UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

ANNE KAROLLYNNE CASTRO MONTEIRO

ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO ASFÁLTICA COM AGREGADO SINTERIZADO DE ARGILA CALCINADA (ASAC) SEGUNDO MODELO REOLÓGICO VISCOELÁSTICO LINEAR DE HUET-SAYEGH

Manaus

2020

ANNE KAROLLYNNE CASTRO MONTEIRO

ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO ASFÁLTICA COM AGREGADO SINTERIZADO DE ARGILA CALCINADA (ASAC) SEGUNDO MODELO REOLÓGICO VISCOELÁSTICO LINEAR DE HUET-SAYEGH

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.
Área de concentração: Materiais
Linha de pesquisa: Pavimentação

Orientadora: Prof[a] Dra. Consuelo Alves da Frota
Coorientador: Prof. Dr. Hidembergue Ordozgoith da Frota

Manaus
2020

Ficha Catalográfica

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

Monteiro, Anne Karollynne Castro

M775a Análise da Composição Asfáltica com Agregado Sinterizado de Argila Calcinada (ASAC) segundo Modelo Reológico Viscoelástico Linear de Huet-Sayegh / Anne Karollynne Castro Monteiro. 2020

84 f.: il. color; 31 cm.

Orientadora: Consuelo Alves da Frota

Coorientador: Hidembergue Ordozgoith da Frota

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas.

1. Método dos Mínimos Quadrados. 2. Huet-Sayegh. 3. Módulo Complexo. 4. Mistura Asfáltica. I. Frota, Consuelo Alves da. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

ANNE KAROLLYNNE CASTRO MONTEIRO

ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO ASFÁLTICA COM AGREGADO SINTERIZADO DE ARGILA CALCINADA (ASAC) SEGUNDO MODELO REOLÓGICO VISCOELÁSTICO LINEAR DE HUET-SAYEGH

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.
Área de concentração: Materiais
Linha de pesquisa: Pavimentação

Prof. Dra. Consuelo Alves da Frota (Orientadora e Presidente)
Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM)

Prof. Dr. Marcos Marques da Silva Paula
Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM)

Rita Moura Fortes

Prof. Dra. Rita Moura Fortes
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) – Membro Externo

Dedico meu trabalho aos meus pais, Ana Néry Prestes Castro e Luiz Gonzaga Queiroz Monteiro e irmã Patrícia Castro Monteiro por terem me incentivado a ter algo que ninguém irá conseguir me tirar: meu conhecimento.

AGRADECIMENTOS

Segundo o dicionário, gratidão, palavra oriunda do latim, *gratituto.inis*, é o ato de reconhecer ou de prestar reconhecimento a alguém por algo bom. Na minha opinião, o significado é ainda mais profundo, pois acredito que está ligado diretamente com o sentimento da felicidade, afinal, ninguém é grato por algo que causa tristeza, muito pelo contrário.

Meu caminho foi longo, difícil, porém recompensante. Ao analisar, reflito que não foram somente dois anos de pós-graduação na modalidade do mestrado acadêmico, foram exatos vinte e quatro anos, que é exatamente, o meu tempo de passagem na Terra, até o presente momento. Por conta disso, quero citar todas as pessoas que participaram da minha trajetória.

Deus, o que eu seria sem Tua proteção? Obrigada por me iluminar e me auxiliar a permanecer firme na minha missão.

Aos meus pais, Ana Néry Prestes Castro e Luiz Gonzaga Queiroz Monteiro, o meu eterno agradecimento. Obrigada por terem sempre me compreendido e por terem sido meu apoio emocional, meu porto seguro.

A minha irmã, Patrícia Castro Monteiro, por ter sido minha inspiração para dar o primeiro passo para iniciação científica, monitoria, projetos de extensão e competições estudantis. Sobretudo, meus agradecimentos pelos conselhos.

Minha madrinha e mãe do coração, Liana Andrade de Freitas, por se fazer sempre tão presente e me ouvir sempre que necessário. É tão bom ter sua amizade e lealdade.

Meu esposo, Dhiego Negreiros de Freitas, pelo apoio emocional. Eu quis tantas vezes desistir por achar que não era capaz e você, em todas as noites, apoiava-me, com grandes conselhos. Nunca esquecerei o que fizeste por mim. Íamos juntos às ruas medir flechas dos pavimentos, bem como, quando necessário, acompanhava-me nos laboratórios para realizar os meus ensaios experimentais. Saiba que sem você, eu não conseguiria esse título.

Meus amigos, por todas as palavras de carinho e compreensão. Eu sei que não era fácil entender quando eu não saia em um final de semana ou feriado, pois, como uma pessoa que "só" estuda pode ser tão ocupada? Embora vocês não presenciassem minha luta diária, sei que davam o seu melhor para me entender. Então, gratidão a vocês: Caren Andréia, Brenda Silva, Caio César, Deborah Amoedo, Raphaela Martins, Rômulo Mota, Marcos André, Ythana Isis.

À Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) por ter financiado minha pesquisa científica, mesmo com o momento conturbado que a sociedade científica brasileira vem sofrendo, com cortes no financiamento do desenvolvimento do país.

À Ardo Construtora pela doação dos materiais utilizados na pesquisa, bem como o apoio logístico disponibilizado.

Por outro lado, é indispensável que eu fale sobre alguns anjos que apareceram no meu caminho. Uma espécie de seres iluminados munidos de pinceis, quadro e um grande conhecimento. Eles estiveram presentes em quatro etapas da minha vida acadêmica, entre as quais: alfabetização (Creche Municipal Cecília Cabral), com a "tia" Carla Souza, que utilizava em suas aulas preceitos do grandiosíssimo Paulo Freire; ensino fundamental (Colégio Brasileiro Pedro Silvestre), com professores que levo no coração: Nagai e Juliana Miranda (Matemática), José Francisco (Língua Portuguesa); ensino médio (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas): Orlandão Ferreira *in memorian* (Matemática); Alzanira Santos (Língua Portuguesa); Júlio César, *Julinho* (Física); ensino superior (Universidade Estadual do Amazonas): meu mentor que me apresentou à academia, Francisco dos Santos Rocha. Ademais, com um parágrafo não é possível mensurar minha gratidão aos senhores.

Já na pós-graduação, etapa presente, na ilustre Universidade Federal do Amazonas, eu tive o privilégio de trabalhar com a Professora Consuelo Alves da Frota. Uma grande mulher, cuja garra e força são impressionantes. Com ela, eu aprendi que é possível eu chegar onde eu quiser, com fé, atitude e foco. Para ter como base a minha admiração, cito o dia do meu exame de qualificação, em que ela disse, no seu discurso: "O não para mim é um sim. Não existe essa de impossível". Isso para mim foi uma frase de inspiração, pois quando eu não conseguia seguir com alguma atividade, eu lembrava desse ensinamento e repetia: "Eu consigo sim!". Então, por isso e todos os conselhos, obrigada, minha professora, minha mãe! Principalmente por não ter desistido de mim e ter me guiado, até quando eu era sua única aluna. Só nós duas sabemos as provações a que fomos submetidas nesses dois anos, obrigada por ter sido meu ombro amigo também.

A meu coorientador Hidembergue Ordozgoith da Frota pela enorme ajuda na modelagem numérica e grandes aulas de teoria da viscoelastoplasticidade. O senhor foi chave fundamental na minha formação acadêmica.

Por último, não menos importante, aos técnico-administrativos que me ajudaram de alguma forma nos trâmites, assim como a equipe de segurança e limpeza do Bloco de Geotecnia.

A todos vocês, obrigada! Como dito no início desse relato, sem gratidão, não há felicidade.

DNA Caboclo

Meu pecado é te amar
Infinito amor
Não dá pra disfarçar
Te levo aonde vou, aonde vou, aonde vou
Vou contigo Amazônia

Tá no meu coração
Tá no meu linguajar
Tá no DNA caboclo

Tá no meu guaraná, tá no meu tambaqui
Farinha d' água cai bem com tucumã e açaí
Bala de cupuaçu, bolo de piracuí, filé de pirarucu
Molho de pimenta murupi no tucupi

E a saudade do meu boi-bumbá
Só não é maior
Que o meu rio,
Que o meu rio amazonas

Enéas Dias, Márcia Santos

RESUMO

O método vigente de dimensionamento brasileiro de pavimentos atua com três parâmetros: índice de suporte, parâmetros climáticos e tráfego. Aliado a isso, os pavimentos são um sistema complexo, isto é, compreendem diversas camadas, em especial a camada de revestimento, que contém na sua composição o ligante betuminoso, material cujo comportamento quanto à deformação é dualístico: elástico e viscoso. Para descrever esse fenômeno, utiliza-se a previsão do comportamento tensão-deformação mediante análise do ensaio de módulo complexo. Para o presente trabalho, foram analisadas duas composições asfálticas, provenientes de trabalhos do Grupo de Pesquisa em Geotecnia (GEOTEC/UFAM): Concreto Asfáltico (CA), sob flexão a quatro pontos, e mistura SMA, no tocante ao comportamento uniaxial de corpos-de-prova cilíndricos. A metodologia utilizada foi o ajuste de curvas baseado nos dados experimentais de Módulo Complexo |E*| e frequência, relativo ao Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), para que se encontrassem os parâmetros do Modelo Reológico de Huet-Sayegh. A análise numérica demostrou a aplicabilidade do modelo para determinação do comportamento viscoelástico linear, nas faixas de temperaturas e frequências adotadas.

Palavras-chave: Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), Huet-Sayegh, módulo complexo, mistura asfáltica.

ABSTRACT

The current Brazilian pavement design method works with three parameters: support index, climatic parameters and traffic. Allied to this, the floors are a complex system, that is, they comprise several layers, especially the asphalt concrete, which contains in its composition the bituminous binder, a material whose behavior in terms of deformation is dualistic: elastic and viscous. To describe this phenomenon, the stress-strain behavior prediction is used by analyzing the complex modulus test. For the present work, two asphalt compositions from the work of Geotechnical Group (GEOTEC/UFAM) were analyzed: Asphalt Concrete (CA), under four-point bending test, and SMA mixture, with respect to the uniaxial behavior of cylindrical specimens. The methodology used was the adjustment of curves based on the experimental data of Complex Modulus |E*| and frequency, relative to the Ordinary Least Squares (OLS), to find the parameters of the Huet-Sayegh Rheological Model. The numerical analysis demonstrated the applicability of the model for determining the linear viscoelastic behavior, in the adopted temperature and frequency ranges.

Keywords: Ordinary Least Squares (OLS), Huet-Sayegh, complex modulus, asphalt mix.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Modelo de Maxwell 20
Figura 2.2 - Modelo de Kelvin 22
Figura 2.3 - Modelo de Burgers 25
Figura 2.4 - Modelo de Huet 29
Figura 2.5 - Modelo de Huet-Sayegh 30
Figura 2.6 - Modelo 2S2P1D 31
Figura 2.7 - Modelo GHS 32
Figura 2.8 – Ângulo de Fase 33
Figura 2.9 – Representação cartesiana do módulo complexo 34
Figura 2.10 - Flexão a quatro pontos 35
Figura 3.1 – a) ASAC; b) areia residual; c) Cimento asfáltico de petróleo 37
Figura 3.2: ASAC após processo de britagem 39
Figura 3.3 - Corpos-de-prova cilíndricos 42
Figura 3.4 – Sistema de moldagem dos corpos de prova prismáticos 46
Figura 3.5 - Prensa hidráulica P30 46
Figura 3.6 - Flexão a quatro pontos 47
Figura 4.1: Modelo de Huet-Sayegh 49
Figura 5.1: Curvas Granulométricas 57
Figura 5.2: Fibra do Curauá 60
Figura 5.3: Curvas Granulométricas 61
Figura 5.4: Curvas Granulométricas 62
Figura 5.5: Curvas Isócronas (Concreto Asfáltico) 64
Figura 5.6: Curvas Isotérmicas (Concreto Asfáltico) 64
Figura 5.7: Curvas Isotermas 65
Figura 5.8: Compósitos SMA com ASAC 66
Figura 5.9: Curvas Isócronas (Mistura SMA) 66
Figura 5.10: Curvas Isotérmicas (Mistura SMA) 67
Figura 5.11: Curvas Isotermas (Mistura SMA) 68
Figura 5.12: Curva Mestra (Concreto Asfáltico) 72
Figura 5.13: Curva Mestra (Mistura SMA) 72
Figura 5.14: Plano Cole-Cole 73
Figura 5.15: Plano Cole-Cole (Mistura SMA) 74

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Granulometria 41
Tabela 3.2: Número de giros x Tráfego 42
Tabela 3.3 - Parâmetros Volumétricos 44
Tabela 3.4: Parâmetros Volumétricos SMA 45
Tabela 5.1: Coeficiente de Uniformidade e Curvatura 58
Tabela 5.2 - Densidades dos Agregados 59
Tabela 5.3 - Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo 59
Tabela 5.4 – Parâmetros *Superpave* 61
Tabela 5.5: Ajuste dos Dados Numéricos e Experimentais (Concreto Asfáltico) 69
Tabela 5.6: Ajuste dos Dados Numéricos e Experimentais (Mistura SMA) 70
Tabela 5.7: Parâmetros de Huet-Sayegh 71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ANP	Agência Nacional do Petróleo
ASAC	Agregado Sinterizado de Argila Calcinada
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNT	Confederação Nacional de Transportes
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
NAPA	National Asphalt Pavement Association
REMAN	Refinaria Isaac Sabbá
SMA	Stone Matrix Asphalt

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 OBJETIVO 16
1.1.1 Geral 16
1.1.2 Específicos 16
2 REVISÃO DE LITERATURA 18
2.1 REOLOGIA 18
2.2 MODELOS FÍSICO-MATEMÁTICOS VISCOELÁSTICOS 19
2.2.1 Maxwell 19
2.2.2 Kelvin 22
2.2.3 Burgers 25
2.2.4 Modelos Reológicos com Elementos Parabólicos 27
2.3 MÓDULO COMPLEXO 32
2.4 FLEXÃO A QUATRO PONTOS 35
2.5 AGREGADO SINTERIZADO DE ARGILA CALCINADA 36
3 MATERIAIS E MÉTODOS 37
3.1 MATERIAIS 37
3.1.1 Agregado Miúdo 38
3.1.2 Agregado Graúdo 38
3.1.3 Material de Enchimento 40
3.1.4 Ligante Betuminoso 41
3.2 DOSAGEM MINERAL 41
3.3 MOLDAGEM DAS VIGAS 45
3.4 COMPORTAMENTO REOLÓGICO 47
3.4.1 MÓDULO COMPLEXO 47
4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - O MODELO DE HUET-SAYEGH 49
4.1 MODELAGEM NUMÉRICA 55
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 57
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 57
5.1.1 PARTICIPANTES DAS MISTURAS ASFÁLTICAS 57
5.2 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS 60
5.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO SOB FLEXÃO A QUATRO PONTOS 62
5.3.1 Concreto Asfáltico com ASAC 63
5.3.2 Mistura SMA com ASAC 65
5.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO DE HUET-SAYEGH 68
CONCLUSÃO 77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 77

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

O pavimento é um sistema complexo, compreendendo várias camadas com diferentes materiais, que são dimensionadas de acordo com tráfego atuante e condições ambientais (KIM, 2007)

O dimensionamento de pavimentos empregado no Brasil, intitulado Método DNER, de 1960, requer três parâmetros para sua implementação, representativos da capacidade de suporte das camadas, condições climáticas e o tráfego (DNIT, 2006). Trata-se de um procedimento empírico, com parâmetros de campo provenientes da pista experimental da Associação Americana de Rodovias e Transportes (*American Association of State Highway and Transportation Officials* – AASHTO).

Em outra vertente, tem-se a avaliação funcional dos pavimentos nacionais pela Confederação Nacional de Transportes (CNT, 2019). Anualmente essa entidade realiza pesquisa para avaliar a qualidade da malha rodoviária nas cinco regiões do Brasil. O Amazonas, Estado pertencente à Região Norte, tem suas rodovias classificadas como regular (686 km – 65,5%), ruim (79 km – 7,6%) e péssima (281 km – 26,9%). Em resumo, não foram constatadas vias que se enquadrassem no aspecto ótimo e bom, isto é, em perfeito estado, com garantia de um tráfego seguro. No tocante a custos, esses defeitos influenciam no aumento do consumo de combustível e acarretam despesas gerais com reparo e manutenção dos veículos (ISLAM e BUTTLAR, 2012).

Específico a Manaus, capital do Estado do Amazonas, no aspecto visual, as vias apresentam diversos sinais de deterioração, englobando múltiplas anomalias, entre elas: ondulações, panelas, trincas, remendos e desgaste. Muitas dessas patologias são causadas não somente por inadequado dimensionamento, mas também por deficiência de materiais, ausência de manutenção periódica ou negligência na execução dos pavimentos (HUANG, 2004; CAVALCANTE *et. al*, 2012).

