, como aditivo incorporado às misturas asfálticas para a obtenção de misturas mornas. Os resultados apontaram uma redução de até 9 °C na temperatura de mistura e 7 °C na temperatura de compactação com o uso de 2 e 3% de cera. As misturas asfálticas foram dosadas pelo método *Superpave* e submetidas a ensaios mecânicos: ensaios de resistência à tração, dano por umidade induzida, módulo de resiliência, módulo dinâmico e vida de fadiga. A incorporação de 2% acarretou resultados superiores quanto ao desempenho mecânico das misturas asfálticas, principalmente ao dano por umidade induzida, e uma maior redução das temperaturas de mistura e compactação. Portanto, as misturas cumpriram as exigências mecânicas e se apresentaram viáveis tecnicamente, podendo contribuir para mitigação de danos ambientais como a redução do consumo de energia e as emissões de CO₂ em usinas asfálticas.

Palavras-chave: Misturas Asfálticas Mornas; Ligante Asfáltico; Desempenho Mecânico; Material Alternativo; Test t; Aditivo Orgânico.

ABSTRACT

In order to minimize the environmental impact caused by hot asphalt mixtures, the so-called warm asphalt mixtures emerged. This work investigated the use of type 1 carnauba wax, at levels of 1, 2, and 3% by weight of asphalt binder classified with penetration 50/70, as an additive incorporated into asphalt mixtures to obtain warm mixtures. The results showed a reduction of up to 9 °C in the mixing temperature and 7 °C in the compaction temperature with the use of 2 and 3% wax. The asphalt mixtures were dosed by the *Superpave* method and submitted to mechanical tests: tensile strength tests, induced moisture damage, modulus of resilience, dynamic modulus and fatigue life. The incorporation of 2% resulted in superior results in terms of the mechanical performance of the asphalt mixtures, mainly in terms of induced moisture damage, and a more significant reduction in mixing and compaction temperatures. Therefore, the mixtures complied with the mechanical requirements and were technically viable, contributing to the mitigation of environmental damages such as the reduction of energy consumption and CO₂ emissions in asphalt plants.

Keywords: Warm Asphalt Mixtures; Asphalt Binder; Mechanical Performance; Alternative Material; T-test; Organic Additive.

1. INTRODUÇÃO

A *Hot Mix Asphalt* (HMA) é produzida em temperaturas elevadas em torno de 140° a 190°, com isso necessita de grande quantidade de combustíveis fosseis para aquecer agregados e ligantes asfáltico [1–4]. Isso, portanto,

resulta na emissão de gases que aceleram o efeito estufa, poluindo o meio ambiente [5, 6]. A partir de tal preocupação ambiental surgiram as chamadas *Warm Mix Asphalt* (WMA). Esse tipo de tecnologia surgiu na Europa em 1997 [7], onde foi imposta uma série de restrições em relação as emissões de gases poluentes, sendo necessária idealizar novas técnicas que diminuam os impactos ambientais que tais atividades e materiais da construção civil causam. A WMA apresenta temperatura de mistura na faixa de 20 a 40 °C mais baixa do que a HMA [8–10].

Além disso, segundo estudos [11–14], esse tipo de mistura permite aumentar a distância de transporte e o produto final a uma temperatura de produção menor, permitindo que o pavimento asfáltico seja construído durante a estação fria, podendo vir a reduzir o envelhecimento (devido à menor oxidação e volatilização no processo de construção) do ligante asfáltico. Em termos de resistência do revestimento asfálticos, as misturas a quente são superiores e, geralmente, são utilizadas como revestimento de rodovias em que se espera um elevado tráfego de veículos. Já as misturas a frio, são mais utilizadas em rodovias com menor tráfego de veículos e sua principal aplicação está em operações de recapeamento, conservação e manutenção de estradas [15].

No entanto, as WMAs são uma tecnologia que vem sendo considerada um método mais limpo de produção de misturas asfálticas quando comparado às misturas asfálticas a quente (HMA), uma vez que as WMAs necessitam de temperaturas mais baixas, demandando menor consumo energético e reduzindo o impacto ambiental. Além de proporcionar menor viscosidade do ligante e a consequente melhoria da trabalhabilidade da mistura asfáltica, com menor emissão de poluentes e melhores condições de trabalho [16, 17].

A carnaubeira é uma planta originária do semiárido nordestino, é bastante comum em solos do tipo argilosos, apresentando-se resistentes as secas severas e com grande longevidade (aproximadamente 200 anos). Tendo papel fundamental no bioma da caatinga, responsável pela conservação do solo e pela proteção dos rios, evitando fenômenos como erosão e assoreamento dos rios [18]. Apresenta-se com maior ocorrência nos estados do Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte, com grande importância econômica, social e ecológica. A cera de carnaúba é obtida das folhas de uma palmeira americana designada *Copernicia* (ou *Copernica*) *Cerifera*, apresenta-se amorfa, dura, de alto ponto de fusão, firme e lustrosa. Possui odor agradável e quebra com uma fratura limpa [19, 20].

A classificação da cera de carnaúba em diferentes tipos auxilia na destinação e no uso adequado deste produto nos diferentes tipos de setores da indústria e comércio. Segundo RIZZO [20] existe quatro tipos de cera de carnaúba, a diferença química entre elas deve-se a forma de extração e industrialização. A cera de carnaúba do tipo 1 é obtida do pó do “olho” das carnaubeiras e apresenta cor amarelo-ouro. É geralmente utilizada em indústrias farmacêuticas, cosméticas, alimentícias e em emulsões. Já as outras 3 opções (tipo 2, tipo 3 e tipo 4), são obtidas do pó da palha das carnaubeiras e todas se apresentam na forma de escamas. A cera do tipo 2 apresenta cor amarelo-laranja, ela é refinada, clareada e geralmente é utilizada em tintas de impressoras e códigos de barras. A cera do tipo 3 apresenta cor marrom escuro e é utilizada em tintas, vernizes e cera para polimentos. A cera do tipo 4 tem coloração preta e é utilizada na produção de papel carbono. O Brasil é o principal produtor de cera de carnaúba do mundo e atualmente toda a sua produção de cera do tipo 2 é destinada à exportação.

FEITOSA *et al.* [21] investigaram o uso da cera de carnaúba do tipo 4 nos teores de 3 e 5% como modificador redutor de viscosidade do ligante asfáltico classificado com penetração 50/70 por meio de ensaios reológicos como viscosidade rotacional, performance grade e multiple stress creep and recovery. Os resultados apontaram que esse aditivo melhorou a resposta elástica do ligante asfáltico no teor de 5% e aumento na resistência à deformação permanente. As misturas asfálticas modificadas pela cera de carnaúba tipo 4 apresentaram redução de 25 a 35 °C nas temperaturas de mistura e compactação.

SILVA *et al.* [22] realizou um estudo reológico a respeito do uso do aditivo CCBit e cera de carnaúba do tipo 4 como modificador redutor de viscosidade do ligante asfáltico classificado com penetração 50/70. Os teores utilizados foram 1.0, 1.5, 2.0 e 2.5%. A adição de CCBit aumentou a temperatura de performance grade (PG) do ligante asfáltico em até dois degraus, passando de 64 °C para 76 °C com o uso de 2% e a cera de carnaúba reduziu um degrau com o uso de 2.0 e 2.5%, reduzindo para 58 °C. Os autores apontaram 2% como sendo o teor ideal para a cera de carnaúba, pois apresentou melhor trabalhabilidade e aumentou a resistência do ligante asfáltico permitindo seu uso na categoria tráfego pesado.

A literatura tem apresentado estudos de ligante asfáltico com o uso de cera de carnaúba do tipo 4, mas um questionamento sobre quais efeitos o uso de outro tipo de cera de carnaúba acarretaria ao ligante asfáltico é válido. A fim de preencher essa lacuna, a cera de carnaúba tipo 1 foi utilizada como aditivo para produção de misturas asfálticas mornas, buscando diminuição da temperatura e gasto energético no processo de produção. A cera de carnaúba tipo 1 foi incorporada ao ligante asfáltico classificado com penetração 50/70 nos teores de 1, 2 e 3% por peso de ligante, onde as amostras de ligante foram submetidas a ensaios físicos empíricos e as misturas asfálticas produzidas com esses ligantes foram avaliadas quanto ao desempenho mecânico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico descreve os materiais utilizados neste estudo para produzir as misturas asfálticas mornas, bem como os procedimentos realizados para avaliar o desempenho físico empírico do ligante asfáltico modificado com a cera de carnaúba tipo 1 e os ensaios mecânicos realizados com essas misturas asfálticas modificadas.

