

ALEX GOMES PEREIRA

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS
ASFÁLTICAS PRODUZIDAS COM GRAFITE PURO E
PULVERIZADO NO MOINHO DE ALTA ENERGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Consuelo Alves da Frota

Área de concentração: Materiais
Linha de pesquisa: Pavimentação.

**Manaus
2019**

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

P436c Pereira, Alex Gomes
Comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com grafite puro e pulverizado no moinho de alta energia / Alex Gomes Pereira. 2019
88 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Consuelo Alves da Frota
Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) -
Universidade Federal do Amazonas.

1. Flexão a quatro pontos. 2. Módulo complexo. 3. Ângulo de fase. 4. Grafite. 5. Grafite pulverizado. I. Frota, Consuelo Alves da II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

ALEX GOMES PEREIRA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
MISTURAS ASFÁLTICAS PRODUZIDOS COM GRAFITE
PURO E GRAFITE PULVERIZADO NO MOINHO DE ALTA
ENERGIA**

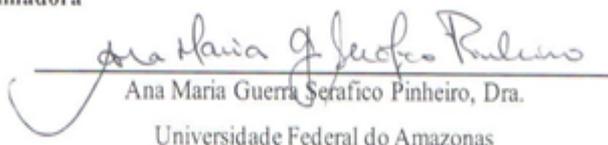
Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais
da Universidade Federal do Amazonas.



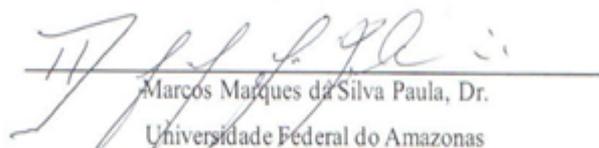
Prof^a. Consuelo Alves da Frota, Dra.

Orientadora

Banca Examinadora



Ana Maria Guerra Serafico Pinheiro, Dra.
Universidade Federal do Amazonas



Marcos Marques da Silva Paula, Dr.
Universidade Federal do Amazonas

A Deus, nosso criador e pai de infinita bondade. Aos meus Pais, Alberto e Marinês, pelo amor, carinho, incentivo e por todas as oportunidades que proporcionaram e pelo exemplo de vida a ser seguido. Aos meus irmãos Alberto e Mariane.

AGRADECIMENTOS

À Deus, em primeiro lugar e acima de qualquer coisa, por me conceder mais uma vitória, porque para Deus nada é impossível.

Aos meus pais, Alberto de Souza Pereira e Marinês Gomes de Araújo Pereira, pelo amor, carinho e o incentivo ao estudo. Sem vocês ao meu lado, nenhuma vitória na minha vida seria possível.

Aos meus irmãos Alberto Gomes Pereira e Mariane Vitória Gomes Pereira, pelo amor e auxílio em todos os momentos da minha vida.

À minha orientadora, Consuelo Alves da Frota, por acreditar em mim e me orientar com tanta presteza e acima de tudo, por não desistir de mim, nem quando eu aprontei. E por ocupar o papel de mãe, empenhando não apenas sua real função, mas também atuando como amiga e conselheira nos dias tristes.

Agradeço a minha moto (Pikachu), por nunca me abandonar. Você fez tanto por mim, e nunca me deixou na mão. Em meio a tantas chuvas, sol escaldante, calor intenso e inúmeras outras dificuldades. Nós sempre seguimos em frente e à frente.

Ao professor, orientador e amigo Benício de Moraes Lacerda, pelo incentivo à pesquisa e a vida acadêmica e sempre acreditou em mim durante toda minha caminhada acadêmica.

Ao meu amigo Juliano Rodrigues Spínola, por estar presente em todas as etapas, pelo auxílio em todos os ensaios laboratoriais desta pesquisa, pela amizade e por sempre estar disposto a ajudar.

Aos meus amigos Anne Karollynne Castro Monteiro, Matheus Pena da Silva e Silva e Ítalo Carvalho da Costa pela amizade verdadeira, pelo incentivo e por sempre acreditar em mim.

Ao meu amigo Diego Negreiros, que conheci durante esta caminhada, um dos maiores presentes que ganhei de Manaus.

À minha amiga Maria Emanuela Conceição Bernardo, pelo auxílio, pela amizade sincera, por ser o ombro amigo, o ouvido sempre postos a me escutar e constantemente torcer pelo meu sucesso.

Aos meus amigos de curso, Ricardo Ito de Messias, Darbens Silvio Correia Junior, Alexandra Lizandra Gomes Rosas e Ana Paula Miléo Guerra Carvalho pelo incentivo, apoio, auxílio, convívio, força e, principalmente, a grande ajuda nos momentos críticos ao longo desta jornada.

Aos professores da graduação Jayne Carlos Piovesan e Natália Souza Neves, por todo carinho, conhecimento e compressão.

Ao Grupo de Geotecnia (GEOTEC), pela disponibilização dos seus laboratórios de solos e comportamento mecânico, nos quais foram realizados todos os ensaios físicos e mecânicos deste trabalho.

Ao Laboratório de Materiais (LabMat/UFAM) pelo suporte na realização dos ensaios de DRX.

À Universidade Federal do Amazonas e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais que me concederam esta oportunidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudo para a realização desta pesquisa.

Aos meus amigos, Jefferson Camilo de Jesus Carvalho, Alisson Schutz Abreu, Antônio Alves de Lemos Filho, Patrick Denardi Santana, Francisco Elcimar Monteiro da

Silva, Massilon Marques de Castro e Emerson Diniz Viriato Ortiz pela torcida, apoio e pelas palavras de incentivo.

Aos meus colegas do GEOTEC, os quais não poderia deixar de mencionar: Fábio dos Santos Gusmão, Louise Motta de Oliveira Souza, Brendo Wesley Souza de Azevedo e Ythana Isis Lopes da Silva Aflitos.

Ao meu amigo, Carlos Eduardo Neves de Castro, pelos ensinamentos e auxílios na produção de misturas asfálticas.

À Construtora e Pavimentação LTDA (ARDO), pela doação de todos os materiais utilizados nessa pesquisa.

Desejo os mais sinceros agradecimentos aos demais amigos, que direta ou indiretamente, contribuíram e acreditaram no êxito desse trabalho.

Com todo o carinho e de coração eu agradeço. Muito obrigado!

*Nunca se esqueça de quem
é, porque é certo que o
mundo não se lembrará.
Faça disso sua força. Assim,
não poderá ser nunca a sua
fraqueza. Arme-se com essa
lembrança, e ela nunca
poderá ser usada para
magoá-lo.*

George R.R. Martin

RESUMO

Os pavimentos são submetidos as cargas dinâmicas resultantes de várias combinações de carregamentos decorrentes dos veículos e 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 presente trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de mecânico de misturas asfálticas produzidas com grafite puro e pulverizado no moinho de alta energia (MAE), por meio do ensaio de flexão em viga a quatro pontos. O programa experimental consistiu na produção de corpos de prova prismáticos de misturas asfálticas com filer tradicional (CA-REF) e alternativas (CA-GRAFP, CA-GRAFM), que foram submetidos aos ensaios no equipamento “Pneumatic 4 Point Bending Apparatus”. A metodologia seguiu as recomendações da norma europeia EN 12697-26: Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt, part 26: Stiffness, com aplicação de carregamento senoidal uniaxial de compressão, amplitude de deformação de 50 $\mu\text{m/m}$, sob as frequências de 0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz e temperaturas de ensaio de 0 °C a 40 °C, com incrementos de 5 °C. Os valores obtidos mostraram que os compósitos asfálticos produzidos com grafite registraram os melhores resultados de para módulo complexo quanto o ângulo de fase, em comparação com a formulação referência.

Palavras-chave: flexão a quatro pontos, módulo complexo, ângulo de fase, grafite, grafite pulverizado, concreto asfáltico.

ABSTRACT

Pavements are subjected to dynamic loads resulting from various vehicle loading combinations and environmental conditions. The performance of asphalt concretes in terms of linear viscoelastic behavior can be predicted using the stress-strain behavior that can be defined by the complex modulus. Among the most modern options for obtaining them are four-point flexion tests. In this context, the present work aimed to study the mechanical behavior of asphalt mixtures produced with pure and pulverized graphite in the high energy mill (MAE), by means of the four-point bending test. The experimental program consisted of the production of prismatic specimens of traditional asphalt mixtures (CA-REF) and alternative mixtures (CA-GRAFP, CA-GRAFM), which were subjected to testing on the Pneumatic 4 Point Bending Apparatus equipment. The methodology followed the recommendations of the European standard EN 12697-26: Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt, part 26: Stiffness, with uniaxial compression sine loading, strain amplitude of $50 \mu\text{m} / \text{m}$, under the frequencies of 0.1 Hz, 0.2 Hz, 0.5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz and test temperatures from 0°C to 40°C in 5°C increments. The values obtained showed that asphalt composites produced with graphite registered the best results for complex modulus as the phase angle, compared to the reference formulation.

Keywords: four point bending, complex modulus, phase angle, graphite, pulverized graphite, asphalt concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Densidade da malha rodoviária pavimentada por país (km/1.000 km ²).....	19
Figura 1.2 - Malha Rodoviária, 2009 e 2017.....	20
Figura 1.3 - Patologias encontradas nas rodovias amazonenses.....	21
Figura 1.4 - Patologias: a) Trincas em bloco; b) Trincas couro-de-jacaré; c) Afundamento de Revestimento; d) Escorregamento.....	22
Figura 2.1 - Modelo de viga para ensaio 4PB.....	26
Figura 2.2 - Carregamento Senoidal.....	27
Figura 2.3 - Representação esquemática do módulo complexo no plano complexo.....	28
Figura 2.4 - Representação esquemática de diferentes alótropos de carbono: a) grafite; b) diamante; c) fulereno; d) nanotubo de carbono de parede simples; e) nanotubo de carbono de parede múltipla; f) grafeno.....	29
Figura 2.5 - Estrutura do grafite.....	30
Figura 2.6 - a) Corpos de prova moldados para o ensaio de Lottman modificado; b) placa de concreto asfáltico para a realização do ensaio de deformação permanente; c) corpo de prova prismático para a realização do ensaio de módulo complexo.....	32
Figura 3.1 - Estrutura da metodologia.....	34
Figura 3.2 - a) brita 1; b) brita 0; c) pó de pedra; d) areia; e) cimento asfáltico petróleo.....	35
Figura 3.3 - Imagens do grafite: a) antes do processo; b) após o processo de moagem.....	36
Figura 3.4 - Processo de preparação dos corpos de prova: a) pesagem do agregado; b) pesagem do ligante; c) aquecimento dos agregados minerais; d) adição do ligante asfáltico; e) homogeneização da mistura; f) processo de envelhecimento; g) introdução da mistura no molde para compactação; h) envelhecimento dos corpos de prova por 24 h; i) extração dos corpos de prova após o período de 24 h; j) corpos de prova após a retiradas dos moldes.....	41
Figura 3.5 - a) molde metálico para moldagem e compactação das vigas; b) prensa hidráulica 30 ton.....	44
Figura 3.6 - a) câmara climática; b) aparato de teste 4 pontos.....	46
Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos materiais.....	48
Figura 4.2 - Difratoograma das amostras de grafite.....	51
Figura 4.3 - Difratoograma das amostras de grafites, segundo pico das amostras de grafite.....	52
Figura 4.4 - Curvas isotérmicas, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFP.....	57

Figura 4.5 - Curvas isotérmicas, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFM.....	58
Figura 4.6 - Curvas isotérmicas, mistura CA-GRAFP x mistura CA-GRAFM.....	59
Figura 4.7 - Curvas isotérmicas, temperaturas 25 °C e 40 °C.....	60
Figura 4.8 - Curvas mestras das diferentes misturas.....	61
Figura 4.9 - Ganhos no módulo complexo em porcentagens.....	63
Figura 4.10 - Isócronas, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFP.....	64
Figura 4.11 - Isócronas, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFM.....	65
Figura 4.12 - Isócronas, mistura CA-GRAP x mistura CA-GRAFM.....	66
Figura 4.13 - Isócronas, mistura CA-GRAP x mistura CA-GRAFM.....	67
Figura 4.14 - Espaço de Black, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFP.....	68
Figura 4.15 - Espaço de Black, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFM.....	69
Figura 4.16 - Espaço de Black, mistura CA-GRAP x mistura CA-GRAFM.....	69
Figura 4.17 - Ângulo de fase (δ) versus frequência, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFP	71
Figura 4.18 - Ângulo de fase (δ) versus frequência, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFM	72
Figura 4.19 - Ângulo de fase (δ) versus frequência, mistura CA-GRAP x mistura CA-GRAFM	73
Figura 4.20 - Redução em porcentagem do ângulo de fase, CA-GRAFP em relação ao CA-REF.....	74
Figura 4.21 - Redução em porcentagem do ângulo de fase, CA-GRAFM em relação ao CA-REF.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Classificação por rodovia pesquisada - Amazonas.....	22
Tabela 3.1 - Caracterização dos agregados.....	38
Tabela 3.2 - Caracterização Ligante asfáltico.....	40
Tabela 3.3 - Dosagem da mistura asfáltica a quente.....	41
Tabela 3.4 - Dosagem das misturas.....	44
Tabela 3.5 - Tempo mínimo de aclimação das amostras.....	47
Tabela 4.1 - Caracterização dos agregados.....	49
Tabela 4.2 - Coeficientes de Uniformidade e de Curvatura dos agregados.....	50
Tabela 4.3 - Propriedades do ligante asfáltico.....	50
Tabela 4.4 - Parâmetros volumétricos do teor de projeto.....	54
Tabela 4.5 - Módulo complexo e Ângulo de fase, CA-REF.....	55
Tabela 4.6 - Módulo complexo e Ângulo de fase, CA-GRAFP.....	56
Tabela 4.7 - Módulo complexo e Ângulo de fase, CA-GRAFM.....	57
Tabela 4.8 - Aumentos no módulo complexo da mistura asfáltica CA-GRAFP e CA-GRAFM em relação a mistura asfáltica CA-REF (ganhos em porcentagem).....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

4PB	Four-Point Bending Beam test
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM	Amazonas
AMP	Asfalto Modificado por Polímero
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ARDO	Construtora e Pavimentação LTDA
ASTM	American Society for Testing and Materials
BR	Brasil
CA	Concreto Asfáltico
CA-REF	Concreto Asfáltico com cimento Portland
CA-GRAFP	Concreto Asfáltico com grafite puro
CA-GRAFM	Concreto Asfáltico com grafite moído por 4 h
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CP	Corpo de Prova
Cu	Cobre
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (Extinto)
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DRX	Difratometria de Raios-X
EM	Europäische Norm
GEOTEC	Grupo de Pesquisa em Geotecnia
Gmb	Massa específica aparente
Gmm	Massa específica máxima medida
Gsa	Massa específica real
Gsb	Massa específica aparente
Gsbssd	Massa específica superfície saturada seca
LabMat	Laboratório de Materiais
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
MAE	Moagem de Alta Energia
NA	Nanoargila
NTC	Nanotubo de Carbono
PET	Polietileno Tereftalato
REMAN	Refinaria Isaac Sabbá
RILEM	International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures
RTFOT	Rolling Thin-Film Oven Test
SBS	Estireno-Butadieno-Estireno
TNM	Tamanho Nominal Máximo
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
V	Volume do líquido deslocado (g/cm ³)
Va	Volume de vazios

VCB	Volume de vazios com betume
VFA	Volume de vazios preenchidos com ligante
VMA	Volume de vazios do agregado mineral

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
A	Massa ao ar da amostra seca
B	Massa na condição saturada de superfície seca
B	Largura na metade da altura do pico mais intensivo de difração
C	Massa da amostra imersa em água
cm^3	Centímetro cúbico
cP	Centipoise
D	Massa do recipiente cheio de água a 25 °C
E	Massa do recipiente com a amostra e água a 25 °C
°C	Grau Celsius
D	Diâmetro
E_1	Parte real do módulo complexo
E_2	Parte imaginária do módulo complexo
E^*	Módulo Complexo
$ E^* $	Módulo dinâmico
F	Frequência de carregamento
G	Gramas
g/cm^3	Gramas por metro cúbico
Ga	Massa específica real do cimento asfáltico de petróleo
Gar	Massa específica real da areia
Gb0	Massa específica real da brita 0
Gb1	Massa específica real da brita 1
Gc	Massa específica real do cimento Portland
Gp	Massa específica real do pó de pedra
H	Altura
H	Hora
Hz	Hertz
Km	Quilômetro
Km^2	Quilômetro quadrado
M	Metro
Ma	Massa do frasco mais líquido para a primeira leitura do nível
Mc	Massa do material utilizado
Min	Minuto
Mm	Milímetro
Mt	Massa do frasco preenchido por líquido e o material
S	Segundo
S	Massa na condição saturada de superfície seca
t	Tempo
T	Temperatura de ensaio
ton	Tonelada
Θ	Ângulo de difração medido
Λ	Comprimento de onda
σ_0	Amplitude de tensão
ϵ_0	Amplitude de deformação

δ Ângulo de fase
 ω Velocidade angular

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	26
1.1	Objetivos	29
1.1.1	Objetivo geral.....	29
1.1.2	Objetivos específicos.....	29
1.2	Estrutura da Dissertação	30
2	REVISÃO DA LITERATURA	31
2.1	Conceituações	31
2.1.1	Módulo de Rigidez ou Módulo Complexo (E*).....	31
2.1.1.1	<i>Flexão a quatro pontos</i>	32
2.2	Estruturas de Carbono	35
2.3	Misturas Asfálticas Alternativas	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	Materiais	41
3.1.1	Agregados e Cimento Asfáltico de Petróleo.....	42
3.1.2	Grafite.....	42
3.2	Caracterização dos materiais	43
3.3	Dosagem das misturas asfálticas	47
3.3.1	Massa específicas e Volumes.....	47
3.3.2	Massa para moldagem dos corpos de provas.....	49
3.4	Moldagem dos corpos de prova prismáticos e ensaios mecânicos	50
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	54
4.1	Agregados minerais	54
4.2	Cimento Asfáltico de Petróleo	55
4.3	Grafite	56
4.4	Parâmetros Volumétricos	58
4.5	Avaliação do comportamento mecânico	59
4.5.1	Isotérmicas e Curvas Mestras.....	62
4.5.2	Isócronas e Diagramas de Black.....	69
4.5.3	Ângulo de Fase (δ).....	76

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	82
REFERÊNCIAS.....	84

CAPÍTULO 1

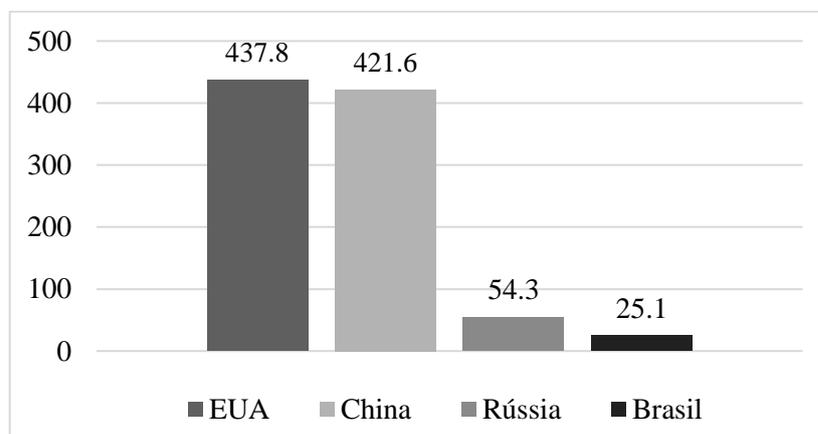
1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história da humanidade, o homem tem utilizado o transporte de mercadorias para disponibilizar seus produtos. Nas últimas décadas, mesmo com os avanços tecnológicos dos meios de comunicação que permitem a troca de informações em tempo real, o transporte físico continua sendo imprescindível.

Em particular, nas primeiras décadas do século XX, o governo brasileiro passou a priorizar a mobilidade rodoviária, em relação aos modais ferroviário e fluvial. Em paralelo, o processo de industrialização automobilística proporcionou o desenvolvimento e consolidação do sistema viário como o principal meio de condução do Brasil.

Em conformidade com as pesquisas realizadas pela Confederação Nacional do Transporte (CNT), no exercício de 2018, esse é o principal meio de transporte do país, contando com mais de 1,7 milhões de quilômetros de estradas, sendo responsável pela movimentação de 61% das mercadorias e por 95% de passageiros. Conforme o citado trabalho, o sistema rodoviário apesar de ser caracterizar como o fundamental meio de transporte, conta com apenas 12,4% de rodovias pavimentadas, com 57% da sua extensão apresentando algum tipo de anomalia. O resultado dessa malha viária mostra 35,2% em estado regular, 15,3% ruim e 6,5% péssimo. Confrontando o modelo predominante no Brasil, em relação a outros países, com características territoriais semelhantes, a densidade das rodovias nacional ainda é insuficiente (Figura 1.1).

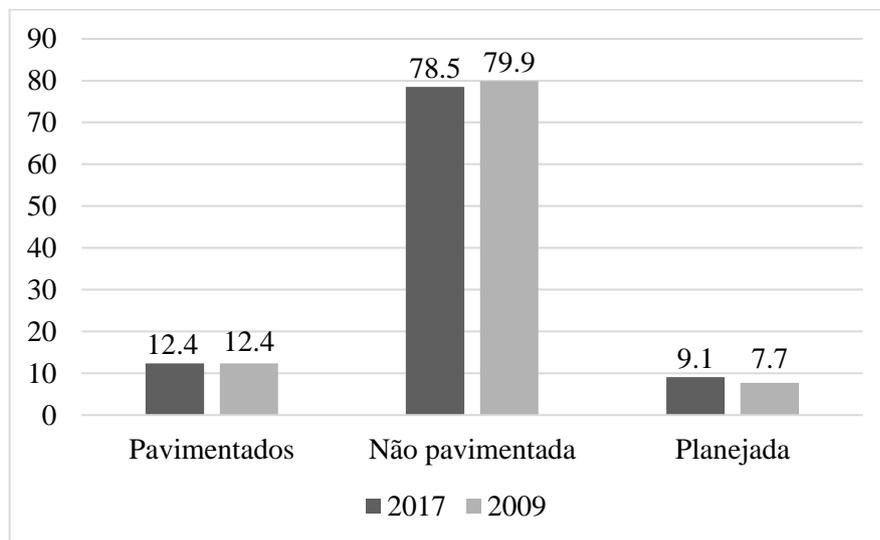
Figura 1.1 - Densidade da malha rodoviária pavimentada por país (km/1.000 km²)



Fonte: Adaptado, CNT (2018).

Também consoante ao mencionado estudo, a extensão total da malha pavimentada cresceu apenas 0,45%, ou seja, ficou praticamente estagnada nos últimos nove anos, que destaca a dificuldade que o país enfrenta de imprimir ritmo mais consistente de expansão do seu sistema viário. Corroborando tal assertiva, esse sistema mostra uma extensão total de 1.720.700,3 km de estrada em 2017, em que somente 12,4% são pavimentados (213.452,8 km), isto é, o setor rodoviário enfrenta sérios problemas com a baixa qualidade da infraestrutura. A Figura 1.2 apresenta esses dados de 2009 e 2017.

Figura 1.2 - Malha Rodoviária, 2009 e 2017



Fonte: Adaptado, CNT (2018).