Em outro aspecto, não menos importante, tem-se a problemática dos insumos naturais, por conta de sua disponibilidade finita, adicionado as condições limitantes de ocorrência de materiais pétreos em superfície, caso de Manaus. Essa escassez suscita o estudo de materiais alternativos, tornando-se um imprescindível campo de pesquisa para a construção civil. Por sua vez, a engenharia vem estudando-os com o fito de empregá-los em suas obras, aliado a

importante compreensão da preservação ambiental (CHOUDHARY *et. al*, 2020); (PÉREZ *et. al*, 2012)

Nesse contexto, tem-se registro na literatura o Agregado Sinterizado de Argila Calcinada, oriundo de solo argiloso, cujos estudos citam que composições asfálticas a quente contendo esse material alternativo melhoraram as propriedades mecânicas de rigidez, susceptibilidade à deformação permanente (SILVA et. al, 2015) e resistência à flexão **(**SPÍNOLA et. al, 2019). Ressalta-se, ainda, pesquisas que mostram o desempenho mecânico satisfatório de formulações com esses agregados calcinados quanto à resistência à tração e ao módulo de resiliência, comparado a misturas com agregados convencionais (FROTA et. al, 2007). Também se verifica na bibliografia resposta de misturas asfálticas com ASAC mostrando elevada rigidez a altas temperaturas e baixas frequências. Portanto, uma alternativa promissora para regiões com clima quente, caso da Região Amazônica (SILVA et. al, 2014).

Salienta-se adicionalmente que, no Brasil tem-se recentemente disponibilizado para um dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos o método MeDiNa (VENDRUSCULO *et. al*, 2018), que prevê comportamento elástico linear com referência às misturas asfálticas representado pelo Módulo Resiliente. Contudo, pela presença sobretudo do asfalto, faz-se necessário analisar o comportamento da parcela viscosa. Tal averiguação é imprescindível ao estudo das propriedades desse tipo de composição.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Geral

Analisar composições asfálticas com a inserção do Agregado Sinterizado de Argila Calcinada (ASAC), baseada no modelo reológico de Huet-Sayegh.

1.1.2 Específicos

a) Discretizar as parcelas reais e imaginárias do Modelo Reológico Linear de Huet-Sayegh;
b) Realizar ajuste linear com os parâmetros experimentais do ensaio de Módulo Dinâmico de duas composições asfálticas: Concreto Asfáltico (CA) e *Stone Matrix Asphalt* (SMA)

c) Comparar os dados experimentais com o Modelo Reológico Linear de Huet-Sayegh (teórico).

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 REOLOGIA

A natureza dos materiais é descrita de acordo com sua capacidade de resistir ou transmitir tensões e, quando expostos a esforços mecânicos, podem se deformar de forma elástica ou plástica.

Em concordância com a lei de Hooke, um material ao ser submetido a tensões que impliquem em deformações não-permanentes, ao retirar-se tais solicitações retorna ao seu estado original, ou seja, tem-se um comportamento reversível ou elástico (TIMOSHENKO e GOODIER, 2017). No caso dos materiais viscosos ideais, relativo à lei de Newton, esses se deformam sucessivamente e irreversivelmente ao receberem esforços externos e manifestam resistência ao escoamento. Em síntese, a energia de deformação não é recuperada ao retirar-se o esforço aplicado, pois ela se dissipa, em formato de calor.

Não obstante, diversos materiais não apresentam tais comportamentos ideais em caráter isolado, ou seja, elástico ou viscoso. Caso dos materiais viscoelásticos que mostram especificidade dualística, no qual parte da tensão aplicada é acumulada e parcialmente dissipada em forma de energia calorífica, conforme estabelece Betten (2008).

Consoante KIM (2007), a reologia consiste em uma ciência destinada ao estudo dos materiais cuja deformação é variável com a carga e tempo de aplicação. Como exemplificador, tem-se o ligante asfalto, material polimérico, cujas características intrínsecas se alteram em razão da temperatura e frequência de carregamento. Pertinente a sua superestrutura molecular complexa, suas propriedades se modificam em função do tempo, ou seja, comportam-se como sólidos em períodos curtos e em situações de cargas aplicadas instantaneamente, tendem a apresentarem-se como fluidos viscosos (NAVARRO, 2017).

Específico ao concreto asfáltico, material formado por agregados minerais e ligante betuminoso, exibe características viscosas a altas temperaturas e um comportamento mais elástico a baixas temperaturas (AURANGZEB et al., 2017). Em situações de serviço, está sujeito à ação de carregamentos a uma dada frequência da passagem de veículos, em conformidade com a temperatura ambiente (BARRA et. al, 2012)

Em complemento, ressalta-se que, as misturas asfálticas com características elásticas e viscosas, quando submetidas a pequenas deformações, porquanto possuem desempenho mecânico dependente do tempo, devido à fluência, exibem o comportamento conhecido como *creep*, que consiste no acréscimo da deformação em relação ao tempo com aplicação de uma carga constante.

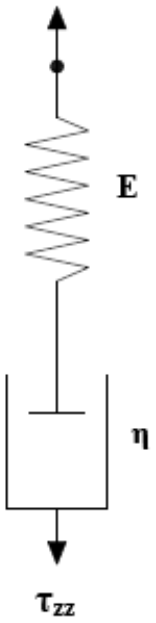
2.2 MODELOS FÍSICO-MATEMÁTICOS VISCOELÁSTICOS

Concernente às particularidades do concreto asfáltico, em razão de mostrar um desempenho reológico viscoelástico, existem modelos que buscam simulá-lo, mediante aplicação das características intrínsecas dos materiais partícipes associado ao comportamento da mistura asfáltica. Em geral, mostram a presença de dois elementos: mola (parte elástica) e amortecedor (componente viscosa), combinados em diferentes arranjos, visando representar a interação da deformação com o tempo, que, respectivamente, reproduzem a elasticidade do material e a simulam a dependência do tempo, seja no carregamento ou descarregamento (Betten, 2008). A seguir, são expostos os modelos físico-matemáticos viscoelásticos, em que os índices m e p são empregados para descrever, respectivamente, os elementos físicos mola e amortecedor; ε_{zz} a deformação; τ_{zz} a tensão; E o módulo de elasticidade; η a constante de viscosidade e t o tempo.

2.2.1 Modelo de Maxwell

Consoante a Figura 2.1, o modelo de Maxwell, proposto por James Clerck Maxwell, consiste em uma mola e de um amortecedor dispostos em série. As tensões são iguais nos dois elementos e a deformação é a soma das deformações específicas de cada elemento (FINDLEY, et. al, 1976). As Equações 2.1 e 2.2 são, respectivamente, a deformação nos componentes mola e amortecedor, enquanto a Equação 2.3 a soma desses.

Figura 2.1 - Modelo de Maxwell



$$\left(\varepsilon_{zz}\right)_m = \frac{\tau_{zz}}{E} \therefore \left(\dot{\varepsilon}_{zz}\right)_m = \frac{\dot{\tau}_{zz}}{E} \tag{2.1}$$

$$\left(\varepsilon_{zz}\right)_p = \frac{\tau_{zz}}{\eta} \tag{2.2}$$

$$\varepsilon_{zz} = \left(\dot{\varepsilon}_{zz}\right)_m + \left(\dot{\varepsilon}_{zz}\right)_p = \frac{\dot{\tau}_{zz}}{E} + \frac{\tau_{zz}}{\eta} \tag{2.3}$$

Na Equação 2.4, tem-se a deformação em função do tempo, devido a uma tensão constante (τ_{zz}) aplicada instantaneamente, determinada na situação de fluência.

$$\varepsilon_{zz} = \int_0^t \dot{\varepsilon}_{zz} dt = \int_0^t \frac{\dot{\tau}_{zz}}{E} dt' + \int_0^t \frac{\tau_{zz}(t')}{\eta} dt' \tag{2.4}$$

Ao empregar as seguintes premissas, $\tau_{zz} = \frac{d\tau_{zz}}{dt}$ e $\tau_{zz}(t') = \left(\tau_{zz}\right)_0$ na Equação 2.5, tem-se como resultado a deformação variável com o tempo na Equação 2.6, mediante resolução algébrica.

$$\int_0^t \frac{\dot{\tau}_{zz}}{E} dt' = \frac{1}{E}\int_0^t \frac{d\tau_{zz}}{dt'} dt' = \frac{1}{E}\int d\tau_{ZZ} = \frac{\tau_{zz}}{E} = \frac{(\tau_{zz})_0}{E} \tag{2.5}$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{(\tau_{zz})_0}{E} + \frac{(\tau_{zz})_0}{\eta} t \tag{2.6}$$

Na situação de relaxação, a tensão em função do tempo é encontrada com o auxílio das considerações: $\varepsilon_{zz} = (\varepsilon_{zz})_0$, $t \geq 0$ e $\varepsilon_{zz} = \frac{d\varepsilon_{zz}}{dt} = 0$, aplicadas na Equação 2.7. As Equações 2.8 e 2.9 são resultados de manipulações matemáticas, originando a expressão da tensão dependente do tempo (Equação 2.10).

$$\frac{1}{E}\frac{d\tau_{zz}}{dt} + \frac{\tau_{zz}}{\eta} = 0 \tag{2.7}$$

$$\frac{d\tau_{zz}}{\tau_{zz}} = -\frac{E}{\eta} dt \tag{2.8}$$

$$\int_{(\tau_{zz})_0}^{\tau_{zz}} \frac{d\tau_{zz}}{\tau_{zz}} = -\int_0^t \frac{E}{\eta} dt' \tag{2.9}$$

$$\tau_{zz} = (\tau_{zz})_0 e^{-\frac{E}{\eta}t} \tag{2.10}$$

Na determinação do módulo complexo (Equação 2.11) adota-se que τ_{zz} é função da temperatura, logo, a aplicação do princípio da sobreposição frequência-temperatura é aceitável (MINHOTO, 2005).

$$E^*(\omega) = E \times \frac{i\omega\tau}{1 + i\omega\tau} = \frac{E\omega^2\eta^2 + iE^2\omega\eta}{E^2 + \omega^2\eta^2} \tag{2.11}$$

As variáveis são:

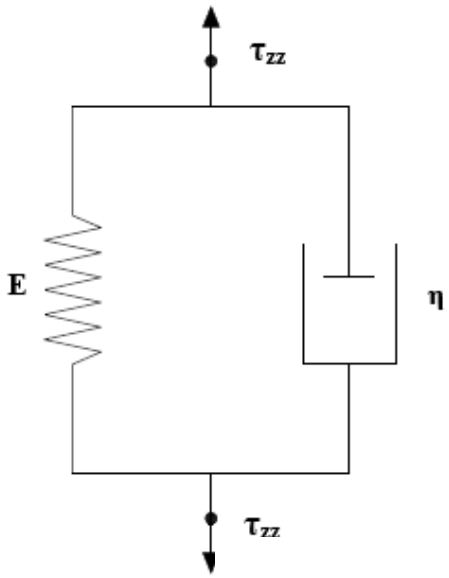
a) $E^*(\omega)$ = módulo complexo;

b) i = número complexo;
c) ω = frequência angular relacionada com a frequência de carregamento f;
d) τ = tempo de relaxação que se define como a relação entre a viscosidade η e a rigidez E;
e) E = rigidez do elemento elástico;
f) η = viscosidade do elemento viscoso.

2.2.2 Modelo de Kelvin

Na configuração, ilustrada na Figura 2.2, representativa do modelo idealizado por Lord Kelvin, o amortecedor e mola estão dispostos em paralelo, ou seja, as deformações são iguais nos dois elementos e a tensão é a totalização das tensões de cada elemento, mencionados na Equação 2.12 e 2.13, resultando na Equação 14 (FINDLEY, et. al, 1976).

Figura 2.2 - Modelo de Kelvin



$$\left(\tau_{zz}\right)_{mola} = E\varepsilon_{zz} \tag{2.12}$$

$$\left(\tau_{zz}\right)_{amortecedor} = \eta\dot{\varepsilon}_{zz} \tag{2.13}$$

$$\tau_{zz} = \eta\dot{\varepsilon}_{zz} + E\varepsilon_{zz} \tag{2.14}$$

Levando-se em consideração o princípio de que $\tau_{zz} = (\tau_{zz})_0$, tem-se os sucessivos cálculos nas equações 2.15 e 2.16.

$$\eta\dot{\varepsilon}_{zz} + E\varepsilon_{zz} = \tau_{zz} \tag{2.15}$$

$$\tau_{zz} = (\tau_{zz})_0 \tag{2.16}$$

Nota-se que, a expressão 2.17 é uma equação diferencial linear não homogênea de primeira ordem, logo, nas equações subsequentes, 2.18 a 2.20, busca-se encontrar uma solução.

$$\dot{\varepsilon}_{zz} + \frac{E}{\eta}\varepsilon_{zz} = \frac{(\tau_{zz})_0}{\eta} \tag{2.17}$$

$$\dot{\varepsilon}_{zz} + \frac{E}{\eta}\varepsilon_{zz} = 0 \tag{2.18}$$

$$\frac{d\varepsilon_{zz}}{dt} + \frac{E}{\eta}\varepsilon_{zz} = 0 \tag{2.19}$$

$$\frac{d\varepsilon_{zz}}{\varepsilon_{zz}} = -\frac{E}{\eta}dt \tag{2.20}$$

Na Equação 2.21, a é uma constante proveniente da integração da Equação 2.20.

$$\ln\varepsilon_{zz} = -\frac{E}{\eta}t + a \tag{2.21}$$

Ao combinar propriedades logarítmicas, a fim de manipular algebricamente a expressão 2.21, o resultado é mostrado na Equação 2.22.

$$\varepsilon_{zz} = e^{-\frac{E}{\eta}t+a} = e^{a}e^{-\frac{E}{\eta}t} = ce^{-\frac{E}{\eta}t} \tag{2.22}$$

A solução particular para a equação diferencial linear não homogênea é encontrada por inspeção, mediante aplicação da Equação 2.23.

$$\varepsilon_{zz} = \frac{(\tau_{zz})_0}{E} \tag{2.23}$$

A solução geral consiste na soma das soluções, conforme Equação 2.24. Para determinar a constante, usa-se a condição inicial de que $\varepsilon_{zz} = 0$ e t = 0, segundo a expressão 2.25.

$$\varepsilon_{zz} = ce^{-\frac{E}{\eta}t} + \frac{(\tau_{zz})_0}{E} \tag{2.24}$$

$$c = -\frac{(\tau_{zz})_0}{E} \tag{2.25}$$

Enfim, a deformação em função do tempo é dada pela Equação 2.26, ao combinar-se as variáveis encontradas no decorrer das operações matemáticas.

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{(\tau_{zz})_0}{E}\left(1 - e^{-\frac{E}{\eta}t}\right) \tag{2.26}$$

O módulo complexo se define com as mesmas propriedades citadas no modelo de Maxwell, dando origem a Equação 2.27.

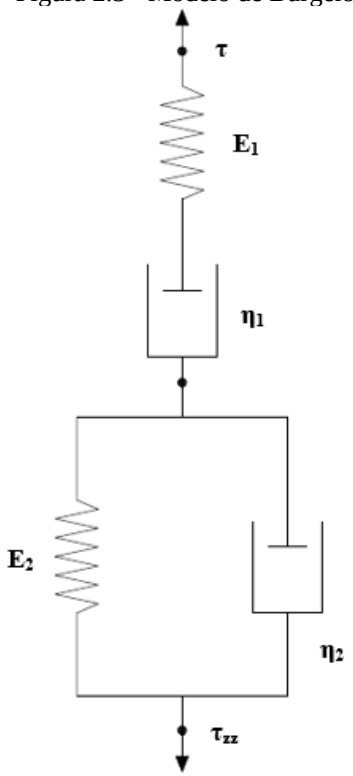
$$E^*(\omega) = E + i\omega\eta \tag{2.27}$$

Segundo Melo (2014), os modelos analógicos de Maxwell e Kelvin, não descrevem corretamente o comportamento complexo dos materiais asfálticos. Não obstante, a associação de modelos busca simular a maioria dos materiais viscoelásticos e eliminar algumas inconsistências encontradas nos modelos simples. O modelo de Burgers, na seção 2.2.3, é um exemplo.

2.2.3 Modelo de Burgers

Neste modelo, os padrões de Maxwell e Kelvin (Figura 2.3) estão ligados em série, por conseguinte, as tensões são iguais nos dois componentes, conforme Equação 2.28, e a deformação é a soma em cada componente, de acordo com a Equação 2.29 e 2.30. Para resolução das equações, são utilizadas as componentes de Maxwell e Kelvin calculadas, respectivamente, nas seções 2.1.1.1 e 2.1.1.2, e recapituladas nas equações 2.30 e 2.31 (SHAMES e COZZARELLI, 1997), resultando na Equação 2.31.

Figura 2.3 - Modelo de Burgers



$$\tau_M = \tau_K = \tau \tag{2.28}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_K \tag{2.29}$$

$$\dot{\varepsilon}_M = \frac{\dot{\tau}_M}{E_1} + \frac{\tau_M}{\eta_1} \tag{2.30}$$

$$\eta_2 \dot{\varepsilon}_K + E_2 \varepsilon_K = \tau_K \tag{2.31}$$

Da Equação 2.29, obtém-se a Equação 2.32, por derivação.

