

AVALIAÇÃO LABORATORIAL DE MISTURA ASFÁLTICA A QUENTE PRODUZIDA COM GRAFITE COMERCIAL

LABORATORY ASSESSMENT OF HOT ASPHALT MIXTURE PRODUCED WITH COMMERCIAL GRAPHITE

ALEX GOMES PEREIRA, M.Sc. | UNISINOS
BENÍCIO DE MORAIS LACERDA, M.Sc. | UNISINOS
REGINA CÉLIA ESPINOSA MODOLO, Dr. | UNISINOS

RESUMO

As estruturas dos pavimentos estão na maioria das vezes sujeitas às cargas dinâmicas resultantes de várias combinações de carregamentos decorrentes dos veículos e diferentes condições ambientais. O desempenho de concretos asfálticos em termos de comportamento viscoelástico linear pode ser previsto usando o comportamento tensão-deformação que pode ser definido pelo módulo complexo. Dentre as opções mais modernas para sua obtenção, encontram-se os testes de flexão a quatro pontos. Neste contexto, o trabalho avalia a viabilidade técnica do uso do grafite comercial em camadas de pavimentos rodoviários. Para isto, foram produzidas duas misturas asfálticas, uma confeccionada com cimento Portland, codificada por CA-REF e outra produzida com grafite comercial (CA-GRAFP). Para atingir o objetivo desta pesquisa, as composições asfálticas foram submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos para obtenção do módulo complexo e o ângulo de fase. A metodologia adotada seguiu as recomendações da norma europeia EN 12697-26, com aplicação de carregamento de compressão senoidal uniaxial e amplitude de deformação de 50µm/m, frequências de 0,1 a 20Hz e temperaturas de 0 a 40°C, com incrementos de 5 em 5 °C. Os resultados da pesquisa evidenciaram que o CA-GRAFP apresentou módulos complexos superiores ao CA-REF. Além disso, foi possível observar menores valores dos ângulos de fases para composição CA-GRAFP. Os resultados obtidos neste estudo apontam para a viabilidade do uso do grafite como material aplicável em pavimentos rodoviários.

PALAVRAS CHAVE: Grafite Comercial; Mistura Asfáltica; Teste de Flexão de Quatro Pontos; Curva Mestre.

ABSTRACT

Pavement structures are most often subject to dynamic loads resulting from various combinations of loads resulting from vehicles and different environmental conditions. The performance of asphalt concrete in terms of linear viscoelastic behavior can be predicted using the stress-strain behavior that can be defined by the complex module. Among the most modern options for obtaining it, there are four-point flexion tests. In this context, the work assesses the technical feasibility of using commercial graphite in road pavement layers. For this, two asphalt mixtures were produced, one made with Portland cement, coded by CA-REF and the other produced with commercial graphite (CA-GRAFP). To achieve the objective of this research, the asphalt compositions were submitted to the four point flexion test to obtain the complex module and the phase angle. The adopted methodology followed the recommendations of the European standard EN 12697-26, with application of uniaxial sinusoidal compression loading and deformation amplitude of 50µm / m, frequencies from 0.1 to 20Hz and temperatures from 0 to 40 ° C, with increments of 5 at 5 ° C. The research results showed that the CA-GRAFP presented complex modules superior to the CA-REF. In addition, it was possible to observe lower values of the phase angles for the CA-GRAFP composition. The results obtained in this study point to the feasibility of using graphite as a material applicable to road pavements.

KEY WORDS: Commercial Graphite; Asphalt Mixtures; Four Point Bending Test; Master Curve.



1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a ocorrência prematura da perda das características funcionais e estruturais dos pavimentos asfálticos levou ao desenvolvimento e adoção de materiais inovadores para aumentar a vida útil das camadas asfálticas (MORENO-NAVARRO, IGLESIAS e RUBIO-GÁMEZ, 2016). Em relação a isso, em muitos países, diferentes materiais, especificamente os resíduos industriais, vêm sendo inseridos nas misturas asfálticas com o objetivo de agregar valor à execução, recuperação e manutenção dos pavimentos, já que estas representam técnicas sustentáveis e alternativas economicamente viáveis.

A utilização de materiais alternativos em camadas de pavimento, consiste em alcançar uma economia significativa nos gastos, diminuição do consumo de matérias primas, aumento da capacidade de carga e proteger o meio ambiente. O impacto do emprego de resíduos provenientes de processos industriais na pavimentação asfáltica representa um importante tema de estudo, devido, principalmente, às vantagens econômicas e ambientais, além de favorecer a implementação de políticas de manutenção e recuperação de pavimentos. Além disto, Lee et al. (2013) e Turner et al. (2015) destacam que o uso de material reciclado promove a sustentabilidade na construção de estradas, reduzindo o consumo de energia e a emissão de gases do efeito estufa produzidos no processo de mineração de agregados naturais.

Dessa maneira, com o objetivo de reduzir custos e manutenção e, ainda, mitigar a exploração dos materiais convencionais, recursos naturais não renováveis, normalmente usados nessas estruturas, a literatura cita diversos estudos relacionados a utilização de diferentes materiais, provenientes de processos industriais (SPECHT, et al., 2007; SPECHT, CERATTI e BORGES 2007; BOCK et al., 2009; PAMPLONA et al. 2012; BARDINI et al., 2012; MELO, 2014; YAN, XU e YOU, 2015; MARCON, 2016; MELO e TRICHÊS, 2016a, MELO e TRICHÊS, 2016b; CARLESSO et al., 2019).