2.1. Materiais

2.1.1. Ligante asfáltico

Nesta pesquisa utilizou-se o ligante asfáltico classificado com penetração 50/70 e grau de desempenho PG 64-XX, fornecido pela empresa Rocha Cavalcante, localizada na cidade de Campina Grande, Brasil. A escolha desse tipo de ligante asfáltico foi à vasta utilização na região nordeste do Brasil.

2.1.2. Agregados

Os agregados graníticos utilizados nesta pesquisa foram a brita 19.0 mm, brita 12.5 mm e o pó de pedra, fornecidos também pela empresa Rocha Cavalcante. As amostras foram separadas por quarteamento, método B da norma DNIT PRO 199 [23]. A areia e o filer (cal hidratada) foram comprados no comércio local na cidade de Campina Grande. A amostra de areia foi separada por amostragem de pilha de estoque em miniatura, método C da designação DNIT PRO 199 [23]. A Tabela 1 apresenta os dados de caracterização de acordo com as normas estabelecidas.

Os valores de massa específica real e aparente dos agregados foram realizados com duas repetições, e se encaixaram dentro do esperado para cada tipo de material. Estes dados foram utilizados para a determinação do teor de projeto de ligante asfáltico na dosagem *Superpave* (*Superior Performing Pavements*). A Figura 1 apresenta a curva de distribuição dos grãos para cada agregado, onde todos apresentaram graduação uniforme.

2.1.3. Cera de Carnaúba

O aditivo cera de carnaúba utilizado nesta pesquisa foi adquirido por meio da empresa Ceras Microcristal, do tipo CT1 (classificação fornecida pelo fabricante) em tom amarelado, obtida a partir do processo de centrifugação, sabendo que esse é o seu estado de maior maturação, com um ponto de fusão de 86 °C.

Tabela 1: Resultados da caracterização dos agregados.

AGREGADOS	BRITA 19.0 mm	BRITA 12.5 mm	AREIA	PÓ DE PEDRA	NORMA
Massa Específica Real (g/cm ³)	2.82	2.75	2.52	2.43	ASTM C 127 [24]
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	2.85	2.79	2.47	2.42	ASTM C 127 [24]
Abrasão Los Angeles (%)	26.05	25.40	–	–	ASTM C 131 [25]

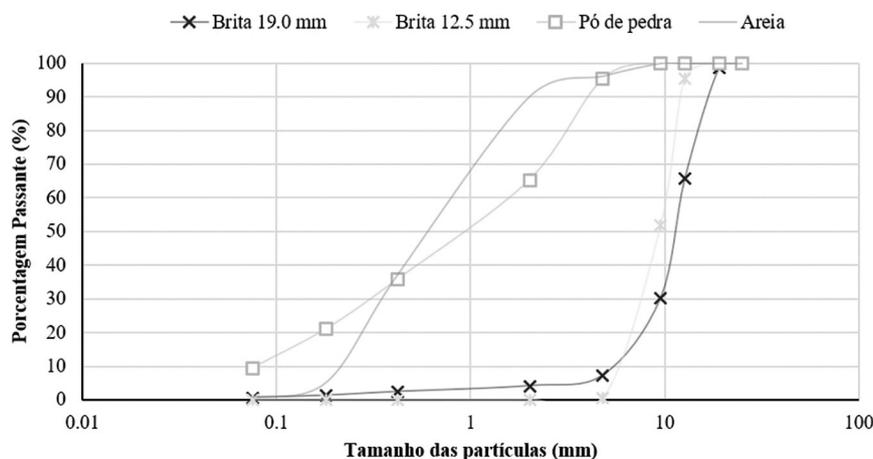


Figura 1: Curvas de distribuição do tamanho das partículas dos agregados.



Figura 2: (a) Cera de carnaúba antes do procedimento de peneiramento, (b) Cera de carnaúba após procedimento de peneiramento.

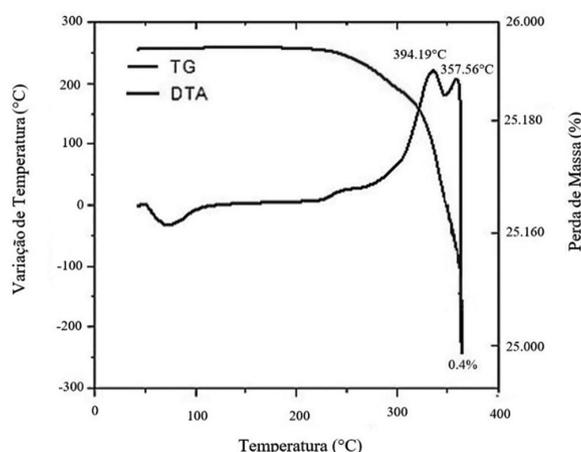


Figura 3: Curvas TG e DTA.

SILVA [26] descreve em seu trabalho a metodologia para preparação e uso da cera de carnaúba: (i) a cera deve ser moída com auxílio da mão de gral, e (ii) passar posteriormente na peneira de número 40 (0.42 mm) com o objetivo de facilitar a fusão do ligante asfáltico com a cera. A Figura 2 apresenta a cera de carnaúba antes e após o procedimento de peneiramento.

Para se obter um melhor conhecimento da cera de carnaúba, em relação à estrutura e características físicas e químicas, foram executados alguns ensaios de caracterização como Análise Termogravimétrica (TG) e Análise Térmica Diferencial (DTA). A análise térmica diferencial (DTA) e termogravimétrica (TG) da cera de carnaúba foram realizadas em equipamento BP Engenharia, Modelo RB 3000, operando a 12.5 °C/min. A temperatura máxima utilizada nas análises térmicas foi de 400 °C e o padrão utilizado nos ensaios de DTA foi o óxido de alumínio (Al₂O₃) calcinado.

Assim, de acordo com os resultados obtidos para a análise termodiferencial (Figura 3), verifica-se que a cera de carnaúba apresenta estabilidade térmica até aproximadamente 285 °C, indicando que a esta temperatura as propriedades químicas e físicas se mantêm inalteradas e que sua utilização em misturas asfálticas contribuirá para a redução das temperaturas de usinagem e compactação. Quanto à análise termogravimétrica (Figura 3) verificou-se uma perda de massa total de 0.4%, correspondente a 0.104 g referente ao processo de decomposição térmica da cera de carnaúba.

2.2. Métodos

2.2.1. Modificação do ligante asfáltico

Na etapa de modificação do ligante asfáltico foi utilizado um agitador mecânico FISATOM, modelo 722 D, seguindo os seguintes passos: (i) o ligante asfáltico foi aquecido a uma temperatura de 130 °C por aproximadamente 90 minutos, (ii) em seguida foi adicionado a um béquer e colocado sob o agitador mecânico,

submetido a uma rotação de aproximadamente 600 rpm, (iii) após a estabilização na temperatura de 140 °C, o aditivo foi adicionado, separadamente, na proporção por peso do ligante, e (iv) as rotações foram elevadas para 1000 rpm por cerca de 30 minutos para homogeneização da amostra. Após esse processo, observou-se amostras homogeneizadas sem a presença de grumos. A amostra de ligante asfáltico puro foi denominada como amostra de referência e as amostras de ligante modificadas pela cera de carnaúba como 1%CC, 2%CC e 3%CC para os teores adicionados de 1, 2 e 3%, respectivamente.

2.2.2. Análise física empírica do ligante asfáltico

As amostras obtidas no processo de modificação do ligante asfáltico foram submetidas a ensaios físicos empíricos a fim de investigar o comportamento do ligante asfáltico após a adição da cera de carnaúba tipo 1.