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}_M + \dot{\varepsilon}_K \tag{2.32}$$

Utiliza-se a variável isolada $\dot{\varepsilon}_K$ da Equação 2.31 e ε_K da Equação 2.29 substituindo-as na Equação 2.31, dando origem a expressão mostrada na Equação 2.33.

$$\eta_2\left(\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_M\right) + E_2(\varepsilon - \varepsilon_M) = \tau \tag{2.33}$$

Ao derivar-se a Equação 2.32, em relação a t, resulta a Equação 2.34.

$$\eta_2\left(\ddot{\varepsilon} - \ddot{\varepsilon}_M\right) + E_2(\dot{\varepsilon} - \dot{\varepsilon}_M) = \dot{\tau} \tag{2.34}$$

Com a derivada temporal da Equação 2.30, o resultado é mostrado na Equação 2.35.

$$\ddot{\varepsilon}_M = \frac{\ddot{\tau}}{E_1} + \frac{\dot{\tau}}{\eta_1} \tag{2.35}$$

Substituindo a Equação 2.35 na Equação 2.34, verifica-se o resultado na equação 36.

$$\eta_1\eta_2 E_1\ddot{\varepsilon} + \eta_1 E_1 E_2\dot{\varepsilon} = \eta_1\eta_2\ddot{\tau} + (E_1\eta_2 + E_2\eta_1 + E_1\eta_1)\dot{\tau} + E_1E_2\tau \tag{2.36}$$

A deformação em função do tempo é dada pela soma das deformações em cada componente, isto é, de Maxwell e Kelvin, obtidas nas seções anteriores, segundo a Equação 2.37, com $\tau = \tau_0$

$$\varepsilon = \varepsilon_M + \varepsilon_K = \tau_0\left[\frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_1} + \frac{1}{E_2}\left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2}t}\right)\right] \tag{2.37}$$

2.2.4 Modelos Reológicos com Elementos Parabólicos

Em contraste aos modelos de Maxwell, Kelvin e Burgers, em algumas configurações reológicas mais recentes, citadas nas seções 2.2.4.1 a 2.2.4.4, consta a inserção do elemento parabólico como componente adicional aos elementos mola e amortecedor. O objetivo consiste em representar com maior exatidão o comportamento teórico dos compósitos asfálticos, análogo ao obtido experimentalmente.

Visando caracterizar numericamente o comportamento sob ação de cargas do constituinte parabólico, em caráter isolado, tem-se a Equação 2.38 que descreve a deformação plástica, nas condições de tensão constante em função do tempo.

$$J(t) = a\left(\frac{t}{\tau}\right)^h \tag{2.38}$$

As variáveis são:

a) J(t) = função fluência;
b) a = constante adimensional;
c) h = expoente com valores 0 < h < 1;
d) τ = tempo característico variante com a temperatura;
e) t = tempo de carregamento

Acrescenta-se, também, a definição do módulo complexo, pela Equação 2.39.

$$E^*(i\omega\tau) = \frac{(i\omega\tau)^h}{a\Gamma(h+1)} \tag{2.39}$$

Os elementos da expressão são:

a) E*(iωτ) = módulo complexo;
b) i = número complexo;
c) Γ = função gama, em que Γ(n) = $\int_0^\infty t^{n-1}e^{-t}dt$ com n>0
d) ω = frequência angular relacionada com a frequência de carregamento f;
e) a = constante adimensional;

f) h = expoente com valores 0 < h < 1;

g) τ = tempo característico.

O tempo característico, variável presente no módulo complexo, é calculado de acordo com a Equação 2.40.

$$\tau(\theta) = \alpha_T(\theta) \times \tau_o \tag{2.40}$$

Em que:

a) $\alpha_T(\theta) =$ fator de transformação à temperatura θ;

b) τ_o = determinada mediante uma temperatura de referência T_s

Ressalta-se que o fator de transformação é determinado pela Equação 2.41, com base no princípio proposto por William-Landel-Ferry (MALCOM et. al, 1955).

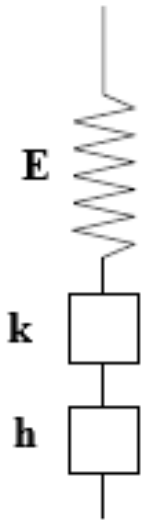
$$log(\alpha_T) = \frac{-C_1(T - T_s)}{C_2 + (T - T_s)} \tag{2.41}$$

Sendo, C_1 e C_2 constantes dependentes do material e seus valores obtidos experimentalmente.

2.2.4.1 Huet

Huet (1963) foi pioneiro desse tipo de arranjo que, em síntese, consiste em uma mola e dois constituintes parabólicos k e h em série, exemplificado na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Modelo de Huet



Igualmente aos outros modelos, a expressão da fluência pode ser encontrada baseada na Equação 2.42.

$$J(t) = \frac{1}{E_\infty}\left(1 + \delta\frac{\left(t/\tau\right)^k}{\Gamma(k+1)} + \delta\frac{\left(t/\tau\right)^h}{\Gamma(h+1)}\right) \tag{2.42}$$

Em que:

a) J(t) = função fluência;

b) $E_\infty =$ módulo complexo limite, relativo à condição de que $\omega\tau \to \infty$;

c) h, k = expoentes parabólicos na premissa de 1 > h > k > 0;

d) $\delta =$ constante adimensional;

e) τ = tempo característico;

f) Γ = função gama.

Deste modo, o módulo complexo do modelo de Huet é exibido na Equação 2.43.

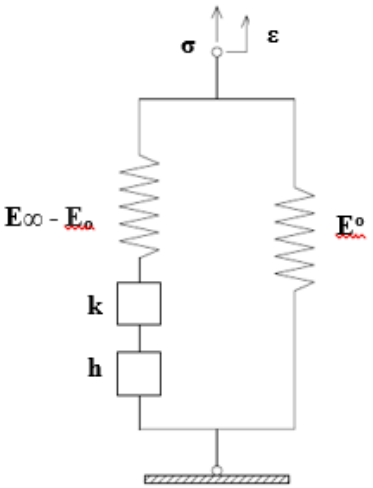
$$E^*(\omega) = \frac{E_\infty}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \tag{2.43}$$

2.2.4.2 Huet-Sayegh

Minhoto (2005) argumenta que o modelo citado anteriormente, de Huet, não descreve precisamente as misturas asfálticas a frequências muito baixas ou temperaturas altas. Dessa forma, foi inserido por Sayegh (1965) uma mola e o módulo complexo limite em paralelo, definindo a configuração de Huet-Sayegh, mostrado na Figura 2.5.

Esse modelo modificado configura-se pela associação em paralelo de uma mola E_o com um conjunto em série, formado por uma mola de módulo $E_\infty - E_o$ (módulo vítreo – módulo elástico) e dois amortecedores viscosos h e k (ZBICIAK; MICHALCZYK, 2014).

Figura 2.5 - Modelo de Huet-Sayegh



Paralelamente, a expressão para o módulo complexo, consoante com esse modelo, registra-se na Equação 2.44 (PRONK, 2003).

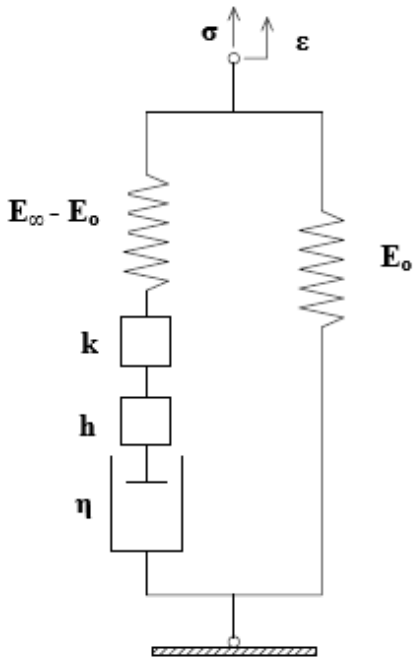
$$E^*(i\omega\tau) = E_o + \frac{E_\infty - E_o}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}} \tag{2.44}$$

Embora esse modelo permita um bom ajuste em misturas com baixas frequências, é necessária a calibração de mais um parâmetro, o que impede de se obter uma expressão analítica para a função de fluência no domínio temporal.

2.2.4.3 2S2P1D

Adicionalmente, visando aprimorar o modelo de Huet-Sayegh, OLARD e DI BENEDETTO (2003) incluíram um amortecedor. Esse novo modelo é conhecido como 2S2P1D (Figura 2.6). Para o cálculo do módulo complexo, tem-se a expressão descrita na Equação 45, com complementação na Equação 2.46, em que η é a viscosidade Newtoniana.

Figura 2.6 - Modelo 2S2P1D



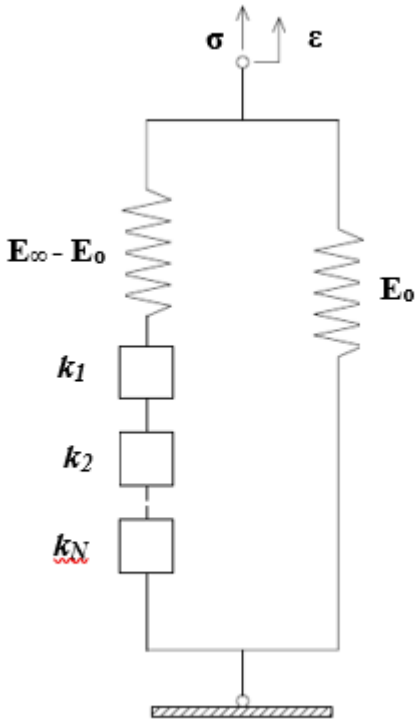
$$E^*(i\omega\tau) = E_o + \frac{E_\infty - E_o}{1 + \delta c^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \tag{2.45}$$

$$\beta = \frac{\eta}{\tau(E_\infty - E_o)} \tag{2.46}$$

2.2.4.4 GHS

Em termos de pesquisas recentes, ZBICIAK e MICHALCZYK (2014) desenvolveram um modelo generalizado, designado GHS (Figura 2.7), com os preceitos de Huet-Sayegh, possibilitando a inclusão de N elementos, cujo módulo complexo determina-se pela Equação 2.47.

Figura 2.7 - Modelo GHS



$$E^*(i\omega\tau) = E_o + \frac{E_\infty - E_o}{1 + (i\omega\tau)^{-k_N} + \sum_{n=1}^{N-1} \delta_n (i\omega\beta\tau)^{-k_n}} \tag{2.47}$$

.

Zbiciak e Michalczyk (2014) demonstraram a viabilidade do uso do modelo de Huet modificado, isto é, o modelo de Huet-Sayegh e o generalizado, GHS. No entanto, o modelo fracionário proporcionou melhores ajustes de curvas, inclusive no plano Cole-Cole, sendo uma alternativa para os protótipos reológicos.

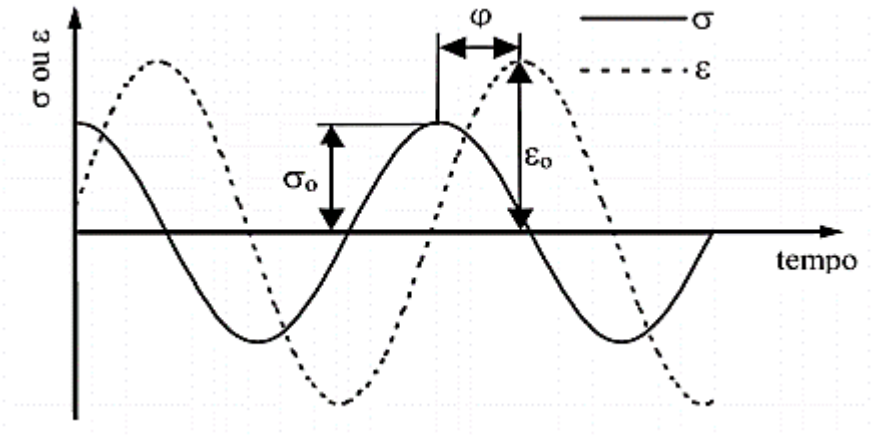
2.3 MÓDULO COMPLEXO

O projeto de um pavimento, fundamentado na teoria da elasticidade, necessita de dois parâmetros elásticos para cada camada, módulo de Young (rigidez) e coeficiente de Poisson. No caso da mistura asfáltica, em métodos-mecanísticos empíricos, emprega-se como parâmetro de rigidez o módulo dinâmico |E*|, pois determina a resposta sob as situações de carregamento oriunda do tráfego e em conformidade com as características térmicas (AURANGZEB et al.,

2017). Em decorrência disso, esse parâmetro pode substituir o módulo de Young (resiliente). Em conformidade com MELLO (2008), o módulo dinâmico é o principal representante de um revestimento asfáltico no programa da AASHTO.

Enfatiza-se que o módulo complexo (E*) apresenta o comportamento viscoelástico linear das composições asfálticas no intervalo de pequenas variações de deformação e ciclos de carregamento. Nessas condições, ao serem submetidas a um tipo de carga senoidal, em decorrência da propriedade viscosa, registram um ângulo de fase, ou seja, um atraso demonstrado mediante um pico de deformação defasado em relação ao pico de tensão em um período de tempo (Figura 2.8), enquadrado no intervalo de 0° a 90°. Esse parâmetro para materiais elásticos mostra φ=0 e no caso de materiais viscosos φ=90°.

Figura 2.8 – Ângulo de Fase



Por outro lado, o carregamento unidimensional senoidal pode ser representado por uma forma complexa, segundo as equações 2.48 e 2.49, em que: σ_o é a amplitude de tensão, ω é a velocidade angular relacionada com uma frequência f, ε_o é a amplitude de deformação, φ é o ângulo de fase e i o número imaginário ($\sqrt{-1}$).

$$\sigma^* = \sigma_0 e^{i\omega t} \tag{2.48}$$

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 e^{i(\omega t - \varphi)} \tag{2.49}$$

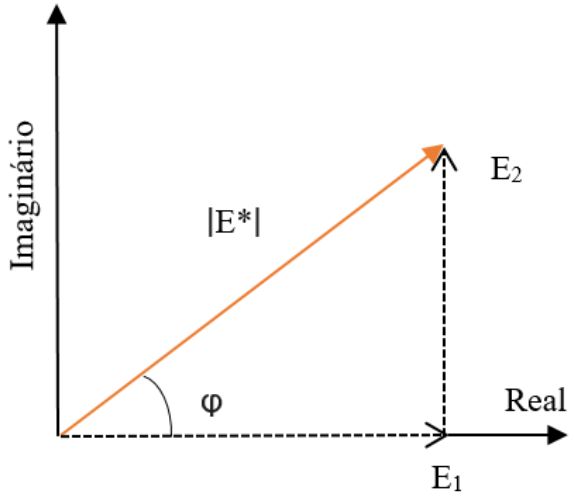
Portanto, o módulo axial pode ser obtido pela Equação 2.50. A velocidade calcula-se em concordância com a Equação 2.51, em que f significa a frequência (Hz).

$$\frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = E^*(i\omega) = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}\right)e^{i\varphi} = E_1 + iE_2 \tag{2.50}$$

$$\omega = 2\pi f \tag{2.51}$$

No plano complexo, a parcela real do módulo complexo é chamada de módulo elástico E_1, enquanto a parcela imaginária denomina-se de módulo viscoso E_2, conforme ilustração exposta na Figura 2.9.

Figura 2.9 – Representação cartesiana do módulo complexo



Fonte: Adaptado Kim (2007)

As relações das amplitudes de deformação e tensão $\left(\sigma_0 / \varepsilon_0\right)$ definem o módulo dinâmico $|E^*(\omega)|$, ou seja, valor absoluto do módulo complexo (Equação 2.52).

$$|E^*(\omega)| = \sqrt{E_1^{\,2} + E_2^{\,2}} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \tag{2.52}$$

Em razão dos fatores frequência e temperatura interferirem no comportamento viscoelástico de um material, o ideal seria obter resposta a qualquer valor desses parâmetros. No entanto, existem dificuldades concernentes as limitações dos equipamentos e tempos de ensaios. Por essa razão, tem-se como artifício matemático a curva mestre do material, que

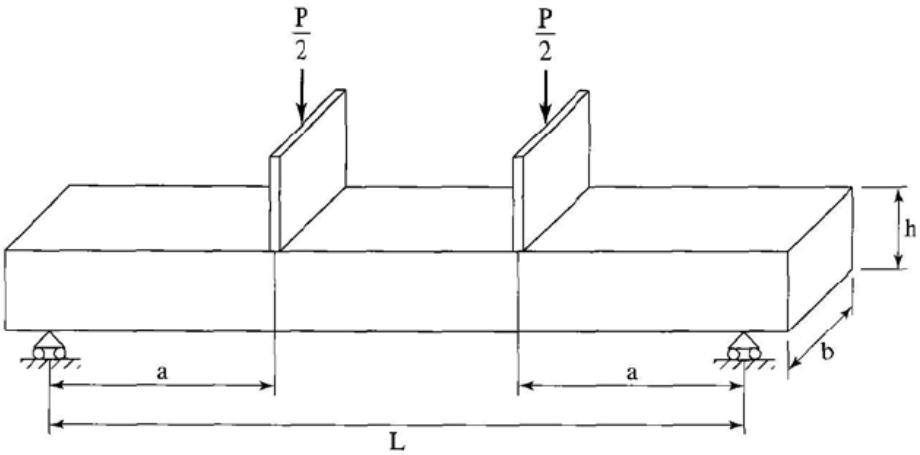
possibilita obter o módulo dinâmico, por exemplo da mistura asfáltica, em qualquer temperatura ou frequência, baseado na superposição tempo-temperatura.

2.4 FLEXÃO A QUATRO PONTOS

Na literatura brasileira não consta norma padronizada para determinação do módulo dinâmico. Atualmente estão em vigor na literatura as normas AASHTO T342:2019 - *Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*, e a EN 12697-26:2018 - *Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 26: Stiffness*. Ressalta-se que a ASTM disponibiliza a norma D3497 - *Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures* para consulta, todavia, tendo sido encerrada, sem previsão de substituição.