Entre estas pesquisas deve ser dado destaque àquelas relacionadas à obtenção do módulo complexo (E^*) e ângulo de fase (δ) no aparato quatro pontos, de diferentes materiais e morfologias, devido principalmente ao seu potencial para fundamentação de formulações de modelos constitutivos de sua estrutura, pois representa tanto a parte do comportamento elástico, decorrente dos agregados, quanto o comportamento viscoso, proveniente do ligante asfáltico.

Melo (2014) avaliou as características reológicas e mecânicas de concretos asfálticos modificados com nanoargila (NA) e nanotubo de carbono (NTC). Nestes nanocompósitos asfálticos, foram estudadas a inclusão dos nanomateriais

variando em 1%, 2% e 3% em relação à massa do ligante asfáltico de petróleo 50/70. As amostras foram submetidas aos ensaios de ação deletéria da água, deformação permanente, módulo complexo e resistência à fadiga no equipamento flexão a quatro pontos (4PB). Os resultados apontaram vantagens técnicas das formulações com misturas nanomodificadas frente ao concreto asfáltico convencional.

Em relação às nanomodificação dos ligantes asfálticos iniciada por Melo em 2014, Marcon (2016) e Carlesso (2017), os parâmetros mecânicos e reológicos de concretos asfálticos modificados como novos materiais foram avaliados. Marcon (2016) investigou misturas asfálticas nanomodificadas por polímero SBS, borracha moída de pneu, NA e NTC. As características mecânicas e reológicas das amostras testadas foram obtidas mediante aos experimentos de resistência à ação deletéria da água no ensaio de Lottman modificado, quanto à deformação permanente, o módulo de rigidez e resistência à fadiga no aparato 4PB. As amostras nanomodificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu apresentaram desempenho superior quanto ao dano por umidade induzida. No estudo reológico, as misturas asfálticas modificadas por SBS e borracha moída de pneu apresentaram valores de E^* e δ inferiores aos valores encontrados para as misturas de nanomodificadas por nanoargila organofílica e nanotubo de carbono.

Carlesso (2017) avaliou a modificação do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) 50/70 por meio da incorporação de nanoargila e o polímero SBS. Os compósitos asfálticos foram submetidos aos ensaios de dano por umidade induzida pelo ensaio de Lottman modificado, à deformação permanente no simulador de tráfego francês, ao E^* e à fadiga (aparato 4 pontos), bem como, simulações numéricas de estruturas de pavimentos. Os resultados encontrados quanto ao efeito da ação deletéria da água e deformação permanente, a mistura 3% NA + 2% SBS mostraram-se superiores.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico do concreto asfáltico do tipo convencional (CA-REF) e o concreto asfáltico com grafite comercial (CA-GRAFP), segundo diferentes temperaturas e frequências de carregamento, por meio da determinação do módulo complexo, sob flexão a quatro pontos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

2.1.1 Agregados minerais

Os agregados minerais utilizados nesta pesquisa são considerados convencionais, geralmente usados em projetos de rodovias em concreto asfálticos. As propriedades

físicas destes materiais foram determinadas por meio de ensaios preconizados pela American Society for Testing and Materials (ASTM). Para os agregados graúdos (brita 1 e brita 0), realizaram-se ensaios de densidade real (Gsa - ASTM C127), densidade aparente (Gsb - ASTM C127), absorção de água (ASTM C127) e dureza (ASTM C131). Os agregados miúdos (pó de pedra e areia), foram avaliados quanto densidade real (Gsa - ASTM C128), densidade aparente (Gsb - ASTM C128), absorção de água (ASTM C128).

Para substituição do fíler tradicional (cimento CP II E32) na formulação de referência, foi utilizado o grafite comercial. Esse material trata-se de um pó natural predominantemente cristalino, amplamente utilizado em diversas aplicações do setor industrial (refratários de magnésia-carbono, refratários monolíticos, refratários de alumina-carbono, pastilhas e lonas de freios, peças sinterizadas, revestimentos de fricção, escovas elétricas, desmoldantes, tintas especiais e embreagens).

2.2. Cimento Asfáltico

Como aglomerante orgânico foi empregado o cimento asfáltico de petróleo (CAP) 50/70, fornecido pela empresa Madecon Engenharia - Construtora e Participações Ltda.

2.3. Dosagem asfáltica

Quanto à dosagem, buscou-se integrar o material grafite comercial em uma formulação usada na construção de pavimentos rodoviários, a fim de propor uma mistura alternativa convencional a nível nacional, dada a abundância desse material no Brasil.

A partir disso, buscou-se uma composição granulométrica que estivesse enquadrada nos limites estabelecidos para a Faixa C da norma ES031 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2004). Após a determinação da composição da mistura de referência contendo apenas materiais minerais, a composição granulométrica dos agregados foi realizada utilizando-se o método tradicional de tentativas. A partir da mistura de referência (CA-REF), foram utilizadas as metodologias do método Bailey para proporcionamento dos componentes, detalhado por Mendes e Marques (2012) obtendo-se, assim, uma mistura que se enquadra nos parâmetros do citado método, assim como nos limites da Faixa C do DNIT. O mesmo foi realizado para a mistura com grafite (CA-GRAPP).

2.4. Produção dos corpos prismáticos de asfalto

Para determinação das temperaturas para confecção das misturas betuminosas, plotou-se o gráfico de viscosidade/temperatura (Figura 1). Os corpos de prova das misturas

asfálticas foram confeccionados utilizando o ligante asfáltico à 160 a 167°C e os agregados à 177°C, ambos materiais aquecidos em estufa.