O ensaio de penetração ASTM D 5M [27], indica a profundidade em décimos de milímetros, que a agulha padronizada de 100 g penetra verticalmente na amostra sob condições de cargas pré-estabelecidas, tempo de 5 segundos e temperatura de 25 °C. O procedimento foi realizado de forma a serem obtidas cinco medições individuais de penetração, e sua média é aceita caso a diferença não exceda o limite determinado em norma. É observado que quanto menor a penetração da agulha, maior a consistência do ligante asfáltico.

O ensaio de ponto de amolecimento ASTM D 36M-14 [28] é um sistema desenvolvido para medir à qual temperatura o ligante asfáltico possui determinada consistência. Neste ensaio, duas esferas metálicas com peso e dimensões especificadas são posicionadas sobre dois anéis preenchidos com material asfáltico. O conjunto é colocado dentro de um béquer preenchido com água à temperatura ambiente. A água é aquecida a uma taxa controlada para que o ligante seja amolecido. Ao amolecer, o ligante não suporta mais o peso da esfera metálica e as esferas se deslocam ao fundo do béquer, ao atingir a placa do fundo do béquer é anotada a temperatura na qual a esfera toca a placa. Caso a diferença de temperatura entre as duas amostras exceda 2 °C, tem-se a necessidade de realizar novamente o ensaio.

O ensaio de viscosidade rotacional ASTM D 4402 [29] permite determinar a viscosidade dos ligantes e suas propriedades de consistência. Esse procedimento é utilizado em análises relacionadas ao bombeamento e estocagem dos ligantes. A partir dos dados obtidos nesse ensaio foi possível obter a curva viscosidade-temperatura. Neste ensaio foi utilizado um controlador de temperatura e um viscosímetro rotacional, que nos permitiu medir o torque necessário para que a haste de prova rodasse ao ser mergulhado no ligante à temperatura, resistência à penetração e ponto de amolecimento já definidos, sob velocidade constante e uniforme. A rotação obtida determinou uma força necessária para vencer a resistência que a viscosidade do material fluido oferece ao movimento rotacional. O ensaio foi realizado nas temperaturas de 135 °C, 150 °C e 177 °C.

As amostras foram submetidas a um envelhecimento a curto prazo – *Rolling Thin Film Oven* ASTM D 2872 [30], este ensaio teve como objetivo simular o envelhecimento que o ligante asfáltico sofre, por oxidação e evaporação, durante o processo de usinagem numa instalação de produção de misturas asfálticas, medindo o efeito do calor e do ar em uma película em movimento de materiais asfálticos semissólidos. Colocou-se aproximadamente 35 g de amostra do ligante asfáltico em um recipiente padronizado que foram inseridos em um refratário vazado e submetido a giros contínuos a 163 °C por 85 minutos, com uma injeção de ar a cada 3 a 4 segundos. Depois de realizado o procedimento, fez-se a medição dos respectivos pesos para verificar a perda de massa e alterações nas propriedades físicas de penetração, ponto de amolecimento e viscosidade rotacional.

2.2.3. Dosagem das misturas asfálticas

A dosagem foi realizada pela metodologia *Superpave* com N de projeto igual a 100 giros para obter um volume de vazios igual a 4%, conforme ASTM D 6925 [31]. A primeira etapa consistiu na escolha de três composições granulométricas a partir dos agregados disponíveis (brita 19.0 mm, brita 12.5 mm, pó de pedra, areia e filer). Em seguida, elaborou-se três curvas Fuller, uma graúda (superior), uma intermediária e uma miúda (inferior), utilizando-se a faixa C especificada pelo DNIT, como também os pontos de Controle e Zonas de Restrição. A Tabela 2 apresenta as proporções dos agregados utilizados nessa pesquisa para as curvas superior, intermediária e inferior, e a respectiva curva escolhida (curva superior) na Figura 4.

Tabela 2: Proporções dos agregados nas granulometrias.

CURVA	BRITA 19.0 mm	BRITA 12.5 mm	AREIA	PÓ DE PEDRA	FILER
Superior	0%	35%	29%	34%	2%
Intermediária	34%	21%	9%	35%	1%
Inferior	35%	30%	0%	35%	0%

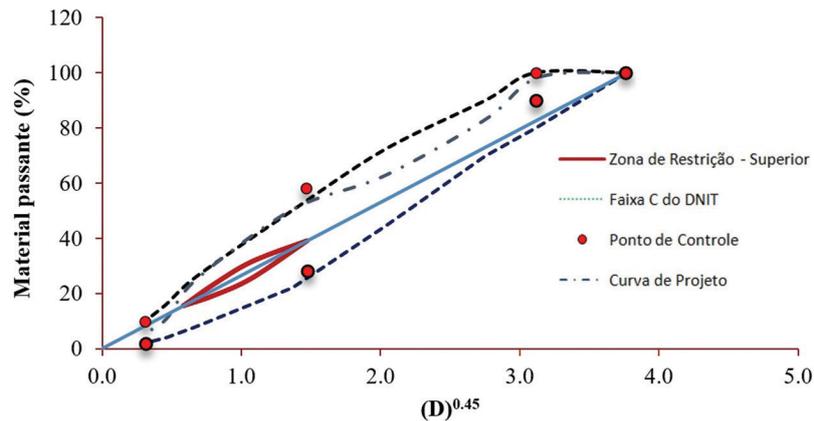


Figura 4: Curva Fuller superior para a Faixa C do DNIT.

Tabela 3: Dados volumétricos para cada teor de ligante asfáltico.

	4.50%	5.00%	5.50%	6.00%	LIMITES
Vazios de ar (%)	5.06	4.27	3.36	2.41	4.00%
Vazios no agregado mineral (%)	14.52	14.82	14.75	14.29	13.00 mín
Massa específica máxima (%)	94.94	95.73	96.64	97.59	96.00
Vazios preenchidos com ligante asfáltico (%)	72.04	72.91	73.09	72.60	65 a 75%

Tabela 4: Parâmetros volumétricos para o teor de CAP de 5.10%.

	5.10%	LIMITES
Vazios de ar (%)	3.93	4.00%
Vazios no agregado mineral (%)	14.70	13.00 mín
Massa específica máxima (%)	96.07	96.00
Vazios preenchidos com ligante asfáltico (%)	72.81	65 a 75%

Portanto, a curva escolhida foi a superior (denominada Curva de Projeto na Figura 4), devido ser essa a curva com o volume de vazios o mais próximo de 4%. Não sendo encontrado o volume de vazios de 4% com o teor inicial de ligante asfáltico de 5%, variou-se o teor de inicial de 5% para $\pm 0.5\%$ e $+ 1\%$, sendo 4.5%, 5.5% e 6.0% moldando dois corpos de prova para cada teor. A partir dos parâmetros volumétricos determinados em cada corpo de prova, foi possível determinar as propriedades volumétricas para os novos teores de ligante que estão apresentadas na Tabela 3.

Na etapa supracitada ainda não foi possível a determinação do teor de projeto de ligante asfáltico com volume de vazios de 4.0%. Realizada uma nova dosagem com três corpos de prova com o teor de ligante asfáltico de 5.10% foi possível a determinação das propriedades volumétricas. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos na dosagem.

Realizou-se os cálculos para a determinação do volume de vazios e teor de projeto determinado para o ligante asfáltico foi 5.10% com um volume de vazios próximo ao estabelecido por norma (3.93%). Dessa forma, corpos de prova foram compactados para serem submetidos a ensaios mecânicos.

2.2.4. Propriedades mecânicas das misturas asfálticas

Os ensaios mecânicos tiveram como finalidade analisar a influência da adição da cera de carnaúba tipo 1 em comparação ao ligante asfáltico puro no desempenho mecânico das misturas asfálticas. As propriedades analisadas nesta etapa foram Resistência à Tração, Suscetibilidade à Umidade, Módulo de Resiliência, Módulo Dinâmico e Fadiga.

O ensaio de resistência à tração (RT) das misturas asfálticas foi determinado seguindo o método de ensaio DNIT 136 [32]. Duas forças opostas foram aplicadas a um corpo de prova cilíndrico, por meio de frisos metálicos que geram tensões de tração constantes perpendiculares ao seu diâmetro. Primeiramente, a carga estática crescente foi aplicada usando uma prensa mecânica na velocidade de deformação de $0,8 \pm 0,1$ mm/s. Em seguida, a carga de ruptura foi lida empregando-se um anel dinamométrico acoplado à prensa. Uma média de 3 corpos de prova de cada tipo de mistura asfáltica foi testada para determinar a média dos resultados.