Regionalmente o anuário CNT (2018), expõe uma pesquisa mais completa que considera fatores com o estado geral, sinalização e geometria das vias, constatando que os pavimentos do Estado do Amazonas são: 0,9% ótimo, 39,6% regular, 26% ruim e 33,5% péssimo. Logo, 99,1% da extensão encontra-se em estado regulares, ruins ou péssimas (Tabela 1.1). O custo de operação do transporte nessa região é de 49,6%, enquanto a média nacional corresponde a 27%. A Figura 1.3 ilustra a problemática das rodovias no Amazonas.

Tabela 1.1 - Classificação por rodovia pesquisada - Amazonas

Rodovia	Extensão pesquisada - km	Estado Geral	Pavimento	Sinalização	Geometria de Via
AM-010	254	Péssimo	Péssimo	Péssimo	Ruim
AMT-174/BR-174	31	Ruim	Ruim	Ruim	Regular
BR-174	480	Ruim	Ruim	Ruim	Ruim
BR-230	33	Regular	Regular	Bom	Ruim
BR-317	116	Ruim	Péssimo	Regular	Ruim
BR-319	417	Ruim	Péssimo	Ruim	Ruim

Fonte: CNT (2018).

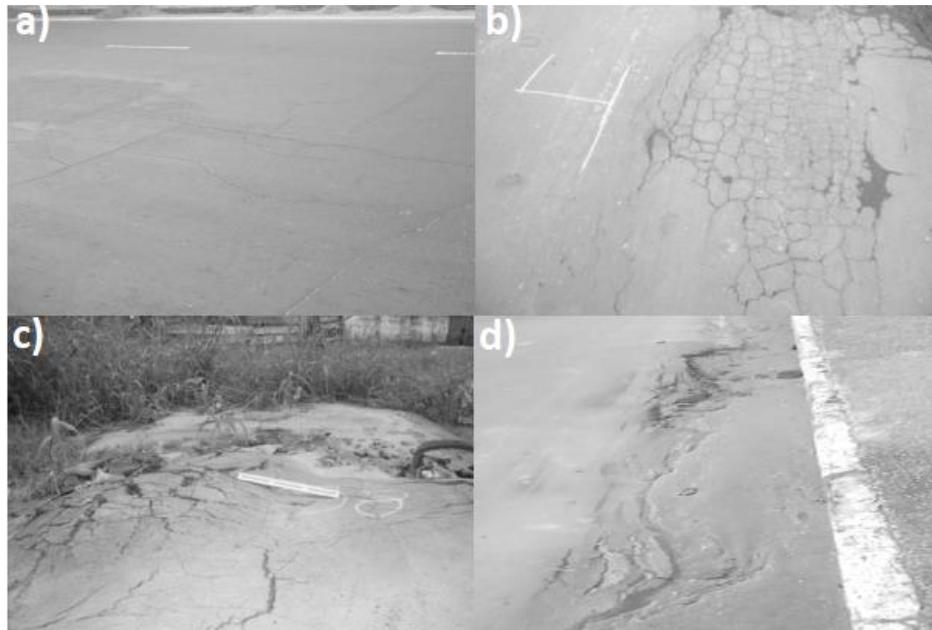
Figura 1.3 - Patologias encontradas nas rodovias amazonenses



Fonte: CNT (2018).

No que se refere a infraestrutura rodoviária do Município de Manaus, o Grupo de Pesquisa em Geotecnia (GEOTEC) da Universidade Federal do Amazonas (UFAM) realizou um levantamento visual das patologias (CAVALCANTE et al., 2012), visando analisar a situação da superfície dos pavimentos. A Figura 1.4 expõe algumas das anomalias encontradas.

Figura 1.4 - Patologias: a) Trincas em bloco; b) Trincas couro-de-jacaré; c) Afundamento de Revestimento; d) Escorregamento



Fonte: Cavalcante et al. (2012).

Nesse contexto, e em particular à pavimentação regional, tornam-se relevantes os estudos de novos materiais a serem utilizados em concretos asfálticos, a fim de favorecer a implementação de políticas de manutenção e recuperação, e, em especial, minimizar a exploração de recursos não renováveis normalmente usados nessas estruturas.

Dessa forma, o presente trabalho estudou o comportamento mecânico de composições asfálticas (referência e alternativas), a partir do ensaio de flexão a quatro pontos, em que se determinaram o módulo complexo e ângulo de fase.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar o desempenho mecânico, sob flexão a quatro pontos, de misturas asfálticas do tipo Concreto Asfáltico (CA) usuais com fíler tradicional (cimento Portland) e alternativas com a participação do grafite (natural e pulverizado no moinho de alta energia), visando seu emprego nos pavimentos regionais.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar individualmente os materiais integrantes dos compósitos asfálticos;
- b) Determinar os parâmetros de moldagem das composições asfálticas;
- c) Avaliar o desempenho mecânico das formulações asfálticas, do tipo concreto asfáltico (CA), com participação do cimento Portland, grafite puro e grafite pulverizado no moinho de alta energia, por meio do ensaio de flexão a 4 pontos;
- d) Comparar os valores do módulo complexo e ângulo de fase de concretos asfálticos com grafite puro e grafite pulverizado relativos aqueles oriundos da composição tradicional (cimento Portland).

1.2 Estrutura da Dissertação

O texto desta Dissertação encontra-se subdividida da seguinte forma:

No Capítulo 1 tem-se a visão geral da pesquisa, os objetivos do estudo e a forma da organização do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentada a revisão da literatura, em que se expõe a fundamentação teórica, sendo abordadas as informações sobre os ensaios mecânicos, módulo de rigidez, misturas asfálticas alternativas e estruturas de carbono.

No Capítulo 3 discutem-se os materiais, a dosagem das misturas asfálticas, processo de moagem do grafite, confecção das composições asfálticas, os procedimentos para realização do ensaio de flexão a quatro pontos, e as específicas metodologias adotadas.

No Capítulo 4 são expostos os resultados alcançados com a caracterização dos materiais, a dosagem, a confecção dos corpos de prova e os ensaios mecânicos.

Por fim, no Capítulo 5 são formalizadas as conclusões do trabalho. Do mesmo modo, são sugeridas recomendações e sugestões para futuros trabalhos.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão dissertados os fundamentos para a pesquisa. A revisão de literatura é realizada abordando tópicos referentes ao comportamento mecânico de concretos asfálticos. Também são discutidos trabalhos presentes na literatura que abordam a obtenção do módulo de rigidez e ângulo de fase por meio de ensaios em corpos de provas prismáticos.

2.1 Conceituações

2.1.1 Módulo de Rigidez ou Módulo Complexo (E^*)

Historicamente, a noção de módulo complexo em composições asfálticas tem como um de seus precursores o engenheiro Papazian, que em 1962, introduziu pela primeira vez os ensaios viscoelásticos nesse tipo de formulação. Ele realizou um ensaio aplicando uma tensão senoidal em um corpo de prova cilíndrico segundo uma determinada frequência e media as deformações resultantes. Tais experimentos executavam-se sob condições controladas de temperaturas, em variadas amplitudes de carga e frequência, concluindo-se que os conceitos viscoelásticos poderiam ser empregados em projetos e estudo do desempenho de pavimentos asfálticos (CLYNE et al., 2003).

Já na década de 70, aqueles testes puderam ser realizados de acordo com diversas formas de carregamento. Verificou-se que as principais diferenças foram encontradas nos ângulos de fase e tendiam ser mais significativo em função do aumento das temperaturas. Witczack & Root (1974) e Bonnaure et al. (1977) constataram que os ensaios de tração-compressão são mais representativos para condições de carga de campo. Usaram uma amostra trapezoidal fixada na parte inferior, sendo submetido a uma carga sinusoidal na extremidade livre (CLYNE et al., 2003).

No fim da década de 80 e início dos anos 90, surgiram resultados mais abrangentes sobre essa temática. Artigos científicos e dados relevantes passaram a ser publicados e difundidos em toda Europa. A União Internacional de Laboratórios e Peritos em Materiais de Construção, Sistemas e Estruturas (International Union of Testing and Research Laboratories for Material and Structures, sigla RILEM), Comitê Técnico de Betume (em inglês Technical

Committee on Bitumen) e Asphalt Testing, criaram um programa internacional de testes, cujo objetivo era o desenvolvimento de novos projetos e metodologias que pudessem fazer medições para pavimentos de asfalto. Os ensaios de E^* sucederam em 15 laboratórios de diversos países da Europa. Sendo aplicados em diferentes temperaturas, amostras, geometrias e carregamentos. Esse programa possibilitou o surgimento de novos métodos de dosagens, compactação e ensaios mecânicos (CLYNE et al., 2003).

2.1.1.1 Flexão a quatro pontos

Uma das formas de se verificar o desempenho das composições asfálticas, em termos de comportamento viscoelástico, é determinar o comportamento tensão-deformação definido por um módulo de cisalhamento dinâmico ou complexo (LOULIZI et al. 2006; HAFEEZ et al. 2012), como também pelo módulo complexo (E^*) e ângulo de fase (δ). Tais parâmetros podem ser obtidos por meio de ensaios em vigas prismáticas, flexão em barras, compressão diametral ou uniaxial em corpos cilíndricos, propagação de ondas mecânicas (CLYNE et al. 2003), ou por meio de modelos de previsão baseados na granulometria dos agregados e características do ligante asfáltico (WITCZACK & FONSECA, 1996).

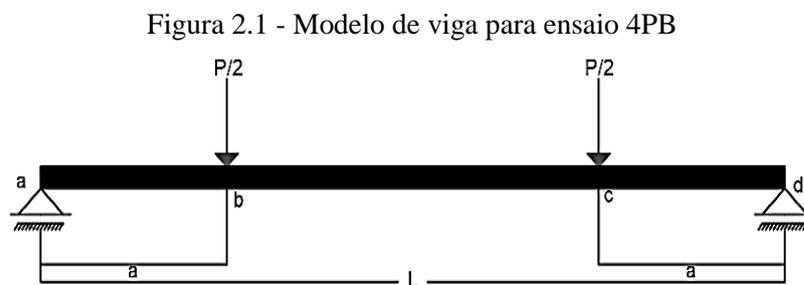
Dentro da análise mecanicista o módulo complexo se mostra de grande importância, em virtude do concreto asfáltico mostrar deformações, decorrentes da aplicação de cargas, conforme duas respostas: elástica (agregados) e viscosa (ligante asfáltico). Deste modo, o citado parâmetro se torna de fundamental relevância por descrever de forma mais realista as características viscoelásticas dessas composições.

A determinação do módulo de rigidez por meio do equipamento “*Pneumatic 4 Point Bending Apparatus* (4PB)” mediante aplicação de carregamentos senoidais com o monitoramento dos deslocamentos senoidais em laboratório é um procedimento considerado especial, por exigir equipamentos relativamente complexos e caros, tornando reduzido o seu uso fora das instituições de pesquisa. Isso explica a limitação, no Brasil, no que diz respeito à determinação das propriedades dinâmicas de composições asfálticas, principalmente quando se trata da obtenção, em laboratório, do módulo de rigidez por meio dos testes de flexão a quatro pontos. Embora se realizem testes de compressão uniaxiais, ainda assim limitados as instituições de pesquisa e pouco difundido no país, sobretudo por causa de limitações de equipamentos.

À vista disso, trabalhos abordando a obtenção do módulo complexo por meio de ensaios em corpos de provas prismáticos no país são muito recentes, tais como: Silva (2014);

Colpo (2014); Melo (2014); Marcon (2016); Melo & Trichês (2016); Silva e Frota (2016), Carlesso (2017); Lima (2017); Torres (2018); Carlesso et al. (2019).

O ensaio de flexão a quatro pontos se caracteriza por submeter um corpo de prova prismático de concreto asfáltico (Figura 2.1), a pulsos de cargas sinusoidais contínuas e consecutivas nos terços médios da amostra. Conforme a norma EN 12697-26 - *Bituminous Mixtures, Test Methods for Hot Mix Asphalt*, executa-se esse teste em diferentes frequências, que podem variar de 0,1 Hz a 50 Hz, e diversas temperaturas, entre -30 °C a 40 °C. Segundo Colpo (2014), quando as cargas senoidais são transmitidas tem-se o mesmo nível de deslocamento para o lado inferior e superior, com amplitudes de deslocamentos constantes e alternadas ao longo do tempo.



Fonte: Autor (2019).

Na determinação do E^* o carregamento unidimensional sinusoidal e a tensão resultante podem ser representados pelas Equações 2.1 e 2.2 (KIM, 2009). A Figura 2.2 mostra esquematicamente tais características. Assim, o módulo complexo pode ser definido pela relação entre a tensão senoidal e a deformação (Equação 2.3).

$$\sigma^* = \sigma_0 e^{i\omega t} \quad 2.1$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)} \quad 2.2$$

$$\frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = E^*(i\omega) = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \right) e^{i\varphi} = E_1 + E_2 \quad 2.3$$

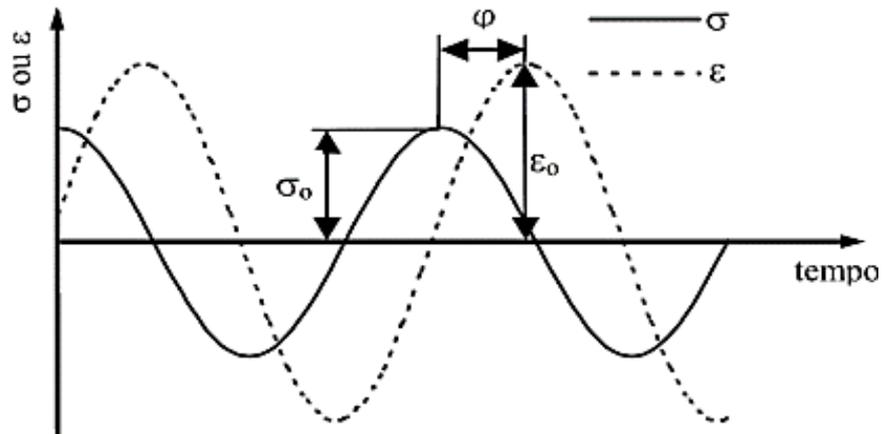
Onde, σ_0 corresponde a amplitude de tensão, ε_0 a amplitude de deformação, t o tempo, δ o ângulo de fase, sendo este a diferença de tempo entre os picos de tensão e deformação e ω é a velocidade angular, que está relacionado com a frequência (Equação 2.4). Destaca-se que

E_1 e E_2 retratam, respectivamente, a parte real (módulo de armazenamento ou elástico) e a parte imaginária (módulo viscoso).

$$\omega = 2\pi f$$

2.4

Figura 2.2 - Carregamento Senoidal



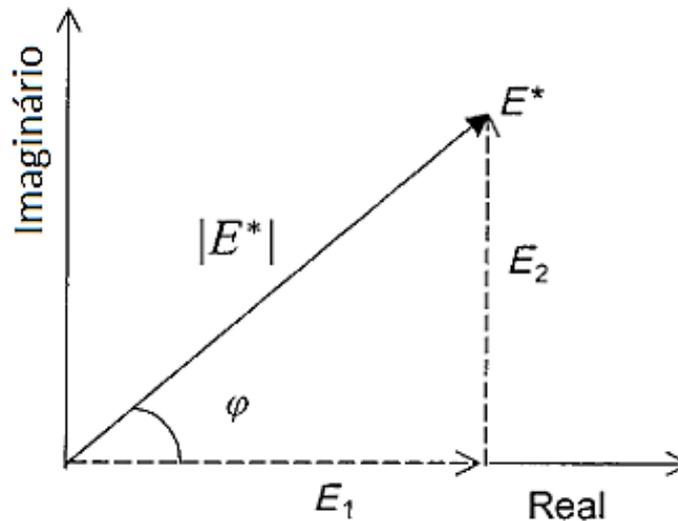
Fonte: Silva & Frota (2016).

A relação entre a amplitude da tensão e deformação (Equação 2.3) é definido como o módulo dinâmico $|E^*|$, sendo dado pelo valor absoluto do módulo complexo E^* . A Figura 2.3 mostra o plano complexo, no qual, as partes real e imaginária do módulo rigidez podem ser representados pela Equação 2.6.

$$|E^*(\omega)| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad 2.5$$

$$E^* = E_1 + E_2 \quad 2.6$$

Figura 2.3 - Representação esquemática do módulo complexo no plano complexo



Fonte: Adaptado, Kim (2009).

Também os módulos E_1 e E_2 podem ser representados como uma função do δ de acordo com as Equações 2.7 e 2.8. Centofante (2016) explica que o δ pode ser descrito como um indicador das propriedades viscosas do material ensaiado e pode ser concebido como o ângulo de atraso de ε_0 em relação a σ_0 (Equação 2.9).

$$E_1 = \frac{\sigma_0 \cos \varphi}{\varepsilon_0} \quad 2.7$$

$$E_2 = \frac{\sigma_0 \sin \varphi}{\varepsilon_0} \quad 2.8$$

$$\delta = \frac{t_i}{t_p} \times 360 \quad 2.9$$

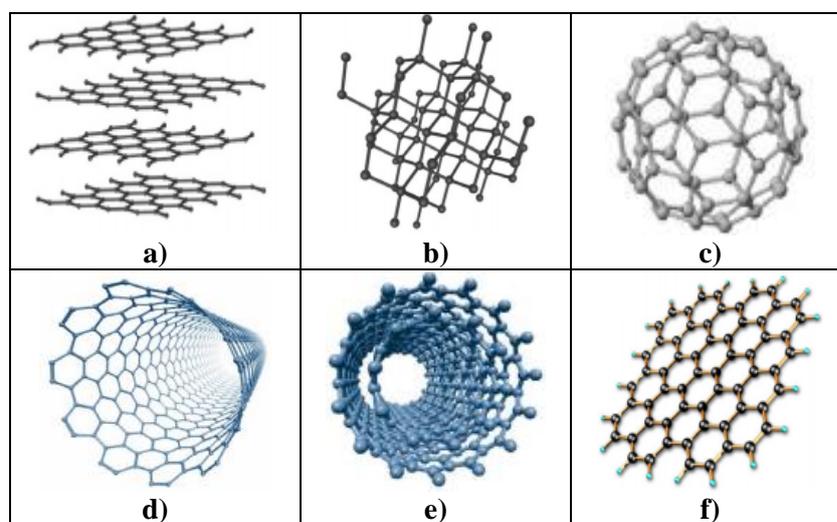
Em que, t_i representa a fração do tempo entre os picos de tensão e deformação, t_p o tempo de um ciclo de carga e ω é a frequência angular.

2.2 Estruturas de Carbono

O carbono é um dos elementos químicos mais importantes, por ser indispensável à existência da vida e por exibir aplicações em diferentes áreas do conhecimento. Dependendo

das suas condições de formação, pode ser encontrado na natureza em diversas formas alotrópicas, como: o carbono amorfo (negro de fumo, carvão comum, coque, carbono vítreo, etc.), cristalino em forma de grafite (estrutura cristalina hexagonal) ou diamante (estrutura cristalina cúbica), fulerenos, o grafeno e o nanotubo de carbono (ZARBIN & OLIVEIRA, 2013). A Figura 2.4 exemplifica algumas dessas configurações.

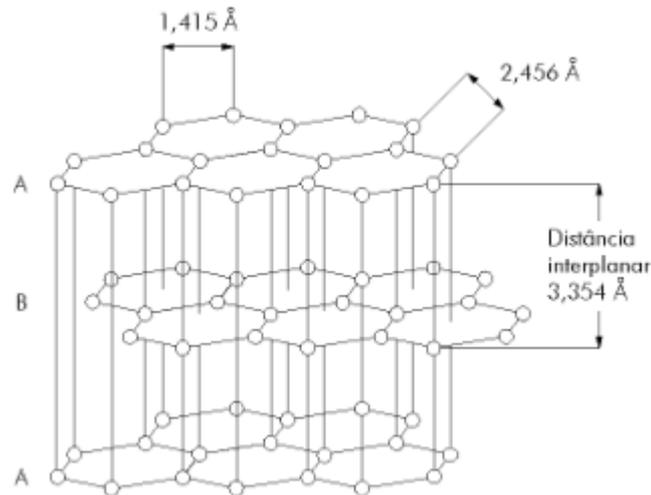
Figura 2.4 - Representação esquemática de diferentes alótropos de carbono: a) grafite; b) diamante; c) fulereno; d) nanotubo de carbono de parede simples; e) nanotubo de carbono de parede múltipla; f) grafeno



Fonte: Zarbin & Oliveira (2013).

Em particular o grafite natural, também denominado de grafita, é um material não metálico, inerte, com coloração variando entre o cinza escuro e o preto (HARBEN & BATES, 1990; HAND, 1996), possui peso específico entre 2,1 e 2,3 g/cm³ e brilho semi-metálico (BELÉM, 2018). É um mineral macio, com dureza entre 1 a 2 na escala de Mohs. Além disso, possui as seguintes propriedades físico-químicas: clivagem, plasticidade, baixo coeficiente de atrito e alta temperatura de fusão (3.650 °C), além de ser altamente refratário, lubrificante, compressível, flexível e ter grande resistência química, termal e à oxidação. A combinação de todas essas características o credencia nas mais diversas aplicações industriais (BELÉM, 2018). Sublinha-se que ocorre naturalmente sob forma de cristais hexagonais (Figura 2.5). Sua estrutura cristalina é formada por um arranjo atômico de camadas sobrepostas de átomos de carbono, unidos de três em três por meio de ligações covalentes do tipo sp², compondo uma rede infinita de ciclos hexagonais regulares.

Figura 2.5 - Estrutura do grafite



Fonte: Oliveira, Studart, Silva e Pandolfelli (2000).

2.3 Misturas Asfálticas Alternativas

Historicamente, após a década de 80, os resíduos se transformaram em graves problemas para a sociedade devido ao processo de urbanização e crescimento populacional, que se refletiu diretamente no aumento exponencial desses materiais, notadamente, pela dificuldade de tratamento e deposição em locais adequados. Ao mesmo tempo ocorreu um crescimento progressivo da conscientização pública para a preservação do meio ambiente, com redução do uso de matérias-primas finitas e o gerenciamento (reutilização e reciclagem) de produtos em diversos setores da indústria.

Após décadas de descarte não racional, os resíduos, também denominados materiais alternativos, têm ampliado o seu emprego em diferentes setores da construção civil. No modelo atual de produção, a reutilização desses subprodutos vem aumentando rapidamente, e atualmente, pesquisas já demonstram a potencialidade desses materiais no ramo da engenharia de infraestrutura, em particular dos transportes rodoviários. Os indicadores obtidos por meio de suas aplicações garantem a redução da demanda de agregados naturais, representa uma alternativa econômica, além de trazer benefícios ao meio ambiente e o desempenho mecânico dos pavimentos. De modo geral, a literatura cita vários tipos de resíduos, provenientes de processos industriais, que têm sido empregados na construção civil em substituição aos usuais materiais, notadamente em pavimentação asfáltica. Entre esses resíduos, destacam-se: o polietileno tereftalato (PET), os fileres minerais, borracha de pneu, resíduo de óleo de xisto, resíduo quartzito foliado, resíduo de tijolo cerâmico e polímero Estireno-Butadieno-Estireno

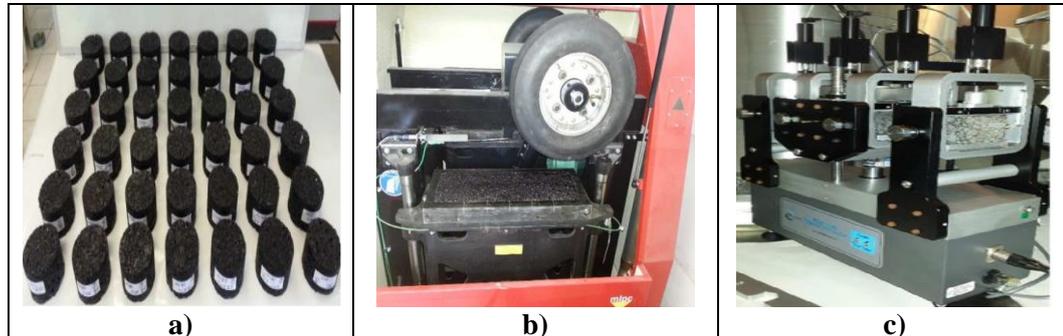
(SBS) (KIM, et al. 2003; FILHO, 2004; FAXINA, 2006; ALECRIN, 2009; BARDINI et. al., 2012; ARAO, 2016; CARLESSO, 2017; SOUZA, SORIANO & PATINO, 2018).