Na pesquisa em apreço, a norma europeia EN 12697-26:2014 será referência para a metodologia dos ensaios. Em seu texto, encontram-se vários tipos de carregamentos com diferentes geometrias, entre os quais, flexão a dois pontos com corpos-de-prova trapezoidais e flexão a três e a quatro pontos usando amostras prismáticas, respectivamente, em seus anexos A e B. Baseado no anexo B, com a geometria e carregamento adotados como parâmetros de teste, tem-se o ensaio mecânico sob flexão a quatro pontos, que é realizado conforme o aparato explanado na Figura 2.10.

Figura 2.10 - Flexão a quatro pontos



Fonte: Huang (2004)

De acordo com COLPO (2014), essa configuração é considerada eficaz para simular o comportamento em campo, pois possui um adequado fator de correlação quando são comparados os resultados obtidos em laboratório relativos ao campo. Além disso, cita que o

procedimento pode ser realizado mediante tensão ou deformação controlada. Para validação de dados práticos concernentes ao desempenho em campo, TANGELLA et. al (1990) salienta que é necessária a determinação de um fator laboratório-campo, para validação dos resultados laboratoriais.

Na literatura brasileira, citam-se os trabalhos, que até o presente momento, encontraram o módulo dinâmico utilizando o aparato de flexão a quatro pontos: TORRES (2018), LIMA (2017), SILVA (2014), COLPO (2014), MELO (2014) e PEREIRA (2012).

2.5 AGREGADO SINTERIZADO DE ARGILA CALCINADA

Silva *et. al* (2010) define o Agregado Sinterizado de Argila Calcinada (ASAC) como uma excelente substituição ao agregado convencional, pois é possível obter grandes quantidades em sua produção, granulometria contínua, o que acarreta menos vazios na mistura.

Por conta disso, o Grupo de Pesquisa em Geotecnia (GEOTEC/UFAM) vem estudando há mais de uma década o emprego desse material visando substituir o agregado convencional, analisando diversas propriedades mecânicas. A primeira dissertação data do ano de 2004, com o estudo desse material visando à preservação de matérias-primas naturais (Pereira, 2004). Posteriormente, realizou-se estudo sobre a viscoelastoplasticidade mediante módulo dinâmico uniaxial (Silva, 2011), bem como análise do comportamento mecânico quanto à resistência à tração (RT), módulo resiliente (MR) e vida em fadiga (Cunha, 2014). Em 2014 também, realizou-se a primeira pesquisa empregando vigas prismáticas para análise da flexão a quatro pontos (Silva, 2014). Em adição, Barbosa (2016) empregou o ASAC em misturas SMA, caracterizadas por resistirem a tráfegos intensos, analisando RT, MR e módulo dinâmico. Em 2017, empregou-se o estudo de materiais nanométricos visando modificar misturas asfálticas contendo ASAC (Cabral, 2017). Por fim, ROCHA FILHO (2020) realizou uma pesquisa sobre a viabilidade técnica, econômica e ambiental do emprego do ASAC em misturas asfálticas.

Em adição, destacam-se os trabalhos publicados pelo Grupo de Pesquisa Geotécnica (GEOTEC): (Frota, Nunes e Silva 2003; Frota *et al.* 2004; Frota, Silva e Nunes 2006b, 2006a; Frota *et al*. 2007; Silva *et al*. 2008; Silva, Nunes e Frota, 2008; *Silva* et al. 2008; Nunes, Silva e Frota 2009; Sarges, Nogueira, e Frota, 2010; Valença *et al.* 2011; Silva e Frota, 2013; Silva, Silva e Frota 2014; Silva, Frota e Frota, 2015; Silva e Frota 2016; Cunha et al. 2018; Spínola et al. 2019). Nos estudos citados, os resultados mecânicos foram satisfatórios, principalmente a altas temperaturas, ao contrário das misturas compostas por seixo e pedra britada.

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo discutem-se os ensaios com referência à caraterização dos materiais, a dosagem, ao método de execução dos corpos-de-prova prismáticos, e a avaliação do comportamento mecânico.

.

3.1 MATERIAIS

As misturas asfálticas tiveram como constituintes os seguintes materiais: areia, como agregado miúdo; ASAC, na condição de agregado graúdo; cimento Portland representando o fíler; e o cimento asfáltico de petróleo (CAP), como ligante betuminoso. A Figura 3.1 mostra os agregados e ilustra o cimento asfáltico de petróleo.

Figura 3.1 – a) ASAC; b) areia residual; c) Cimento asfáltico de petróleo

3.1.1 Agregado Miúdo

A caracterização da areia natural proveniente de Manaus-AM, realizou-se mediante:

a) granulometria por peneiramento, especificada pela ASTM C136:2014- *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, que consiste na descrição da distribuição dos tamanhos de partículas expressa em porcentagem do peso total;

b) os parâmetros de densidade relativa real (G_{sa}), densidade relativa aparente (G_{sb}) e absorção, todos relativos ao procedimento gravimétrico, expostos pela ASTM C128: 2015 - *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*, e calculados pelas Equações 3.1, 3.2 e 3.3:

$$G_{sa} = \frac{A}{B + S - C} \tag{3.1}$$

$$G_{sb} = \frac{A}{B + A - C} \tag{3.2}$$

$$Absorção(\%) = \left(\frac{S - A}{A}\right) \times 100 \tag{3.3}$$

Em que:

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

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

C = massa do picnômetro + amostra + água até a marca de calibração (g);

S = massa da amostra saturada de superfície seca (g).

3.1.2 Agregado Graúdo

Participou na condição de agregado graúdo, o ASAC, material produzido numa empresa cerâmica situada no município de Iranduba/Am. Sua confecção é por meio de tijolos maciços, cujos furos centrais são de ϕ16mm, para posterior britagem para execução de diferentes granulometrias, sendo elas: 0, 1, 2 e 3. A Figura 3.2 ilustra esse processo.

Figura 3.2: ASAC após processo de britagem

Fonte: Silva (2011)

Para sua caracterização, foram realizados os seguintes ensaios:

a) granulometria por peneiramento, especificada pela ASTM C136:2014 - *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*;

b) densidade relativa real (G_{sa}), densidade relativa aparente (G_{sb}) e absorção, alusivos ao procedimento gravimétrico, delineado pela ASTM C127:2015 - Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, e determinados pelas Equações 3.4, 3.5 e 3.6.

Ressalta-se que, para efetivação dos citados ensaios, excluiram-se materiais passantes na peneira 4,75mm, bem como os agregados graúdos foram previamente lavados, a fim de remover substâncias, tais como matéria orgânica, torrões de argila, entre outros.

$$G_{sa} = \frac{A}{B - C} \tag{3.4}$$

$$G_{sb} = \frac{A}{A - C} \tag{3.5}$$

$$Absorção(\%) = \left(\frac{B - A}{A}\right) \times 100 \tag{3.6}$$

Em que:

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

B = massa da amostra no estado da superfície saturada seca (g);

C = massa aparente da amostra submersa em água (g).

c) Para avaliar a rigidez, seguiram-se as recomendações prescritas pela ASTM C131:2014 - Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine, sendo quantificado o desgaste ou a resistência à abrasão do agregado mineral com base na Equação 3.7.

$$Desgate(\%) = \frac{(C - Y)}{C} \times 100 \tag{3.7}$$

No qual:

C = massa da amostra original;

Y = massa final da amostra.

3.1.3 Material de Enchimento

As amostras do cimento Portland analisaram-se em conformidade com a norma ASTM C188:2017- *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*, e segundo as Equações 3.8 e 3.9.

$$M_c = M_t - M_a \tag{3.8}$$

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

Em que:

M_c = massa do material de enchimento (g)

M_t = massa do frasco de *Le Chatelier* + líquido + material de enchimento (g)

M_a = massa do frasco de *Le Chatelier* + líquido para a primeira leitura da graduação (g)

ρ = densidade do material de enchimento (g/cm³)

V = volume deslocado do líquido (cm³)

Quanto à granulometria, empregou-se a norma de referência DNER-EM 367:1997 – Material de enchimento para misturas betuminosas. A textura deve tambem estar enquadrada em alguns dos itens expostos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Granulometria

Abertura de malhada (mm)	% em peso, passando
0,42	100
0,18	95-100
0,075	65-100

Fonte: DNER (1997)

3.1.4 Ligante Betuminoso

Examinou-se o ligante asfáltico em conformidade com a prescrição da Agência Nacional de Petróleo e Biocombustíveis (ANP), segundo a Resolução N°19 – 2005, que estabelece as especificações dos cimentos asfálticos de petróleo (CAP) comercializados no território nacional.

3.2 DOSAGEM MINERAL

O compósito asfáltico a quente embasa-se na aglutinação de agregados uniformemente misturados e recobertos com asfalto que devem ser pré-aquecidos, a fim de adquirir uma boa mistura e trabalhabilidade.

No laboratório o procedimento de dosagem realizou-se conforme as etapas delineadas a seguir:

a) Combinação dos agregados minerais, enquadrados conforme procedimentos descritos na seção 3.1;
b) Temperatura da mistura e da compactação, respectivamente, de acordo com a viscosidade de 0,17 $\pm$ 0,02 Pa.s e 0,28 $\pm$ 0,03 Pa.s;
c) Em função do tráfego, definem-se os números de giro inicial, de projeto e máximo, tendo em vista que executou-se a compactação conforme metodologia *Superpave*, em que consta o uso do Compactador Giratório Superpave (CGS), de acordo com Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Número de giros x Tráfego

Tráfego N AASHTO x 10^6	**Parâmetros de compactação**		
	N_{ini}	$N_{projeto}$	$N_{máx}$
< 0,3	6	50	75
0,3 a 3	7	75	115
3 a 30	8	100	160
> 30	9	125	205

Fonte: Barbosa (2016)

d) Preparação dos corpos-de-prova, com constituintes secos e peneirados previamente, tendo cerca de 1200g para cada amostra. Na sequência, aqueceram-se os partícipes a uma maior temperatura relativa aquela designada no item b, sem exceder 10°C, e misturados manualmente. A Figura 3.3 exibe o produto final.

Figura 3.3 - Corpos-de-prova cilíndricos

e) Após o processo anterior (etapa c), acondicionou-se o compósito asfáltico em estufa por 2 horas, na temperatura de compactação, a fim de simular o envelhecimento a curto prazo, que ocorre durante o processo de usinagem, transporte e compactação em campo;

f) Determinação da densidade relativa aparente do corpo-de-prova (Gmb), após sua compactação e extração do molde metálico, conforme ASTM D2726 - Standard Test *Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Asphalt Mixtures*, e cálculo pela Equação 3.10:

$$G_{mb} = \frac{A}{B - C} \tag{3.10}$$

Tem-se:

A = massa do corpo-de-prova compactado seco ao ar (g);

B = massa do corpo-de-prova compactado na condição de superfície saturada seca (g);

C = massa do corpo-de-prova compactado na condição submersa (g).

Para o cálculo da densidade do corpo-de-prova compactado (g/cm³), é necessário multiplicar o G_{mb} pela densidade da água à 25°C (0,997 g/cm³).

g) Cálculo da densidade relativa máxima da mistura (G_{mm}), definida conforme a metodologia descrita na ASTM D2041:2019 - *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Asphalt Mixtures*, mediante emprego do método a vácuo (Equação 3.11)

$$G_{mm} = \frac{A}{A + D - E} \tag{3.11}$$

Em que:

A = massa da amostra seca ao ar (g)

D = massa do recipiente com volume completo com água (g)

E = massa do recipiente em conjunto com a amostra submersa em água a 25°C.

h) Determinação dos parâmetros volumétricos, consoante as equações 3.12 a 3.15.

$$V_a = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100 \tag{3.12}$$

$$VCB = \frac{G_{mb} \times \%a}{G_a} \tag{3.13}$$

$$VAM = V_a + VCB \tag{3.14}$$

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \times 100 \tag{3.15}$$

No qual:

V_a = volume de ar;

VCB = vazios cheios com betume;

VAM = volume agregado mineral;

RBV = relação betume/vazios;

%a = porcentagem do ligante asfáltico;

G_a = massa específica do ligante asfáltico (g/cm³).

i) Realização do enquadramento conforme os limites prescritos pelo DNIT 031/2006, para Va e RBV (%) e VAM e RBV, de acordo com DNER-ME 043 (Tabela 3.3)

Tabela 3.3 - Parâmetros Volumétricos

Características	Camada de rolamento	Camada de ligação
Porcentagem de vazios (%)	3 a 5	4 a 6
Relação betume/vazios	75-82	65 - 72

Fonte: DNIT (2006)

j) Enfatiza-se consoante o Manual do Asfalto (Asphalt Institute, 2007), que os poros com ar da camada compactada existem em toda a mistura, como pequenas bolsas entre as partículas de agregado cobertas de asfalto. Por conta disso, um valor aceitável de densidade relativa de um material é necessário no cálculo do volume de vazios do compósito asfáltico. No entanto, esse valor depende do grau de absorção de asfalto pelo agregado. Em tese, a densidade relativa real (G_{sa}) considera que o asfalto é absorvido por todos os poros permeáveis à água. No entanto, a densidade relativa aparente (G_{sb}) supõe que esse processo não ocorre.

Específico às misturas SMA, os parâmetros volumétricos seguiram a metodologia definida por NAPA (2002), descritos nas Equações 3.16 a 3.19.

$$VCA_{DRC} = \left(\frac{G_{ca}\gamma_{\omega} - \gamma_s}{G_{ca}\gamma_{\omega}} \right) 100 \tag{3.16}$$

$$VCA_{mix} = 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{ca}} P_{CA} \right) \tag{3.17}$$

$$V_a = 100 \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \tag{3.18}$$

$$VMA = 100 - \left(\frac{G_{mb}}{G_{sb}} P_s \right) \tag{3.19}$$

As variáveis mencionadas anteriormente são:

VCA_{DRC} = vazios do agregado graúdo;

G_{ca} = massa específica aparente do agregado graúdo (kg/m³);

γ_w = massa específica da água (kg/m³);

γ_s = massa unitária do agregado graúdo (kg/m³);

VCA_{mix} = vazios do agregado graúdo na mistura compactada;

VMA = vazios do agregado mineral;

P_{CA} = % de agregado graúdo na mistura asfáltica

G_{sb} = massa específica de todos os agregados;

P_S = % de agregados na mistura asfáltica.

Para seu enquadramento visando o teor de projeto, Napa (2002) estabelece alguns limites ilustrados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Parâmetros Volumétricos SMA

Propriedade	Requerido
Teor de ligante (%)	6 (mínimo)
Volume de ar (%)	4
VMA (%)	17 (mínimo)
VCAmix (%)	Menor que VCA_{DRC}

Fonte: NAPA (2002)

3.3 MOLDAGEM DAS VIGAS

Moldaram-se os corpos de prova prismáticos em formas metálicas fabricadas com as seguintes dimensões: 400 mm de comprimento, 64,5 mm de largura e 50 mm de altura. O controle da densificação consistiu em monitorar a altura, regulada mediante parafusos posicionados na extremidade do molde 1, de acordo com os parâmetros de compactação pré-estabelecidos (Figura 3.4). Preliminar à mistura asfáltica, as formas foram pré-aquecidas com antecedência de 24 horas em estufa na temperatura de compactação de 150 a 160°C. Executou-se a compactação na prensa hidráulica modelo P30, marca Bovenau, Figura 3.5, com

capacidade de 30 toneladas, que possui uma mesa de trabalho tendo altura variável e um mamômetro indicador da sobrecarga.

Figura 3.4 – Sistema de moldagem dos corpos de prova prismáticos

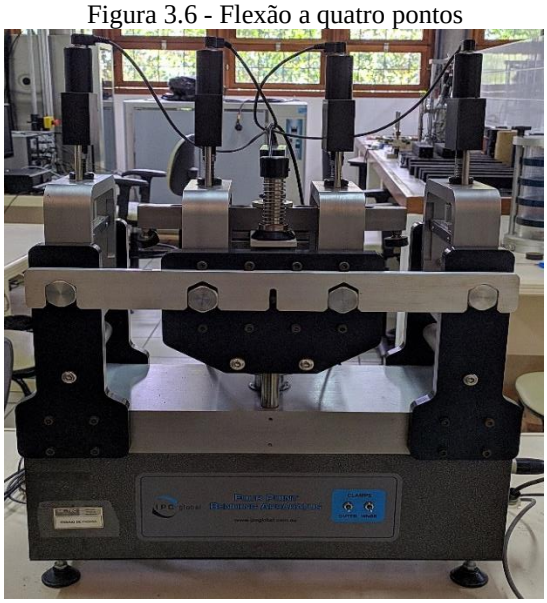
Figura 3.5 - Prensa hidráulica P30

3.4 COMPORTAMENTO REOLÓGICO

3.4.1 Módulo Complexo

Para o concreto asfáltico, as misturas foram ensaiadas na *Four Point Apparatus*, Figura 3.6, da fabricante IPC Global, na qual um corpo-de-prova prismático é submetido a flexão a quatro pontos com rotação livre e translação horizontal em todos os pontos de carga e reação. Esse suporte permaneceu em câmara climática visando atingir as temperaturas de ensaio. Os procedimentos adotados acompanharam as recomendações da norma europeia EN 12697-26: *Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Part 26: Stifness* (anexo B) em relação à aparelhagem para a flexão a quatro pontos, e execução dos corpos-de-prova. O experimento consistiu na imposição de uma carga senoidal ao corpo de prova prismático, medindo-se a carga aplicada e a deflexão correspondente. Assentou-se a viga em apoios que permitem livre rotação e deslocamento horizontal, porém restringem o deslocamento na vertical.