Para determinar a resistência à suscetibilidade à água, o teste de *Lottman* modificado DNIT 180 [33] tem sido amplamente utilizado na literatura. O cálculo do dano por umidade induzida é chamado de Relação de Resistência à Tração (RRT) (%) e é dado pela razão entre a resistência à tração condicionada e a resistência à tração não condicionada, sendo o valor uma média dos três corpos de prova testados, 3 condicionados e 3 não condicionados. Este ensaio verifica a sensibilidade à água de corpos de prova de misturas asfálticas, avaliando a adesividade do agregado ligante e a coesão da mistura em condições resultantes de saturação e condicionamento acelerado na presença de água.

O teste de Módulo de Resiliência (MR) DNIT 135 [34] foi realizado na prensa hidráulica IPC UTM-25. As amostras cilíndricas (em triplicata) utilizadas nesse ensaio apresentaram dimensões de aproximadamente 10.0 cm de diâmetro por 6.5 cm de altura. Aplicou-se uma carga de compressão igual a 10% da resistência à tração. A frequência aplicada foi de 60 ciclos por minuto (1 Hz) com tempo de aplicação de 0.1 s e 0.9 s segundos de repouso ou descarga. O MR foi submetido a variações de temperatura: 4 °C, 21 °C, 25 °C e 37 °C. Essas temperaturas foram escolhidas para obter um parâmetro para avaliação com o teste de Módulo Dinâmico, que também foi realizado na pesquisa com essas mesmas temperaturas.

O Módulo Dinâmico (MD) DNIT 416 [35] foi avaliado aplicando-se uma tensão de compressão senoidal uniaxial em amostras de 10.0 cm de diâmetro por 15.0 cm de altura (em triplicata), em temperaturas e frequências de carga especificadas pela norma. A tensão aplicada e a deformação axial recuperável resultante da amostra foram medidas e usadas para calcular o módulo dinâmico. Os testes foram realizados nas temperaturas de 4, 20 e 40 °C, com frequências de 0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10.0 e 25.0 Hz para cada temperatura para obtenção das curvas mestras.

A Fadiga Diametral por Tensão Controlada DNIT 183 [36] foi realizada utilizando uma carga de compressão igual a 32.5%, 35.0%, 37.5% e 40.0% da resistência à tração. A frequência de pulso utilizada foi de 1 Hz (com 0.1 s de aplicação de carga senoidal e 0.9 s de repouso), e a temperatura foi de 25 °C. No ensaio foram utilizadas 3 amostras para cada nível de tensão aplicada e calculada a média dessas amostras.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos na fase experimental das misturas asfálticas com cera de carnaúba tipo 1.

3.1. Análise física empírica do ligante asfáltico

A Tabela 5 apresenta os resultados físicos empíricos dos ligantes asfálticos puro e modificados antes e após o procedimento de envelhecimento a curto prazo.

Ao analisar os dados obtidos no ensaio de penetração se observou uma redução nos valores à medida que se aumentou o teor adicionado de cera de carnaúba tipo 1 ao ligante asfáltico, tanto antes quanto após o envelhecimento a curto prazo (RTFO). A adição de 1%CC reduziu em 8.78% e 3.05%, 2%CC em 9.56% e 4.93%, e 3%CC em 9.88% e 5.64%, antes e após RTFO, respectivamente. Esse comportamento também foi observado por FEITOSA *et al.* [21] ao incorporarem 3 e 5% de cera de carnaúba tipo 4 ao mesmo tipo de ligante asfáltico, com redução de 19.23% e 23.08%, respectivamente. A cera de carnaúba tipo 4 no teor de 3% acarretou uma redução maior da penetração (19.23%) em relação ao uso de 3% de cera de carnaúba tipo 1 (9.88%) no mesmo tipo de ligante asfáltico antes do RTFO, ou seja, pode-se inferir que o tipo de cera utilizada como aditivo modificador se influencia em grau diferente no comportamento físico do ligante mesmo tendendo de forma semelhante à redução da rigidez. Os dados da Tabela 5 permite observar que o aumento do teor de cera de carnaúba tipo 1 ao ligante asfáltico não apresentou uma mudança significativa na penetração das amostras, tanto antes como após o envelhecimento do material. Observa-se uma redução maior de penetração com a adição de 3% de cera de carnaúba, uma diminuição de aproximadamente 10% em relação ao ligante de referência. A norma DNIT 095 [37] determina que a penetração retida mínima deve ser de 55% para o ligante asfáltico de referência. Todas as amostras testadas apresentaram valores superiores ao limite mínimo estabelecido.

Os dados relativos ao ponto de amolecimento são importantes porque permitem a realização de ensaios com as misturas asfálticas em condições de serviço ideais. Maiores valores de ponto de amolecimento apontam

Tabela 5: Resultados físicos empíricos das amostras de ligante asfáltico.

ENSAIO ANTES RTFO					
	RESULTADOS				NORMAS
	AMOSTRA CONTROLE	1%CC	2%CC	3%CC	
Penetração 0.1 mm (100 g, 5 s, 25 °C)	63.80	58.20	57.70	57.50	ASTM D5M [27]
Ponto de Amolecimento (°C)	47.50	47.30	48.00	49.00	ASTM D36M-14 [28]
Viscosidade Rotacional 135 °C (cp)	457.50	370.00	361.30	326.30	ASTM D4402 [29]
Viscosidade Rotacional 150 °C (cp)	223.50	196.00	184.50	169.00	
Viscosidade Rotacional 177 °C (cp)	80.80	70.80	70.30	65.30	
ENSAIO APÓS RTFO					
Penetração 0.1 mm (100 g, 5 s, 25 °C)	42.60	41.30	40.50	40.20	ASTM D5M [27]
Ponto de Amolecimento (°C)	52.00	55.00	54.30	50.50	ASTM D36M-14 [28]
Varição do ponto de amolecimento (°C)	4.50	7.70	6.30	1.50	ASTM D36M-14 [28]
Penetração Retida (%)	66.80	70.90	70.20	69.90	ASTM D5M [27]
Viscosidade Rotacional 135 °C (cp)	626.30	582.50	490.00	460.00	ASTM D4402 [29]
Viscosidade Rotacional 150 °C (cp)	298.00	280.50	242.00	230.50	
Viscosidade Rotacional 177 °C (cp)	105.50	97.00	86.80	83.30	

em maior rigidez das amostras. As amostras modificadas pela cera de carnaúba apresentaram valores próximos ao obtido pela amostra de referência. De acordo com as especificações do DNIT 095 [37], o ponto de amolecimento mínimo para o ligante asfáltico com penetração 50/70 é de 46 °C, e pôde-se observar que todos as amostras de ligante asfáltico modificado com os teores de cera de carnaúba tipo 1 se apresentaram acima do mínimo especificado. A adição de teores de cera de carnaúba ocasionou um aumento no ponto de amolecimento, esse ganho pode ser interpretado como um aumento da rigidez do material, o qual torna-se um benefício em relação a longevidade na utilização em campo. A adição dos teores de cera de carnaúba nas proporções 1, 2 e 3% elevaram o ponto de amolecimento da amostra em relação à mistura de referência. É possível observar que dentre os ligantes modificados com os vários teores de cera de carnaúba, o ligante asfáltico modificado com 1% da cera apresentou o maior ponto de amolecimento após o RTFO.

É possível observar uma redução expressiva da viscosidade em todas as temperaturas para as amostras de ligante asfáltico modificado em relação ao ligante sem cera de carnaúba tipo 1. A menor viscosidade em relação ao ligante de referência é obtida com a incorporação de 3% de cera de carnaúba do tipo 1. Isto representa uma menor temperatura de produção e compactação de misturas asfálticas. Essa redução da viscosidade ao adicionar cera de carnaúba é observada também no estudo realizado por SILVA *et al.* [22], no qual se obteve uma diminuição de 30% da viscosidade adicionando 3% de cera de carnaúba tipo 4 em relação ao ligante de referência. WARGHA FILHO [38] observou uma redução expressiva na viscosidade ao adicionar a cera de carnaúba tipo 4, uma diminuição de 50% na viscosidade comparado ao ligante de referência.