Ressaltam-se igualmente outros trabalhos com o fito em avaliar o aumento do desempenho mecânico e reológico, viabilidade técnica-econômica de compósitos asfálticos. Como exemplos têm-se os estudos do Grupo de Geotecnia da UFAM, em que soluções foram propostas aos problemas da região amazônica, podendo-se mencionar: Frota et al. (2007); Nunes, Silva e Frota (2009); Frota et al. (2010); Sarges, Nogueira e Frota (2010); Cunha, Dantona e Frota (2010); Cunha e Frota (2011); Valenca & Frota (2011a); Valenca e Frota (2011b); Dantona & Frota (2011); Cunha et al. (2012); Silva, Silva e Frota (2014); Silva, Frota e Frota (2015); Silva, Frota e Frota (2015); Silva & Frota (2016), Cunha, Cardoso e Frota (2017); Cunha et al. (2018).

Mais recentemente, com o advento da nanotecnologia, a literatura traz a baila pesquisas com aplicação de nanomateriais como agentes modificadores de ligantes asfálticos e nas misturas asfálticas, demonstrando efeitos positivos. Nos estudos desenvolvidos na Universidade Federal de Santa Catarina, verificou-se que a modificação do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) com adição de pequenas frações de nanomateriais melhoraram de forma significativa as propriedades das composições asfálticas, quanto ao desempenho reológico e mecânico. Entre vários trabalhos realizados, destacam-se os estudos de E^* e resistência à fadiga (MELO, 2014; MARCON, 2016; MELO e TRICHÊS, 2016; CARLESSO, 2017; CARLESSO et al. 2019) no aparato quatro pontos. Ambos vêm ganhando crescente aceitação na análise mecanicista de concretos asfálticos, 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 ao peso do ligante asfáltico de petróleo 50/70. As amostras asfálticas foram submetidas aos ensaios de ação deletéria da água, deformação permanente, módulo complexo e resistência à fadiga no equipamento “Pneumatic 4 Point Bending Apparatus” ou fadiga a 4 pontos, conforme mostra a Figura 2.6. Os resultados apontaram vantagens técnicas das formulações com misturas nanomodificadas frente ao concreto asfáltico convencional.

Figura 2.6 - a) Corpos de prova moldados para o ensaio de Lottman modificado; b) placa de concreto asfáltico para a realização do ensaio de deformação permanente; c) corpo de prova prismático para a realização do ensaio de módulo complexo



Fonte: Melo (2014).

Dando continuidade à bem-sucedida pesquisa de nanomodificação dos ligantes asfáltico, iniciado por Melo em 2014, Marcon (2016) & Carlesso (2017) avaliaram os parâmetros mecânicos e reológicos de concretos asfálticos modificados como novos materiais. Na pesquisa de Marcon (2016) foram estudadas misturas asfálticas nanomodificadas por polímero SBS, borracha moída de pneu, NA e NTC. As características mecânicas e reológicas das amostras foram obtidas mediante aos experimentos de resistência à ação deletéria da água no ensaio de Lottman modificado, à deformação permanente, módulo de rigidez e resistência à fadiga no aparato quatro pontos. As amostras nanomodificadas por polímero SBS e borracha moída de pneu mostraram desempenho superiores 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.

A respeito da pesquisa de Carlesso (2017), foi analisada a modificação do 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.

No tocante específico a Região Norte, o Grupo de pesquisa em Geotecnia da UFAM (GEOTEC) tem ampliado a sua experiência de inovação na aplicação dos compósitos asfálticos produzidos com resíduos e materiais típicos da região, destacando-se: a cal de carbureto, a fibra do curauá, o biochar e o carvão vegetal (LIMA, 2017; TORRES, 2018). Até muito recentemente

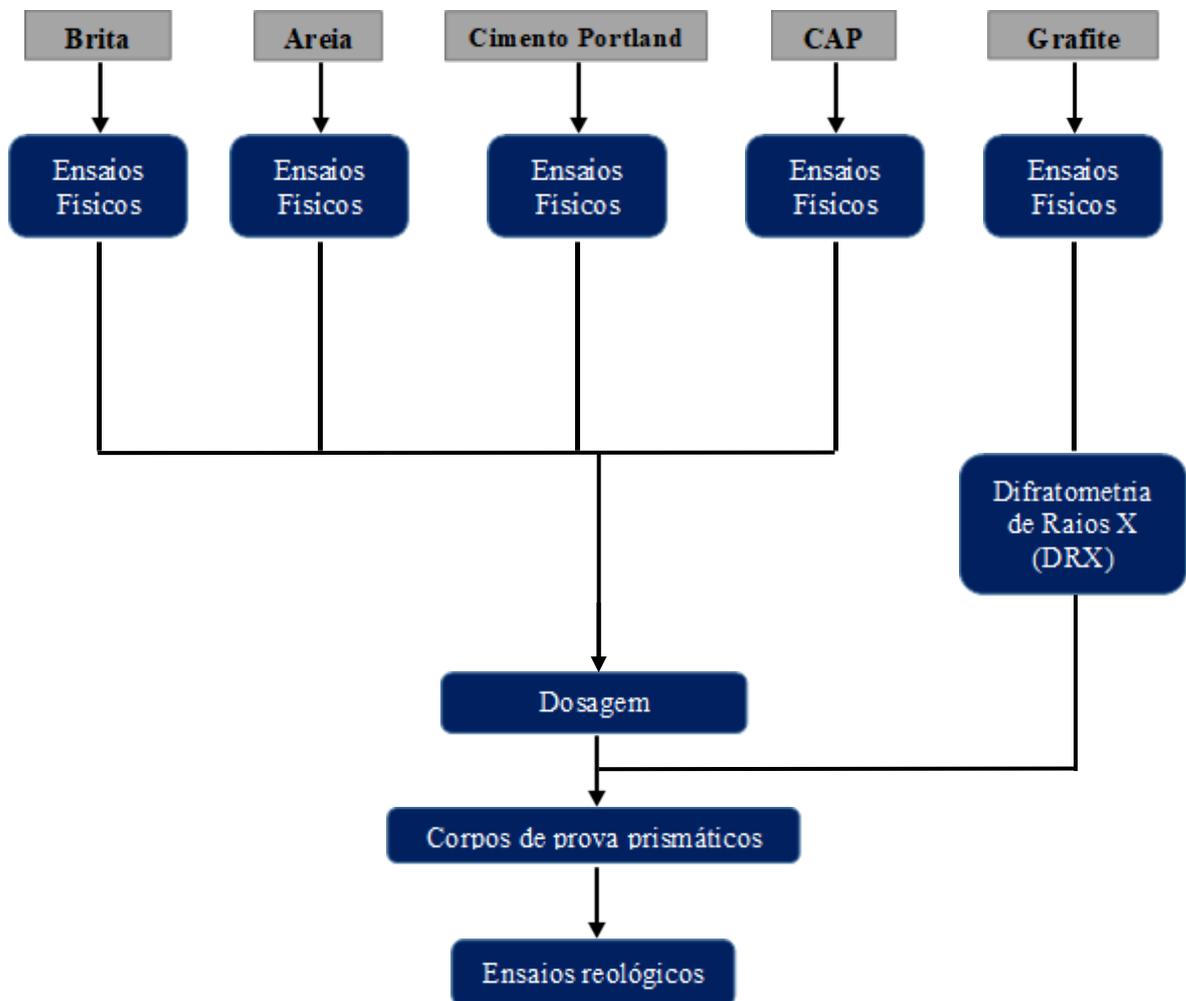
a aplicação de nanomateriais em pavimentos asfálticos eram utilizadas quase que exclusivamente nas regiões Sul e Sudeste do país. Em 2016, entretanto, os pesquisadores do GEOTEC começaram também a fazer uso de nanocompósitos do tipo grafeno e resíduos cerâmicos (BARBOSA, 2016 e CABRAL, 2017) obtidos pelo processo de moagem mecânica de alta energia, o que deu origem a uma nova linha de pesquisa, que tem recebido o nome de nanocompósitos.

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são discutidos sobre os materiais e as metodologias empregadas na avaliação das misturas asfálticas, em conformidade com as etapas delineadas no fluxograma da Figura 3.1.

Figura 3.1 - Estrutura da metodologia



Fonte: Autor (2019).

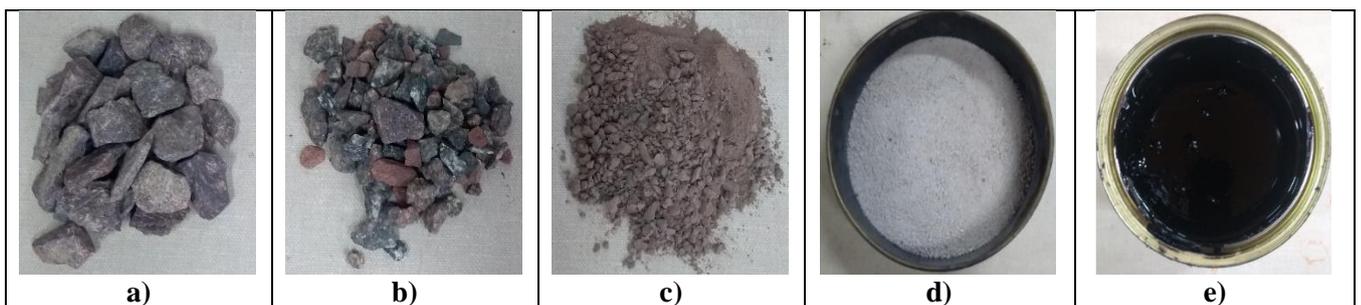
3.1 Materiais

Todos os materiais participantes na pesquisa, exceto o grafite, foram doados pela Construtora e Pavimentação LTDA (ARDO), e são normalmente aplicados nas obras de pavimentação asfáltica na cidade de Manaus.

3.1.1 Agregados e Cimento Asfáltico de Petróleo

Dois tipos de agregados graúdos fizeram parte das composições, brita 1 (4,75 mm a 19 mm) e brita 0 (0,15 mm a 12,5 mm). Alusivo ao agregado miúdo e fíleres, estes integraram as formulações nas seguintes dimensões: areia (0,15 a 2,36 mm), pó de pedra (0,15 mm a 4,75 mm) e cimento Portland. Na função de ligante, teve-se o cimento asfáltico de petróleo (CAP), comercializado pela refinaria Isaac Sabbá (REMAN) localizada em Manaus/AM/BR. A Figura 3.2 ilustra tais materiais.

Figura 3.2 - a) brita 1; b) brita 0; c) pó de pedra; d) areia; e) cimento asfáltico petróleo



Fonte: Autor (2019).

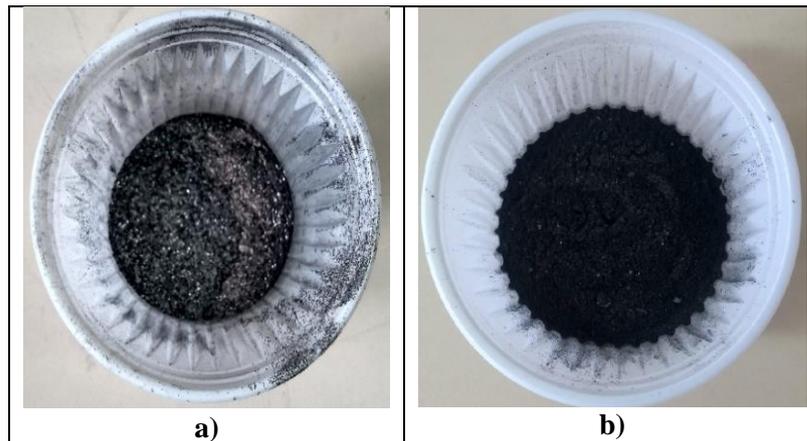
3.1.2 Grafite

Para substituição do fíler tradicional (cimento Portland) na formulação de referência, escolheu-se o mineral do tipo grafite por ser largamente utilizado em diversas aplicações do setor industrial. O grafite empregado na pesquisa foi adquirido por meio do comércio local, localizado no município de Manaus.

Tendo-se como motivação que a redução do tamanho dos grãos de um material, acarreta, em regra, o aumento da superfície específica que, por conseguinte, potencializa as propriedades específicas dos materiais (JACKSON & SHERMAN, 1953; DAS, 2014), procurou-se por meio do moinho de alta energia (MAE), modelo Mixer/Mill® da Spex Sample, a diminuição do tamanho médio dos grãos desse mineral. Obteve-se a sua redução por meio dos seguintes tempos de moagem: 15 minutos, 30 minutos, 60 minutos e 240 minutos. A

metodologia da moagem teve início com a pesagem da amostra, e na sequência inseriu-se o material no recipiente cilíndrico ($D = 2 \frac{1}{4}''$ e $h = 3''$) com capacidade de carga de até 10 g, juntamente com duas esferas de aço de $\frac{1}{2}$ polegada para, então, dar início ao processo cominuição/amorfização mecânica. A Figura 3.3 ilustra as amostras antes e após o processo de moagem por 240 minutos, respectivamente.

Figura 3.3 - Imagens do grafite: a) antes do processo; b) após o processo de moagem



Autor (2019).

3.2 Caracterização dos materiais

Os experimentos de caracterização dos agregados minerais realizaram-se no Laboratório de Solos pertencente ao GEOTEC da UFAM, e do ligante asfáltico na REMAN da Petrobras em Manaus/AM/BR.

Os agregados, grãos e miúdos foram submetidos aos ensaios de massa específica real (G_{sa}), massa específica aparente (G_{sb}), absorção de água, dureza e granulometria, de acordo com as metodologias do órgão estadunidense de normalização *American Society for Testing and Materials* (ASTM), conforme mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Caracterização dos agregados

Propriedades	Norma
Massa específica real do agregado graúdo	ASTM C127
Massa específica aparente do agregado graúdo	ASTM C127
Absorção de água do agregado graúdo	ASTM C127
Massa específica real do agregado miúdo	ASTM C128
Massa específica aparente do agregado miúdo	ASTM C128
Absorção de água do agregado miúdo	ASTM C128
Massa específica real do material pulverulento	ASTM C 188
Dureza (Abrasão Los Angeles)	ASTM C131
Granulometria	ASTM C136

Fonte: Autor (2019).

Para determinação das massas específicas dos agregados graúdos, empregou-se as Equações 3.1 a 3.4 da norma ASTM C127/15 - *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*.

$$Gsa = \frac{A}{A - C} \quad 3.1$$

$$Gsb = \frac{A}{B - C} \quad 3.2$$

$$Gsb_{ssd} = \frac{B}{B - C} \quad 3.3$$

$$Absorção, \% = \left[\left(\frac{B - A}{A} \right) \right] \times 100 \quad 3.4$$

Onde:

A = massa ao ar da amostra seca (g);

B = massa na condição saturada de superfície seca (g);

C = massa da amostra imersa em água (g).

No cálculo da massa específica real e absorção do agregado miúdo, conforme os procedimentos da ASTM C128/15 - *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*, usaram-se as Equações 3.5 a 3.7.

$$Gsa = \frac{A}{(B + A - C)} \quad 3.5$$

$$Gsb_{ssd} = \frac{S}{(B + S - C)} \quad 3.6$$

$$Absorção, \% = 100 \times \left[\frac{(S - A)}{A} \right] \quad 3.7$$

Onde:

A = massa da amostra seca no forno (g);

B = massa do picnômetro preenchido com água (g);

C = massa do picnômetro preenchido com água e amostra (g);

S = massa na condição saturada de superfície seca (g).

As amostras de cimento Portland e grafite foram avaliadas consoante a massa específica real (Gsa), acompanhando a norma ASTM C188/17 - *Density of Hydraulic Cement*, sendo calculada pelas Equações 3.8 e 3.9.

$$M_c = M_t - M_a \quad 3.8$$

$$\rho = \frac{M_c}{V} \quad 3.9$$

Onde:

M_c = massa do material (g);

M_t = massa do frasco preenchido por líquido e o material (g);

M_a = massa do frasco mais líquido para a primeira leitura do nível (g);

V = volume do líquido deslocado (g/cm³).

Para a determinação da dureza do agregado, adotou-se as recomendações da ASTM C 131 - *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by*

Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine e a Equação 3.10 para o calcular a abrasão (Los Angeles).

$$Perda\ Percentual = \left[\frac{(C - Y)}{C} \right] \times 100 \quad 3.10$$

A partir dos ensaios de granulometria determinaram-se as curvas granulométricas, sendo calculados os coeficientes de uniformidade e de curvatura, em concordância com as Equações 3.11 e 3.12, respectivamente (DAS, 2014).

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad 3.11$$

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad 3.12$$

Onde:

D_{60} = diâmetro do grão que corresponde a 60% do material mais fino;

D_{10} = diâmetro do grão que corresponde a 10% do material mais fino;

D_{30} = diâmetro do grão que corresponde a 30% do material mais fino.

A caracterização do ligante asfáltico, realizada nos laboratórios da REMAN, seguiram as especificações da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), que utiliza os métodos da ASTM listadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Caracterização Ligante asfáltico

Propriedade	Norma
Penetração	ASTM D 5
Ponto de amolecimento	ASTM D 36
Viscosidade SayboltFurol	ASTM E 102
Viscosidade aparente	ASTM D 4402
Ponto de fulgor	ASTM D 92
Solubilidade em tricloroetileno	ASTM D 2042
Ductilidade	ASTM D 113
Efeito de calor e ar	ASTM D 2872

Fonte: Autor (2019).

Examinou-se o grafite, material natural e pós moídos em diferentes tempos (15 minutos, 30 minutos, 60 minutos e 240 minutos), pela densidade, com base na norma ASTM C188/17 - *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*, e pela estrutura cristalina, segundo a técnica de Difractometria de Raios-X (DRX), no Laboratório de Materiais (LabMat/UFAM), usando o equipamento da *PANalytical*, modelo *Empyrean*, com radiação de Cu-K α ($\lambda=0,1541838$ nm) e em uma faixa angular de 5-120° de 2θ , e com taxa de 0,02°/min. Para a análise dos resultados provenientes do DRX, utilizou-se o software computacional OriginPro 2016, com vista a plotagem dos dados.

3.3 Dosagem das misturas asfálticas

Nesta etapa da pesquisa são definidas as dosagens das composições de referência, grafite puro e grafite moído por 4 h, do tipo CA, em que são determinados parâmetros volumétricos. Específico a mistura padrão utilizou-se os percentuais usados pela prefeitura de Manaus, exemplificando uma formulação usada na construção de vias pavimentadas em Manaus. A Tabela 3.3 ilustra tais percentuais alusivos a cada componente da mistura referência.

Tabela 3.3 - Dosagem da mistura asfáltica a quente

Componente	Percentual (%)
Brita 1	14.30
Brita 0	28.40
Pó de Pedra	25.40
Areia	23.70
Fíler	3.00
CAP	5.20
Total	100.00

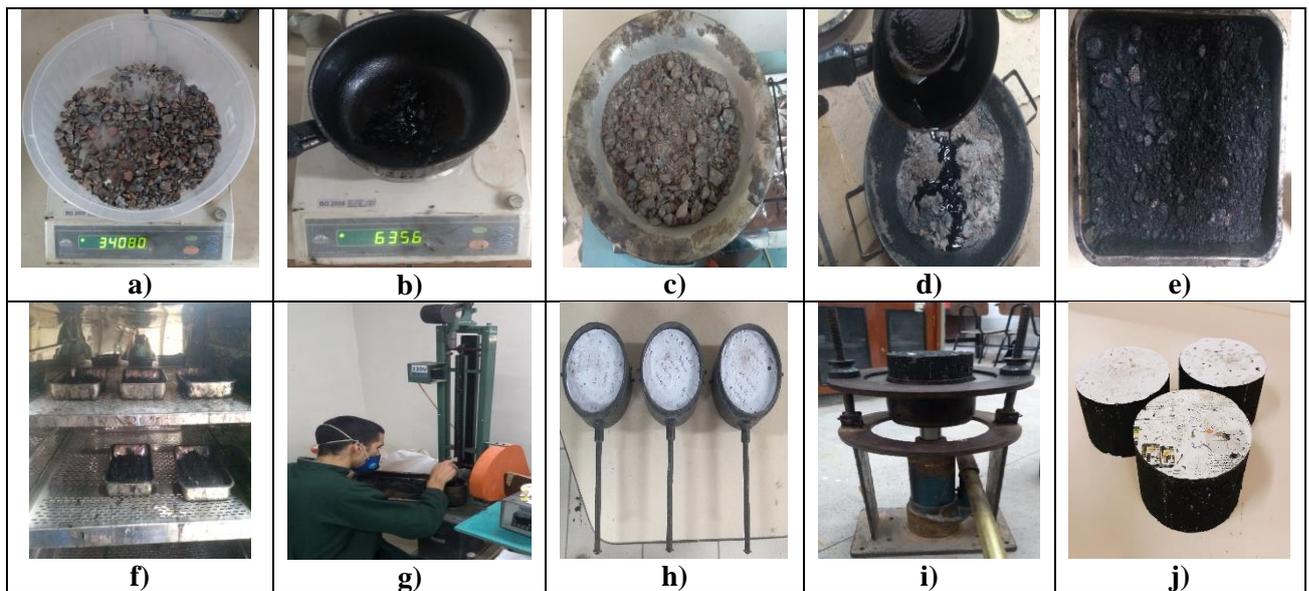
Fonte: Autor (2019).

3.3.1 Massa específicas e Volumes

Na determinação da massa específicas aparente (G_{mb}) moldaram-se seis corpos de prova no compactador Marshall automático, seguindo a metodologia Marshall, segundo os procedimentos estabelecidos na norma da ASTM D6926/16 - *Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus*. A Figura 3.4 apresenta esquematicamente o processo de preparação e compactação das composições, bem como, as amostras moldadas. Após a produção dos corpos de prova, determinou-se o citado parâmetro, acompanhando os critérios da norma da ASTM D2726/19 - *Standard Test Method for Bulk*

Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures, de acordo com a Equação 3.13.

Figura 3.4 - Processo de preparação dos corpos de prova: a) pesagem do agregado; b) pesagem do ligante; c) aquecimento dos agregados minerais; d) adição do ligante asfáltico; e) homogeneização da mistura; f) processo de envelhecimento; g) introdução da mistura no molde para compactação; h) envelhecimento dos corpos de prova por 24 h; i) extração dos corpos de prova após o período de 24 h; j) corpos de prova após a retiradas dos moldes



Fonte: Autor (2019).