Figura 3.6 - Flexão a quatro pontos



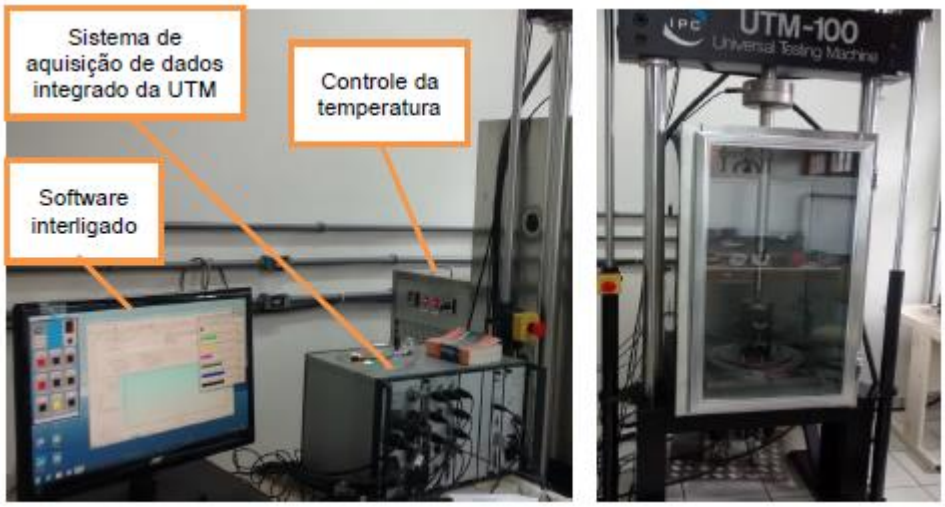
No que tange as frequências de carregamento, empregaram-se 1, 3, 10 e 20Hz. Salienta-se que, retoma-se a medida de 1 Hz para verificar se o compósito asfáltico não foi danificado no decorrer do ensaio. Se a diferença entre a rigidez da amostra na primeira e na última medição, em frequência idêntica e à mesma temperatura, for maior que 3%, pode-se concluir que houve deterioração devido aos esforços solicitantes e, portanto, não pode ser usada para testes adicionais em outras temperaturas. Quanto às temperaturas, definiu-se 25, 30, 35, 40, 45, 50 e

55°C. Esses valores foram estipulados também devido à necessidade de modelar a realidade, ou seja, as condições climáticas regionais. Por fim, ressalta-se que os experimentos executaram-se sob deformação controlada, em concordância com a norma, em uma amplitude máxima de deformação por flexão de 50μm/m.

Em relação à mistura SMA (*Stone Matrix Asphalt*), estas foram ensaiadas de acordo a AASHTO T342, em corpos de prova cilíndricos nas temperaturas de 5, 25 e 40°C e nas seguintes frequência de carregamento: 0.1, 0.5, 1, 5, 10 e 25Hz.

As amostras foram moldadas no Compactador Giratório Superpave (CGS) e o ensaio de módulo complexo ocorreu na Universal Testing Machine (UTM – 100) (Figura 3.7) de natureza servo-hidráulica. Previamente, acondicionaram-se os corpos de prova em câmara térmica, para atingirem as temperaturas estipuladas no programa experimental. A deformação axial teve seu valor controlado, na ordem de 75μm, com o fito de assegurar um comportamento viscoelástico linear.

Figura 3.7: UTM-100



Fonte: Barbosa (2016)

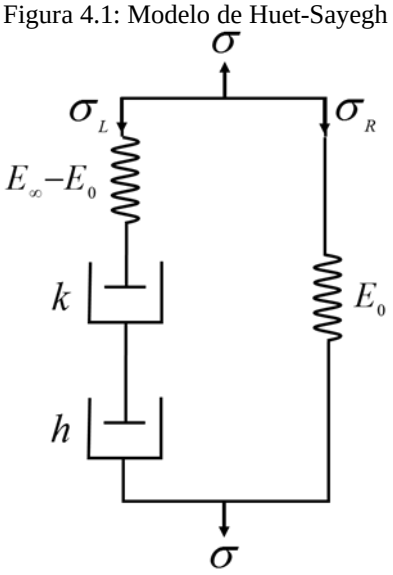
CAPÍTULO 4

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA - O MODELO DE HUET-SAYEGH

Na Figura 4.1 apresenta-se o modelo de Huet-Sayegh, que utilizar-se-á para analisar o comportamento mecânico das amostras de concreto asfáltico e de misturas SMA estudadas nesta dissertação. Ele é constituído por dois amortecedores k e h em série com uma mola de constante elástica $E_\infty - E_0$, estando esse conjunto em paralelo com uma mola de constante elástica E_0.

Para efeito de comparação com os resultados experimentais, escrever-se-á explicitamente as partes real e imaginária do Módulo Complexo |E*| desse modelo. Para isso, analisar-se-á as tensões e as deformações nos seus componentes. A tensão total é dada pela soma das tensões nos dois ramos do modelo, conforme Equação 4.1. Por outro lado, as deformações nos dois ramos são iguais, como mostrado na Equação 4.2. A partir dessas duas equações, que caracterizam as tensões e deformações totais do modelo em função das respectivas tensões e deformações dos seus componentes, serão determinadas as suas propriedades mecânicas.

Figura 4.1: Modelo de Huet-Sayegh



$$\sigma = \sigma_L + \sigma_R \tag{4.1}$$

$$\varepsilon_L = \varepsilon_R = \varepsilon \tag{4.2}$$

As tensões nos amortecedores, de acordo com a definição de Huang (2004), encontra-se em conformidade com a Equação 4.3, em que o i é a unidade complexa, $\omega = 2\pi f$, f a frequência, η consiste no parâmetro viscoelástico, α a variável do modelo do amortecedor e τ o tempo de relaxação.

$$\sigma_\alpha = \frac{\eta}{\tau}(i\omega\tau)^\alpha \, \varepsilon_\alpha \tag{4.3}$$

Ainda de acordo com a Figura 4.1, em (1), à direita (R), há uma mola (E_o), logo, segundo a Equação 4.4, tem-se a relação Hookeana. Considerando que as deformações, por estarem em paralelo, são iguais, considera-se também a expressão da Equação 4.5.

$$\sigma_R = E_0 \varepsilon_R \tag{4.4}$$

$$\sigma_R = E_0 \varepsilon \tag{4.5}$$

Para o lado esquerdo, em (2), consta uma ligação em série: mola (E_∞ - E_o) e dois amortecedores denotados por k e h. Portanto, a deformação é a soma de cada dispositivo de ligação, enquanto a tensão é σ_L (Equação 4.6). Para a tensão, a Equação 4.7 exemplifica o processo.

$$\varepsilon_L = \varepsilon_{mola} + \varepsilon_k + \varepsilon_h \tag{4.6}$$

$$\sigma_{mola} = \sigma_L = \left(E_\infty - E_0\right)\varepsilon_{mola} \tag{4.7}$$

Em relação aos amortecedores, seguindo a definição abordada na Equação 4.3, tem-se as expressões das deformações nas Equações 4.8 e 4.9.

$$\varepsilon_k = \frac{\sigma_L}{\frac{\eta}{\tau}\left(i\omega\tau\right)^k} \tag{4.8}$$

$$\varepsilon_h = \frac{\sigma_L}{\frac{\eta}{\tau}\left(i\omega\tau\right)^k} \tag{4.9}$$

Substituindo as Equações 4.7, 4.8, 4.9 na 4.6, obtém-se o resultado na Equação 4.10.

$$\varepsilon_L = \frac{\sigma_L}{E_\infty - E_0} + \frac{\sigma_L}{\frac{\eta}{\tau}\left(i\omega\tau\right)^k} + \frac{\sigma_L}{\frac{\eta}{\tau}\left(i\omega\tau\right)^h} \tag{4.10}$$

Como $\varepsilon_L = \varepsilon$, pode-se rescrever a Equação 4.10 no formato da Equação 4.11.

(4.11)

Em posse das funções matemáticas para as tensões σ_L e σ_R e substituindo as expressões 4.5 e 4.11 na Equação 4.1, tem-se a Equação 4.12.

$$\sigma = \left(E_0 + \frac{1}{\frac{1}{E_0 - E_\infty} + \frac{\tau}{\eta}\left(i\omega\delta\right)^{-k} + \frac{\tau}{\eta}\left(i\omega\delta\right)^{-h}} \right)\varepsilon \tag{4.12}$$

Finalmente, o Módulo Complexo |E*| pode ser definido em concordância com a Equação 4.13.

$$|E^*| = \left(E_0 + \frac{1}{\frac{1}{E_0 - E_\infty} + \frac{\tau}{\eta}\left(i\omega\delta\right)^{-k} + \frac{\tau}{\eta}\left(i\omega\delta\right)^{-h}} \right) \tag{4.13}$$

Definindo $E_1 = E_\infty - E_o$ e levando em consideração a Equação 4.14, origina a Equação 4.15.

$$\frac{\tau}{\eta} E_1 \equiv \delta \tag{4.14}$$

$$|E^*| = E_0 + \frac{E_1}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + \delta(i\omega\tau)^{-h}} \tag{4.15}$$

A Equação 4.15 é teórica, disponível para consulta em livros e artigos científicos. No entanto, o objetivo do trabalho em pauta é distinguir o módulo complexo na parcela real e imaginária, assim sendo, utilizar-se-á a definição proposta nas Equações 4.16 e 4.17.

$$|E^*| = E' + iE'' \tag{4.16}$$

$$i = e^{i\frac{\pi}{2}} \tag{4.17}$$

Aplicando 4.17 em 4.16, tem-se o proposto em 4.18.

$$|E^*| = E_0 + \frac{E_1}{1 + \delta(\omega\tau)^{-k} e^{-\frac{i\pi k}{2}} + \delta(i\omega\tau)^{-h} e^{-\frac{i\pi h}{2}}} \tag{4.18}$$

Definindo 4.19 e 4.20, origina- a expressão 4.21.

$$\delta_1 = \delta(\omega\tau)^{-k} \tag{4.19}$$

$$\delta_2 = \delta(\omega\tau)^{-h} \tag{4.20}$$

$$|E^*| = E_0 + \frac{E_1}{1 + \delta_1 e^{-\frac{i\pi k}{2}} + \delta_2 e^{-\frac{i\pi h}{2}}} \tag{4.21}$$

Visando reduzir a Equação 4.21, englobam-se duas variáveis, α e β, exemplificadas na Equação 4.22 e 4.23 que resulta na Equação 4.24.

$$\alpha = \frac{\pi k}{2} \tag{4.22}$$

$$\beta = \frac{\pi h}{2} \tag{4.23}$$

$$|E^*| = E_0 + \frac{E_1}{1 + \delta_1 e^{-i\alpha} + \delta_2 e^{-i\beta}} \tag{4.24}$$

Ao multiplicar o numerador e o denominador da Equação 4.24 pela expressão $\left(1 + \delta_1 e^{i\alpha} + \delta_2 e^{i\beta}\right)$, obtém-se para o denominador (D), inicialmente, a Equação 4.25.

$$D = 1 + \left(\delta_1\right)^2 + \left(\delta_2\right)^2 + \delta_1\left(e^{i\alpha} + e^{-i\alpha}\right) + \delta_2\left(e^{i\beta} + e^{-i\beta}\right) + \delta_1\delta_2 e^{i(\beta-\alpha)} + \delta_1\delta_2 e^{(\alpha-\beta)} \tag{4.25}$$

Aplicando a definição da fórmula de Euler (Equação 4.26), tem-se a Equação 4.27.

$$e^{i\theta} = \cos\theta + i sen\theta \tag{4.26}$$

$$\begin{aligned} D = {} & 1 + \left(\delta_1\right)^2 + \left(\delta_2\right)^2 + \delta_1\left(\cos\alpha + i\sin\alpha + \cos\left(-\alpha\right) + i\sin\left(-\alpha\right)\right) \\ & + \delta_2\left(\cos\beta + i\sin\beta + \cos\left(-\beta\right) + i\sin\left(-\beta\right)\right) \\ & + \delta_1\delta_2\left(\cos\left(\beta-\alpha\right) + i\sin\left(\beta-\alpha\right) + \cos\left(\alpha-\beta\right) + i\sin\left(\alpha-\beta\right)\right) \end{aligned} \tag{4.27}$$

Sabendo que cos(θ) = cos(-θ) e sin(-θ) = -sin(θ), a Equação 4.27 ainda pode ser escrita conforme a Equação 4.28.

$$D = 1 + \left(\delta_1\right)^2 + \left(\delta_2\right)^2 + \delta_1\left(2\cos\alpha\right) + \delta_2\left(2\cos\beta\right) + \delta_1\delta_2 2\cos\left(\beta-\alpha\right) \tag{4.28}$$

Em relação ao numerador (N), originou-se a Equação 4.29.

$$N = E_1\left(1+\delta_1\left[\cos\alpha + i\sin\alpha\right]+\delta_2\left[\cos\beta + i\sin\beta\right]\right)$$
$$N = E_1\left[\left(1+\delta_1\cos\alpha+\delta_2\cos\beta\right)+i\left(\delta_1\sin\alpha+\delta_2\sin\beta\right)\right] \tag{4.29}$$

O numerador (N) e o denominador (D), em seu formato original, isto é, com as variáveis dos elementos parabólicos k e h, são mostrados nas Equações 4.30 e 4.31.

$$N = E_1\left[1+\delta\left(\omega\tau\right)^{-k}\cos\frac{\pi k}{2}+\delta\left(\omega\tau\right)^{-h}\cos\frac{\pi h}{2}\right]+$$
$$iE_1\left[\delta\left(\omega\tau\right)^{-k}\sin\left(\frac{\pi k}{2}\right)+\delta\left(\omega\tau\right)^{-h}\sin\left(\frac{\pi h}{2}\right)\right] \tag{4.30}$$

$$D = 1+\left[\delta\left(\omega\psi\right)^{-k}\right]^2+\left[\delta\left(\omega\tau\right)^{-h}\right]^2+2\delta\left(\omega\tau\right)^{-k}\cos\left(\frac{\pi k}{2}\right)$$
$$2\delta\left(\omega\tau\right)^{-h}\cos\left(\frac{\pi h}{2}\right)+2\delta^2\left(\omega\tau\right)^{-k}\left(\omega\tau\right)^{-h}\cos\left[\frac{\pi}{2}\left(h-k\right)\right] \tag{4.31}$$

O numerador (N), por conter uma parte real e imaginária, pode ser decomposto por N = N_1 + iN_2, conforme Equação 4.32 e 4.33.

$$N_1 \equiv E_1\left[1+\delta\left(\omega\tau\right)^{-k}\cos\left(\frac{\pi k}{2}\right)+\delta\left(\omega\tau\right)^{-h}\cos\left(\frac{\pi h}{2}\right)\right] \tag{4.32}$$

$$N_2 \equiv E_1\left[\delta\left(\omega\tau\right)^{-k}\sin\left(\frac{\pi k}{2}\right)+\delta\left(\omega\tau\right)^{-h}\sin\left(\frac{\pi h}{2}\right)\right] \tag{4.33}$$

Logo, a expressão do Módulo Complexo |E*| pode ser reescrita como $|\mathrm{E}^*| = \mathrm{E}_0 + \frac{\mathrm{D}_1}{\mathrm{D}} + \mathrm{i}\frac{\mathrm{D}_2}{\mathrm{D}}$. Assim, encontram-se as parcelas requeridas, E’ e E’’, respectivamente, Módulo Complexo Real e Módulo Complexo Imaginário.

Por outro lado, realiza-se o limite dessas parcelas, conforme Equação 4.34 e 4.35.

$$\lim_{\omega \to 0} D_1 = \frac{E_1 \delta \cos\left(\frac{\pi h}{2}\right)}{(\omega\partial)^h} \tag{4.34}$$

$$\lim_{\omega \to 0} D_2 = \frac{E_1 \delta \sin\left(\frac{\pi h}{2}\right)}{(\omega\partial)^h} \tag{4.35}$$

Finalmente, as Equações 4.36 e 4.37 retratam as variáveis E' e E'', dependentes da variável D abordada em 4.38.

$$E_1 = E_0 + \frac{(E_\infty - E_0)\left[1 + \frac{\partial}{\eta}(E_\infty - E_0)(\omega\partial)^{-k} \cos\left(\frac{\pi k}{2}\right) + \frac{\partial}{\eta}(E_\infty - E_0)(\omega\partial)^{-h} \cos\left(\frac{\pi h}{2}\right)\right]}{D} \tag{4.36}$$

$$E_2 = \frac{(E_\infty - E_0)\left[\frac{\partial}{\eta}(E_\infty - E_0)(\omega\partial)^{-k} \sin\left(\frac{\pi k}{2}\right) + \frac{\partial}{\eta}(E_\infty - E_0)(\omega\partial)^{-h} \sin\left(\frac{\pi h}{2}\right)\right]}{D} \tag{4.37}$$

$$\begin{aligned} D = {} & 1 + \left[\frac{\partial}{\eta}(E_\infty - E_0)(\omega\partial)^{-k}\right]^2 + \left[\frac{\partial}{\eta}(E_\infty - E_0)(\omega\partial)^{-h}\right]^2 + \\ & 2\frac{\partial}{\eta}(E_\infty - E_0)(\omega\partial)^{-k} \cos\left(\frac{\pi k}{2}\right) + 2\frac{\partial}{\eta}(E_\infty - E_0)(\omega\partial)^{-h} \cos\left(\frac{\pi h}{2}\right) + \\ & 2\left[\frac{\partial}{\eta}(E_\infty - E_0)\right]^2 (\omega\partial)^{-k} (\omega\partial)^{-h} \cos\left[\frac{\pi}{2}(h - k)\right] \end{aligned} \tag{4.38}$$

4.1 MODELAGEM NUMÉRICA

Consoante Almeida (2015), o ajuste de curvas consiste em determinar, a partir de pontos experimentais, uma curva que o expresse matematicamente. Visando reduzir o trabalho manual, especialmente por conta de inúmeros cálculos, pode-se ajustar os dados de ensaios com auxílio de *softwares*. Em regra, no estudo em pauta, trabalhou-se com o Excel, produto pertencente à plataforma Office, da Microsoft.