As temperaturas de mistura e compactação estão relacionadas à redução da viscosidade causada pela adição da cera de carnaúba tipo 1. Assim, é importante verificar se houve redução dessas temperaturas para os teores testados. A temperatura de projeto do ligante asfáltico na produção de misturas asfálticas deve ser de 0.17 ± 0.02 Pa.s para ligantes asfálticos convencionais testados no viscosímetro rotacional. A Tabela 6 apresenta, por meio de interpolação, as temperaturas de mistura e compactação para as amostras de ligante modificadas.

Tabela 6: Temperaturas de mistura e compactação para as amostras de ligante asfáltico.

	AMOSTRAS			
	REFERÊNCIA	1%CC	2%CC	3%CC
Temperatura de Mistura (°C)	157.00	152.50	148.00	148.00
Temperatura de Compactação (°C)	143.00	139.00	137.00	136.00

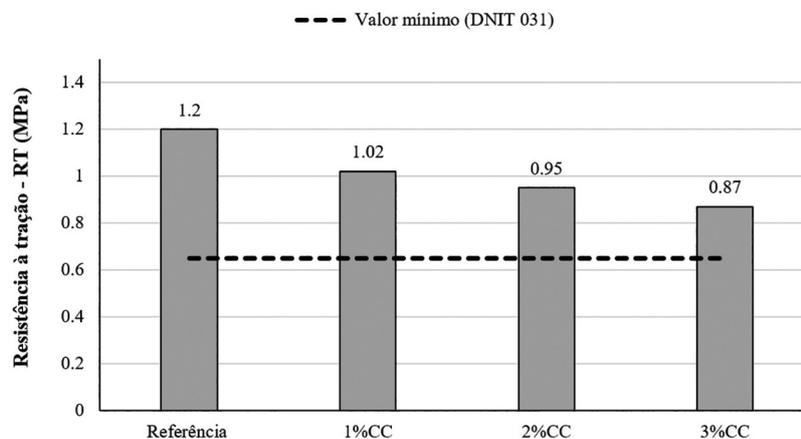
A partir de uma análise obtida com os dados de viscosidade para todas as amostras de ligante testadas, pôde-se observar uma redução da temperatura de mistura de até 5.73% ($-9\text{ }^{\circ}\text{C}$) para as amostras 2%CC e 3%CC em relação à de referência, e de até 4.90% ($-7\text{ }^{\circ}\text{C}$) na mistura de compactação para a amostra 3%CC. SILVA *et al.* [22] obtiveram reduções de até $7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para a amostra com 2% de cera de carnaúba tipo 4 nas temperaturas de mistura e compactação, respectivamente. Dessa forma, observou-se que a cera de carnaúba tipo 1 foi mais eficaz na redução das temperaturas, pois as temperaturas de mistura são superiores às temperaturas de compactação, e a redução para a cera de carnaúba tipo 1 foi maior para a temperatura de mistura ($9\text{ }^{\circ}\text{C}$) em relação à obtida por SILVA *et al.* [22] ($7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) ao utilizar a cera de carnaúba tipo 4.

Assim, a redução da temperatura traz benefícios energéticos para a produção de pavimentos flexíveis. De acordo com Thives e Guisi [39], o consumo de energia e as emissões de CO_2 em usinas asfálticas à base de gás podem ser significativamente reduzidas usando tecnologias de mistura morna em comparação com a produção asfáltica de mistura a quente.

3.2. Avaliação do desempenho mecânico das misturas asfálticas

As misturas asfálticas modificadas pela cera de carnaúba tipo 1 foram submetidas aos ensaios de desempenho mecânico a fim de verificar os efeitos do modificador na resistência das misturas. Um teste estatístico t de *student* com nível de significância de 5% foi realizado para os ensaios de resistência à tração, resistência retida à tração e módulo de resiliência a fim de verificar a significância dos dados observados. As hipóteses consideradas nesse teste foram as seguintes: (i) H_0 (não há diferença estatisticamente significativa entre as médias dos resultados observados) e (ii) H_1 (há diferença estatisticamente significativa entre as médias dos resultados observados). A Figura 5 apresenta os dados oriundos do ensaio de resistência à tração por compressão diametral para as misturas asfálticas com e sem a cera de carnaúba tipo 1, onde os resultados são resultantes da média de três corpos de prova para cada composição analisada.

Segundo a norma do DNIT 031 [40], o valor médio da resistência à tração deve ser de no mínimo 0.65 MPa (a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$), em misturas asfálticas utilizadas em camadas de rolamento. Observou-se que todas as misturas se apresentaram dentro do especificado pela norma. A mistura de referência foi a que apresentou maiores resultados deste parâmetro, e a partir do aumento do teor de cera de carnaúba, percebeu-se uma diminuição da resistência à tração das misturas. Isto já seria esperado, por conta da redução da rigidez do material com a


Figura 5: Resultados do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

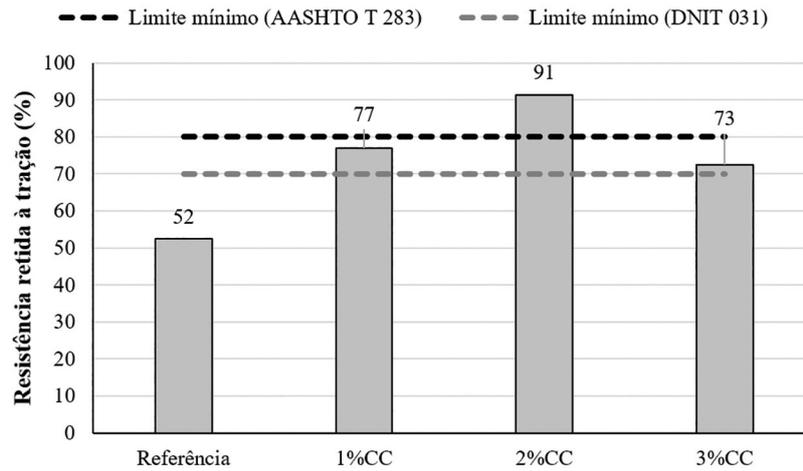


Figura 6: Resultados do ensaio de dano por umidade induzida.

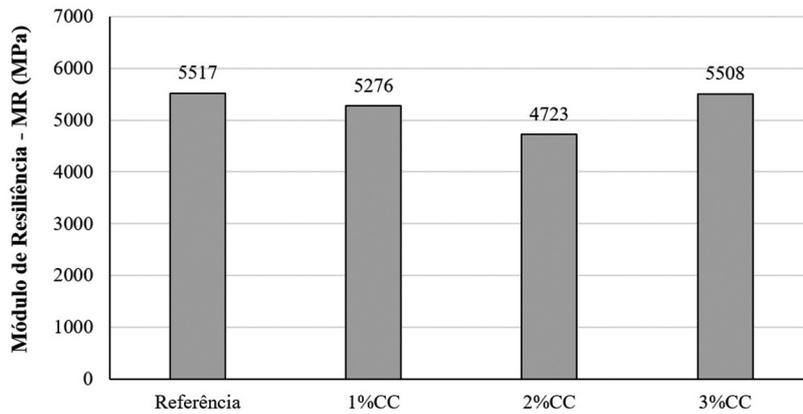


Figura 7: Resultados do ensaio de módulo de resiliência.

incorporação da cera de carnaúba tipo 1. WARGHA FILHO [38] observou em seu estudo com misturas asfálticas mornas incorporadas com 5% de cera de carnaúba tipo 4 um resultado de resistência à tração de 0.75 MPa, valor inferior aos obtidos nesse estudo. Esse dado corrobora com a tendência de que o aumento do teor adicionado de cera ao ligante asfáltico acarreta menor viscosidade e rigidez, reduzindo a resistência à ruptura. A Figura 6 apresenta os resultados do ensaio de dano por umidade induzida para as misturas asfálticas com e sem a adição da cera de carnaúba tipo 1.