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C} \quad 3.13$$

Onde:

A = massa da amostra seca ao ar (g);

B = massa na condição saturada de superfície seca (g);

C = massa da amostra imersa em água (g).

Para a massa específica máxima medida (G_{mm}) adotou-se a metodologia Rice (ASTM D2041 - *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*) que usa a Equação 3.14.

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E} \quad 3.14$$

Onde:

A = massa da amostra, seca em estufa, ao ar (g);

D = massa do recipiente cheio de água a 25 °C (g);

E = massa do recipiente com a amostra e água a 25 °C (g).

A partir dos resultados do G_{mb} e G_{mm} , calculou-se o volume de vazios (V_a), volume de vazios com betume (VCB), volume de vazios do agregado mineral (VMA) e volume de vazios preenchidos com ligante (VFA), em conformidade com as Equações 3.15 a 3.18, respectivamente.

$$V_a = \left(\frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \right) \times 100 \quad 3.15$$

$$VCB = \frac{G_{mb} \times \%a}{G_a} \quad 3.16$$

$$VMA = V_a + VCB \quad 3.17$$

$$VFA = \left(\frac{VMA - V_a}{VMA} \right) \times 100 \quad 3.18$$

Onde:

G_{mm} = massa específica máxima medida;

G_{mb} = massa específica aparente;

$\%a$ = porcentagem do cimento asfáltico de petróleo;

G_a = massa específica real do cimento asfáltico de petróleo;

2.3.1 Massa para moldagem dos corpos de provas

De posse da dosagem, G_{mb} e das medidas do molde para compactação das vigotas, calculou-se a massa estimada para a confecção das amostras prismáticas. Com os procedimentos de dosagens das misturas asfálticas de referências definidas, passou-se a etapa de definição dos procedimentos e a obtenção dos teores do grafite natural e pós moído no MAE,

adotados para substituição do material de enchimento convencional (cimento Portland). As proporções dos materiais são listadas na Tabela 3.4. A mistura asfáltica referência é chamada como “CA-REF”, enquanto os concretos asfálticos produzidos com grafite puro e grafite moído por quatro horas corresponde à “CA-GRAFP e CA-GRAFM”, respectivamente.

Tabela 3.4 - Dosagem das misturas

Dosagem referência (CA-REF)	
Componente	Percentual (%)
Brita 1	14,30
Brita 0	28,40
Pó de Pedra	25,40
Areia	23,70
Fíler (cimento Portland)	3,00
CAP	5,20
Total	100,00
Dosagem com grafite puro (CA-GRAFP)	
Brita 1	14,30
Brita 0	28,40
Pó de Pedra	25,40
Areia	23,70
Fíler (grafite puro)	3,00
CAP	5,20
Total	100,00
Dosagem com grafite moído por 4 h (CA-GRAFM)	
Brita 1	14,30
Brita 0	28,40
Pó de Pedra	25,40
Areia	23,70
Fíler (grafite moído por 4 h)	3,00
CAP	5,20
Total	100,00

Fonte: Autor (2019).

2.3 Moldagem dos corpos de prova prismáticos e ensaios mecânicos

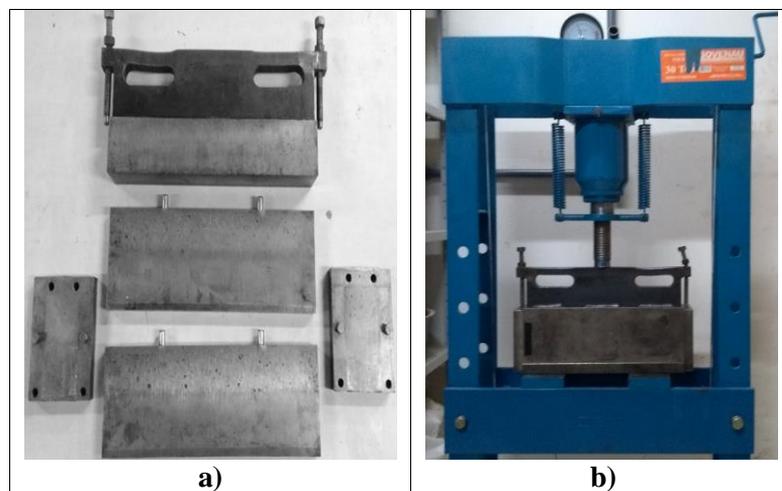
Esta etapa correspondeu ao processo de confecção dos corpos de prova do concreto asfáltico de referência e o alternativo com grafite pulverizado no período de 4 horas para a realização dos ensaios mecânicos, por meio do aparato de flexão a quatro pontos. Quanto a temperatura para moldagem dessas amostras, optou-se pelo emprego das mesmas temperaturas que são usadas pela empresa de pavimentação ARDO.

Após o processo de mistura/homogeneização, as composições asfálticas foram levadas à estufa por um período de duas horas, na temperatura de compactação para o processo de envelhecimento, conforme preconiza a ASTM D 4867 - *Standard Test Method for Effect of*

Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures. O citado período tem como finalidade simular o processo de preparação e aplicação do concreto asfáltico no campo.

Para a preparação das vigas, adotou-se a mesma metodologia realizada por Mello (2008), Lima (2017) e Torres (2018). 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. A Figura 3.5 ilustra o sistema de moldagem e compactação das vigas.

Figura 3.5 - a) molde metálico para moldagem e compactação das vigas; b) prensa hidráulica 30 ton



Fonte: Autor (2019).

Conforme preconiza a norma EN 12697-24, as amostras asfálticas, após o processo de compactação, foram deixadas ao ar até massa constante, a uma umidade relativa do ar inferior a 80% e a uma temperatura entre 15 e 25°C, sendo consideradas secas quando duas pesagens realizadas em intervalos de 24 horas não divergiram em mais de 0,25%. Após o período de cura, determinou-se as massas específicas e dimensões. Ressalta-se que no cálculo da geometria dos CPs, realizaram-se 6 (seis) medidas para cada dimensão, em concordância com as especificações da norma europeia EN 12697-29 - *Bituminous Mixtures, Test methods for Hot Mix Asphalt - Part 29: Determination of the Dimensions of a Bituminous Specimen*. No que se refere as massas específicas admitiu-se a padronização da norma europeia EN 12697-6 - *Bituminous Mixtures, Test Methods for Hot Mix Asphalt - Part 6: Determination of Bulk Density of Bituminous Specimens*, bem como, os cálculos da massa específica aparente e a massa específica máxima dos corpos de prova prismáticos conforme as Equações 3.19 e 3.20, respectivamente.

$$\gamma_{aparente} = \frac{M_{seca}}{B \times H \times L} \quad 3.19$$

Onde:

$\gamma_{aparente}$ = massa específica aparente do CP;

M_{seca} = massa seca do CP medida na temperatura ambiente;

B = largura média do CP;

H = altura média do CP;

L = comprimento médio do CP.

$$\gamma_{máxima} = \rho_{água} \times \frac{M_{seca}}{M_{sm} - M_{im}} \quad 3.20$$

Onde:

$\gamma_{máxima}$ = massa específica máxima do CP;

$\rho_{água}$ = peso específico da água à temperatura do ensaio;

M_{seca} = massa seca do CP;

M_{im} = massa do CP imersa em água;

M_{sm} = massa com superfície saturada seca do CP.

Examinaram-se as características mecânicas com base no ensaio de flexão, em que se obtiveram o E^* e δ . Utilizou-se o aparato 4 pontos da empresa australiana IPC Global® - Modelo CS 7800 e uma câmara climática (Figura 3.6), pertencentes ao Laboratório de Comportamento Mecânico do GEOTEC/UFAM. O equipamento aplica pulsos de cargas sinusoidais consecutivos (tração/compressão) nos terços médios do vão da viga, com frequência variável de 0,01 a 30 Hz. A metodologia adotada seguiu as recomendações da norma europeia EN 12697-26, com aplicação de carregamento senoidal uniaxial de compressão, amplitude de deformação de 50 $\mu\text{m/m}$, sob as frequências de 0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 20 Hz e temperaturas de ensaio de 0 °C, 5 °C, 10 °C, 15 °C, 20 °C, 25 °C, 30 °C, 35 °C e 40°C.

Para cada temperatura de ensaio adotou-se o tempo mínimo de aclimação estabelecido pela EN 12697-26. Por exemplo, para os ensaios a temperaturas de 0 °C, as amostras foram colocadas em uma câmara climática por um período mínimo de 2 horas antes do início do

ensaio. Com o objetivo de evitar o envelhecimento excessivo dos corpos de prova, o período máximo não durou mais do que 6 horas. A Tabela 3.5 mostra os tempos mínimos empregados no presente estudo.

Figura 3.6 - a) câmara climática; b) aparato de teste 4 pontos



Fonte: Autor (2019).

Tabela 3.5 - Tempo mínimo de aclimação das amostras

Temperatura	Tempo mínimo de aclimação
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

Fonte: Autor (2019).

ensaio. Com o objetivo de evitar o envelhecimento excessivo dos corpos de prova, o período máximo não durou mais do que 6 horas. A Tabela 3.5 mostra os tempos mínimos empregados no presente estudo.

Figura 3.6 - a) câmara climática; b) aparato de teste 4 pontos



Fonte: Autor (2019).

Tabela 3.5 - Tempo mínimo de aclimação das amostras

Temperatura	Tempo mínimo de aclimação
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

Fonte: Autor (2019).

CAPÍTULO 4

2 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são discutidos os resultados alusivos a caracterização dos agregados minerais (grãos e miúdos), ligante asfáltico e dos fíleres (tradicional e modificado), assim como, a dosagem e o estudo do comportamento mecânico das composições do tipo concreto asfáltico com cimento Portland (CA-REF), tendo a presença do grafite puro (CA-GRAFP) e a participação do grafite moído por 4 h (CA-GRAFM), por meio do ensaio de flexão a 4 pontos.

4.1 Agregados minerais

Os ensaios físicos de caracterização realizaram-se no Laboratório de Solos do Grupo de Pesquisa em Geotecnia (GEOTEC/UFAM), consoante a normalização da ASTM. Visualiza-se na Tabela 4.1 os parâmetros avaliados e seus respectivos resultados.

Analisando os resultados constantes na Tabela 4.1, tem-se que: as massas específicas da brita 1 e brita 0 dos agregados grãos alcançaram $2,58 \text{ g/cm}^3$ e $2,74 \text{ g/cm}^3$, respectivamente. A massa específica aparente das amostras brita 1 e brita 0, mostraram resultados semelhantes ($2,55 \text{ g/cm}^3$ e $2,62 \text{ g/cm}^3$), a absorção das britas 1 e 0, evidenciou baixos valores, ou seja, menores que 2%. Enfatiza-se que uma maior absorção dos agregados, resulta em um maior consumo de ligante asfáltico; e o valor do abrasão *Los Angeles* referente à brita 1 e brita 0 explicitou um baixo valor da ordem de 14,10 e 27,39 %. Ou seja, estão dentro dos limites (igual ou inferior a 50%) estabelecidos pela norma Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes DNIT ME - 035/98. Os grãos da areia residual apresentaram massa específica real de $2,21 \text{ g/cm}^3$. Quanto ao pó de pedra obteve-se um valor igual a $2,75 \text{ g/cm}^3$. A caracterização do cimento Portland e grafite utilizados denotaram massas específicas reais de $2,94 \text{ g/cm}^3$ e $2,64 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

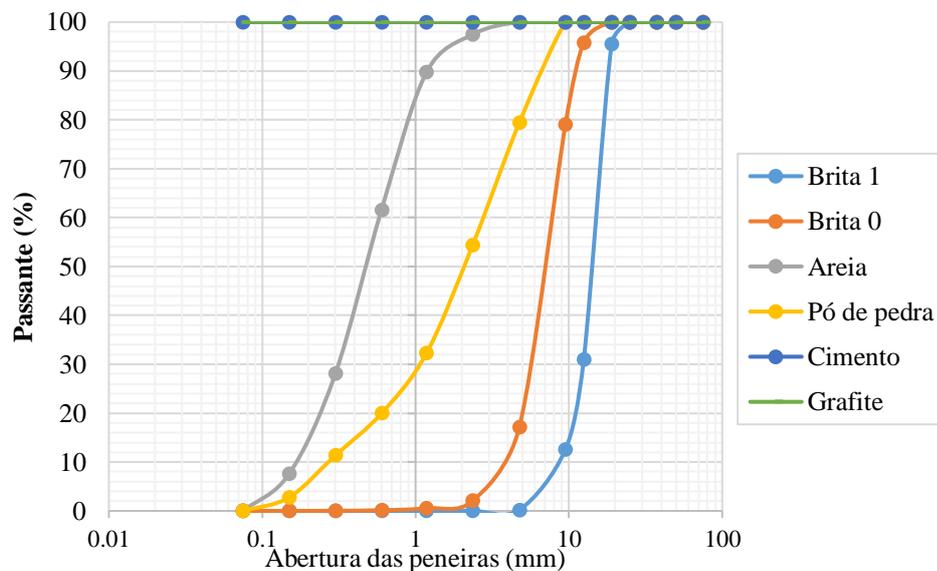
Tabela 4.1 - Caracterização dos agregados

Propriedades	Norma	Resultado
Massa específica real do agregado graúdo - brita 1	ASTM C 127	2,58 g/cm ³
Massa específica aparente do agregado graúdo - brita 1	ASTM C 127	2,55 g/cm ³
Absorção do agregado graúdo - brita 1	ASTM C 127	0,51 %
Massa específica real do agregado graúdo - brita 0	ASTM C 127	2,74 g/cm ³
Massa específica aparente do agregado graúdo - brita 0	ASTM C 127	2,62 g/cm ³
Absorção do agregado graúdo - brita 0	ASTM C 127	1,66 %
Massa específica real do agregado miúdo - areia	ASTM C 128	2,21 g/cm ³
Massa específica real do material pulverizado - cimento Portland	ASTM C 188	2,94 g/cm ³
Massa específica real do agregado miúdo - pó de pedra	ASTM C 128	2,75 g/cm ³
Dureza (Abrasão Los Angeles) - brita 1	ASTM C 131	14,10 %
Dureza (Abrasão Los Angeles) - brita 0	ASTM C 131	27,39 %
Massa específica real do material pulverizado - grafite	ASTM C 188	2,64 g/cm ³

Fonte: Autor (2019).

As características granulométricas dos citados materiais são ilustradas na Figura 4.1 e a Tabela 4.2. De acordo com esses resultados e os coeficientes de uniformidade e curvatura, e em conformidade com o Sistema Unificado de Classificação do Solos, tais materiais são classificados, como: pedregulhos mal graduados, caso das britas 1 e 0; areia mal graduada, referente a areia residual; e areia bem graduada, específico ao pó de pedra. Os partícipes cimento Portland e grafite passaram integralmente pela malha nº 200 (0.075 mm), atendendo, portanto, os requisitos para uso como fíler (ASTM C117/17) - *Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*).

Figura 4.1 - Curvas granulométricas dos materiais



Fonte: Autor (2019).

Tabela 4.2 - Coeficientes de Uniformidade e de Curvatura dos agregados

Materiais	Cu	Cc
Brita 1	1,81	1,16
Brita 0	1,91	0,97
Areia	3,38	1,06
Pó de pedra	11,49	1,58

Fonte: Autor (2019).

4.2 Cimento Asfáltico de Petróleo

Examinou-se o ligante asfáltico em conformidade com as metodologias da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), cujos valores, contidos na Tabela 4.3, foram disponibilizados pela empresa ARDO ao presente trabalho, quando adquiriu o produto na REMAN. Por meio da citada tabela, verifica-se, que: a Penetração classificou o cimento asfáltico de petróleo como 50/70; o Ponto de Amolecimento e Ponto de Fulgor atenderam as especificações, ou seja, encontram-se acima do valor mínimo estabelecido por norma; os valores referentes as viscosidades Saybolt Furol e Brookfield, nas temperaturas 135, 150 e 177 °C, posicionaram-se de acordo com os limites especificados; a Solubilidade em tricloroetileno e a Ductilidade mostraram resultados satisfatórios; e os parâmetros posteriores ao processo de envelhecimento das amostras, em estufa de filme fino rotativo (RTFOT), igualmente atenderam ao preconizados pela ASTM.

Tabela 4.3 - Propriedades do ligante asfáltico

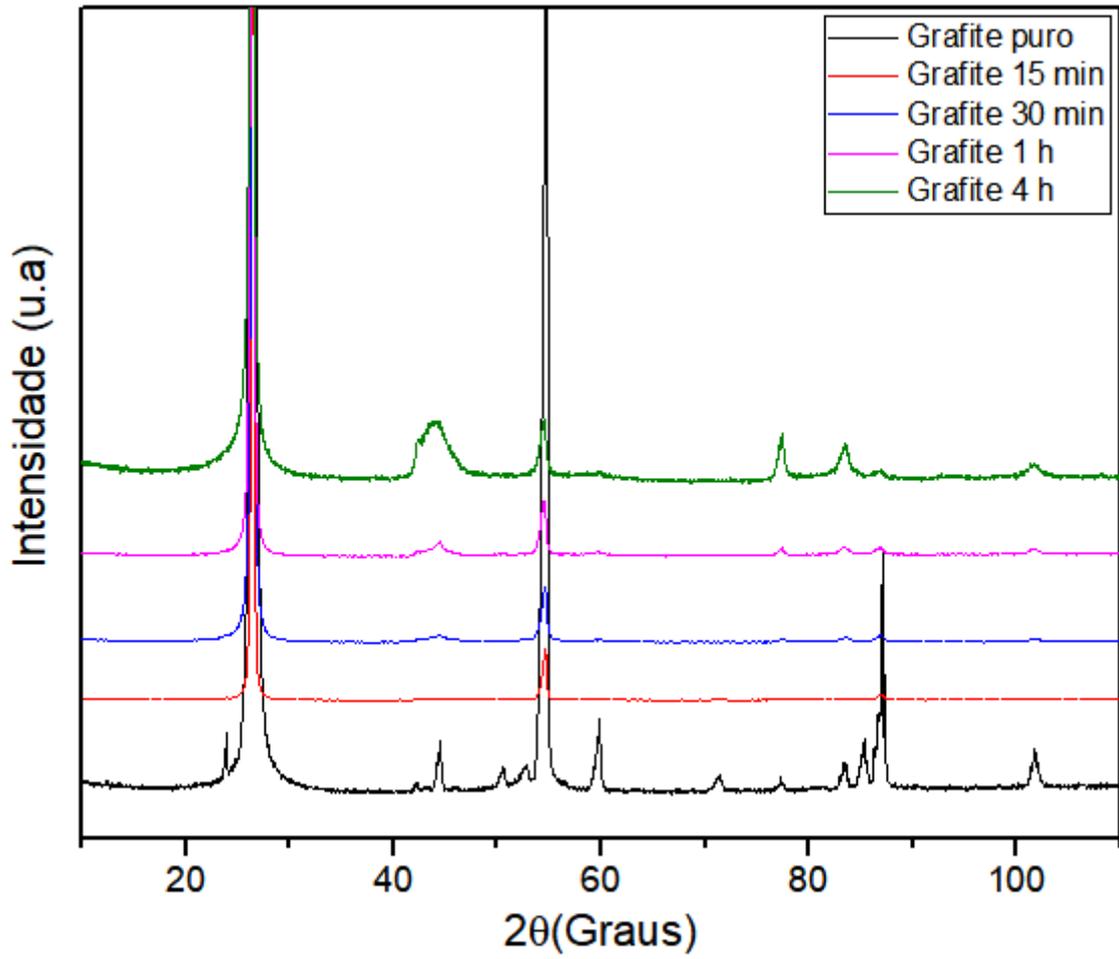
Características	Unidade	Resultados	Limites	Métodos ASTM
Penetração -5s, 25 °C	0,1 mm	69	50-70	D5
Ponto de Amolecimento, min	°C	49,7	> 46	D 36
Viscosidade Saybolt Furol a 135 °C	s	283	> 141	E 102
Viscosidade Saybolt Furol a 150 °C	s	140,7	> 50	E 102
Viscosidade Saybolt Furol a 177 °C	s	50,8	30-150	E 102
Viscosidade Brookfield a 135 °C	cP	539	> 274	D 4402
Viscosidade Brookfield a 150 °C	cP	279,8	>112	D 4402
Viscosidade Brookfield a 177 °C	cP	96,8	57-285	D 4402
Ponto de fulgor, min	°C	318	> 235	D 92
Solubilidade em tricloroetileno	% massa	99,5	> 99,5	D 2042
RTFOT Variação em massa	% massa	0,04	< 0,5	D 2872
Ductilidade a 25 °C	cm	> 100	60	D 113
RTFOT aumento do ponto de amolecimento	°C	7,1	< 8	D 36
RTFOT penetração retida	%	63	> 55	D 5

Fonte: ANP (2005).

4.3 Grafite

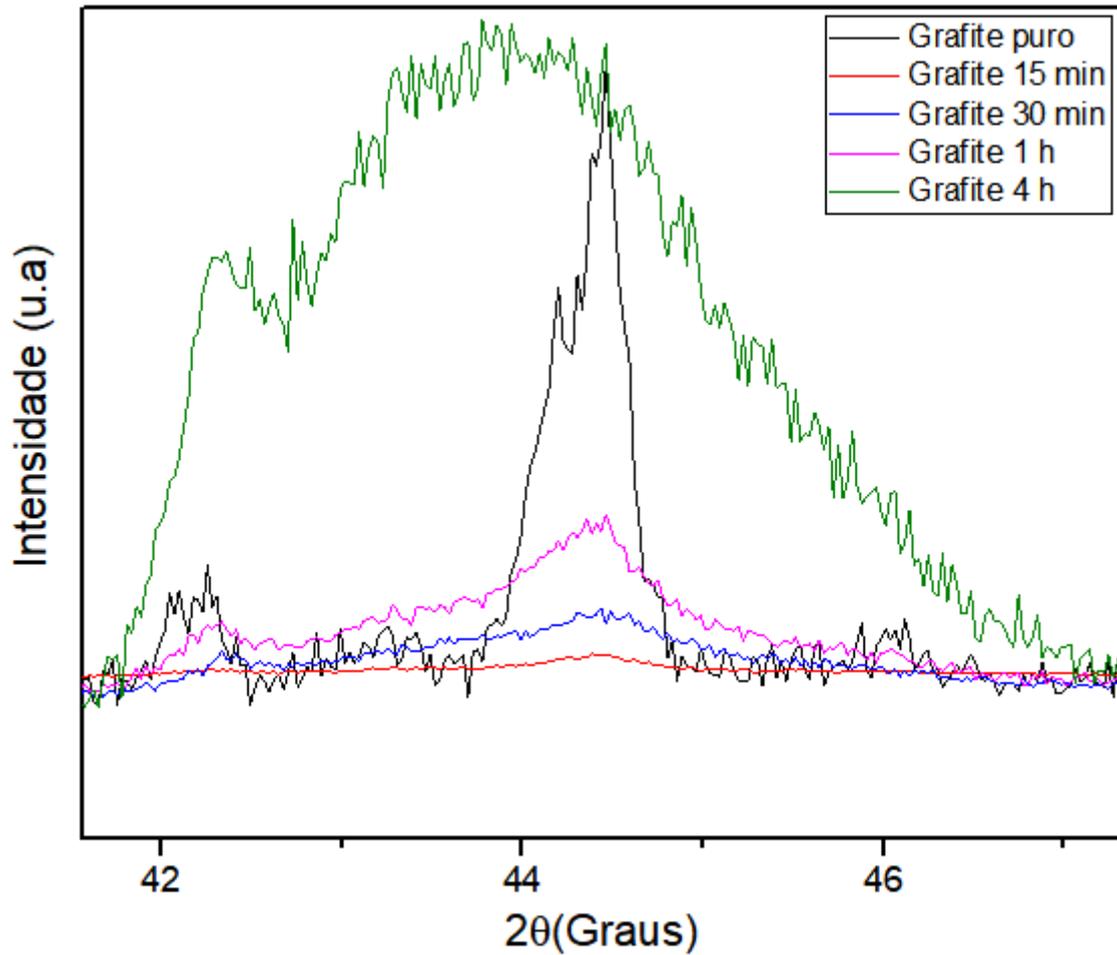
As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam os difratogramas representativo das amostras de grafite natural e pulverizadas para os tempos de 15, 30, 60 e 240 minutos. Respeitante à Figura 4.2, nota-se que os picos dos materiais pós moídos exibiram redução da intensidade e alargamentos em relação amostra do grafite puro. Conforme mostrado na Figura 4.3, que ilustra o segundo pico dos difratogramas, verifica-se que o grafite pulverizado por 240 minutos (4h) exibiu um alargamento diferenciado em comparação as outras amostras, apontando uma possível desordem em sua estrutura, assim como, a formação de uma nova estrutura cristalina e redução do tamanho médio das partículas. Essa arrumação pode estar relacionada ao processo de cisalhamento e de impacto das esferas sobre as partículas (CARREÑO, 2008). Deste modo, com base nesses resultados, e segundo Jackson & Sherman (1953); Das (2014) a redução do tamanho das partículas promove o aumento da área superficial específica e, conseqüentemente, acresce o seu poder coesivo em uma composição, optou-se por utilizar o grafite submetido a uma moagem mecânica de alta energia por 4 h.