Após o procedimento de mistura/homogeneização, as composições asfálticas foram condicionadas por um período de duas horas na estufa (envelhecimento a curto prazo), na temperatura de compactação (148 a 153°C) para o processo de envelhecimento, conforme recomenda a norma D 4867 (ASTM, 2014). O período de duas horas em como objetivo simular o processo de preparação, transporte e distribuição e compactação do concreto asfáltico no campo, assim como melhorar a interação ligante-agregado.

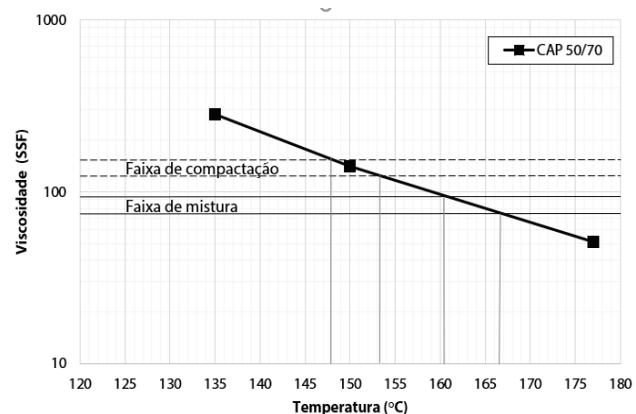


Figura 1: Gráfico, viscosidade Saybolt Furol versus temperatura
Fonte: Autor (2020).

Posteriormente ao processo de envelhecimento a curto prazo, as misturas asfálticas, as misturas asfálticas foram compactadas, conforme a metodologia adotada por Mello (2008), Lima (2017), Torres (2018), Pereira et al. (2019) e Pereira et al. (2020). Para isso, utilizou-se um molde metálico que consiste essencialmente de conjunto com dispositivo para encaixe e uma base. Consoante a compactação, empregou-se uma prensa hidráulica de 30 toneladas, no qual, o molde é submetido a uma pressão constante.

2.5. Determinação da do Rigidez e Ângulo de fase

A avaliação de rigidez e ângulo de fase dos compósitos asfálticos ocorreu por meio do ensaio de flexão a quatro pontos. O ensaio foi realizado de acordo com as prescrições do órgão Europäische Norm (EN). As vigas prismáticas foram avaliadas com base no ensaio de flexão em viga em quatro pontos para determinação do módulo complexo e ângulo de fase. Utilizou-se o aparato 4 pontos da empresa australiana IPC Global® – Modelo CS 7800 e uma câmara climática.

O equipamento aplica pulsos de carga sinusoidal consecutivos (tração/compressão) nos terços médios do vão da viga, com frequência variável de 0,01 a 30Hz. A metodologia adotada seguiu as recomendações da norma europeia descrita na EN 12697-26 (EN, 2018), com aplicação de carregamento senoidal uniaxial de compressão, amplitude de deformação de 50µm/m, sob as frequências de 0,1Hz, 0,2Hz, 0,5Hz, 1Hz, 2Hz, 5Hz, 10Hz e 20Hz e temperaturas de ensaio de 0°C a 40°C, com acréscimo de 5 em 5°C.

Para cada temperatura de ensaio adotou-se o tempo mínimo de aclimação estabelecido pela EN 12697-26 (EN, 2004). Para os ensaios com temperaturas de 0°C, as amostras foram colocadas em uma câmara ambiental por um período mínimo de 2 horas antes do início do ensaio, tempo mínimo de aclimação para temperaturas de teste 5°C até 20°C foi necessário a interpolação dos valores de 2 horas e 1 hora, e para temperaturas de ensaio superiores a 20°C, os corpos de prova permaneceram por no mínimo 1 hora na câmara climática.

Para avaliar o comportamento reológico das misturas, foram plotadas as curvas isotérmicas, curvas isócronas e espaços de Black. A Tabela 1 mostra o tempo mínimo de aclimação dos corpos de prova.

Temperatura	Tempo
0 °C	2 horas
5 °C	1 hora e 45 minutos
10 °C	1 hora e 30 minutos
15 °C	1 hora e 15 minutos
20 °C	1 hora
25 °C	1 hora
30 °C	1 hora
35 °C	1 hora
40 °C	1 hora

Tabela 1: Tempo mínimo de aclimação das amostras
Fonte: Autor (2020).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Materiais

Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 2.

Parâmetro	Resultado	Norma
Gsa, g/cm ³ (brita 1)	2,58	ASTM C127
Gsb, g/cm ³ (brita 1)	2,55	
Absorção, % (brita 1)	0,51	
Gsa, g/cm ³ (brita 0)	2,74	ASTM C127
Gsb, g/cm ³ (brita 0)	2,62	
Absorção, % (brita 0)	1,66	

Gsa, g/cm ³ (areia)	2,21	ASTM C128
Gsa, g/cm ³ (pó de pedra)	2,75	

Tabela 2: Resultados de testes de rotina para agregados minerais
Fonte: Autor (2020).

Analisando-se a Tabela 2, tem-se que: a absorção das britas 1 e 0 evidenciaram baixos valores, ou seja, menores que 2%. Enfatiza-se que uma maior absorção maior que 2%, resultaria em um maior consumo de ligante asfáltico; e com relação à determinação do desgaste por abrasão Los Angeles, os agregados pétreos, brita 1 e brita 0 mostraram uma perda de 14,10% e 27,39%, respectivamente. Analisando o referencial normativo ME 035 (DNER, 1998), no geral, é apresentada uma faixa admissível de perda por abrasão com valor máximo de 50%. Logo, os materiais atendem às especificações estabelecidas por norma.

A Figura 2 mostra o aspecto morfológico do grafite comercial obtido por meio da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV). O material de enchimento apresenta uma estrutura em placas bem definidas no seu estado cristalino, e com uma superfície lisa e uniforme.