De acordo com a norma AASHTO T 283 [41], os valores admitidos para as misturas asfálticas devem ser maiores que 80%. A especificação do DNIT 031 [40] preconiza que este valor deve ser de 70%. Observa-se na Figura 6 que apenas a mistura de referência não atingiu o critério estabelecido por tais normas, apresentando um RRT (%) de apenas 52%. A adição da cera de carnaúba tipo 1 ocasionou um aumento expressivo da resistência retida à tração. As misturas com 1% e 3% de cera enquadraram-se no estabelecido pela norma do DNIT 031 [40], apresentando um RRT (%) de 77% e 73%, respectivamente. Já a amostra com 2% de cera de carnaúba se enquadrou tanto na norma do DNIT 031 [40], como também na norma da AASHTO T 283 [41], apresentando um RRT (%) de 91%, um aumento de aproximadamente 75% em relação à amostra de referência, não apresentando perda significativa de resistência à tração após o condicionamento. Isto significa que a adição da cera de carnaúba tipo 1 ao ligante asfáltico nos teores propostos aumentou o índice de resistência retida à tração, apresentando uma maior adesão entre o agregado e o ligante nas condições da amostra parcialmente saturada. A Figura 7 apresenta os dados médios realizados em três corpos de provas no ensaio de módulo de resiliência de cada mistura avaliada.

Tabela 7: Parâmetros estatísticos dos ensaios de resistência à tração, resistência retida à tração e módulo de resiliência das misturas asfálticas modificadas com cera de carnaúba tipo 1.

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO			
	1%CC	2%CC	3%CC
Média	1.02	0.95	0.87
Variância	0.0028	0.0007	0.0009
Observações	3	3	3
Grau de liberdade	4	4	4
p-valor	0.0082	0.0006	0.0002
RESISTÊNCIA RETIDA À TRAÇÃO			
Média	77	91	73
Variância	7	1	3
Observações	3	3	3
Grau de liberdade	4	4	4
p-valor	0.0004	2.84×10^{-5}	0.0004
MÓDULO DE RESILIÊNCIA			
Média	5276	4723	5508
Variância	20208	49807	17584
Observações	3	3	3
Grau de liberdade	4	4	4
p-valor	0.6668	0.2076	0.9869

As misturas asfálticas apresentaram resultados compatíveis com estudos realizados com cera de carnaúba, como por exemplo, o estudo realizado por WARGHA FILHO [38], no qual a adição de 5% de cera de carnaúba tipo 4 na mistura asfáltica reduziu 17.32% o módulo de resiliência em relação à mistura de referência. A mistura de referência foi a que obteve valor de MR mais elevado, resultado bastante similar ao obtido com a mistura asfáltica contendo 3% de cera de carnaúba tipo 1. Observou-se que a mistura de referência, em virtude de ser produzida e compactada a uma temperatura mais elevada, pode ter apresentado um maior envelhecimento, deixando-a mais rígida e com valor superior de MR. Em relação às misturas com adição de cera de carnaúba tipo 1, observou-se uma redução mais acentuada do MR no teor de 2% de cera, voltando a aumentar no teor de 3%, ou seja, na menor temperatura de usinagem e compactação foi possível alcançar valor de MR similar à amostra de referência. Assim, o comportamento esperado de uma maior temperatura de usinagem e compactação proporcionando uma maior rigidez ao material e envelhecimento não se comprovou. O MR da mistura 3%CC ficou 0.16% inferior à mistura de referência, enquanto às amostras 1%CC e 2%CC ficaram 4.4% e 14.4%, respectivamente, menores. A Tabela 7 apresenta os parâmetros estatísticos para as misturas asfálticas referentes aos ensaios de resistência à tração, resistência retida à tração e módulo de resiliência.

Observa-se a partir dos dados obtidos na Tabela 7 que todas as misturas asfálticas modificadas pela cera de carnaúba tipo 1 apresentaram diferenças estatisticamente significativas a um nível de significância de 5% para os ensaios de resistência à tração e resistência retida à tração, com p-valores abaixo da significância de 5%. Ou seja, a hipótese de que não há diferença estatisticamente significativa entre as médias dos resultados observados (H_0) foi rejeitada. Enquanto os p-valores das misturas asfálticas com cera de carnaúba para o ensaio de módulo de resiliência se apresentaram acima do nível de significância de 5%, aceitando a hipótese H_0 e confirmando que não houve diferença estatisticamente significativa entre as médias observadas. Dessa forma, pode apontar que a adição da cera de carnaúba tipo 1 nos teores testados acarretou redução da resistência à tração e ganho de resistência aos efeitos deletérios da água. Entretanto, foi observado que os valores de resistência à tração se mantiveram acima do mínimo estabelecido em norma (0.65 MPa) e que o módulo de resiliência obtido para essas misturas modificadas foi equivalente ao obtido para a mistura asfáltica de referência. KAVUSSI e HASHEMIAN [42] apontam que a resistência ao

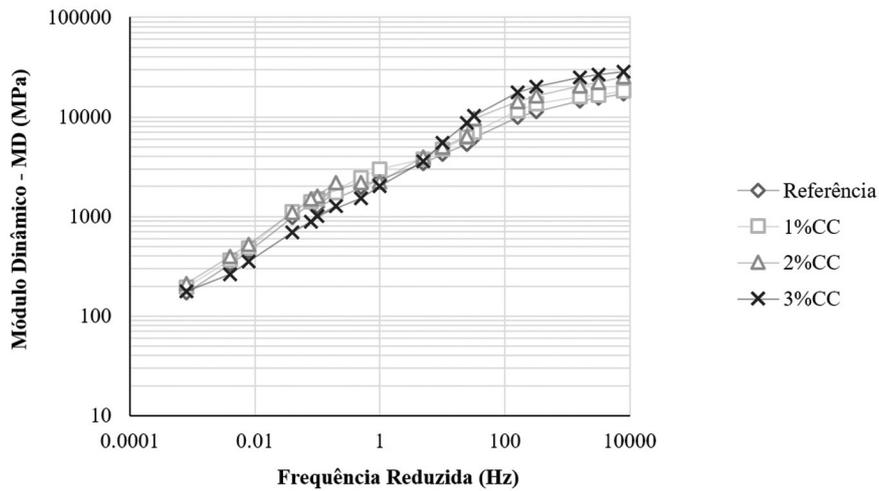


Figura 8: Curvas mestras das misturas asfálticas.

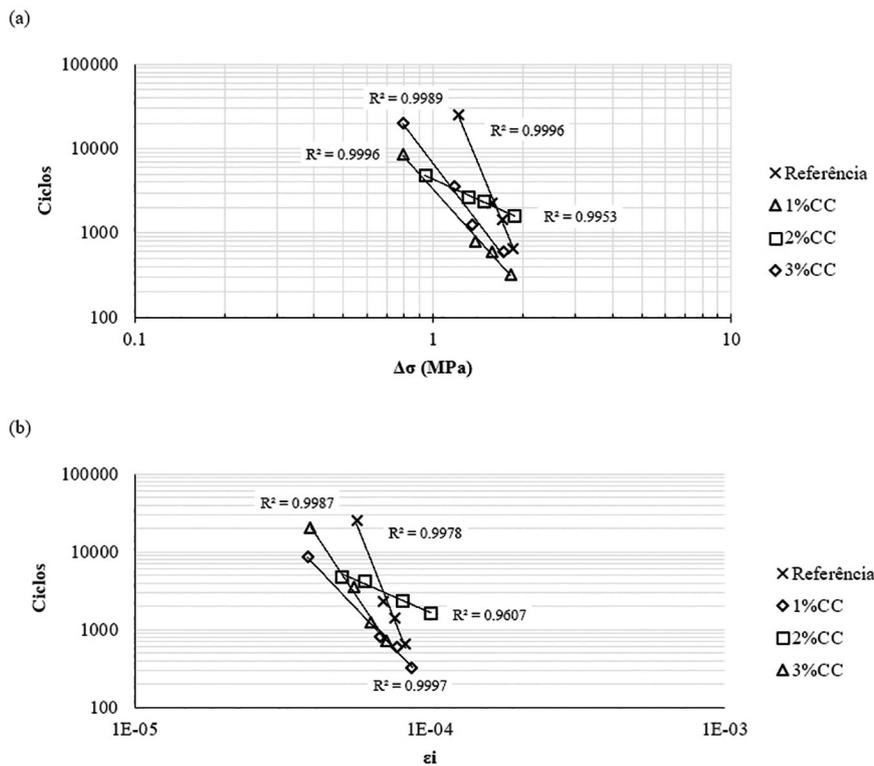


Figura 9: (a) Vida de fadiga versus diferença de tensões, (b) vida de fadiga versus deformação específica resiliente.

dano por umidade induzida é influenciada pela temperatura de compactação, onde menores temperaturas de compactação acarretam menor resistência retida à tração. Esse fato não foi observado nesse estudo, o que comprova que o modificador pode ter uma maior influência na resistência à umidade, devido ao fator adesividade, que a temperatura de compactação.