Figura 4.2 - Difratoograma das amostras de grafite



Fonte: Autor (2019).

Figura 4.3 - Difratoograma das amostras de grafites, segundo pico das amostras de grafite



4.4 Parâmetros Volumétricos

Na Tabela 4.4 são ilustrados os valores da massa específica máxima medida (G_{mm}), massa específica aparente de mistura asfáltica compactada (G_{mb}), volume de vazios (V_a), volume de vazios com betume (VCB), volume de vazios do agregado mineral (VMA), e volume de vazios preenchidos com ligante (VFA) correspondente o teor de ligante de projeto de 5,2%. Observando-se os resultados da Tabela 4.4, verifica-se que os mencionados parâmetros, mostraram-se dentro dos limites para camada de rolamento, especificados pelo DNIT - ES 031/2006.

Tabela 4.4 - Parâmetros volumétricos do teor de projeto

Método	Massa específica máxima medida (DMM)
Teor de asfalto (%)	5,2
Gmm	2,36834
Gmb média (g/cm ³)	2,27
Va (%)	4,05
VCB (%)	11,84
VMA (%)	15,89
VFA (%)	75

Fonte: Autor (2019).

4.5 Avaliação do comportamento mecânico

Nas Tabelas 4.5, 4,6 e 4,7 encontram-se os resultados de módulo complexo e de ângulo de fase correspondentes às médias aritméticas obtidas para dois corpos de prova. Tais parâmetros são apresentados em função das temperaturas e frequências de carregamento.

Tabela 4.5 - Módulo complexo e Ângulo de fase, CA-REF

f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	40							
E* (MPa)	133	153	199	267	334	392	423	735
δ (°)	35,0	36,6	38,0	36,7	29,1	28,0	31,2	44,4
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	35							
E* (MPa)	152	180	233	290	346	423	494	794
δ (°)	32,6	32,7	33,1	30,3	28,8	28,5	32,4	43,2
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	30							
E* (MPa)	256	286	362	436	532	697	840	992
δ (°)	29,1	31,1	31,9	32,2	31,6	30,7	31,6	47,0
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	25							
E* (MPa)	390	464	606	754	945	1188	1370	1645
δ (°)	33,1	32,1	31,7	32,2	31,2	27,1	26,3	15,7
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	20							
E* (MPa)	450	557	744	914	1131	1502	1780	2316
δ (°)	34,2	33,8	33,3	31,5	29,8	26,8	24,8	24,3
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	15							
E* (MPa)	1046	1219	1536	1794	2153	2565	2911	3339
δ (°)	27,4	26,5	24,8	24,4	22,5	19,6	19,4	18,2
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	10							
E* (MPa)	1433	1712	2125	2473	2846	3381	3605	3710
δ (°)	24,2	23,3	21,7	20,4	19,0	17,1	15,4	13,4
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	5							
E* (MPa)	1724	2106	2538	2969	3366	3872	4294	4552
δ (°)	22,9	21,2	19,4	17,7	16,3	15,4	14,3	13,2
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	0							
E* (MPa)	3806	4046	4464	4854	4972	5184	5214	5360
δ (°)	13,4	12,1	11,1	10,3	9,4	8,6	7,2	6,1

Fonte: Autor (2019).

Tabela 4.6 - Módulo complexo e Ângulo de fase, CA-GRAFP

f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	40							
 E* (MPa)	188	226	278	335	393	475	567	773
δ (°)	33,5	28,2	26,1	24,5	24,9	28,8	30,4	35,9
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	35							
 E* (MPa)	269	308	354	430	496	621	743	885
δ (°)	26,9	24,2	25,3	23,3	24,4	27,5	28,2	35,9
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	30							
 E* (MPa)	313	379	490	593	728	919	1138	1352
δ (°)	36,9	38,4	37,8	37,8	36,7	35,0	33,9	48,7
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	25							
 E* (MPa)	432	526	693	843	1033	1319	1562	1864
δ (°)	34,3	33,8	32,8	32,2	30,7	28,0	27,1	32,8
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	20							
 E* (MPa)	592	751	961	1151	1397	1794	2001	2353
δ (°)	29,7	28,9	28,7	28,4	27,3	26,5	24,1	21,3
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	15							
 E* (MPa)	1334	1700	2156	2463	2868	3169	3373	3614
δ (°)	25,6	23,3	21,4	20,1	18,9	18,4	17,4	16,2
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	10							
 E* (MPa)	1647	1979	2360	2673	3003	3394	3748	4248
δ (°)	20,8	18,8	17,2	15,9	14,6	13,2	12,0	11,2
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	5							
 E* (MPa)	2528	2874	3370	3786	4165	4484	4735	4950
δ (°)	18,0	16,4	14,9	13,5	12,2	11,7	9,8	8,0
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	0							
 E* (MPa)	4379	4738	5298	5733	5963	6140	6245	6580
δ (°)	12,2	11,1	9,9	8,7	7,5	6,8	5,8	5,1

Fonte: Autor (2019).

Tabela 4.7 - Módulo complexo e Ângulo de fase, CA-GRAFEM

f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	40							
E* (MPa)	242	245	314	353	453	573	671	914
δ (°)	26,7	27,7	25,9	26,3	25,5	27,1	29,2	30,3
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	35							
E* (MPa)	280	315	380	439	521	676	824	1009
δ (°)	33,2	24,7	23,4	21,8	21,8	26,4	28,0	29,0
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	30							
E* (MPa)	413	476	594	704	846	1143	1326	1526
δ (°)	33,9	33,5	30,9	31,1	31,0	25,5	21,5	31,2
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	25							
E* (MPa)	589	692	869	1022	1218	1558	1770	2193
δ (°)	31,3	30,5	28,8	28,5	25,9	21,0	19,2	26,9
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	20							
E* (MPa)	911	1029	1230	1362	1586	1940	2193	2510
δ (°)	23,6	22,9	21,2	20,5	19,4	18,5	17,1	16,5
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	15							
E* (MPa)	1552	1873	2249	2585	2976	3417	3584	3706
δ (°)	22,2	19,6	18,0	16,6	15,0	14,6	13,4	12,6
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	10							
E* (MPa)	1967	2184	2567	2894	3174	3467	3675	3930
δ (°)	17,0	16,7	15,1	13,5	12,7	12,3	11,4	10,4
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	5							
E* (MPa)	2791	3395	3979	4390	4745	4899	5014	5394
δ (°)	16,4	14,0	11,9	10,6	9,6	8,1	7,2	5,7
f (Hz)	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
T (°C)	0							
E* (MPa)	4707	4852	5511	5860	6207	6345	6578	6804
δ (°)	10,3	9,2	8,2	7,6	7,3	6,5	5,6	4,5

Fonte: Autor (2019).

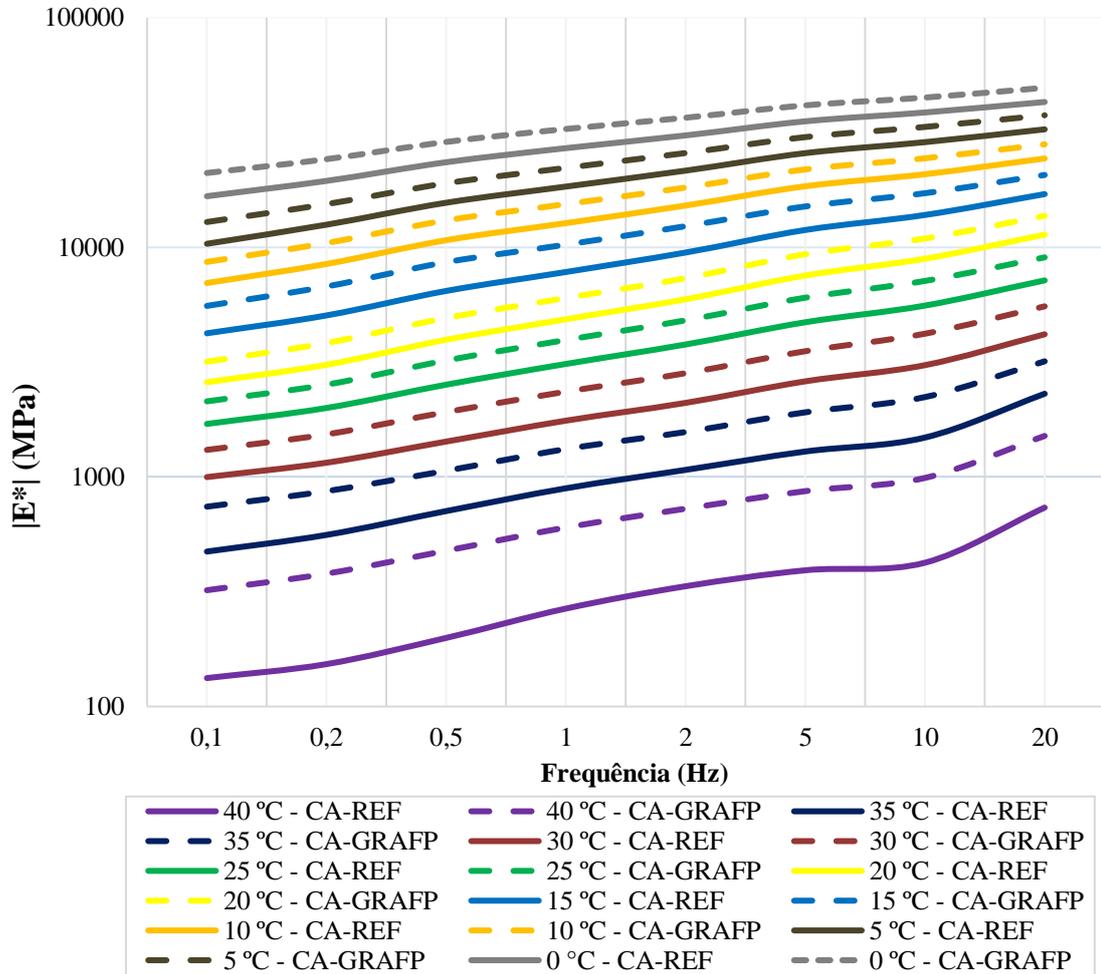
Onde: f = frequência de carregamento; T = temperatura de ensaio; |E*| = módulo complexo; δ = ângulo de fase.

4.5.1 Isotérmicas e Curvas Mestras

Com a intenção de evidenciar de forma sistemática a susceptibilidade cinética das composições (rigidez), por meio dos resultados apresentados nas Tabelas 4.6 a 4.8, elaboraram-se os gráficos que correlacionam os módulos complexos (ordenadas) em função das frequências

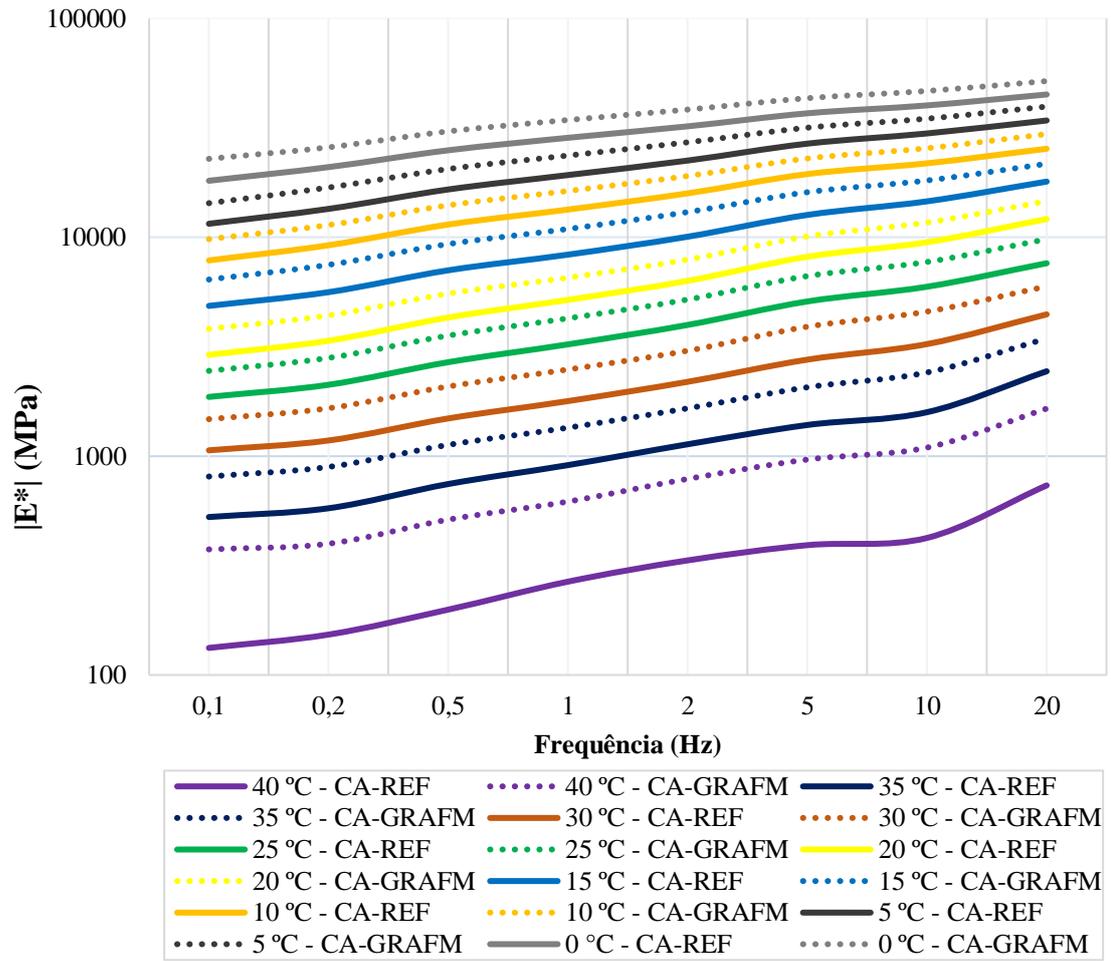
de carregamento (abscissas), a diferentes temperaturas. Desta forma, as Figuras 4.4 a 4.6 confrontam as curvas isotérmicas das misturas asfálticas do presente estudo.

Figura 4.4 - Curvas isotérmicas, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFP



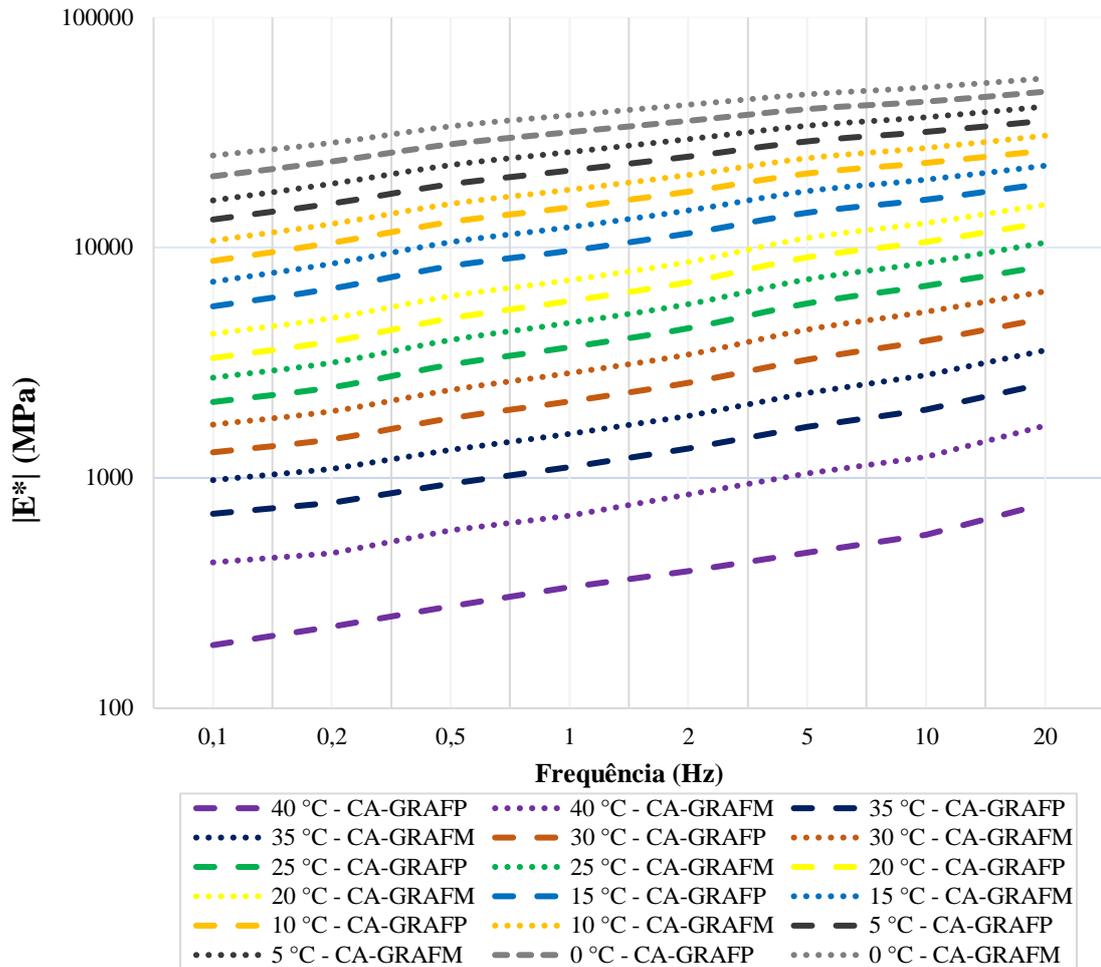
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.5 - Curvas isotérmicas, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFM



Fonte: Autor (2019).

Figura 4.6 - Curvas isotérmicas, mistura CA-GRAFP x mistura CA-GRAFM

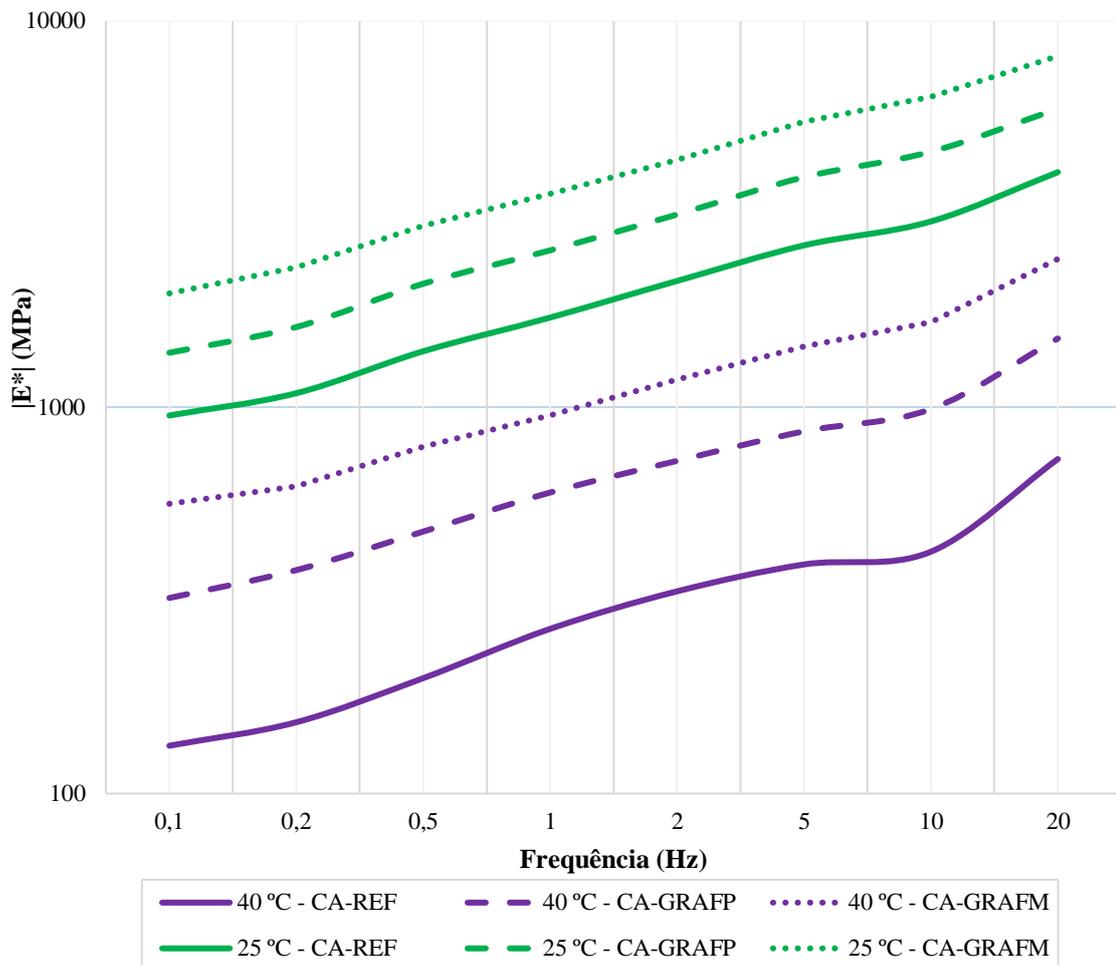


Na Figura 4.4 é possível notar ganhos da composição CA-GRAFP em relação à formulação CA-REF. Similar comportamento é observado nas curvas isotérmicas da Figura 4.5, em que a mistura CA-GRAFM apresentou comportamento superior a composição referência, porém com valores superiores aos mostrados pela mistura CA-GRAFP. Com base na Figura 4.6, que se relaciona os concretos asfálticos CA-GRAFP e CA-GRAFM, percebe-se uma maior rigidez para a formulação CA-GRAFM. Destaca-se, também, o aumento dos módulos complexos para a mistura CA-GRAFM respeitante às misturas CA-REF e CA-GRAFP, tendência esperada na pesquisa em pauta, a partir da amorfização mecânica do grafite natural.