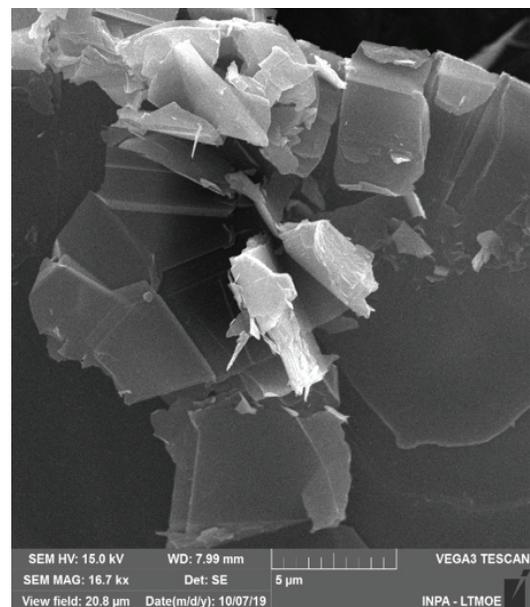


Figura 2: Imagem de microscopia eletrônica de varredura do grafite comercial
Fonte: Autor (2020).

Nas Tabelas 3 a 6 são apresentados os resultados de módulo complexo e do ângulo de fase. Os valores correspondem à média de dois corpos de prova produzidos para cada mistura. Os parâmetros são apresentados em função das temperaturas e frequências de carregamento.

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)						
	0	5	10	15	20	25	30
0,1	3806	1724	1433	1046	450	390	256
0,2	4046	2106	1712	1219	557	464	286
0,5	4464	2538	2125	1536	744	606	362
1	4854	2969	2473	1794	914	754	436
2	4972	3366	2846	2153	1131	945	532
5	5184	3872	3381	2565	1502	1188	697
10	5214	4294	3605	2911	1780	1370	840
20	5360	4552	3710	3339	2316	1645	992

Tabela 3: Módulo complexo: CA-REF
Fonte: Autor (2020).

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)						
	0	5	10	15	20	25	30
0,1	13,4	22,9	24,2	27,4	34,2	33,1	29,1
0,2	12,1	21,2	23,3	26,5	33,8	32,1	31,1
0,5	11,1	19,4	21,7	24,8	33,3	31,7	31,9
1	10,3	17,7	20,4	24,4	31,5	32,2	32,2
2	7,9	16,3	19,0	22,5	29,8	31,2	31,6
5	7,0	15,4	17,1	19,6	26,8	27,1	30,7
10	6,1	14,3	15,4	19,4	24,8	26,3	31,6
20	5,6	13,2	13,4	18,2	24,3	15,7	47,0

Tabela 4: Ângulo de fase: CA-REF
Fonte: Autor (2020).

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)						
	0	5	10	15	20	25	30
0,1	4379	2528	1647	1334	592	432	313
0,2	4738	2874	1979	1700	751	526	379
0,5	5298	3370	2360	2156	961	693	490
1	5733	3786	2673	2463	1151	843	593
2	5963	4165	3003	2868	1397	1033	728
5	6140	4484	3394	3169	1794	1319	919
10	6245	4735	3748	3373	2001	1562	1138
20	6580	4950	4248	3614	2353	1864	1352

Tabela 5: Módulo complexo: CA-GRAFP
Fonte: Autor (2020).

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)						
	0	5	10	15	20	25	30
0,1	12,2	18,0	20,8	25,6	29,7	34,3	36,9
0,2	11,1	16,4	18,8	23,3	28,9	33,8	38,4
0,5	9,9	14,9	17,2	21,4	28,7	32,8	37,8
1	8,7	13,5	15,9	20,1	28,4	32,2	37,8
2	7,5	12,2	14,6	18,9	27,3	30,7	36,7
5	6,8	11,7	13,2	18,4	26,5	28,0	35,0

10	5,8	9,8	12,0	17,4	24,1	27,1	33,9
20	5,1	8,0	11,2	16,2	21,3	32,8	48,7

Tabela 6: Ângulo de fase: CA-GRAFP
Fonte: Autor (2020).

Para evidenciar o aumento nos valores referentes ao módulo complexo ocasionado pela incorporação do grafite nas amostras asfálticas, bem como obter uma descrição mais ampla do comportamento mecânico das formulações estudadas, empregou-se o princípio da superposição frequência-temperatura para a construção das curvas mestras (Figura 3).

Com as frequências de ensaio 0,1 a 20Hz e temperaturas utilizadas de 0 a 30°C, foram calculados os fatores de translação horizontal (a_T) por meio da equação 1 de WilliamsLandel-Ferry (WLF).

$$\log a_T = \frac{-C_1 x (T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (1)$$

Onde, C1 é adimensional e C2 tem unidade de temperatura (K). Estas constantes dependem das propriedades do material e da temperatura de referência, T_{ref} .

A importância destas curvas reside em poder definir graficamente o módulo de rigidez para diversas temperaturas e frequências, para além das empregadas nos experimentos, o qual, pode-se ampliar significativamente a fronteira dos dados. Nesse caso específico, embora os ensaios realizados tenham se limitado a frequências compreendidas entre 0.1Hz e 20Hz, com a construção das curvas mestras, pode-se determinar o módulo de rigidez para as frequências compreendidas entre 10-4Hz e 108Hz.