XU *et al.* [43] apontam que depois que a cera orgânica esfria, ela pode formar uma estrutura de treliça. E é considerada para melhorar o desempenho das misturas. Sasobit (também chamado de cera FT) é uma cera utilizada como modificador para misturas asfálticas mornas e seu uso acarreta melhoria à suscetibilidade à umidade das misturas asfálticas [44–49], corroborando com os achados desse estudo. A Figura 8 apresenta as

curvas mestras determinadas no ensaio de módulo dinâmico em temperatura de referência de 20 °C, utilizando três temperaturas (4, 20 e 40 °C) e seis frequências (0.1; 0.5; 1.0; 5.0; 10.0 e 25.0 Hz).

Percebe-se que todas as misturas asfálticas com ou sem a adição de cera de carnaúba tipo 1 apresentaram comportamentos bastante semelhantes quando se estuda a relação entre a queda de rigidez da amostra, à medida que a temperatura vai aumentando. Também é possível perceber que a rigidez de todas as misturas estudadas diminui à medida que ocorre a redução da frequência de aplicação de carga. Percebe-se que a introdução dos teores de cera de carnaúba não influenciou no parâmetro de rigidez das amostras avaliadas. A amostra 2%CC foi a que obteve maior valor de módulo dinâmico nas temperaturas mais altas (20 °C e 40 °C). O ensaio de fadiga foi executado com quatro níveis de tensão (32.5; 35.0; 37.5; 40.0%) da RT. As curvas de vida de fadiga estão apresentadas na Figura 9 e, por meio de regressão linear, ajustou-se uma linha de tendência aos dados de cada mistura, a qual segue o modelo de previsão de fadiga de Wöhler. De acordo com a norma do DNIT [36], essas regressões lineares devem apresentar R^2 mínimo de 0.80.

Conforme observado na Figura 9, as regressões lineares dos gráficos apresentaram um bom ajuste com R^2 acima do mínimo estabelecido em norma (0.80). A mistura 2%CC, conforme a Figura 9a, apresentou N (vida de fadiga) maior para altas diferenças de tensões. Enquanto para baixas diferenças de tensões, a mistura de referência ficou muito próxima da mistura 3%CC e apresentou N (vida de fadiga) mais elevado. As misturas 1%CC e 2%CC apresentaram comportamento semelhante entre si, porém, um baixo valor de N. Pode-se observar que as misturas de referência, 1%CC e 3%CC apresentaram inclinações das retas muito semelhantes, o que não acontece com a mistura 2%CC, a qual apresentou uma inclinação maior e assim pode-se interpretar que para menores níveis de tensões esta mistura tenderia a apresentar uma vida de fadiga inferior, se comparada com as demais misturas estudadas. Porém, segundo MERIGHI [50], não se pode julgar isoladamente o desempenho da mistura apenas considerando a vida da fadiga, pois a mistura também sofrerá influência de outros fatores que impactarão diretamente neste parâmetro tais como: volume de vazios e disposição da matriz de agregados. Dessa forma, a mistura 2%CC apresentou melhor comportamento à fadiga. Para comportamento à fadiga de menor deformação, a mistura de referência e 3%CC apresentaram melhor desempenho.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados obtidos nas análises físicas empíricas do ligante asfáltico e mecânica das misturas asfálticas permitiram avaliar quais misturas asfálticas foram mais viáveis como misturas mornas. Assim, esse estudo permitiu concluir que:

- A adição de cera de carnaúba tipo 1 reduziu as temperaturas de mistura em até 9 °C para as amostras 2%CC e 3%CC e em até 7 °C na temperatura de compactação para a amostra 3%CC.
- À medida que se aumentou o teor de cera na mistura asfáltica, maior foi a redução da resistência à tração. Entretanto, toda as composições apresentaram valores superiores ao mínimo estabelecido.
- As misturas com cera de carnaúba tipo 1 apresentaram melhor desempenho ao dano por umidade induzida em relação à mistura de referência, principalmente a mistura 2%CC com ganho de 75%.
- As misturas modificadas apresentaram valores equivalente à mistura de referência nos ensaios de módulo de resiliência e módulo dinâmico.
- A mistura com 2% de cera de carnaúba tipo 1 apresentou o melhor desempenho à fadiga. Entretanto não suportou elevado número de ciclos, o que pode limitar seu uso a rodovias de tráfego leve.

Dessa forma, a adição da cera de carnaúba tipo 1 aferiu boas propriedades à mistura asfáltica, mantendo os resultados dentro dos parâmetros especificados para o uso na pavimentação, principalmente no dano por umidade. A mistura 2%CC foi a que apresentou melhores resultados mecânicos e melhor trabalhabilidade do ligante asfáltico, assim como apresentou maior redução das temperaturas de mistura e compactação. A utilização da cera de carnaúba tipo 1 pode ser considerada uma alternativa viável para diminuir as temperaturas de mistura e compactação, podendo contribuir para mitigação de danos ambientais como a redução do consumo de energia e as emissões de CO₂ em usinas asfálticas.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelas bolsas de pesquisa dos autores. Os autores também agradecem o apoio do Laboratório de Engenharia de Pavimentos (LEP) da Universidade Federal de Campina Grande.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] STOTKO, O., “Energy and related carbon emission reduction technologies for hot mix asphalt plants”, In: *Proceedings of the 10th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA)*, pp. 11–14, Winterton, South Africa, 2011.
- [2] MELO NETO, O.M., SILVA, I.M., LUCENA, L.C.F.L., *et al.*, “Viability of recycled asphalt mixtures with soybean oil sludge fatty acid”, *Construction & Building Materials*, v. 349, pp. 128728, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128728>.
- [3] MENDONÇA, A.M.G.D., MELO NETO, O.M., RODRIGUES, J.K.G., *et al.*, “Characterisation of modified asphalt mixtures with lignin of pinus and eucalyptus woods”, *Australian Journal of Civil Engineering*, 2022. doi: <https://doi.org/10.1080/14488353.2022.2089376>.
- [4] CRUZ, G.K.A., MELO NETO, O.M., ARRUDA, S.M., *et al.*, “Influence of particle size selection methods on asphalt mixtures produced with lateritic aggregates”, *Construction & Building Materials*, v. 314, pp. 125201, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125201>.
- [5] MORETTI, L., MANDRONE, V., D’ANDREA, A., *et al.*, “Comparative “from cradle to gate” life cycle assessments of Hot Mix Asphalt (HMA)”, *Sustainability*, v. 9, n. 3, pp. 400, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/su9030400>.
- [6] SILVA, C.C.V.P., MELO NETO, O.M., RODRIGUES, J.K.G., *et al.*, “Evaluation of the rheological effect of asphalt binder modification using *Linum usitatissimum* oil”, *Matéria*, v. 27, n. 3, e20220138, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1517-7076-rmat-2022-0138>.
- [7] CHOWDHURY, A., BUTTON, J.W., *A review of warm mix asphalt*, Austin, Texas A&M University System, 2008.
- [8] ZHANG, J., LI, P., ZUN, C., *et al.*, “Effects of composite warm mix additive (CAR) on the physical and rheological performance of bitumen and the pavement performance of its concrete”, *Sustainability*, v. 12, n. 23, pp. 3916, 2019. PubMed PMID: 31783488.
- [9] MELO NETO, O.M., MENDONÇA, A.M.G.D., RODRIGUES, J.K.G., *et al.*, “Rheological study of asphalt binder modified by cotton and copaiba oils”, *Revista Cubana de Ingeniería*, v. 13, pp. 1, 2022.
- [10] MENDONÇA, A.M.G.D., MELO NETO, O.M., RODRIGUES, J.K.G., *et al.*, “Análise física-reológica de ligantes asfálticos modificados com óleo de algodão refinado para uso em misturas asfálticas mornas”, *Revista Cubana de Ingeniería*, v. 13, e325, 2022.
- [11] ABDULLAH, M.E., ZAMHARI, K.A., BUHARI, R., *et al.*, “Warm mix asphalt technology: a review”, *Jurnal Teknologi*, v. 71, pp. 39–52, 2014. doi: <http://dx.doi.org/10.11113/jt.v71.3757>.
- [12] CAI, X., ZHANG, J., XU, G., *et al.*, “Internal aging indexes to characterize the aging behavior of two bio-rejuvenated asphalts”, *Journal of Cleaner Production*, v. 220, pp. 1231–1238, 2019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.203>.
- [13] PODOLSKY, J.H., BUSS, A., WILLIAMS, R.C., *et al.*, “Effect of bio-derived/chemical additives on warm mix asphalt compaction and mix performance at low temperature”, *Cold Regions Science and Technology*, v. 136, pp. 52–61, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.02.003>.
- [14] NOGUEIRA, R.L., SOARES, J.B.S., SOARES, S.A., “Rheological evaluation of cotton seed oil fatty amides as a rejuvenating agent for RAP oxidized asphalts”, *Construction & Building Materials*, v. 223, pp. 1145–1153, 2019. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.128>.
- [15] RUBIO, M.C., MORENO, F., MARTINEZ-ECHEVARRÍA, M.J., *et al.*, “M., “Comparative analysis of emissions from the manufacture and use of hot and half-warm mix asphalt”, *Journal of Cleaner Production*, v. 41, pp. 1–6, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.036>.
- [16] BUSS, A., WILLIAMS, R.C., SCHRAM, S., “The influence of warm mix asphalt on binders in mixes that contain recycled asphalt materials”, *Construction & Building Materials*, v. 77, pp. 50–58, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.023>.
- [17] LUCENA, L.C.F.L., SILVEIRA, I.V., COSTA, D.B., “Avaliação de ligantes asfálticos modificados com óleo da Moringa Oleífera Lam para uso em misturas mornas”, *Revista Matéria*, v. 21, pp. 72–82, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-707620160001.0007>.
- [18] VARELA, A.F.C., “*Instituições prevaletentes, tradição e persistência no extrativismo da cera de carnauba em Limoeiro do Norte – CE*”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.
- [19] WARTH, A.H., *The chemistry and technology of waxes*, New York, Reinhold Publishing Corporation, 1947.