Realizou-se ajuste dos dados provenientes da curva-mestra, isto é, módulo dinâmico *versus* frequência reduzida, determinada pelos ensaios mecânicos para as formulações asfálticas do tipo CA e SMA. Os parâmetros E_o, E_∞, k, h, δ e t foram parametrizados em conformidades com as equações demonstradas no item 4, por meio de regressão múltipla não-linear. A eficácia do processo analisou-se por meio do coeficiente de correlação de Pearson, que também pode ser chamado de coeficiente de determinação (R^2) (QUININO e BESSEGATO, 2011). No *software* em questão, o desenvolvimento do ajuste é feito por meio da função *solver*, encontrada na aba Dados, em que se selecionam as células variáveis, que no caso, são os coeficientes a serem encontrados.

CAPÍTULO 5

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, consta a discussão dos resultados referentes à caracterização física dos agregados, dosagem utilizada e dados relativos ao ensaio de módulo dinâmico, com corpos-de-prova prismáticos e cilíndricos, bem como aplicação do modelo reológico linear de Huet-Sayegh.

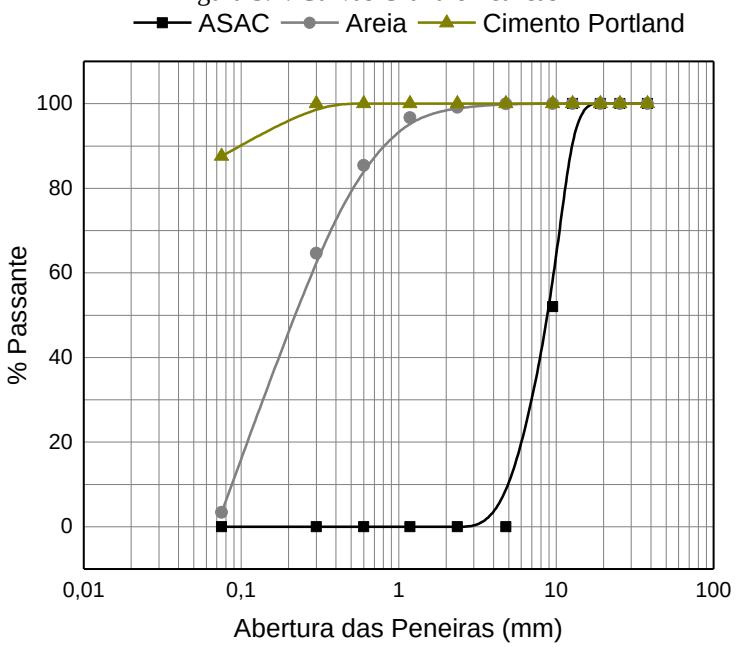
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1 Participantes das Misturas Asfálticas

Constituíram as misturas asfálticas o agregado sinterizado de argila calcinada (ASAC), na condição de agregado graúdo, areia residual (agregado miúdo), cimento Portland (fíler), resíduos da fibra do curauá (*Ananas erectifolius*) e o ligante asfáltico.

No tocante aos agregados minerais, são ilustradas suas curvas granulométricas na Figura 5.1, cujos resultados classificam tais materiais como: agregados graúdos, retido na 4,75 mm (pedregulhos); agregado miúdo, passante na 4,75 mm; e fíler mineral, passante na 0,075 mm.

Figura 5.1: Curvas Granulométricas



Baseado também nas curvas granulométricas, determinaram-se os coeficientes de uniformidade (C_u), de acordo com a Equação 5.1, em que seu valor decresce ao ser mais uniforme o material; e coeficiente de curvatura (C_c), baseado na Equação 5.2, cujo resultado numérico fornece uma noção do formato da curva, detectando descontinuidades ou não, e cujos valores são mostrados na Tabela 5.1.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \tag{5.1}$$

Em que: D_{60} = abertura em (mm) referente ao diâmetro de 60% e da mesma forma, D_{10} referente ao diâmetro de 10%.

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}} \tag{5.2}$$

Cujo D_{30} refere-se à abertura em (mm) para o diâmetro de 30%.

Tabela 5.1: Coeficiente de Uniformidade e Curvatura

Materiais	**C_u**	**C_c**
ASAC	1,8	1,08
Areia	3,12	0,89

Concernente a esses resultados, o ASAC e areia possuem granulometria uniforme, isto é, mal graduadas, com tamanhos de partícula basicamente iguais, pois possuem C_u inferior a 5.

Na Tabela 5.2 apresentam-se as características físicas dos agregados. As densidades relativas reais do ASAC, areia e cimento Portland mostraram, respectivamente, valores de 2,78; 2,73 e 2,94 g/cm³. Por conseguinte, em conformidade com os valores alusivos a esses tipos de materiais. Quanto à absorção, os dados presentes na citada tabela denotam valores relativamente baixos, o que é um ponto positivo, pois valores elevados refletem uma mistura asfáltica menos coesiva (*ASPHALT INSTITUTE*, 2007).

Nas misturas asfálticas, os agregados estão sujeitos à abrasão sob a ação das cargas do tráfego, logo, é ideal que os materiais formadores dessa composição proporcionem capacidade de resistência ao esmagamento, para que sejam evitadas futuras patologias. O desgaste por

abrasão “Los Angeles do ASAC resultou igual a 37,8, inferior a 50% recomendado na norma DNER-ME 035/98 – Agregados: Determinação da abrasão “Los Angeles”.

Tabela 5.2 - Densidades dos Agregados

Materiais	Propriedade	Norma	Resultado
ASAC	Densidade Relativa Real	ASTM C 127	2,78 g/cm³
	Densidade Relativa Aparente		2,76 g/cm³
	Absorção		0,32 %
Areia	Densidade Relativa Real	ASTM C 128	2,73 g/cm³
Cimento Portland	Densidade Relativa Real	ASTM C 188	2,94 g/cm³
ASAC	Desgaste	ASTM C 131	37,8 %

As análises laboratoriais do cimento asfáltico de petróleo (CAP), consoante as recomendações da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), realizaram-se na Refinaria Isaac Sabá (REMAN). Todos os resultados (Tabela 5.3) exibiram valores dentro das faixas recomendadas. Destaca-se que a Penetração, Solubilidade em tricloroetileno e Aumento do Ponto de Amolecimento apontaram grandezas próximas às margens superiores. Verificou-se também que a amostra se enquadrou como CAP 50/70, visto que a penetração obteve, a 25°C, valor numérico de 69, dentro dos limites da faixa de 50 a 70.

Tabela 5.3 - Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo

Ensaios	Unid.	Classificação ANP	Experimental	Metodologia ASTM
		CAP 50/70		
Penetração	0,1mm	50 – 70	69	D5
Ponto de Amolecimento	°C	> 46	49,7	D36
Viscosidade Saybolt-Furol				
135°C	s	> 141	283	E102
150°C		> 50	140,7	
177°C		30 - 150	50,8	

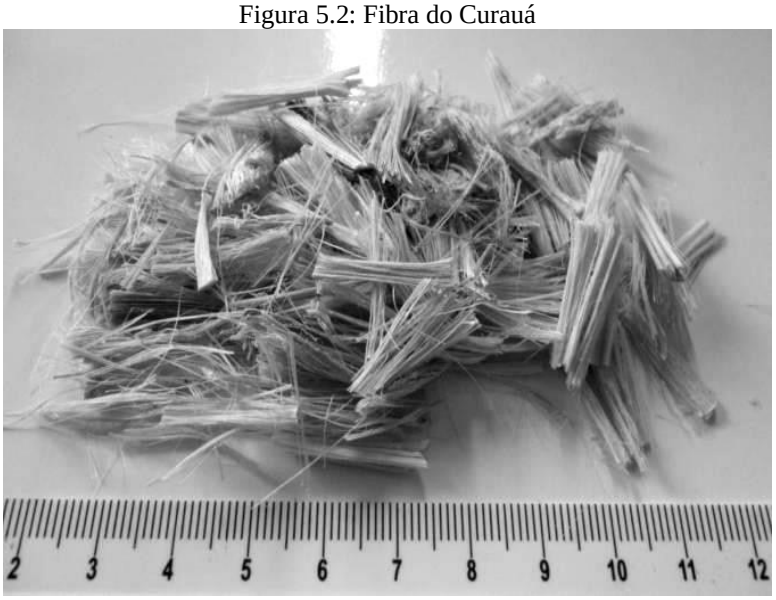
Tabela 5.3 - Caracterização do Cimento Asfáltico de Petróleo (Continuação)

Viscosidade Brookfield				
135°C	cP	> 274	539	D4402
150°C		> 112	279,8	
177°C		57 - 285	96,8	
Ponto de Fulgor	°C	> 235	318	D92
Solubilidade em Tricloroetileno	% massa	> 99,5	99,5	D2042
Ductilidade	cm	> 60	100	D113

Efeito do Calor e do Ar (RTFOT) a 163°C, 85min				
Variação em massa	% massa	< 0,5	0,04	D2872
Aumento do Ponto de Amolecimento	°C	< 8	7,1	D36
Penetração Retida	%	> 55	63	D5

Resíduos da fibra do Curauá (Figura 5.2) integraram as formulações SMA com comprimentos fixos de 20mm, conforme Barbosa (2016). Essa escolha, ocorreu, com a finalidade de evitar a formação de grumos durante a mistura asfáltica. A densidade da fibra apresentou valor igual a 1430 kg/m³. Via de regra, se aproximou de resultados presente na literatura.

Figura 5.2: Fibra do Curauá



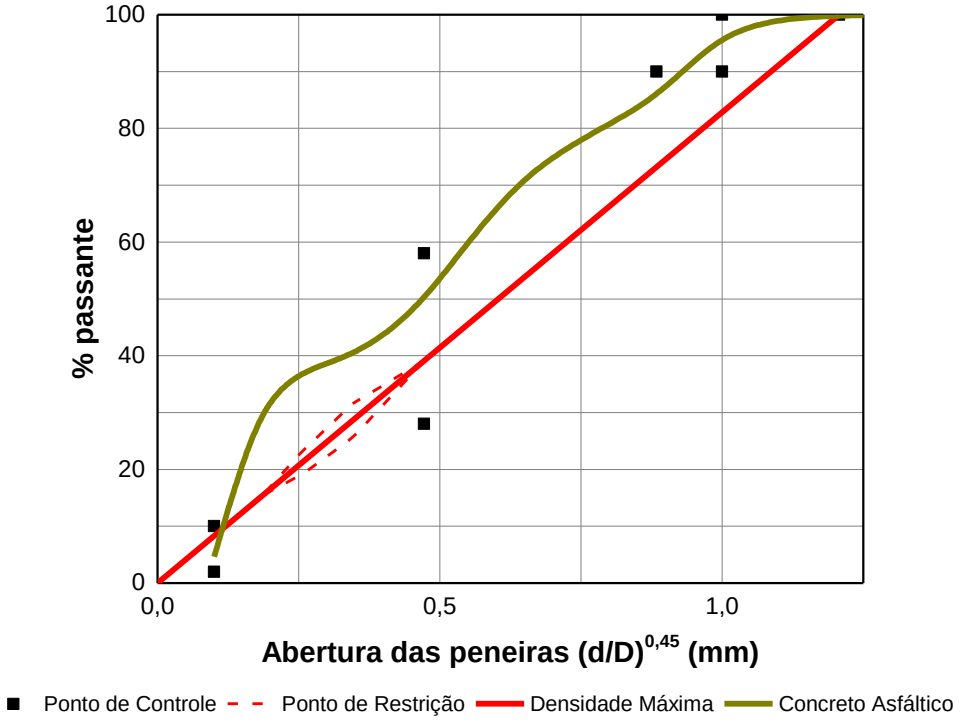
Fonte: Valença et. al (2020)

5.2 DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

Para ambas as misturas asfálticas, Concreto Asfáltico (CA) e Stone Matrix Asphalt (SMA), aplicou-se a metodologia *Superpave*, proveniente do programa *Strategic Highway Research Program* (SHRP). No caso da textura, função do tamanho máximo nominal do agregado (TMNA), a faixa granulométrica deve posicionar-se entre limites, chamados de ponto de controle (PC), e a zona de restrição. Em regra, indica, em conjunto com a reta de máxima

densidade, pontos que a curva granulométrica do compósito não deve passar. O gráfico, indicado na Figura 5.3, exemplifica esse processo para o tamanho máximo nominal de 12,5mm, da mistura referente ao concreto asfáltico.

Figura 5.3: Curvas Granulométricas



Para determinação do teor de projeto, utilizou-se o Compactador Giratório *Superpave* (CGS) para moldagem dos corpos de prova, de acordo com as diretrizes apontadas pela ASTM D6925 e as diretrizes básicas para determinação dos parâmetros volumétricos descritos na seção 3.2. De posse desses valores, classificou-se a melhor mistura em concordância com os limites propostos pelo procedimento *Superpave*, detalhados na Tabela 5.4.

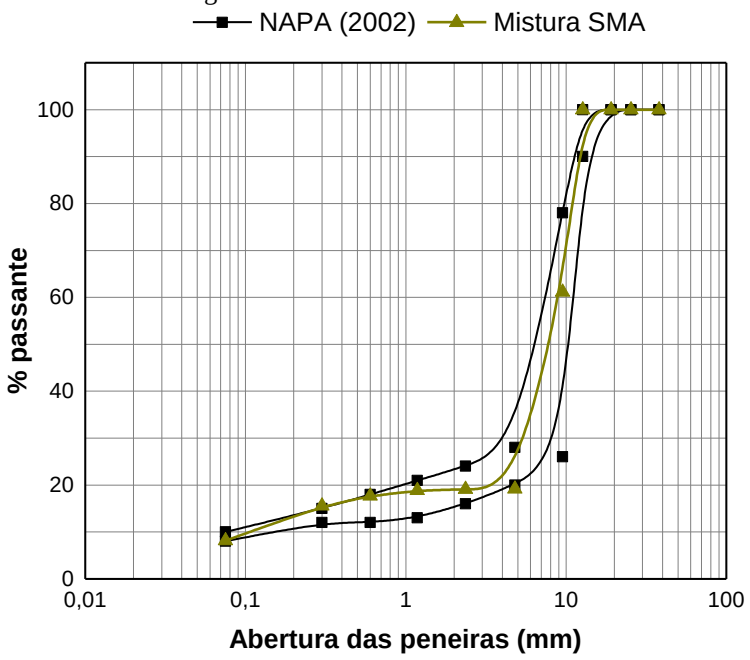
Tabela 5.4 – Parâmetros *Superpave*

Tráfego N AASHTO 10^6	**Densidade Relativa % Gmm**			**VAM (%)** Tamanho Máximo Nominal (TMN) (mm)						**RBV (%)**	
< 0,3	N_{ini}	$N_{projeto}$	$N_{máximo}$	37,5	25	19	12,5	9,5	4,75		
< 0,3	91,5	96	98	11	12	13	14	15	16	70	80
0,3 a 3	90,5	96	98	11	12	13	14	15	16	65	78
3 a 10	89	96	98	11	12	13	14	15	16	65	75
10 a 30	89	96	98	11	12	13	14	15	16	65	75
> 30	89	96	98	11	12	13	14	15	16	65	75

A partir dessas premissas, a dosagem mineral do concreto asfáltico foi de 62% de ASAC, 34% de areia natural e 4% de Cimento Portland. Baseado na tentativa sucessiva de 4 teores de projeto, encontrou-se o teor de ligante ideal de 10,9% que atendeu a todas as diretrizes *Superpave*, ou seja, os parâmetros volumétricos.

No tocante à mistura SMA, por ter em sua composição grande incidência de agregado graúdo, resultou: 81% de ASAC, 10% de areia, 9% de Cimento Porland, 0,3% de fibra de curauá e, após sucessivas tentativas para enquadramento das especificações Superpave, 12,5% de ligante betuminoso. O tamanho máximo nominal também acompanhou o valor de 12,5mm. Na Figura 5.4, tem-se a dosagem mineral, segundo a metodologia NAPA (2002).

Figura 5.4: Curvas Granulométricas



Fonte: Barbosa (2016)

5.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO SOB FLEXÃO A QUATRO PONTOS

Os dados explanados a seguir foram retirados do banco de dados de dissertações do Grupo de Pesquisa em Geotecnia (GEOTEC/UFAM), para compilação do modelo numérico, sendo o Concreto Asfáltico (CA) com ASAC relativo ao trabalho de Silva (2014) e a mistura SMA com ASAC referente à pesquisa de Barbosa (2016).