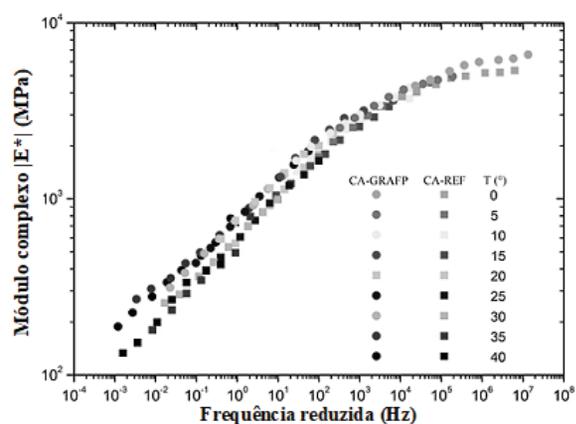


Figura 3: Curvas mestras das diferentes misturas
Fonte: Autor (2020).

Na Figura 3 observa-se a melhoria das misturas dos compósitos asfálticos produzidos com grafite comercial, no que se refere aos resultados de rigidez, em todo

o domínio de frequências. Comportamento semelhante registrou-se em Melo e Trichês (2016a) e Carlesso et al. (2019), que adotaram a mesma metodologia de estudo em pauta, embora os experimentos tenham sido realizados com ligantes modificados e com diferentes processos de compactação. Nessas circunstâncias, justifica-se as diferenças obtidas, especialmente, pelo tipo de material e moldagem dos concretos asfálticos utilizados nas pesquisas. Ainda quanto à diferença entre os resultados, vale salientar que as diferentes características mineralógicas dos agregados, dosagens e composição granulométrica adotadas nessa pesquisa, e sugere-se que esses fatores também possam ter contribuído para essa diferença.

Adicionalmente, para quantificar o aumento do parâmetro referente ao módulo complexo das misturas, a Tabela 7 apresenta, em termos percentuais, o aumento da rigidez, evidenciando os ganhos do módulo complexo das formulações asfálticas CA-GRAFP em comparação à mistura asfáltica CA-REF.

		Temperatura (°C)					
Frequência (Hz)	0	5	10	15	20	25	30
		Termos percentuais (%)					
0.1	15.05	46.59	14.93	27.51	31.64	10.93	22.30
0.2	17.10	36.48	15.58	39.46	34.90	13.31	32.54
0.5	18.67	32.77	11.06	40.38	29.22	14.32	35.60
1	18.10	27.53	8.08	37.28	25.93	11.81	36.21
2	19.94	23.74	5.52	33.21	23.48	9.29	36.79
5	18.44	15.79	0.36	23.56	19.43	11.01	31.94
10	19.77	10.25	3.97	15.87	12.42	14.08	35.47
20	22.75	8.75	14.49	8.24	1.59	13.34	36.29

Tabela 7: Aumentos no módulo complexo da mistura asfáltica CA-GRAFP em relação a mistura asfáltica CA-REF (ganhos em porcentagem)
Fonte: Autor (2020).

Na Tabela 7 é possível observar ganhos expressivos de módulo complexo com a utilização do grafite comercial. Por exemplo, na frequência de 10Hz, representativa de uma velocidade correspondente a 72 km/h (CHABOT et al., 2011), a adição do módulo complexo é da ordem de 35,47%, 14,08%, 12,42% e 15,87%, para as temperaturas de 30°C, 25°C, 20°C e 15°C, respectivamente. Sublinha-se que, na prática, o aumento da rigidez retrata um maior coeficiente angular na curva tensão-deformação (MELO e TRICHÊS, 2016a). Isso indica que a rigidez das misturas CA-GRAFP, em campo, sob um mesmo estado de tensões, seria menos sensível às deformações de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico.

Na Figura 4 apresenta-se o módulo de rigidez dinâmico em função da temperatura. Estas curvas relacionam o módulo complexo (escala logarítmica) com a temperatura (escala aritmética), e expressam a variação da rigidez em função das diferentes temperaturas e frequências de carregamento. Deste modo, é possível avaliar o desempenho térmico das composições a partir das inclinações das curvas, isto é, quanto maior a temperatura menor é a rigidez do concreto asfáltico.

É possível verificar que as isócronas apresentam a redução da rigidez à medida que há um aumento da temperatura de ensaio, ou seja, o valor de do módulo dinâmico é inversamente proporcional ao aumento de temperatura. Tais observações já eram esperadas, uma vez que para materiais viscoelásticos, o aumento de temperatura diminui sua rigidez. Ainda com os dados obtidos, nota-se um melhor comportamento térmico para as misturas CA-GRAFP no tocante à formulação referência. Em suma, isto indicaria que, em campo, as mudanças de temperatura exerceriam menor influência na rigidez da mistura com grafite comercial.

Os resultados obtidos estão em consonância com os encontrados por outros autores, Melo e Trichês (2017), Marcon (2016) e Carlesso (2017). Em termos mecânicos, os autores observaram que a incorporação de resíduos alternativos na mistura asfáltica, resulta em módulos e ângulos de fases superiores em comparação à mistura convencional.

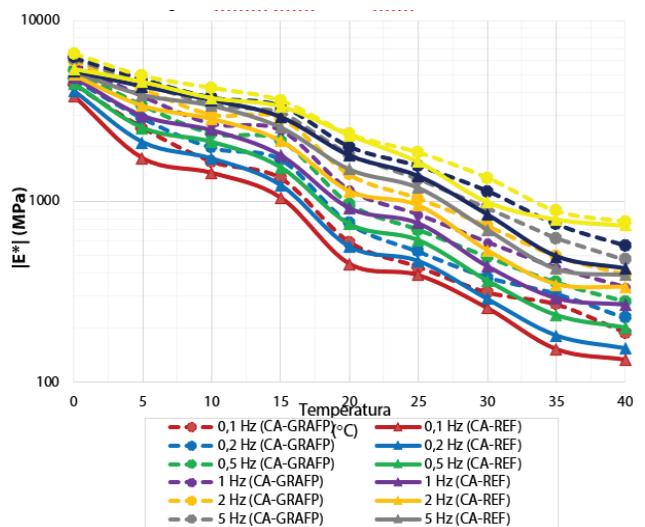


Figura 4: Isócronas, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFP
Fonte: Autor (2020).