- [20] RIZZO, M.M., “*Caracterização físico-química de materiais de esculturas de cera do museu Alpino*”, Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. doi: <http://dx.doi.org/10.11606/D.46.2008.tde-10062008-150929>.
- [21] FEITOSA, J.P.M., ALENCAR, A.E.V., FILHO, N.W., *et al.*, “Evaluation of sun-oxidized carnauba wax as warm mix asphalt additive”, *Construction & Building Materials*, v. 115, pp. 294–298, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.219>.
- [22] SILVA, G.G., LUCENA, A.E.F.L., COSTA, D.B., *et al.*, “Rheological study of additives for viscosity reduction in asphalt binders”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 33, pp. 1, 2021. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003521](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003521).
- [23] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, *PRO 199, Redução de Amostra de Campo de Agregados para Ensaio de Laboratório*, Rio de Janeiro, DNIT, 2020.
- [24] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM C 127, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*, West Conshohocken, ASTM, 2015.
- [25] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM C 131M: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*, West Conshohocken, ASTM, 2020.
- [26] SILVA, G.G., “*Estudos reológicos de aditivos utilizados na fabricação de misturas mornas*”, Tese de D.Sc., Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.
- [27] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM D 5M: Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials*, West Conshohocken, ASTM, 2020.
- [28] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM D 36M-14: Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus)*, West Conshohocken, ASTM, 2020.
- [29] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM D 4402: Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*, West Conshohocken, ASTM, 2015.
- [30] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM D 2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt Binder (Rolling Thin-Film Oven Test)*, West Conshohocken, ASTM, 2019.
- [31] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, *ASTM D 6925: Standard Test Method for Preparation and Determination of the Relative Density of Asphalt Mix Specimens by Means of the Superpave Gyrotory Compactor*, West Conshohocken, ASTM, 2015.
- [32] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, *DNIT 136: Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio*, Rio de Janeiro, DNIT, 2018.
- [33] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, *DNIT 180: Pavimentação – Misturas Asfálticas – Determinação do Dano por Umidade Induzida – Método de Ensaio*, Rio de Janeiro, DNIT, 2018.
- [34] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, *DNIT 135: Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do Módulo de Resiliência – Método de Ensaio*, Rio de Janeiro, DNIT, 2018.
- [35] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, *DNIT 416: Pavimentação Asfáltica – Misturas Asfálticas – Determinação do Módulo Dinâmico – Método de Ensaio*, Rio de Janeiro, DNIT, 2019.
- [36] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, *DNIT 183: Pavimentação Asfáltica – Ensaio de Fadiga por Compressão Diametral à Tensão Controlada – Método de Ensaio*, Rio de Janeiro, DNIT, 2018.
- [37] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, *DNIT 095: Cimentos Asfálticos de Petróleo – Especificação de Material*, Rio de Janeiro, DNIT, 2006.
- [38] WARGHA FILHO, N., “*Avaliação da influência da redução das temperaturas de usinagem e de compactação no comportamento mecânico de misturas asfálticas mornas*”, Tese de D.Sc., Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- [39] THIVES, L.P., GHISI, E., “Asphalt mixtures emission and energy consumption: a review”, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 72, pp. 473–484, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.087>.

- [40] DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, *DNIT 031: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço*, Rio de Janeiro, DNIT, 2006.
- [41] AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, *AASHTO T 283: Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*, Washington, D.C., AASHTO, 2014.
- [42] KAVUSSI, A., HASHEMIAN, L., “Laboratory evaluation of moisture damage and rutting potential of WMA foam mixes”, *The International Journal of Pavement Engineering*, v. 13, n. 5, pp. 415, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2011.597859>.
- [43] XU, S., XIAO, F., AMIRKHANIAN, S., *et al.*, “Moisture characteristics of mixtures with warm mix asphalt technologies: a review”, *Construction & Building Materials*, v. 142, pp. 148, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.069>.
- [44] ŞENGÖZ, B., TOPAL, A., GORKEM, C., “Evaluation of moisture characteristics of warm mix asphalt involving natural zeolite”, *Road Materials and Pavement Design*, v. 14, n. 4, pp. 933, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.817352>.
- [45] XIAO, F., PUNITH, V.S., AMIRKHANIAN, S.N., *et al.*, “Improved resistance of long-term aged warm-mix asphalt to moisture damage containing moist aggregates”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 25, n. 7, pp. 913, 2013. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000567](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000567).
- [46] PUNITH, V.S., XIAO, F., AMIRKHANIAN, S.N., “Effects of lime content on moisture susceptibility of rubberized stone matrix asphalt mixtures using warm mix additives in terms of statistical analysis”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 24, n. 12, pp. 1431, 2012. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000525](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000525).
- [47] SARGAND, S., NAZZAL, M.D., AL-RAWASHDEH, A., *et al.*, “Field evaluation of warm-mix asphalt technologies”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 24, n. 11, pp. 1343, 2012. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000434](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000434).
- [48] HILL, B., BEHNIA, B., BUTTLAR, W.G., *et al.*, “Evaluation of warm mix asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement through mechanical performance tests and an acoustic emission approach”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 25, n. 12, pp. 1887, 2013. doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000757](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000757).
- [49] AMERI, M., HESAMI, S., GOLI, H., “Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag”, *Construction & Building Materials*, v. 49, pp. 611, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.034>.
- [50] MERIGHI, C.F., “*Estudo do comportamento de misturas asfálticas mornas em revestimentos de pavimentos com adição de borracha moída de pneu*”, Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.