Avançando na análise dos resultados, selecionaram-se para avaliação duas curvas isotérmica (Figura 4.7), correspondente à temperatura de 25 °C (temperatura ambiente) e outra de 40 °C que representa as condições diárias da superfície dos pavimentos asfálticos de Manaus (AM). Nestas curvas pode-se verificar que o comportamento cinético dos concretos asfálticos

a partir da inclinação das isotermas demonstram um crescimento da rigidez, conforme a frequência de carregamento aumenta. Em particular, essa inclinação crescente caracteriza o deslocamento vertical das composições alternativas em relação a formulação convencional. Constata-se, ainda, que quanto menor a temperatura, maiores são os ganhos de rigidez pela incorporação dos materiais alternativos. Além disso, em todas as misturas, que quanto maior a temperatura, maior a sensibilidade cinética.

Figura 4.7 - Curvas isotérmicas, temperaturas 25 °C e 40 °C



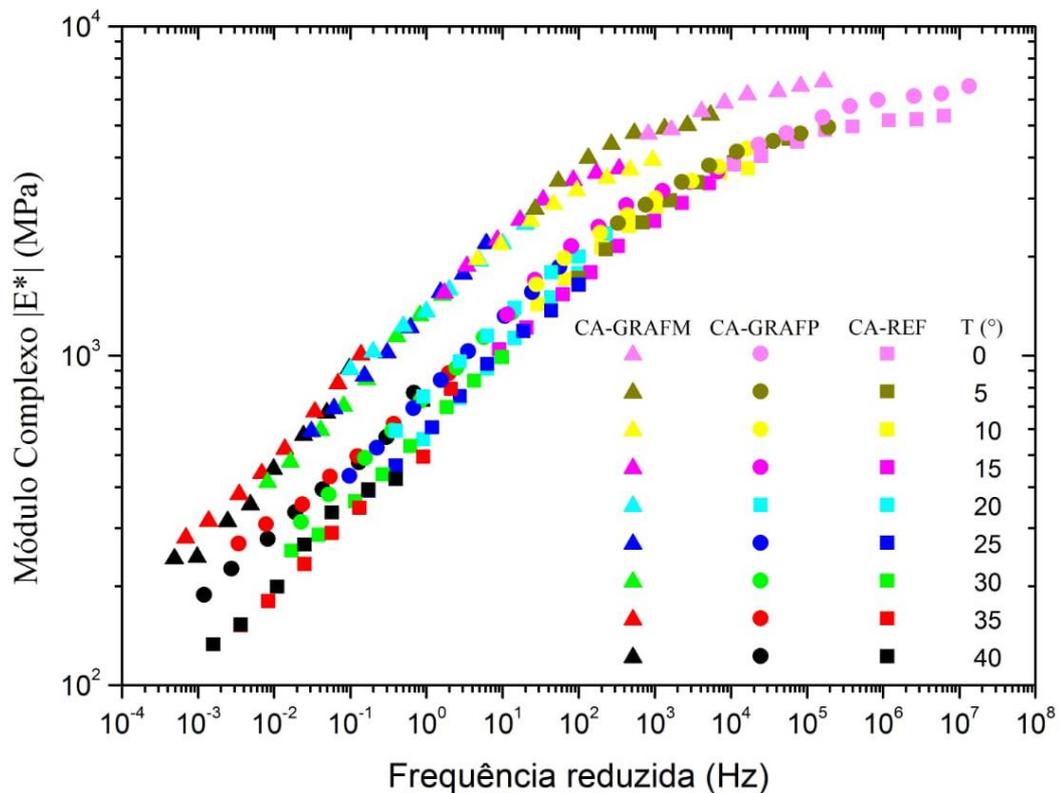
Fonte: Autor (2019).

A susceptibilidade cinética é considerada uma importante característica do concreto asfáltico, pois ganhos neste aspecto, retratam menor dano a deformação permanente da mistura asfáltica sob esforços oriundos de várias combinações de carregamentos resultantes dos veículos (MELO, 2014). Esse acréscimo também foi observado nos trabalhos de Melo (2014), Melo & Trichês (2016), Marcon (2016) e Carlesso (2017), Carlesso et al. (2019), que usaram a

mesma metodologia de ensaio do estudo em apreço, embora com experimentos realizados com ligantes modificados e processo de compactação diferentes.

Para evidenciar melhor os aumentos no módulo complexo ocasionado pela incorporação do grafite nas amostras asfálticas, bem como, obter uma descrição completa do comportamento mecânico das formulações estudadas, empregou-se o princípio da superposição frequência-temperatura para a construção das curvas mestras. A importância destas curvas reside em poder definir graficamente o módulo de rigidez para diversas temperaturas e frequências, muito além das empregadas nos experimentos. No qual, pode-se ampliar significativamente a fronteira dos dados. No caso específico, embora os ensaios realizados tenham se limitado a frequências compreendidas entre 0,1 Hz a 20 Hz, com a construção das curvas mestras, pode-se determinar o citado parâmetro para frequências entre 0,0001 Hz e 10000000 Hz. Na Figura 4.8, são apresentadas as curvas mestras das misturas CA-REF, CA-GRAFP e CA-GRAFM.

Figura 4.8 - Curvas mestras das diferentes misturas



Fonte: Autor (2019).

Pode-se notar na Figura 4.8, que o princípio da superposição frequência-temperatura proporciona obter valores de módulo complexo para frequências extremamente altas e baixas.

Do ponto de vista experimental, seria impraticável, pois exigiria longos períodos de investigação para as frequências extremamente baixas, e hiatos de tempo ao nível de vibração molecular nas frequências altas.

Comparando-se as curvas mestras das diferentes misturas, nota-se a superioridade dos compósitos asfálticos produzidos com grafite puro e grafite pulverizado, no que se refere aos resultados de rigidez, em todo o domínio de frequências, com destaque para CA-GRAFM. A Tabela 4.8 apresenta, em termos percentuais, o aumento da rigidez, em que explicita os ganhos do módulo complexo das formulações asfálticas CA-GRAFP e CA-GRAFM relativas à mistura asfáltica CA-REF.

Tabela 4.8 - Aumentos no módulo complexo da mistura asfáltica CA-GRAFP e CA-GRAFM em relação a mistura asfáltica CA-REF (ganhos em percentagem)

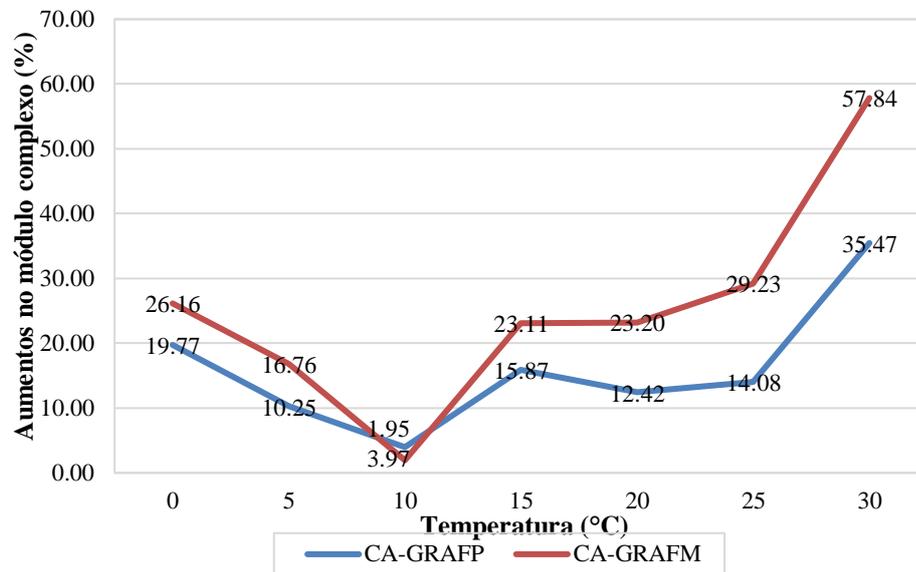
T (°C)	0	5	10	15	20	25	30
f (Hz)	CA-GRAFP						
0,1	15,05	46,59	14,93	27,51	31,64	10,93	22,30
0,2	17,10	36,48	15,58	39,46	34,90	13,31	32,54
0,5	18,67	32,77	11,06	40,38	29,22	14,32	35,60
1	18,10	27,53	8,08	37,28	25,93	11,81	36,21
2	19,94	23,74	5,52	33,21	23,48	9,29	36,79
5	18,44	15,79	0,36	23,56	19,43	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
f (Hz)	CA-GRAFM						
0,1	23,65	61,89	37,26	48,34	102,44	50,97	61,01
0,2	19,92	61,21	27,56	53,68	84,74	48,90	66,32
0,5	23,44	56,76	20,80	46,41	65,32	43,35	64,27
1	20,73	47,88	17,03	44,11	49,02	35,55	61,62
2	24,84	40,99	11,52	38,22	40,23	28,83	58,96
5	22,40	26,52	2,55	33,21	29,16	31,10	64,04
10	26,16	16,76	1,95	23,11	23,20	29,23	57,84
20	26,93	18,51	5,91	10,98	8,38	33,35	53,83

Fonte: Autor (2019).

Consolidando-se os valores dos ganhos em percentagem de rigidez para melhor visualização dos resultados, têm-se os gráficos dispostos na Figura 4.9 que demonstra os aumentos da adição dos concretos asfálticos alternativos em comparação a mistura de referência. Consoante aos resultados para a composição CA-GRAFM, e tomando como exemplo a frequência de 10 Hz, representativa de uma velocidade, na prática, de 72 km/h (Chabot et al., 2011), a adição do módulo complexo é da ordem de 57,84%, 29,23%, 23,20% e 23,11%, para as temperaturas de 30 °C, 25 °C, 20 °C e 15 °C, respectivamente. No caso do

grafite puro, o acréscimo é na ordem de 35,47%, 14,08%, 12,42% e 15,87% nas aludidas temperaturas.

Figura 4.9 - Ganhos no módulo complexo em porcentagens



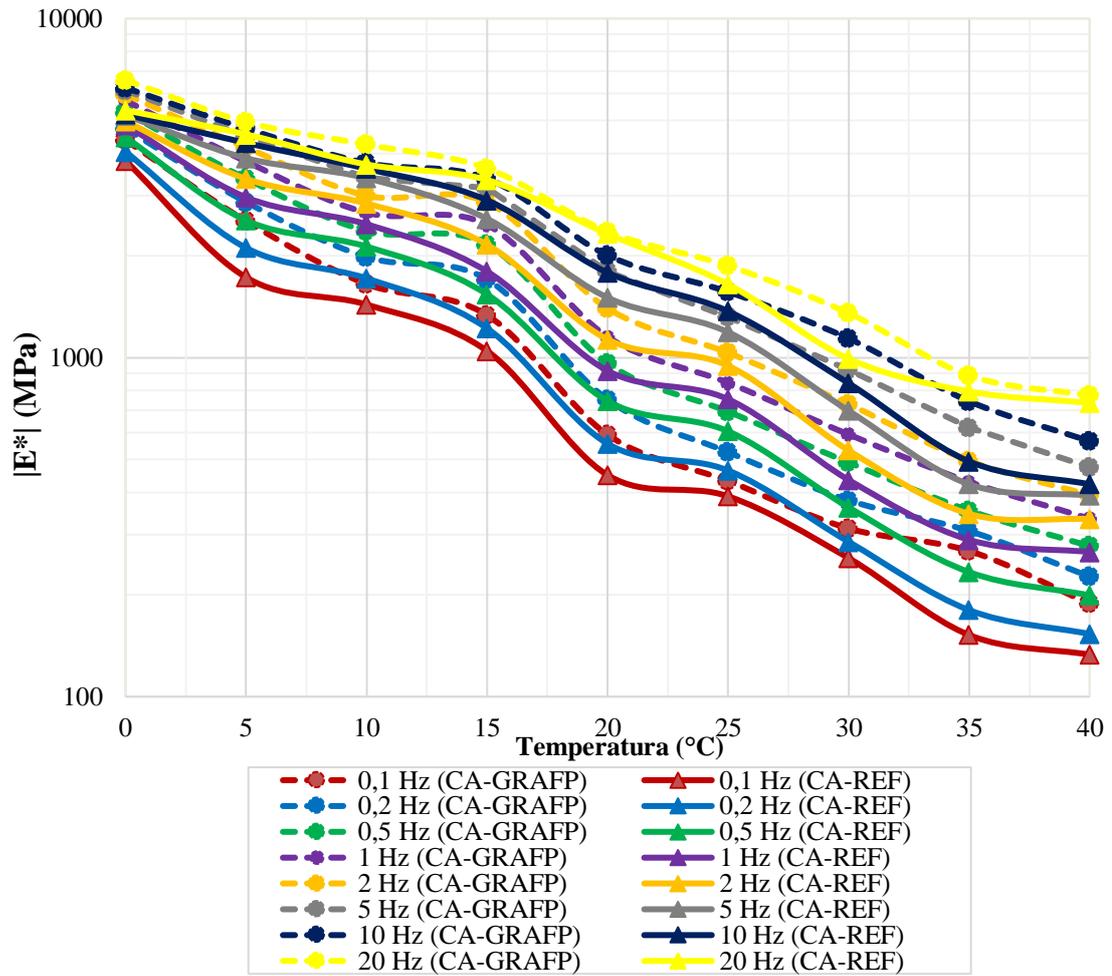
Fonte: Autor (2019).

Enfatiza-se que, na prática, o aumento da rigidez, retrata um maior coeficiente angular na curva tensão-deformação (MELO, 2014). Isso indica que a rigidez das misturas CAG-GRAFP e CA-GRAFM, em campo, sob um mesmo estado de tensões, seriam menos sensíveis às deformações de tração na fibra inferior da camada de revestimento asfáltico.

4.5.2 Isócronas e Diagramas de Black

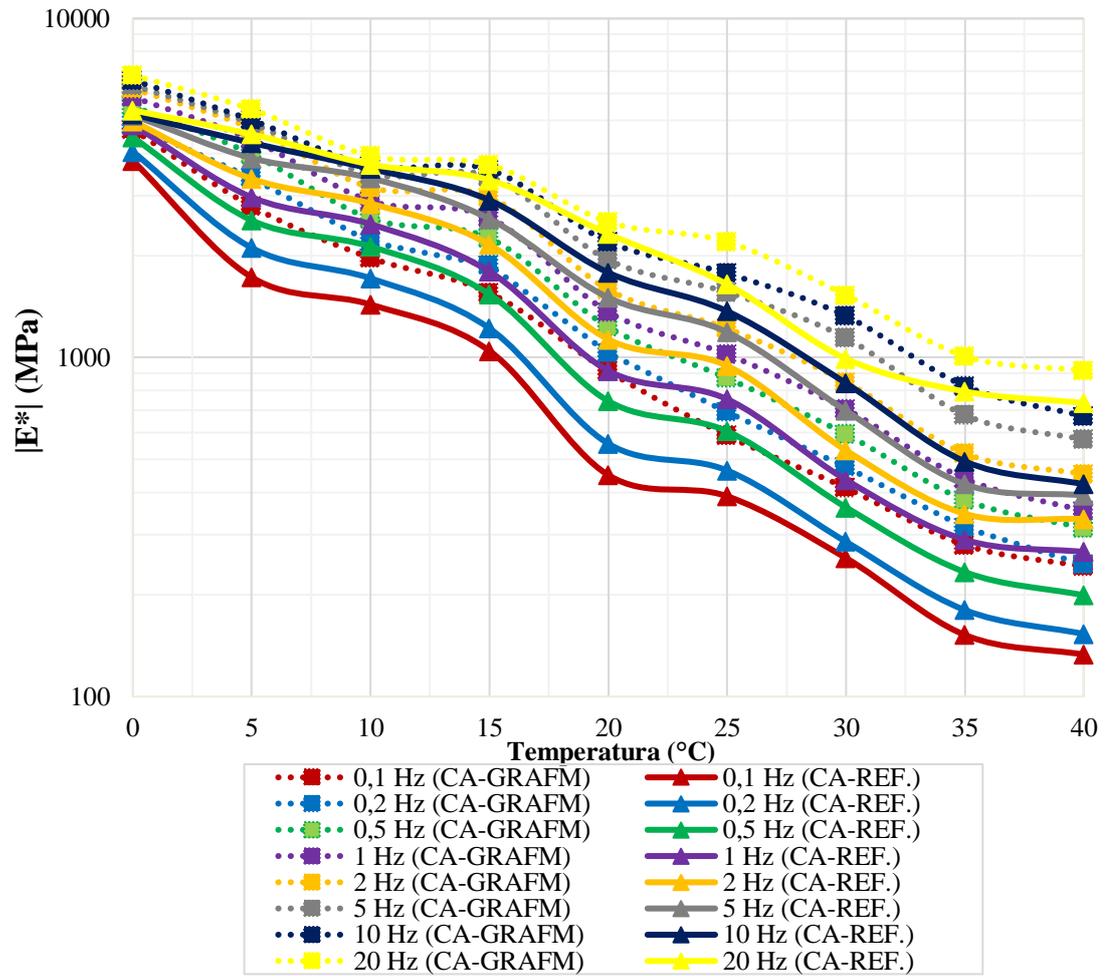
Nas Figuras 4.10 a 4.12 têm-se o módulo de rigidez dinâmico em função da temperatura. Estas curvas correlacionam o módulo complexo (escala logarítmica) com a temperatura (escala aritmética), e expressam a variação da rigidez em função das diferentes temperaturas e frequências de carregamento. Desta forma, 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.

Figura 4.10 - Isócronas, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFP



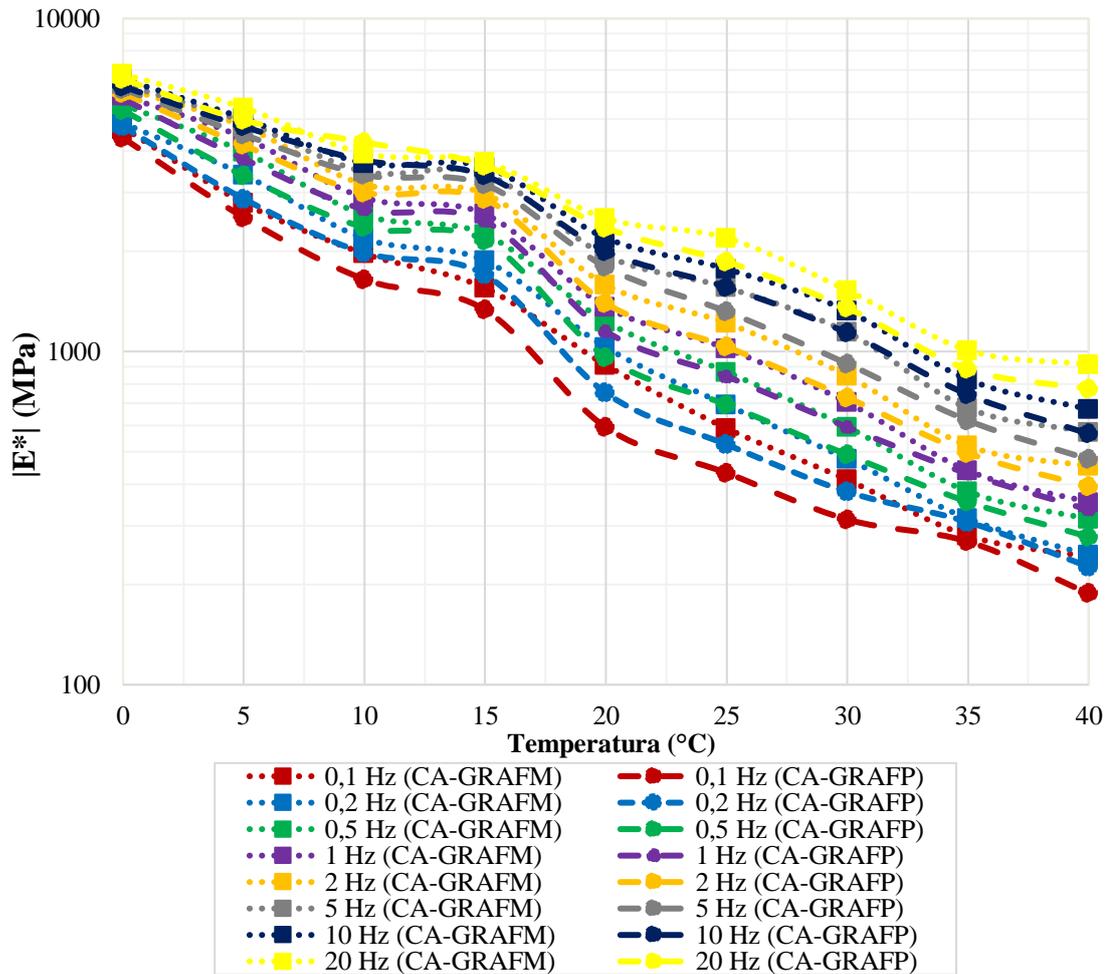
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.11 - Isócronas, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFM



Fonte: Autor (2019).

Figura 4.12 - Isócronas, mistura CA-GRAP x mistura CA-GRAFM



Fonte: Autor (2019).

A partir das Figuras 4.10 a 4.12, constata-se que as isócronas demonstram a diminuição da rigidez conforme o aumento da temperatura de ensaio, bem como, melhor comportamento térmico para as misturas CA-GRAFP e CA-GRAFM no tocante à formulação referência. Percebe-se, ainda, uma tendência de paralelismo entre as curvas para altas frequências de carregamento.

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), que relaciona a velocidade com tempo de aplicação da carga, e à relação empírica proposta por Van Der Poel (1954), podendo ser representado pela Equação 4.1:

$$t = \frac{1}{2\pi f} \quad 4.1$$

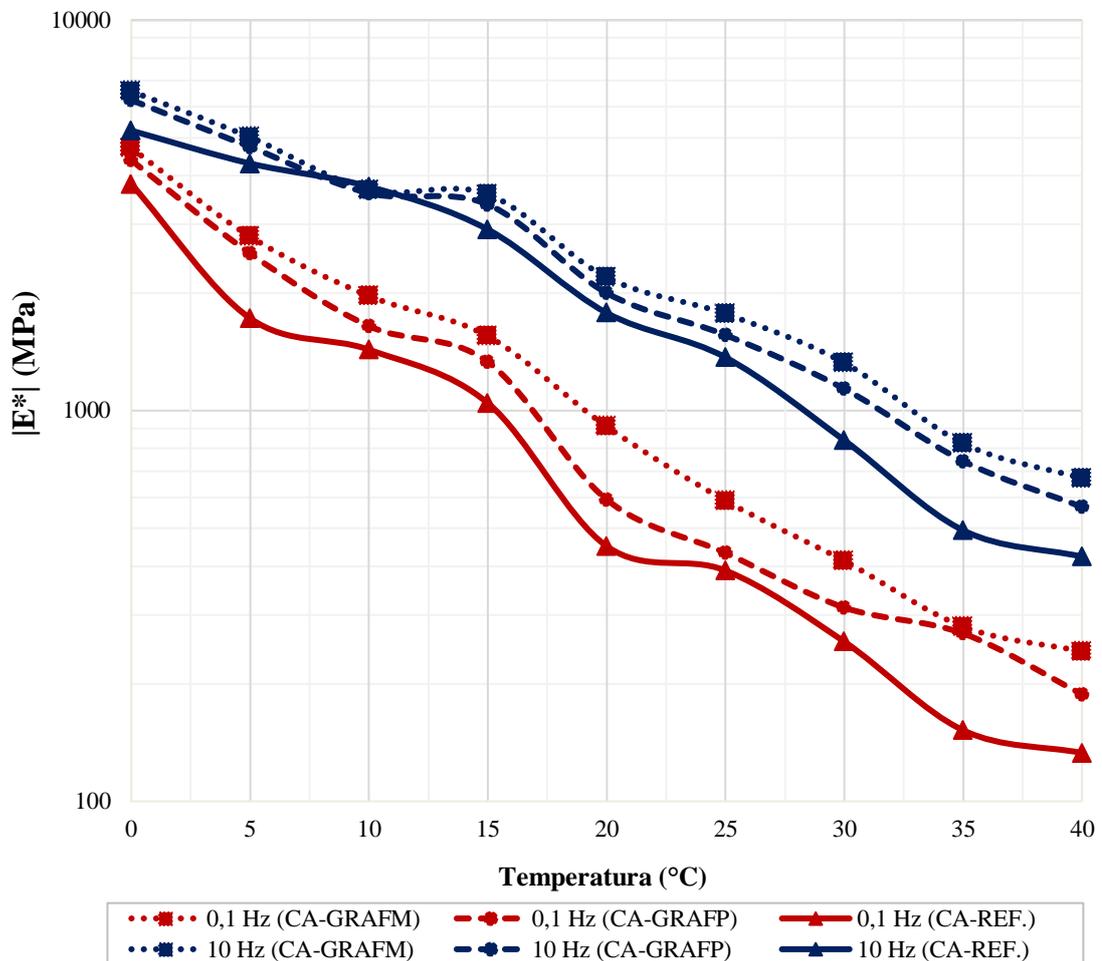
Onde:

t = tempo do pulso;

f = frequência.