Para se ter uma ordem de grandeza da velocidade equivalente à frequência de aplicação dos pulsos de carga, pode-se recorrer ao ábaco publicado por After Barksdale (1971), citado no trabalho de Huang (1993) que relaciona a velocidade com tempo de aplicação da carga,

e à relação empírica proposta por Van Der Poel (1954), também mostrada por Huang (1993), podendo ser representado pela Equação 2:

$$t = \frac{1}{2\pi f} \quad (2)$$

Onde t representa o tempo do pulso e f é a frequência.

Ao mesmo tempo, visando aumentar o entendimento dos resultados obtidos, selecionaram-se as frequências de 0,1Hz e 10Hz. Considerando-se a Equação 2 e o citado ábaco, verifica-se que a frequência de 0,1Hz corresponde a uma velocidade de 1,6km/h. E a frequência de 10Hz que ilustra uma velocidade de 72 km/h. Verifica-se, assim, que o aumento no parâmetro E* é mais expressivo a baixas temperaturas. Sublinha-se, igualmente, a redução do comportamento térmico à medida que se aumenta a frequência de carregamento. Consoante à composição CA-GRAFP, identifica-se, respeitante à mistura CA-REF e para todas as frequências de carregamento, ser menos suscetível à variação de temperatura. A partir desses resultados, constata-se que, a composição asfáltica CA-GRAP torna-se uma alternativa promissora como material aplicável em pavimentos rodoviários na região norte do Brasil, uma vez que nos meses mais quentes do ano a temperatura média diária na superfície dos pavimentos asfálticos alcança em torno de 60°C.

A melhoria das propriedades mecânicas das misturas alternativas pode ser justificada pela mudança na estrutura das misturas asfálticas devido às propriedades físico-químicas do grafite. Sua alta temperatura de fusão (3.650°C), além de baixo coeficiente de expansão térmica, lubrificante, ductilidade, compressível, flexível, boa condutividade elétrica e de calor (HARBEN e BATES, 1990).

Objetivando retratar o comportamento elástico das misturas asfálticas, e evitar possíveis discrepâncias nos resultados experimentais (AIREY, 2002), apresenta-se na Figura 5 os diagramas de Black para as misturas CA-REF e CA-GRAFP, que relaciona o módulo complexo (escala logarítmica) com os respectivos valores de ângulo de fase (escala aritmética), em função da frequência de carregamento e temperatura de ensaios.

De acordo com a mencionada figura, constata-se um encurtamento do espaço de Black da mistura CA-GRAFP em comparação a CA-REF. Em adição, observa-se uma tendência de aumento dos ângulos de fase, à medida que se aumenta a temperatura de ensaio. Portanto, a incorporação do material alternativo, em linhas gerais, gera redução dos ângulos de fase, tornando as amostras mais elásticas.

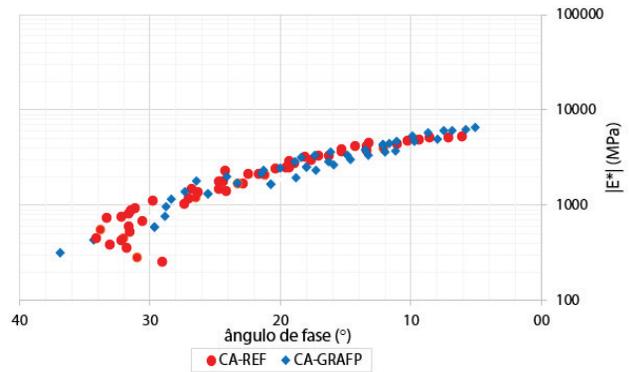


Figura 5: Espaço de Black, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFP
 Fonte: Autor (2020).

Assinala-se que não foram encontrados estudos correspondentes na literatura especializada, versando sobre a substituição do filer tradicional (cimento Portland) por materiais alternativos, em particular, o uso de grafite moído na formulação de concreto asfáltico estudada (CA-GRAFM) sob flexão a quatro pontos. Os trabalhos citados (MELO, 2014; MELO e TRICHÊS, 2016a; MARCON, 2016; CARLESSO, 2017; CARLESSO et al. 2019), embora tenham realizado similar experimento, pesquisaram composições com a participação de ligantes modificados e compactação empregando a mesa compactadora LCPC, condições bastante diferenciadas do estudo em apreço.

Em síntese, o aumento da temperatura, além de reduzir a resistência mecânica dos concretos asfálticos, tratada pela redução do módulo complexo, o torna mais suscetível às deformações permanentes, assim como o desempenho à fadiga, por aumentar a viscosidade do material. Na Tabela 8 são indicadas as reduções do ângulo de fase (em porcentagem) das misturas asfálticas CA-GRAFP relativa à mistura asfáltica CA-REF.

Frequência (Hz)							
Temperatura (°C)	0	5	10	15	20	25	30
	Porcentagem (%)						
0.1	9.95	27.22	16.49	7.03	15.15	-	-
0.2	9.01	29.66	24.10	13.61	17.12	-	-
0.5	12.41	30.64	25.98	15.75	15.87	-	-
1	17.88	31.60	28.10	21.70	10.92	-	-
2	25.33	34.16	29.91	19.21	9.00	1.63	-
5	26.47	32.19	29.55	6.52	1.21	-	-
10	23.61	46.67	28.33	11.49	2.90	-	-
20	19.61	66.04	19.64	12.35	14.19	-	-

Tabela 8: Redução em porcentagem do ângulo de fase, CA-GRAFP em relação ao CA-REF
 Fonte: Autor (2020).