5.3.1 Concreto Asfáltico com ASAC

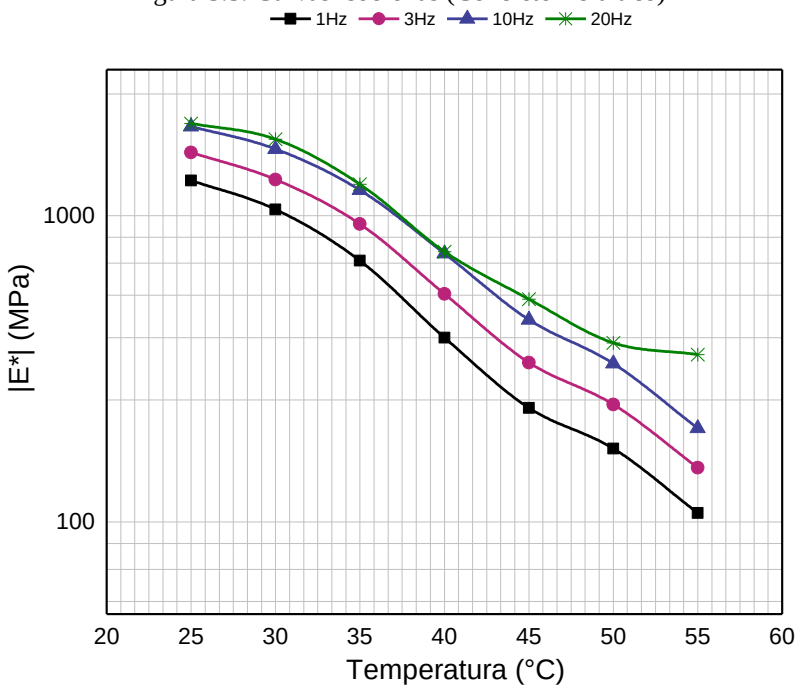
O módulo de rigidez dinâmico obteve-se para uma gama de temperaturas, iniciando em 25°C, com incrementos de 5°C, até atingir o valor final de 55°C. As vigas, ilustradas na Figura 5.4, foram submetidas às seguintes frequências: 1 Hz, 3 Hz, 10 Hz e 20 Hz. Para aliar a teoria à prática, de acordo com SILVA (2014), uma frequência de 1 Hz equivale a uma média de 20 km/h, enquanto 3 Hz aproxima-se de 40 km/h. Essas determinações são realizadas baseadas no ábaco publicado por Barksdale (1971).

Figura 5.4: Vigas Prismáticas de Concreto Asfáltico

Fonte: Silva (2004)

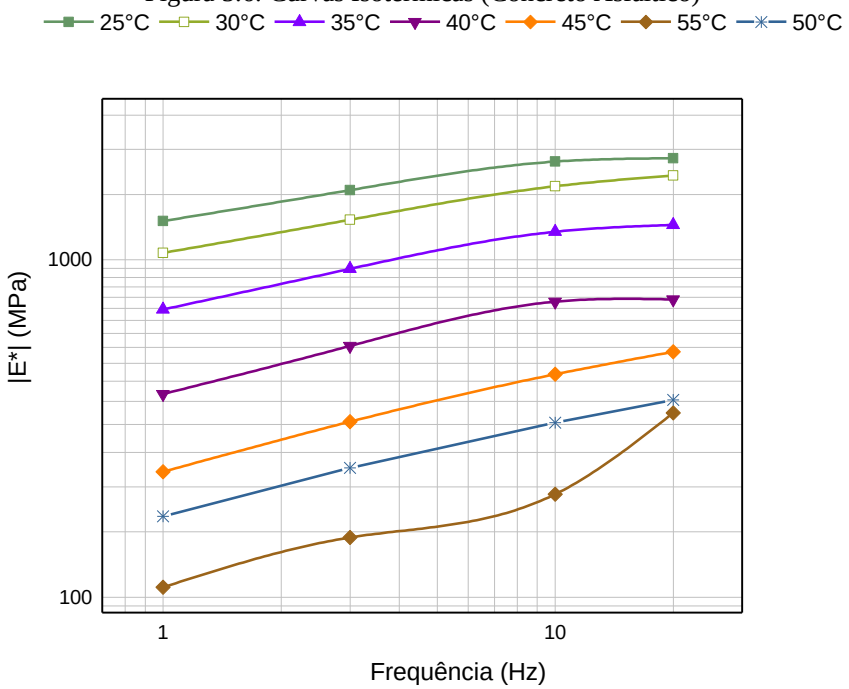
Na Figura 5.5 visualizam-se as curvas isócronas, com o módulo complexo, em escala logarítmica no eixo das ordenadas, e a temperatura, em escala aritmética, no eixo das abscissas. Observa-se comportamento típico, pois, a altas temperaturas, o módulo complexo apresenta valores reduzidos. Ressalta-se, também, melhor performance das misturas asfálticas à uma frequência de 20 Hz.

Figura 5.5: Curvas Isócronas (Concreto Asfáltico)



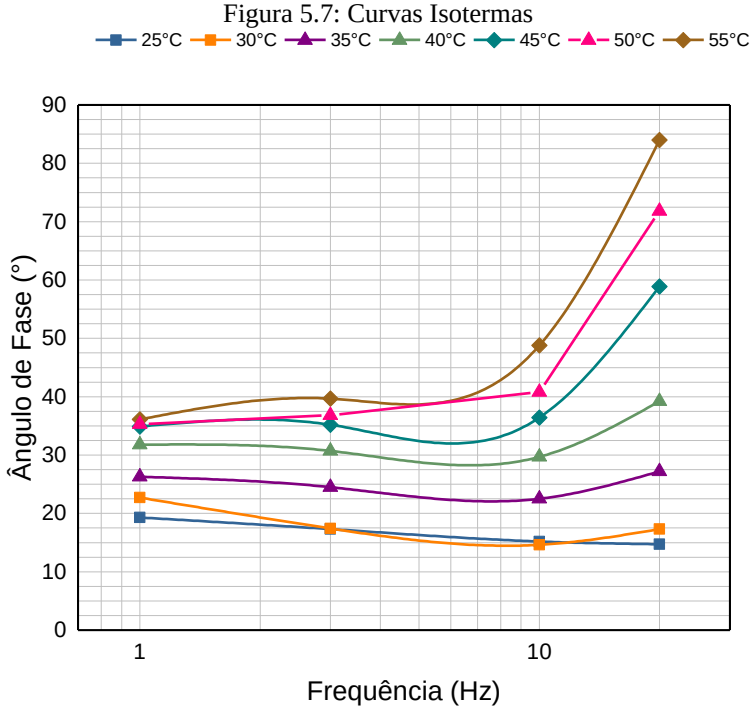
As curvas isotérmicas, explanadas na Figura 5.6, traduzem o comportamento da susceptibilidade cinética do compósito asfáltico, isto é, efeito do tempo de carregamento no comportamento reológico. Ao analisar tais gráficos, classificam-se as misturas com maior coeficiente angular, ou seja, maior sensibilidade cinética, caso retratado pela mistura a 55°C.

Figura 5.6: Curvas Isotérmicas (Concreto Asfáltico)



No tocante às curvas isotermas (Figura 5.7), isto é, ângulo de fase *versus* frequência, constata-se que o comportamento seguiu um padrão. No entanto, para a mistura asfáltica à temperatura de 55°C, evidencia-se o maior valor do ângulo de fase. Segundo SILVA (2014), maiores ângulos de fase ocasionam maiores deformações permanentes no pavimento asfáltico, principalmente por conta da predominância viscosa.

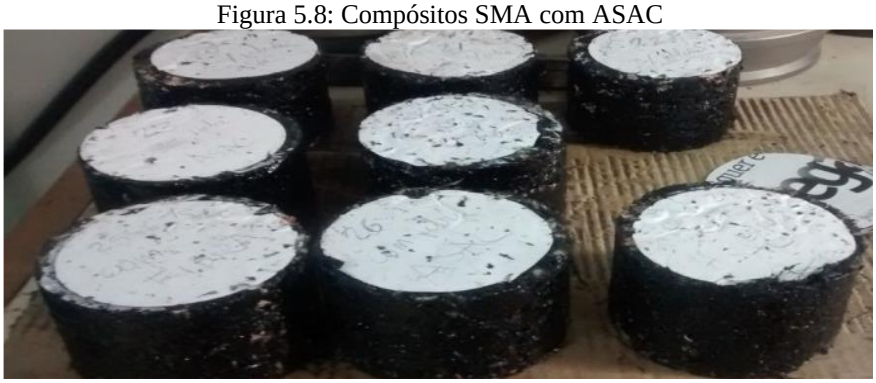
Figura 5.7: Curvas Isotermas



5.3.2 Mistura SMA com ASAC

Stone Matrix Asphalt (SMA) são misturas asfálticas a quente, desenvolvida para serem utilizadas em estradas com alto volume de tráfego. Por conta disso, na sua composição, tem-se uma grande parcela de agregado graúdo. Para caracterização mecânica, realizou-se o ensaio em corpos de prova cilíndricos, ilustrados na Figura 5.8, nas temperaturas de 5, 25 e 40 °C, e frequências iguais a 0.1, 0.5, 1, 5, 10 e 25 Hz.

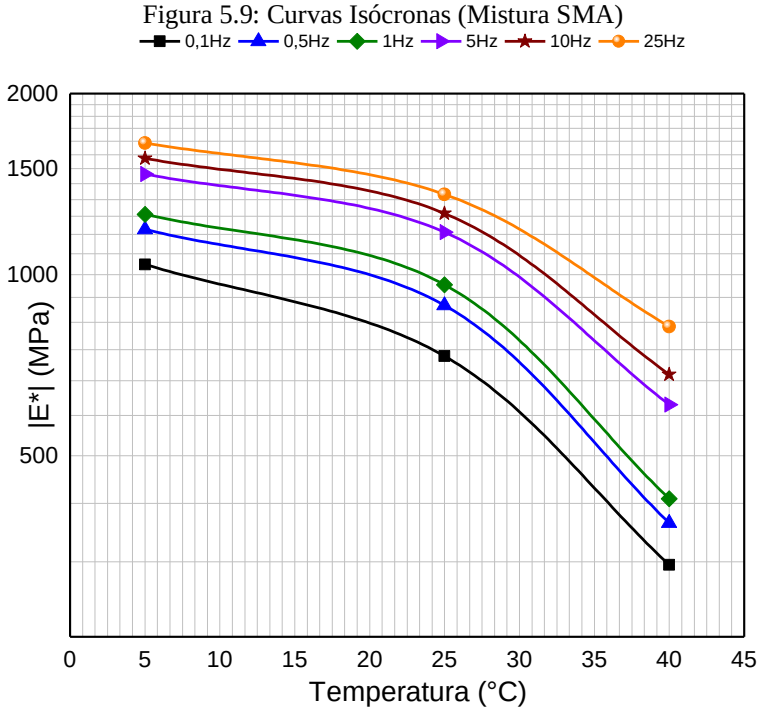
Figura 5.8: Compósitos SMA com ASAC



Fonte: Barbosa (2016)

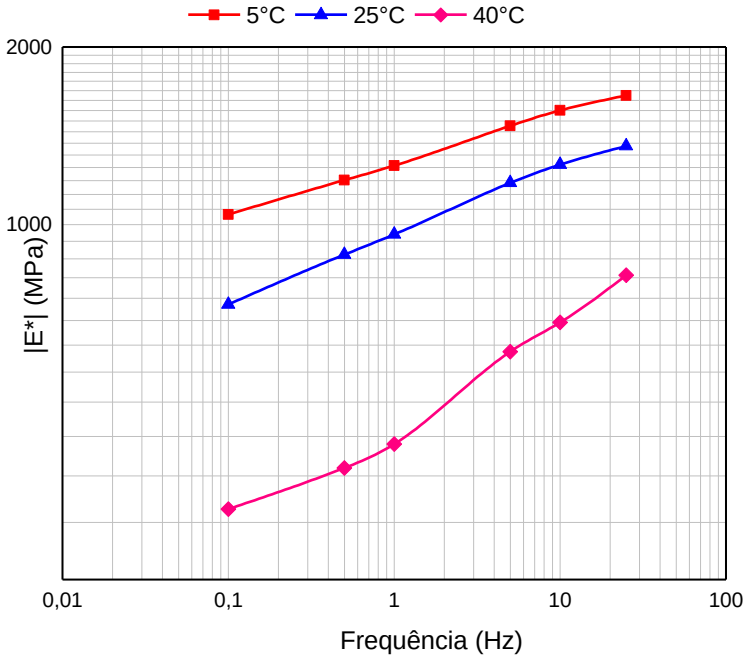
Nota-se na Figura 5.9, em que são apresentadas as curvas isócronas, redução do módulo complexo com o aumento da temperatura e redução da frequência. Constata-se igualmente um padrão em todas as frequências estudadas, especialmente a tendência de paralelismo entre elas.

Figura 5.9: Curvas Isócronas (Mistura SMA)



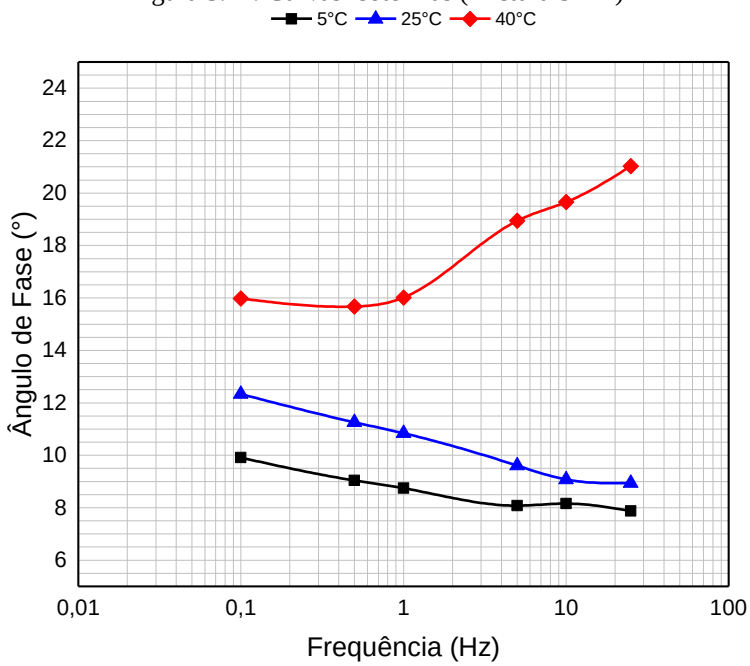
Para as curvas isotérmicas (Figura 5.10), nas temperaturas de 5 °C e 25 °C, tem-se um comportamento similar, isto é, curvas com formatos correspondentes. Consoante a temperatura de 40 °C, devido o seu alto valor, verifica-se valores inferiores no que diz respeito à performance mecânica do módulo complexo.

Figura 5.10: Curvas Isotérmicas (Mistura SMA)



Quanto ao ângulo de fase da mistura SMA, o parâmetro não apresentou comportamento semelhante ao Concreto Asfáltico (CA), ou seja, paralelismo entre as curvas de diferentes temperaturas (Figura 5.11). Observa-se, ainda que à alta temperatura (40°C), o ângulo de fase mostra um leve decréscimo, seguido de acréscimos até alcançar o resultado igual a 21,03°. Especial a baixas temperaturas (5 e 25 °C), constatou-se similar comportamento. Destaca-se que, na temperatura de 5°C, notou-se o menor valor de ângulo de fase (7,87°).