Ao mesmo tempo, visando aumentar o entendimento dos resultados obtidos, selecionaram-se as frequências de 0,1 Hz e 20 Hz (Figura 4.13). Considerando-se a Equação 4.1 e o citado ábaco, verifica-se que a frequência de 0,1 Hz corresponde a uma velocidade de 1,6 km/h. E a frequência de 10 Hz que ilustra uma velocidade de 72 km/h.

Figura 4.13 - Isócronas, mistura CA-GRAP x mistura CA-GRAFM



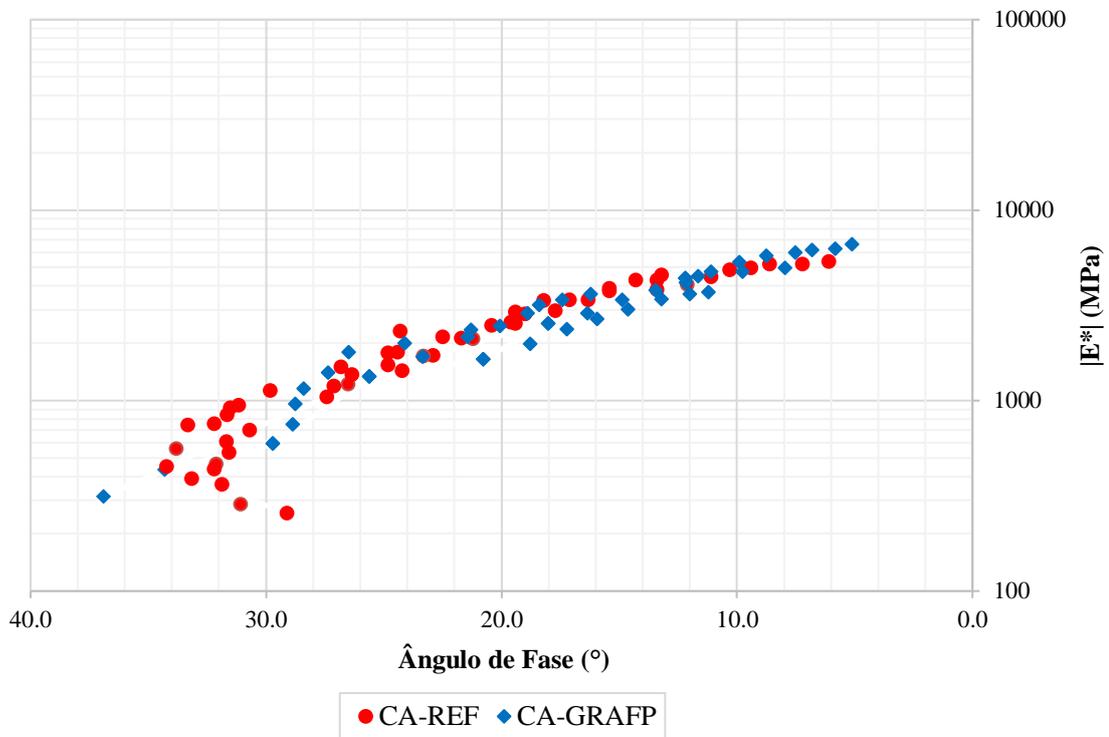
Fonte: Autor (2019).

Verifica-se, assim, que os aumentos nos parâmetros E^* são mais significativos a baixas temperaturas. Sublinha-se, igualmente, a redução do comportamento térmico à medida que se aumenta a frequência de carregamento. Consoante à composição CA-GRAFM, identifica-se,

respeitante as misturas CA-REF e CA-GRAFP e para todas as frequências de carregamento, ser menos suscetível à variação de temperatura.

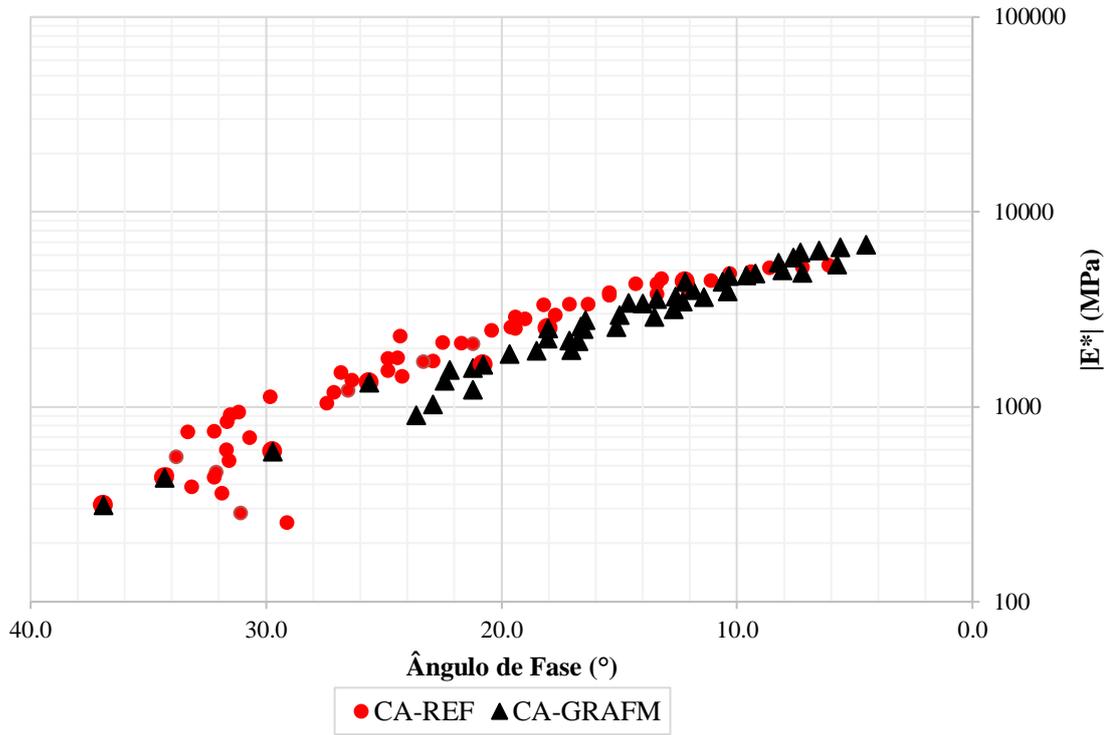
Nas Figuras 4.14 a 4.16 são apresentados os espaços de Black para as misturas CA-REF, CA-GRAFP e CA-GRAFM, em que se relaciona o módulo complexo (escala logarítmica) com os respectivos valores de ângulo de fase (escala aritmética), em função da frequência de carregamento e temperatura de ensaios. O espaço de Black tem o objetivo de retratar o comportamento elástico das misturas asfálticas, e evitar possíveis discrepâncias nos resultados experimentais (AIREY, 2002).

Figura 4.14 - Espaço de Black, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFP



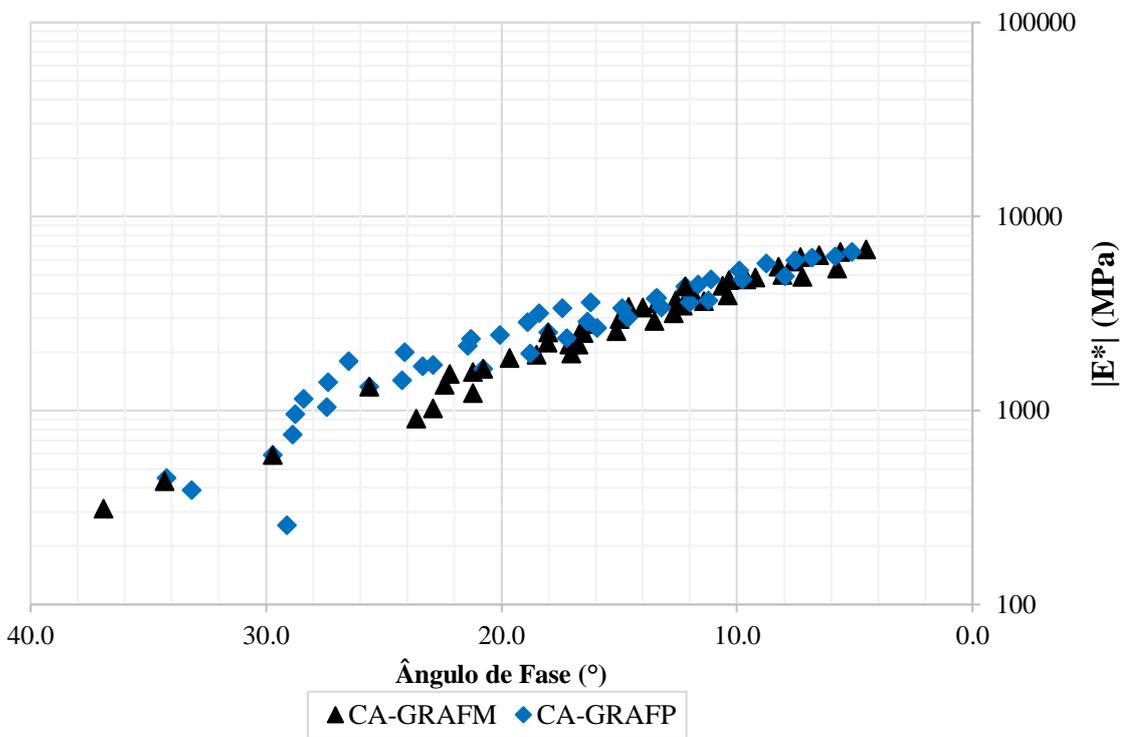
Fonte: Autor (2019).

Figura 4.15 - Espaço de Black, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFM



Fonte: Autor (2019).

Figura 4.16 - Espaço de Black, mistura CA-GRAP x mistura CA-GRAFM



Fonte: Autor (2019).

Constata-se nas Figuras 4.14 a 4.16, um encurtamento do espaço de Black das misturas alternativas em comparação a mistura de referência. Este resultado, traduz a redução do ângulo de fase em função da incorporação do grafite puro e grafite pulverizado. Também foi possível verificar, o encurtamento mais acentuado dos ângulos de fase quando se utilizou o grafite moído. Entre os concretos asfálticos estudados, notou-se que a mistura CA-GRAF_M apresenta maior concentração de baixos ângulos de fase, seguida pela composição CA-GRAF_P. Portanto, é perceptível a influência positiva do grafite nas amostras asfálticas. Isso pode ser notado pelo fato da elasticidade dos concretos asfálticos aumentarem com a substituição do filer convencional (cimento Portland) pelos materiais alternativos, o que se observa pela redução dos valores de ângulo de fase.

4.5.3 Ângulo de Fase (δ)

A adição dos materiais alternativos, em linhas gerais, provoca redução dos ângulos de fase (δ), tornando as amostras mais elásticas. Essas mudanças nas propriedades mecânicas são mostradas de forma mais clara nas Figuras 4.17 a 4.19. Em conformidade com estes resultados, Melo (2014), Melo & Trichês (2016), Marcon (2016) e Carlesso (2017), Carlesso et al. (2019), demonstraram que os concretos asfálticos produzidos com ligantes modificados, de maneira geral, apresentam maior rigidez e, conseqüentemente, a diminuição dos ângulos de fase.

Figura 4.17 - Ângulo de fase (δ) versus frequência, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFP

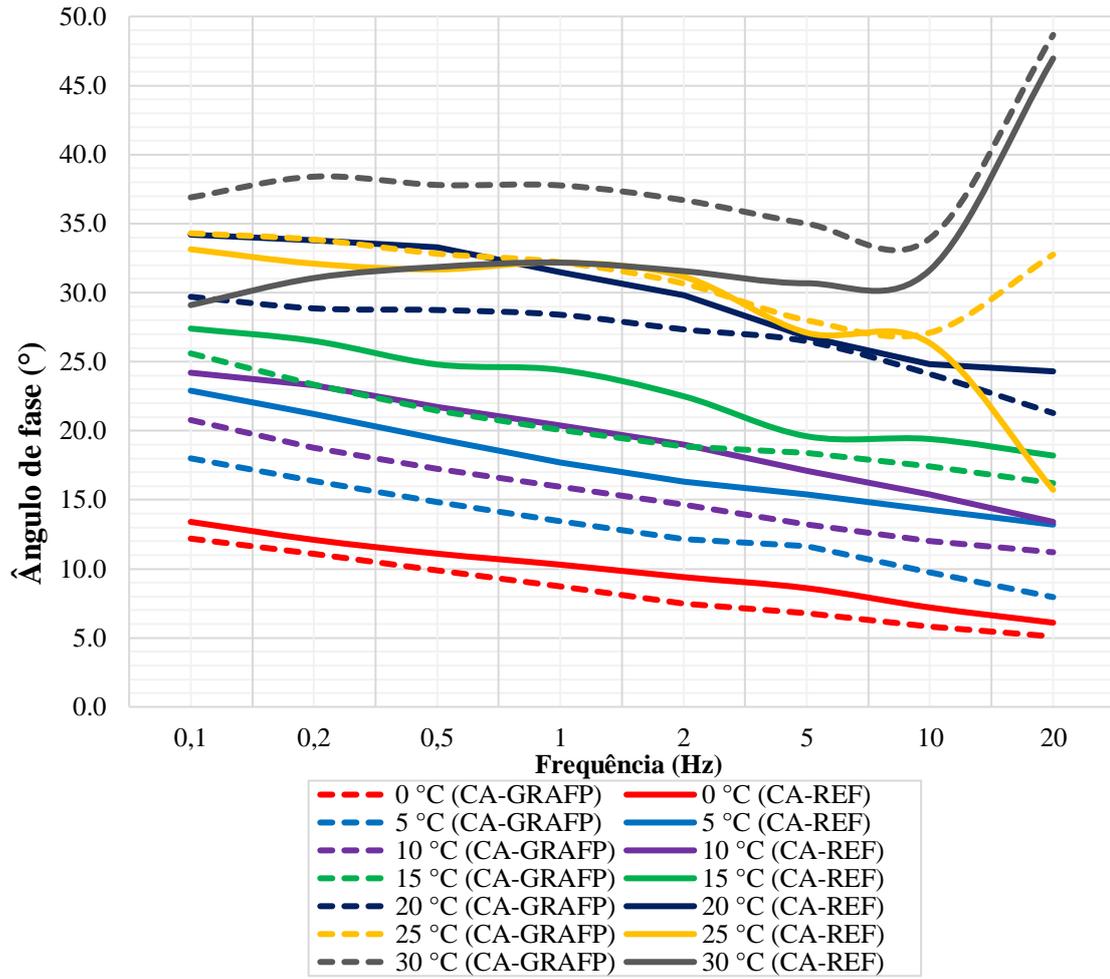
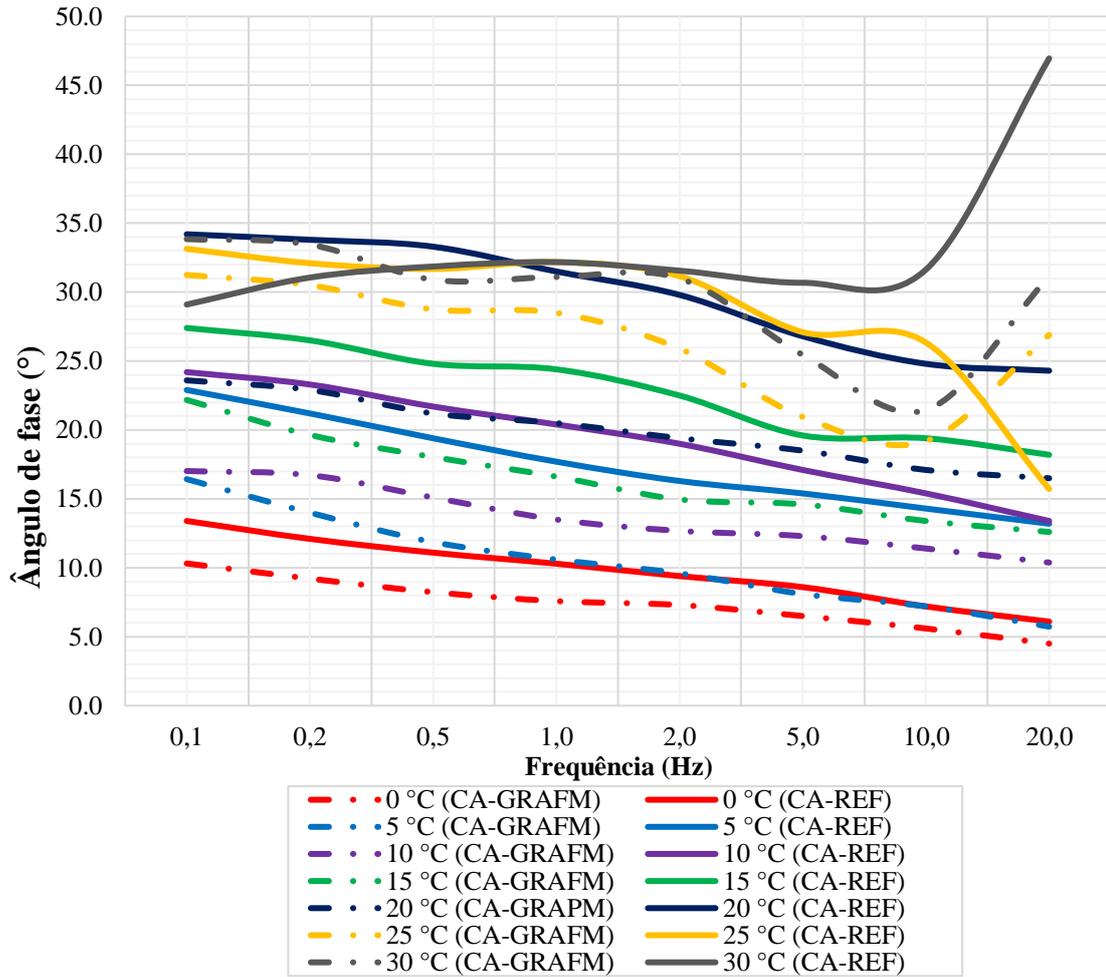
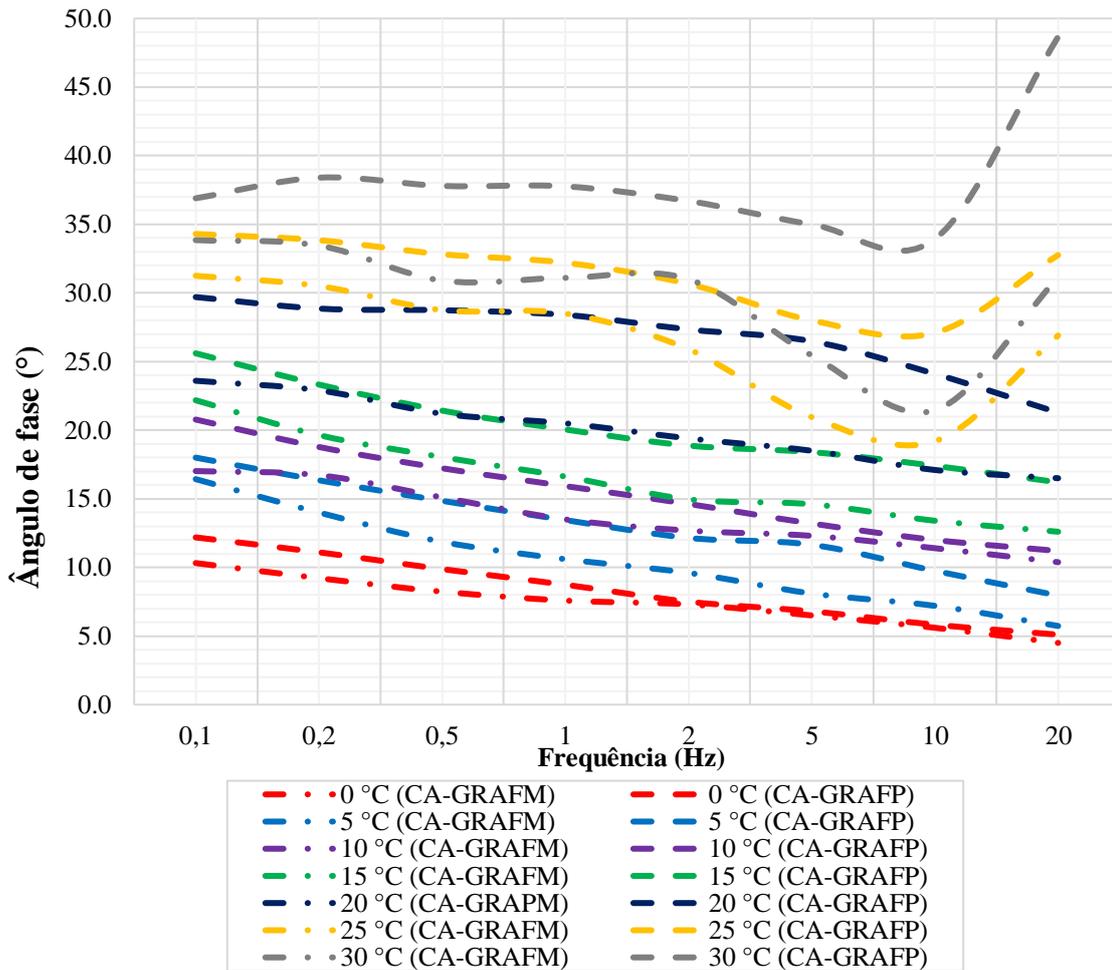


Figura 4.18 - Ângulo de fase (δ) versus frequência, mistura CA-REF x mistura CA-GRAFM



Fonte: Autor (2019).