Conforme os valores apresentados na Tabela 8, é possível verificar uma redução dos ângulos de fase em amostras contendo grafite comercial. Observa-se que, para a frequência de 10Hz (velocidade de tráfego de 72 km/h), quando utilizado o grafite comercial, a atenuação do ângulo de fase da mistura asfáltica é da ordem de 10,92%, 21,70% e 28,10%, nas mesmas temperaturas referenciadas anteriormente. De maneira geral, essas reduções do ângulo de fase, resulta em maior elasticidade da mistura asfáltica, ou seja, em campo, o concreto asfáltico CA-GRAFP apresenta maior capacidade de se recuperar completamente da deformação ocorrendo em cada ciclo de carga (passagem de um eixo de caminhão), reduzindo a acumulação de deformações permanentes (MELO e TRICHÊS, 2016a).

4. CONCLUSÕES

A principal contribuição deste estudo foi a proposição de concretos asfálticos com propriedades superiores à convencional, a partir da incorporação do grafite comercial. As misturas asfálticas foram analisadas por meio dos parâmetros de módulo complexo e ângulo de fase no equipamento 4PB. Com base nos resultados obtido, pode-se concluir que:

- a) O grafite comercial na função de fíler, mostra-se como sendo uma matéria prima com potencial a ser explorado em substituição ao fíler convencional;
- b) O compósito CA-GRAFP apresenta valores de E* superiores quando comparado a mistura tradicional. Também pode-se observar que mistura produzida com grafite foi responsável por uma diminuição significativa nos valores de ângulos de fase;
- c) A construção das curvas mestras, proporcionou observar o aumento de rigidez para da mistura asfáltica alternativa em relação à mistura convencional;
- d) A composição asfáltica CA-GRAFP mostra-se menos susceptível às variações de temperatura, que a mistura com material tradicional, fato este observado pelas curvas isócronas.
- e) Na análise do sistema de compactação, o citado sistema de compactação apresenta resultados satisfatórios, permitindo concluir que o sistema adotado nesta pesquisa pode ser empregado para confecção de vigas prismáticas de asfalto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro ao desenvolvimento

deste trabalho, por meio de concessão de bolsa de estudo e Bolsa de Produtividade em Pesquisa (PQ-Nível 2-Processo 30775-2018-5).

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **ASTM C 127: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate.** USA, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **ASTM C 131: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.** USA, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **ASTM C 128: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.** USA, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **ASTM D 5: Standard test method for penetration of bituminous materials.** USA. 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **ASTM D 36: Standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus).** USA. 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **ASTM E 102: Standard Test Method for Saybolt Furol Viscosity of Bituminous Materials at High Temperatures.** USA, 2016.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **ASTM D 4402: Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer.** USA. 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **ASTM D 92: Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester.** USA, 2018.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **ASTM D 2042: Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene.** USA, 2015.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **ASTM D 2872: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on a Moving Film of Asphalt (Rolling Thin-Film Oven Test).** USA, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **ASTM D 113: Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials.** USA, 2017.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM.

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

AIREY, G.D. Use of black diagrams to identify inconsistencies in rheological data. **Road Materials and Pavement Design**, v. 3, n. 4, p. 403-424, 2002.

BARDINI, V. S. S.; KLINSKY, L. M. G.; JÚNIOR, J. L. F.; ROQUE, R. Influência do fíler mineral no comportamento reológico de mástiques asfálticos. **Transportes**, v. 20, n. 3, p. 19-26, 2012.

BOCK, A. L.; HARTMANN, D.; BUDNY, J.; SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P. Estudo laboratorial sobre os efeitos de diferentes formas de adição de cal a concreto asfáltico. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, v. 14, p. 59-69, 2009.

CARLESSO, G. C. **Estudo do comportamento de mistura asfáltica modificada por nanoargila e polímero SBS.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Florianópolis, 2017.

CARLESSO, G. C.; TRICHÊS, G.; De Melo, J. V.S.; MARCON, M. F.; THIVES, L. P.; DA LUZ, L. C. Evaluation of Rheological Behavior, Resistance to Permanent Deformation, and Resistance to Fatigue of Asphalt Mixtures Modified with Nanoclay and SBS Polymer. **Applied Sciences-Basel**, v. 9, p. 2697-2713, 2019.

CHABOT, A.; CHUPIN, O.; DELOFFRE, L.; DUHAMEL, D. ViscoRoute 2.0 A: Tool for the Simulation of Moving Load Effects on Asphalt Pavement **Road Materials and Pavements Design**, v.11, n. 2, p.227-250, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. ES 031/2006: **Pavimentos flexíveis: concreto asfáltico: especificação de serviço.** Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **ME 035:1998: Agregados - determinação da abrasão "Los Angeles"**. Rio de Janeiro, 1998.

EUROPEAN STANDARD - EN. **EN 12697-26: Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt, part 26: Stiffness.** CEN, Brussels. 2004.

HARBEN P.; BATES R.L. **Industrial minerals geology and world deposit.** Industrial Minerals Division, Metal Bulletin, Londres, 1990.

Y. H. Huang. **Pavement analysis and design. Englewood Cliffs**, N.J., Prentice Hall, 1993.

KIM, Y. R. **Modeling of asphalt concrete.** United State of America: ASCE Press, 2009.