Figura 4.19 - Ângulo de fase (δ) versus frequência, mistura CA-GRAP x mistura CA-GRAFPM

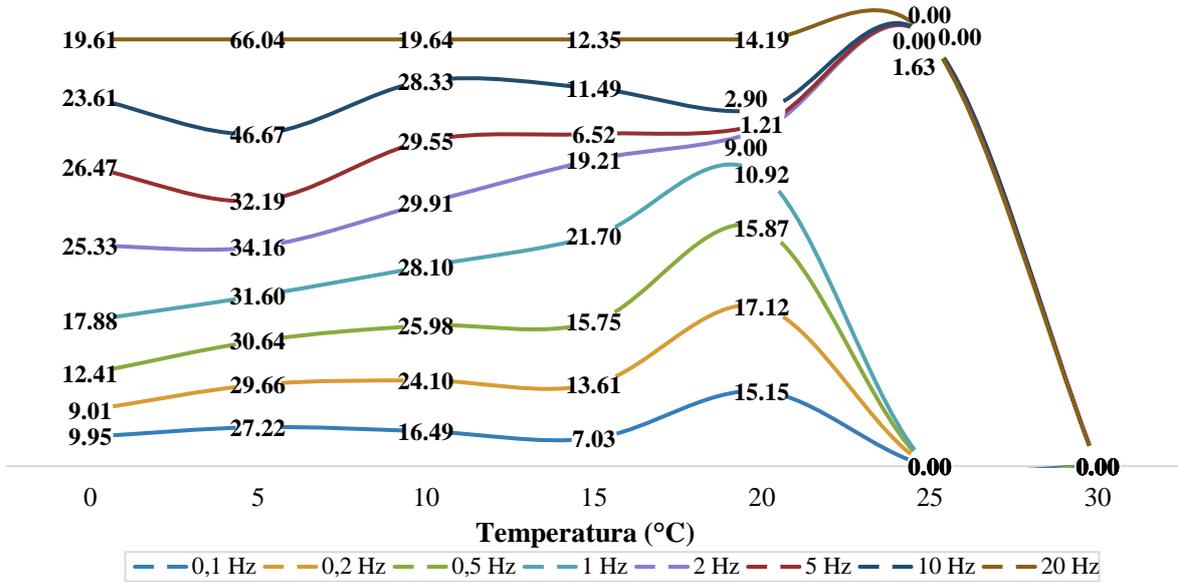


Fonte: Autor (2019).

De modo geral, constatou-se que as misturas CA-GRAFP e CA-GRAFPM foram responsáveis por uma redução significativa nos valores do ângulo de fase (δ) para as temperaturas entre 0 °C e 20 °C, conforme o aumento da frequência de carregamento. Por outro lado, nas temperaturas de 25 °C e 30 °C, notou-se uma considerável variação desse parâmetro para ambos os compósitos em função da frequência de carregamento. Ou seja, o aumento da frequência de carregamento e da temperatura resultaram em maiores ângulos de fase.

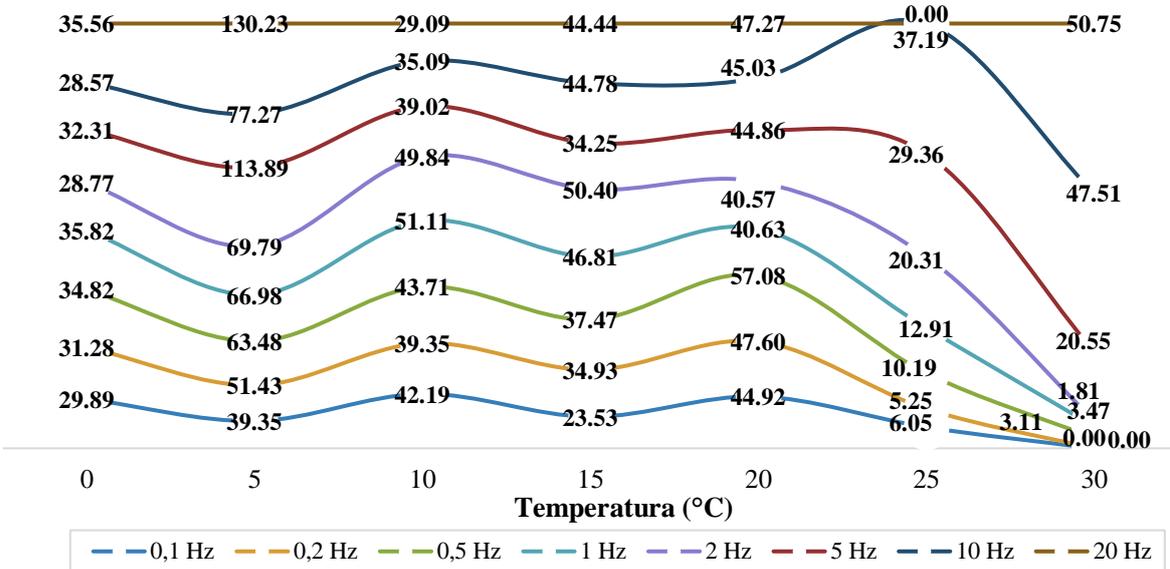
Em síntese, o acréscimo da temperatura, além de diminuir consideravelmente a resistência mecânica dos compósitos asfálticos, retratada pela redução do módulo complexo, o torna mais suscetível às deformações permanentes, assim como, o desempenho à fadiga, por aumentar a resposta viscosa do material, demonstrada pelo acréscimo do ângulo de fase. Nas Figuras 4.20 e 4.21 são indicadas as reduções do ângulo de fase (em porcentagem) das misturas asfálticas CA-GRAFP e CA-GRAFPM relativas a mistura asfáltica CA-REF.

Figura 4.20 - Redução em porcentagem do ângulo de fase, CA-GRAFP em relação ao CA-REF



Fonte: Autor (2019).

Figura 4.21 - Redução em porcentagem do ângulo de fase, CA-GRAFM em relação ao CA-REF



Fonte: Autor (2019).

De acordo com os resultados das Figuras 4.20 e 4.21, é possível verificar uma diminuição dos ângulos de fase com a participação do grafite puro e pulverizado. Por exemplo, para a frequência de 10 Hz (velocidade de tráfego de 72 km/h), quando utilizado o grafite moído por 4 h, a atenuação do ângulo de fase da mistura asfáltica é da ordem de 40,63%, 46,81% e 51,11%, para as temperaturas de 20 °C, 15 °C e 10 °C, respectivamente. Para o grafite puro, constatou-se a redução na 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, além de melhorar o comportamento à fadiga. Ou seja, na prática, a adição dos materiais alternativos, acrescer o tempo de vida útil do pavimento, devido à melhor resposta às deformações permanentes. Esse desempenho favorável para os concretos asfálticos alternativos obtidos no trabalho em questão também se registrou em Melo (2014), Melo & Trichês (2016), Marcon (2016) e Carlesso (2017), Carlesso et al. (2019).

Assinala-se que as formulações estudadas (CA-GRAFP e CA-GRAFM) não encontraram correspondentes na literatura, ou seja, estudos versando sobre a substituição do fíler tradicional (cimento Portland) por materiais alternativos, segundo a determinação do módulo complexo e ângulo de fase por flexão a quatro pontos. Os trabalhos citados (Melo, 2014; Melo & Trichês, 2016; Marcon, 2016; Carlesso, 2017; e Carlesso et al. 2019), embora tenham realizados similar experimento, pesquisaram composições com a participação de ligantes modificados e compactação empregando a mesa compactadora LCPC, condições bastante diferenciadas do estudo em apreço.

CAPÍTULO 5

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo tem-se as conclusões do presente trabalho, assim como as recomendações para futuras pesquisas.

5.1 Conclusões

A presente pesquisa teve como principal objetivo a determinação do comportamento mecânico de concretos asfálticos com grafite puro e pulverizado por 4 h no MAE, possibilitando a obtenção de propriedades viscoelásticas dos pavimentos asfálticos, além da validação da utilização desse material alternativo em substituição ao fíler tradicional (cimento Portland).

Os resultados do programa experimental levaram às seguintes conclusões:

- a) Os materiais alternativos do tipo grafite puro e pulverizado mostraram resultados bastante promissores frente ao fíler convencional;
- b) Os concretos asfálticos CA-GRAFP e CA-GRAFM apresentam valores superiores de E^* e redução de δ , quando comparados a mistura tradicional. Os ganhos mais expressivos aconteceram quando se utilizou o grafite moído por 4 h, isto é, o concreto asfáltico CA-GRAFM mostrou maior capacidade de enrijecimento;
- c) Observou-se por meio das curvas isotérmicas o aumento da susceptibilidade cinética para as misturas CA-REF E CA-GRAFM em relação à mistura convencional;
- d) Verificaram-se pelas isócronas que as formulações asfálticas alternativas se mostraram menos susceptíveis às variações de temperatura, respeitante à composição referência;
- e) A maior rigidez das misturas CA-GRAFP e CA-GRAFM, que evidenciaram a viabilidade do uso em composições asfálticas;
- f) Notaram-se pelos diagramas de Black o aumento da plasticidade com a adição do grafite natural e pulverizado por 4 h.

- g) No tocante a redução dos ângulos de fase, comprova-se uma diminuição no valor com a adição do grafite, sendo esse aumento mais expressivo quando utilizado o grafite pulverizado.

Pelo exposto, os resultados dos ensaios mecânicos evidenciaram desempenho satisfatório das misturas asfálticas com grafite natural e pulverizado, em comparação a composição convencional. Tal conclusão contribui para ratificar que a utilização do mineral grafite em composições asfálticas podem ser uma alternativa ao fíler tradicional (cimento Portland0 para a produção de misturas asfálticas.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Com o objetivo de melhor avaliar o comportamento reológico e o desempenho mecânico de concretos asfálticos com grafite (puro e pulverizado no MAE), sugerem-se para futuros trabalhos:

- a) Analisar as propriedades mecânicas de acordo com a Resistência à Tração (RT), Módulo de Resiliência (MR) e Deformação Permanente (Creep Dinâmico);
- b) Estudar a incorporação do grafite como modificador do ligante asfáltico 50/70, segundo a Resistência à Tração (RT), Módulo de Resiliência (MR), Deformação Permanente (Creep Dinâmico), Módulo Complexo e Ângulo de fase;
- c) Estudar a incorporação do grafite em outras classes de ligantes asfálticos;
- d) Executar e monitorar trechos experimentais com misturas asfálticas tendo a participação do grafite, visando aferir a relação laboratório-campo.

REFERÊNCIAS

- ALECRIM, A. V. **Estudo do resíduo quartzito foliado para emprego em estrutura de pavimentos**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, SP. 2009.
- AIREY, G.D. (2002). Use of black diagrams to identify inconsistencies in rheological data. **Road Materials and Pavement Design**, 3(4), 403-424.
- AMORIM, C. L. G. de. **Estudo do efeito das interações água-argila no inchamento de argilomineirais através da difração de Raios X**. 145f. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Nuclear) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução No. 19, de 11 de julho de 2005**. ANP, Rio de Janeiro, 2005.
- ARAO, M. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com a inserção de polietileno tereftalato (PET) triturado**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2016.
- ASTM - American Society for Testing Materials. **ASTM C117: Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing**. USA, 2017.
- _____. **ASTM C 127: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate**. USA, 2015.
- _____. **ASTM C 128: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate**. USA, 2015.
- _____. **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.
- _____. **ASTM C 136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates**. USA, 2006.
- _____. **ASTM C 188: Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement**. USA, 2017.

_____. **ASTM D 5: Standard test method for penetration of bituminous materials.** USA. 2013.

_____. **ASTM D 36: Standard test method for softening point of bitumen (ring-and-ball apparatus).** USA. 2014.

_____. **ASTM D 4402: Standard test method for viscosity determination of asphalt at elevated temperatures using a rotational viscometer.** USA. 2013.

_____. **ASTM D 92: Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester.** USA, 2018.

_____. **ASTM D 113: Standard Test Method for Ductility of Asphalt Materials.** USA, 2017.

_____. **ASTM D 2041: Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures.** USA, 2011.

_____. **ASTM D 2042: Standard Test Method for Solubility of Asphalt Materials in Trichloroethylene.** USA, 2015.

_____. **ASTM D 2726: Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures.** USA, 2019.

_____. **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.

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

_____. **ASTM D6926: Standard Practice for Preparation of Asphalt Mixture Specimens Using Marshall Apparatus¹.** USA, 2016.

_____. **ASTM E 102: Standard Test Method for Saybolt Furol Viscosity of Bituminous Materials at High Temperatures.** USA, 2016.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo; Oficina de Textos, 2007.

BARBOSA, C. A. **Misturas do tipo stone matrix asphalt (sma) com agregados alternativos, fibra do curauá e nanomaterial**. 2016. 147p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

BARDINI, V. S., KLINSKY, L. M., & FERNANDES JR, J. L.; ROQUE, R (2012). Influência do fíler mineral no comportamento reológico de mástiques asfálticos. **Revista Transportes**. v. 20, n. 3, 2012. Pag. 19-26.

BELÉM, J. **Caracterização Mineralógica, Física e Termobarométrica de Minérios de Grafita da Província Grafítica Bahia-Minas**. Dissertação - Universidade Federal de Minas Gerais. UFMG. Programa de Pós-Graduação do Instituto de Geociências. Belo Horizonte, 2006.

BONNAURE, F., GEST, G., GRAVOIS, A., UGE, P. A New Method of Predicting the Stiffness of Asphalt Paving Mixtures. **Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists**, Vol. 46, 1977, pp. 64-100.

BRANCO, C. V. T. F. (2004) **Caracterização de misturas asfálticas com o uso de escória de aciaria como agregado**. Tese (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE. Programa de Pós-Graduação em Ciências em Engenharia Civil. Rio de Janeiro, 2004.

BRASIL. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **DNER-ME 084: Agregado miúdo – determinação da densidade real**. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995.

CABRAL, A. M. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas com agregado sinterizado de argila modificadas por nanomaterial de multicamadas de grafeno**. 2017. 130p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2017.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. LTC, V. 8º Edição, 2012.

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.

CAVALCANTE, D. G.; CRISÓSTOMO, P. H. S.; SILVA, L. C. P.; SOUZA, R. J. Q.; GUIMARÃES, D. M. D.; FROTA, C. A. Levantamento Visual das Patologias na Cidade de Manaus-AM. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**. n.19. p.77-87. Maio, 2012.

CARRENO, N. L. V.; GARCIA, I. T. S.; LEITE, E. R.; SANTOS, L. P. S.; KEYSON, D.; LONGO, E.; FAJARDO, H. V.; PROBST, L. F. D.; FABBRO, M. T. Nanocompósitos cerâmicos a partir do processo de moagem mecânica de alta energia. **Química Nova**, v. 31, p. 962-968, 2008.

CENTOFANTE, R. **Estudo laboratorial da utilização de material fresado em misturas asfálticas recicladas a quente**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Santa Maria, RS, 2015.

CHABOT, A.; CHUPIN, O.; DELOFFRE, L.; DUHAMEL, D. Viscoroute 2.0: A tool for simulation of moving load effects on asphalt pavement. **Journal Road Materials and Pavement Design**. 2011, 11, 227–250.

CLYNE, T. R.; Li, X.; Marasteanu, M. O.; Skok, E. L. **Dynamic and resilient modulus of Mn/DOT asphalt mixtures**. Minnesota Department of Transportation. Final Report. St. Paul, Minnesota, 2003.

CNT. Confederação Nacional de Transportes. **Pesquisa CNT de Rodovias 2018: relatório gerencial**. - Brasília: CNT: SEST SENAT, 2018.

COLPO, G. B. **Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. 2014. 154p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

CULLITY, B.D., STOCK, S.R. **Elements of X-ray Diffraction**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

CUNHA, T. M. F.; CARDOSO, G.; FROTA, C. A. Rheological Properties of Asphalt Binders Modified With Natural Fibers and Oxidants. **Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology**, v. 4, p. 8332, 2017.

CUNHA, T. M. F.; CORREIA, J. C.; FROTA, C. A.; CHAAR, S. M.; COUCEIRO, P. R. C. Efeito da adição de material vegetal (fibra da castanha de cutia) e polímero (SBS) nas propriedades do ligante asfáltico (CAP 50/70). **Polímeros (São Carlos. Impresso)**, v. 22, p. 345-351, 2012.

CUNHA, T. M. F.; FROTA, C. A. Ligante Asfáltico Modificado: uma Abordagem sobre a Utilização dos Modificadores, Polímero EVA e Fibra Natural da Amazônia. **Petro & Química**, v. 337, p. 54-56, 2011.

CUNHA, T. M. F.; DANTONA, D. M.; FROTA, C. A. Estudo do Ligante CAP 50/70 Modificado pelo Polímero Eva para Vias Urbanas de Manaus/AM. **Petro & Química**, v. 322, p. 47-51, 2010.

CUNHA, M. J. A.; SILVA, C. L.; LIMA, C. A. P.; FROTA, C. A. Efeito da temperatura no comportamento mecânico de misturas asfálticas com agregados sinterizados de argila calcinada (ASAC). **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, p. 11970, 2018.

DAS, B.M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Cengage Learning, 2015.

DANTONA, D. M.; FROTA, C. A. Estudo de misturas asfálticas com ligante modificado pelo polímero EVA para pavimentos urbanos de Manaus - AM. **Polímeros (São Carlos. Impresso)**, v. 21, p. 13-18, 2011.

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.

EN - European Standard. **EN 12697-6: Bituminous mixtures - test methods for hot mix asphalt, part 6: Determination of bulk density of bituminous specimen**. CEN, Brussels. 2004.

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

_____. **EN 12697-29 - Bituminous Mixtures, Test methods for Hot Mix Asphalt - Part 29: Determination of the Dimensions of a Bituminous Specimen**. CEN, Brussels. 2004.

FAXINA, A. L. **Estudo da viabilidade técnica do uso de resíduo de óleo de xisto como óleo extensor de ligantes asfalto-borracha**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, SP. 2006.

FILHO, C. L. D. N. **Avaliação laboratorial de misturas asfálticas sma produzidas com ligante asfalto-borracha**. 2004. 67p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, SP. 2004.

FROTA, C. A.; NUNES, F. R. G.; SILVA, C. L.; MELO, D. M.; SANTOS, M. G. R. Desempenho Mecânico de Mistura Asfálticas Confeccionadas com Agregados Sintéticos de Argila Calcinada. **Cerâmica**, v. 53, p. 255-262, 2007.

FROTA, C. A.; NUNES, F. R. G.; GUIMARÃES, D. M. D.; Souza, R. J. Q.; FORTES, R. M. The Reuse of Construction and Demolitions Materials as a Substitute for Pebbles Taken from River Beds in The Amazon (Brazil) for Use as Aggregate in Asphalt Mixtures. **IJP. International Journal of Pavements**, v. 9, p. 79-86, 2010.

- HAFEEZ, I., KAMAL, M. A., AHADI, M. R., SHAHZAD, Q., BASHIR, N., Performance Prediction of Hot Mix Asphalt from Asphalt Binders, **Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences**, 2012, 104-113.
- HAND, G. P. **Graphite: applications & developments**. Industrial Minerals, 1996.
- HARBEN P.; BATES R.L. **Industrial minerals geology and world deposit**. Industrial Minerals Division, Metal Bulletin, Londres, 1990.
- JACKSON, M. L.; SHERMAN, G. D. Chemical weathering of minerals in soil. **Adv. Agron**, 1953, 211-318.
- KIM, Y. R., LITTLE, D. N., & SONG, I. I. (2003). Effect of Mineral Fillers on Fatigue Resistances and Fundamental Material Characteristics: Mechanistic Evaluation. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 1832, 1-8.
- 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.
- LOULIZI, A.; FLINTSCH, G. W.; AL-QADI, I. L.; MOKAREM, D. Comparison between Resilient Modulus and Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt as Material Properties for Flexible Pavement Design, **Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board**, 2006, 161-170.
- 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. 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.

NUNES, F. R. G.; SILVA, C. L.; FROTA, C. A. Obtenção do módulo dinâmico de misturas asfálticas com agregados sintéticos de argila calcinada, utilizando o ensaio de compressão diametral. **Transportes (Rio de Janeiro)**, v. XVII, p. 5-13, 2009.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; SILVA JÚNIOR, F.; PANDOLFELLI, V. C. Artigo revisão: Estabilização de suspensões aquosas contendo grafite. **Cerâmica**, ABC - São Paulo, v. 46, n.300, p. 186-195, 2000.

SARGES, R. R.; NOGUEIRA, A. C. R.; FROTA, C. A. Depósitos Argilosos Cenozóicos do Estado do Amazonas: Utilização como Agregados de Argilas Calcinadas para Pavimentações na Região Amazônica. **Brazilian Geographical Journal**, v. 1, p. 33-49, 2010.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

SILVA, A. C. L. **Comportamento mecânico de compósitos asfálticos com argila calcinada sob flexão a quatro pontos**. 2014. 127p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos da Amazônia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014.

SILVA, A. C. L.; FROTA, C. A. Análise teórico-experimental do módulo dinâmico de compósitos asfálticos com argila calcinada. **Cerâmica**, São Paulo, v. 62, n. 364, p. 392-399, dez. 2016.

SILVA, A. C. L.; FROTA, C. A.; FROTA, H. O. Módulo complexo de compósitos asfálticos com argila calcinada sob flexão a quatro pontos. **Matéria (UFRJ)**, v. 20, p. 436-451, 2015.

SILVA, C. L.; SILVA, A. C. L.; FROTA, C. A. Módulo dinâmico de compósitos asfálticos com agregados sinterizados de argila calcinada. **Cerâmica (São Paulo. Impresso)**, v. 60, p. 10-21, 2014.

SILVA, C. L.; FROTA, H. O.; FROTA, C. A. Sintered Calcined Clay as an Alternative Coarse Aggregate for Asphalt Pavement Construction. **Open Journal of Civil Engineering**, v. 05, p. 281-288, 2015.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2012.

SOUZA, M. F.; SORIANO, J.; PATINO, M. T. O. Resistência à compressão e viabilidade econômica de blocos de concreto dosado com resíduos de tijolos cerâmicos. **Matéria (UFRJ)**. 2018, vol.23, n.3.

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.

VALENCA, P. M. A.; FROTA, C. A. Estudo de Misturas Areia-Asfalto com Areia de Resíduo de Construção e Demolição, Fibra do Açaí e Polímeros para a Cidade de Manaus, AM. **Ciência & Engenharia (UFU. Impresso)**, v. 20, p. 11-19, 2011.

VALENCA, P. M. A.; Frota, Consuelo A. Da. Misturas Areia-Asfalto com Fibra do Açaí e Resíduo da Construção Civil para a Cidade de Manaus. **T&C Amazônia**, v. 21, p. 50-54, 2011.

POEL, V. D. A General System Describing the Viscoelastic Properties of Bitumens and Its Relation to Routine Test Data. **Journal of Applied Chemistry**, Vol.4, 1954.

WITCZAK, M. W.; ROO, R. E. **Summary of Complex Modulus Laboratory Test Procedures and Results**. STP 561, American Society for Testing and Materials, 1974, pp. 67-94.

WITCZAK, M. W.; FONSECA, O. A., Revised Predictive Model for Dynamic (Complex) Modulus of Asphalt Mixtures, **Transportation Research Record**, 1996, 15-23.

ZARBIN, A. J. G.; OLIVEIRA, M. M. **Nanoestruturas de carbono (nanotubos, grafeno): quo vadis?** Química Nova, v. 36, No 10, p. 1533-1539. 2013.