LIMA, C. A. P. **Comportamento mecânico com resíduos industriais, sob flexão a quatro pontos, para construção de pavimentos flexíveis.** 2017. 123p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

LEE, J. C.; EDIL, T. B.; BENSON, C. H.; TINJUM, J. M. Building environmentally and economically sustainable transportation infrastructure: green highway rating system. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 139, n. 12, 2013.

MARCON, M. F. **Estudo e comparação do desempenho mecânico e reológico entre concretos asfálticos modificados por polímero SBS, borracha moída de pneu e nanomateriais.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

MELO, J. V. S. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos.** Tese de Doutorado -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MELO, J. V. S.; TRICHÊS, G. Effects of organophilic nanoclay on the rheological behavior and performance leading to permanent deformation of asphalt mixtures. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28 n. 11, p. 04016142, 2016.

MELO, J. V. S.; TRICHÊS, G. Caracterização da Resistência à Fadiga de Misturas Asfálticas Reforçadas Com Camadas Nanométricas de Silicatos. **Revista Pavimentação**, v. 42, p. 43-58, 2016.

MELO, J. V. S.; TRICHÊS, G. Evaluation of properties and fatigue life estimation of asphalt mixture modified by organophilic nanoclay. **Construction and Building Materials**, v. 140, p.364-373, 2017.

MELLO, L. G. R. **O estudo do dano em meio contínuo no estudo da fadiga em misturas asfálticas.** Tese de Doutorado - Universidade de Brasília, Distrito Federal. 2008.

MENDES, L. O.; MARQUES, G. L. O. Avaliação da influência do método bailey no processo de dosagem e desempenho de misturas asfálticas. **Transportes**, v. 20, n. 4, p. 35-43, 2012.

MORENO-NAVARRO, F.; IGLESIAS, G. R.; RUBIO-GÁMEZ, M. C. Mechanical performance of mechanomutable asphalt binders under cyclic creep and recovery loads. **Construction and Building Materials**, v. 113, p.

506-512, 2016.

PAMPLONA, T. F.; AMONI, B. C.; ALENCAR, A. E. V.; LIMA, A. P. D.; Ricardo, N. M. P. S.; SOARES, J. B.; SOARES, S. A. Asphalt binders modified by SBS and SBS/nano-clays: effect on rheological properties. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 23, n. 4, p. 639-647, 2012.

PEREIRA, A. G.; LACERDA, B. M.; SILVA, M. P. S.; SPINOLA, J. R.; MONTEIRO, A. K. C.; FROTA, C. A. Evaluation of Mechanical Properties of Graphite Produced Asphalt Mixtures. **International Journal for Innovation Education and Research**, v. 8, p. 191-03, 2020.

PEREIRA, A. G.; SPINOLA, J. R.; MONTEIRO, A. K. C.; LACERDA, B. M.; GUSMAO, F. S.; FROTA, C. A. Mechanical Behavior of Asphaltic Mixtures Produced with Spray Graphite in High Energy Mill. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 9, p. 18-26, 2019.

SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P.; BORGES, P. A. Análise reológica de ligantes modificados com borracha de pneus. **Revista Pavimentação**, v. 2, p. 37-44, 2007.

SPECHT, L. P.; CERATTI, J. A. P.; BRITO, L. A.; BERNUCCI, L. B. Avaliação das propriedades plásticas de misturas asfálticas com incorporação de borracha de pneus através dos processos úmido e seco. **Revista Pavimentação**, v. 2, p. 34-43, 2007.

TORRES, A. P. **Compósitos com biochar e carvão vegetal para camadas de pavimentos asfálticos**. 2018. 69p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018.

TURNER, D. A.; WILLIAMS, I. D.; KEMP, S. Greenhouse gas emission factors for recycling of source-segregated waste materials. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 105, p. 186-197, 2015.

YAN, K.; XU, H.; YOU, L. Rheological properties of asphalts modified by waste tire rubber and reclaimed low density polyethylene. **Construction and Building Materials**, v. 83, p. 143-149, 2015.

AUTORES

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3563-4161>

ALEX GOMES PEREIRA, M.Sc. | Escola Politécnica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) | Engenharia Civil | São Leopoldo, RS - Brasil | Correspondência para: César Guerra Peixe, 5560. Bairro Flodoaldo Pontes Pinto. CEP: 76820576 | E-mail: alexgp885@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4138-7099>

BENÍCIO DE MORAIS LACERDA, M.Sc. | Escola Politécnica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) | Engenharia Civil | São Leopoldo, RS - Brasil | Correspondência para: Estrada Santo Antônio, 4763. Casa 07. Residencial Volpi. CEP: 7680575 | E-mail: benicio_lacerda@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7088-2502>

REGINA CÉLIA ESPINOSA MODOLO, Dra. | Escola Politécnica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) | Engenharia Civil | São Leopoldo, RS - Brasil | Correspondência para: Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Avenida Unisinos Cristo Rei. CEP: 93022000 | E-mail: reginaem@unisinos.br

COMO CITAR ESTE ARTIGO

PEREIRA, Alex Gomes; LACERDA, Benício de Moraes; MODOLO, Regina Célia Espinosa. Avaliação Laboratorial De Misturas Asfálticas À Quentes Produzidas Com Grafite Comercial. **MIX Sustentável, [S.l.], v. 7, n. 3, p. 89-98, ago. 2021**. ISSN 24473073. Disponível em: <<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>>. Acesso em: dia mês. ano. doi: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2021.v7.n3.89-98>.

DATA DE ENVIO: 26/12/2020

DATA DE ACEITE: 01/04/2021