Figura 5.11: Curvas Isotermas (Mistura SMA)



5.4 CALIBRAÇÃO DO MODELO DE HUET-SAYEGH

Para calibração do modelo de Huet-Sayegh, foram determinados os coeficientes parabólicos h e k e parâmetros δ e τ, com base na ferramenta *solver* presente do *software Excel*, a partir das equações representativas daquele modelo, apresentado no Capítulo 4, reescritas no formato das Equações 5.3 a 5.7, em que f_{red} refere-se à frequência reduzida. Os resultados do ajuste dos dados experimentais, apresentados anteriormente, ao modelo de Huet-Sayegh, constam nas Tabelas 5.5 e 5.6. Para efeito de cálculo numérico, escrevem-se as variáveis A e B como nas Equações (5.3) e (5.4).

$$A = 1 + \frac{\delta \cos\left(k\pi/2\right)}{\left(2\pi \times f_{red} \times \tau\right)^{k}} + \frac{\cos\left(h\pi/2\right)}{\left(2\pi \times f_{red} \times \tau\right)^{h}} \tag{5.3}$$

$$B = 1 + \frac{\sin\left(k\pi/2\right)}{\left(2\pi \times f_{red} \times \tau\right)^{k}} + \frac{\sin\left(h\pi/2\right)}{\left(2\pi \times f_{red} \times \tau\right)^{h}} \tag{5.4}$$

De maneira que se pode escrever as partes real (E_1) e imaginária (E_2) do Módulo Complexo (E^*) conforme as Equações 5.5, 5.6 e 5.7.

$$E_1 = E_0 + \left(E_\infty - E_0\right)\frac{A}{A^2 + B^2} \tag{5.5}$$

$$E_2 = \left(E_\infty - E_0\right)\frac{B}{A^2 + B^2} \tag{5.6}$$

$$E^* = \sqrt{\left(E_1\right)^2 + \left(E_2\right)^2} \tag{5.7}$$

Tabela 5.5: Ajuste dos Dados Numéricos e Experimentais (Concreto Asfáltico)

Frequência reduzida (Hz)	A	B	E1 (MPa)	E2(MPa)	E*(MPa)	E*exp
0,008	48,22	3,14	136,21	3,78	136,26	107
0,024	32,34	2,10	164,74	5,63	164,84	150,2
0,080	21,00	1,35	211,54	8,60	211,72	202
0,160	16,44	1,05	248,54	10,90	248,78	351,6
0,050	24,83	1,61	190,94	7,30	191,08	173,6
0,150	16,82	1,08	244,73	10,66	244,96	241,8
0,500	11,09	0,69	330,74	15,80	331,11	328,6
1,000	8,79	0,54	396,86	19,54	397,34	384,6
0,170	16,10	1,03	252,20	11,12	252,44	235,4
0,510	11,02	0,69	332,44	15,90	332,82	331,4
1,7	7,39	0,44	457,26	22,78	457,83	457,4
3,4	5,94	0,35	550,41	27,46	551,09	534
1	8,79	0,54	396,86	19,54	397,34	399,6
3	6,17	0,36	532,33	26,58	532,99	555,4
10,000	4,30	0,23	730,30	35,33	731,15	751,8
20,000	3,55	0,18	868,77	40,33	869,71	763,4
8,000	4,59	0,25	689,50	33,68	690,32	712,6
24,000	3,38	0,17	908,04	41,58	908,99	940,4
80,000	2,52	0,11	1192,50	48,33	1193,48	1211,6
160,000	2,17	0,08	1370,47	50,49	1371,40	1268,2
40,000	2,97	0,14	1023,80	44,81	1024,78	1048,6
120,000	2,31	0,09	1295,81	49,78	1296,77	1312,6
400,000	1,83	0,06	1610,53	50,85	1611,34	1649,8
800,000	1,64	0,05	1788,08	49,19	1788,75	1776,6
120,000	2,31	0,09	1295,81	49,78	1296,77	1302
360,000	1,87	0,06	1583,04	50,96	1583,86	1608

1200,000	1,55	0,04	1887,79	47,53	1888,39	1953,4
2400,000	1,43	0,03	2048,04	43,76	2048,51	1998,2

Tabela 5.6: Ajuste dos Dados Numéricos e Experimentais (Mistura SMA)

Frequência reduzida (Hz)	A	B	E_1 (MPa)	E_2(MPa)	E*(MPa)	E^*_{exp}
1,15	12,43	1,70	1005,94	98,48	1010,75	1040
5,75	10,04	0,73	1189,11	65,40	1190,91	1189
11,5	9,25	0,52	1268,15	55,27	1269,35	1259
57,5	7,76	0,26	1459,56	40,07	1460,11	1470
115	7,22	0,21	1547,13	36,28	1547,55	1561
287,5	6,59	0,16	1668,88	33,06	1669,20	1654
0,1	19,36	6,93	703,18	149,51	718,90	731,9
0,5	14,15	2,71	907,16	119,19	914,95	888,6
1	12,69	1,84	989,66	101,88	994,89	961,5
5	10,22	0,78	1173,29	67,75	1175,24	1176
10	9,40	0,56	1252,11	57,12	1253,41	1264
25	8,48	0,37	1358,73	46,65	1359,53	1359
7,80E-04	115,30	129,62	320,49	39,28	322,89	329,2
0,0039	54,67	48,73	378,53	82,88	387,50	386,4
0,0078	41,47	32,01	423,37	106,39	436,53	424,1
0,039	24,53	12,14	584,19	147,81	602,60	608,2
0,078	20,52	8,03	671,08	150,91	687,83	682,3
0,195	16,80	4,68	789,50	140,36	801,88	820

A técnica utilizada é baseada na regressão múltipla não-linear, por meio de ajuste de curvas, tendo como parâmetros ajustáveis E_0, $E_{\inf}$, k, h e d. O objetivo principal desse método é minimizar a soma do quadrado das diferenças entre o valor estimado, isto é, E^*, e dados obtidos em laboratório ($E^*_{\exp}$). Na Tabela 5.7, mostram-se os parâmetros do modelo de Huet-Sayegh para a mistura de Concreto Asfáltico, com execução das vigas prismáticas, e para a Mistura SMA, executada com corpos de prova cilíndricos. Evidenciam-se os resultados elevados da mistura SMA, especialmente no tocante ao Módulo Complexo, por se tratar de uma composição com alta resistência ao tráfego.

Tabela 5.7: Parâmetros de Huet-Sayegh obtidos na pesquisa

Parâmetros	Concreto Asfáltico	Mistura SMA
E_0 (MPa)	78,108	285,548
E_{inf} (MPa)	2891,607	9407,002
k	0,374	0,113
h	0,355	0,611
d	18,106	9,422
t (s)	1,079	0,051

Enfatiza-se a relevância da dedução das referidas equações, tendo em vista que não há trabalho presente na literatura que exponha o desenvolvimento analítico das parcelas real e imaginária. Aliado a isso, citam-se os artigos que utilizam o *software* denominado ViscoRoute 2.0, que consiste em um programa computacional de origem francesa para cálculo automático dos parâmetros de Huet-Sayegh, com introdução dos valores experimentais do módulo complexo, frequência e ângulo de (BARRA et. al, 2020); (ALMEIDA et. al, 2018); (BARRA et. al, 2016); (OTTO et. al, 2017); (LEANDRI, LOSA e NATALE, 2015); (CHUPIN et. al, 2014); (PRETESEILLE et. al, 2013); (CHUPIN et. al, 2010).

Na Figura 5.12 e 5.13, visualizam-se as curvas-mestras obtidas por meio dos parâmetros de Huet-Sayegh aplicados nas Equações descritas anteriormente. Observa-se a sobreposição da curva analítica com a experimental, atestando a eficácia do modelo reológico. Essa curva foi obtida pela translação das curvas isotérmicas de todas as temperaturas, a uma temperatura referência de 25°C e, a partir dela, é possível obter o módulo de rigidez para qualquer associação de temperaturas e frequências, isto é, dentro dos limites adotados no ensaio. Analisando o formato das curvas, tem-se a premissa especificada por Fontes (2009) de que quanto mais próxima a curva estiver da direção horizontal, o comportamento do compósito asfáltico é mais elástico. Do contrário, é indicativo que pode haver maior susceptibilidade a variabilidades térmicas e quanto à frequência.

Figura 5.12: Curva Mestra para o Concreto Asfáltico, onde se verifica que os dados experimentais (cinza) ajustam-se bem ao modelo de Huet-Sayegh (vermelho).

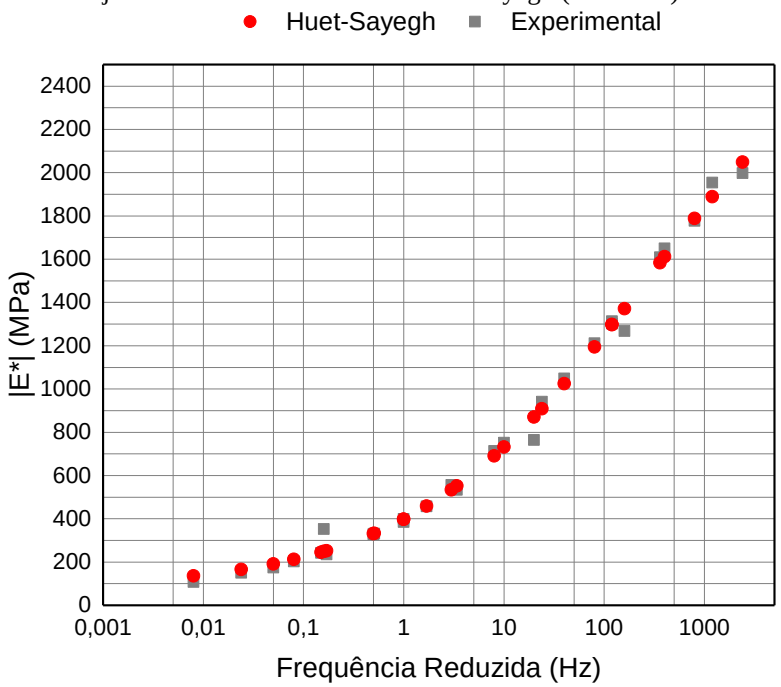
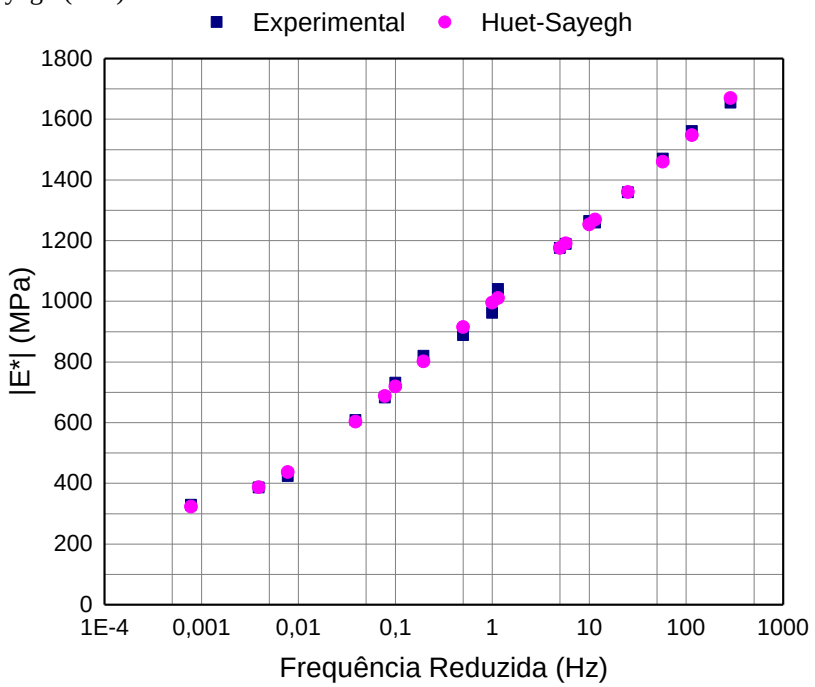


Figura 5.13: Curva Mestra Mistura SMA, onde se verifica que os dados experimentais (azul) ajustam-se bem ao modelo de Huet-Sayegh (rosa)



.

O modelo de Huet-Sayegh é capaz de descrever o comportamento viscoelástico de compósitos asfálticos em qualquer faixa de temperatura. Nota-se que que o concreto asfáltico (CA) foi modelado em sete níveis de temperatura, enquanto a mistura SMA em apenas três. Nas Figuras 5.14 e 5.15, verifica-se o comportamento parabólico para o concreto asfáltico e a

Mistura SMA, respectivamente. O emprego dessa técnica restringe-se ao uso de poucos parâmetros, o que requer baixa capacidade computacional (YAO et. al, 2013).

Para análise do Plano Cole-Cole, enfatiza-se também que ao imaginar uma reta partindo do início da curva, é possível observar o comportamento da mistura asfáltica em dada temperatura no tocante ao comportamento de fadiga. Outrossim, quanto mais inclinada a reta, acarreta um valor maior de E”, o que traduz em um comportamento menos elástico (Fontes, 2019). Do ponto de vista prático, essa característica é propícia para o aparecimento de patologias, como as trincas. Analisando as curvas obtidas no Plano Cole-Cole, o Concreto Asfáltico (CA) obteve um valor máximo de E’’ de 50,96MPa, enquanto a mistura SMA tem um resultado de 150,96MPa.

Figura 5.14: Plano Cole-Cole

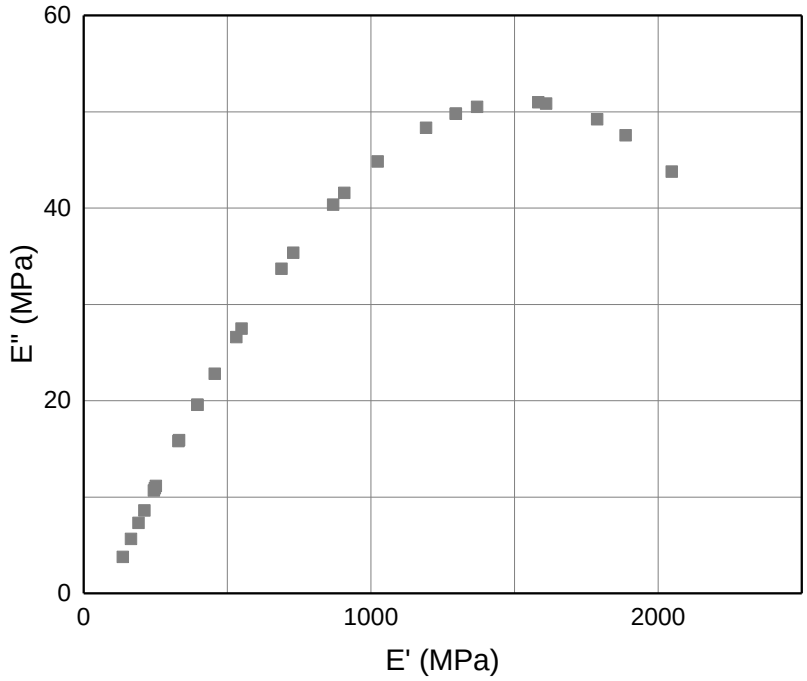
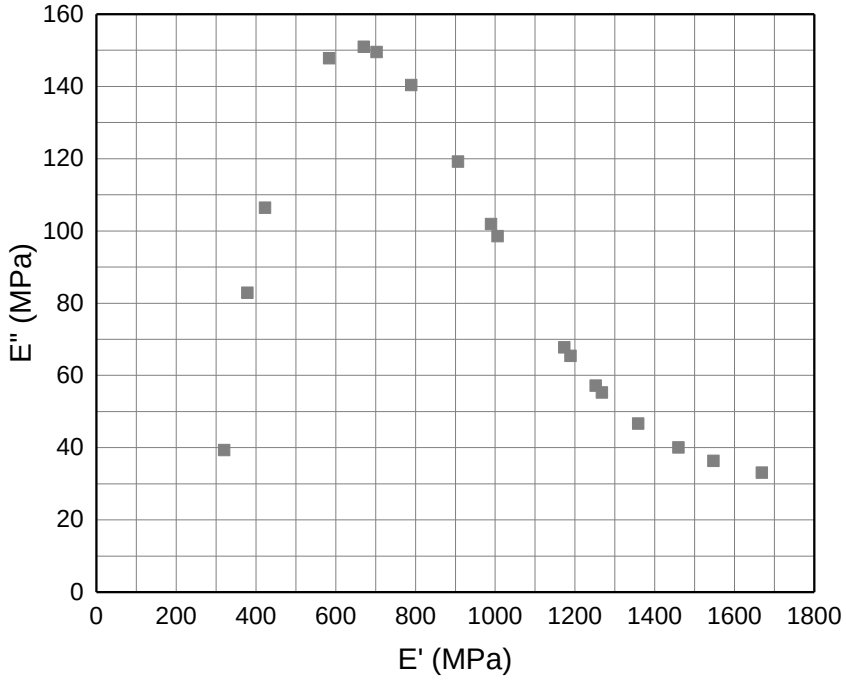


Figura 5.15: Plano Cole-Cole (Mistura SMA)



CAPÍTULO 6

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

6.1 CONCLUSÕES

O trabalho em pauta teve como objetivo central validar os dados experimentais das misturas do tipo Concreto Asfáltico (CA) e SMA, mediante aplicação do modelo reológico de Huet-Sayegh.

O desenvolvimento da pesquisa permitiu concluir os seguintes pontos:

a) O Agregado Sinterizado de Argila Calcinada (ASAC) mostrou-se um agregado graúdo promissor, devido a altos valores de Módulo Dinâmico, sobretudo nas misturas SMA;
b) O ajuste de curva realizado com os dados experimentais confirmou a aplicabilidade do modelo reológico de Huet-Sayegh para determinação do comportamento viscoelástico linear, com a faixa de temperaturas e frequências adotadas;
c) A utilização do modelo reológico em projetos de pavimentos poderia ser adotada, pois, em regra, os experimentos são conduzidos em uma série de temperaturas e frequências limitadas. Portanto, os parâmetros físicos podem ser ajustados de acordo com os resultados disponíveis visando um modelo que represente de forma mais satisfatória a realidade;
d) A curva mestra, em ambos os tipos de mistura, permitiu obter valores do módulo complexo para baixas frequências ou extremamente altas, por conseguinte, resultados que dificilmente seriam obtidos experimentalmente, em razão da limitação dos equipamentos;
e) O módulo dinâmico determinou-se de forma diferente. Para o concreto asfáltico, empregou-se a flexão a quatro pontos, por meio de vigas prismáticas. No caso da mistura SMA, usaram-se corpos de prova cilíndricos. No entanto, mesmo com geometrias diferentes, foi possível avaliar-se o comportamento mecânico e ter-se convergência dos resultados.
f) O ajuste teórico (modelo de Huet-Sayegh) com os dados experimentais mostrou-se satisfatório, confirmando a determinação do comportamento viscoelástico.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Fundamento na pesquisa, desenvolvida na presente dissertação de mestrado e na literatura, sugere-se:

a) Analisar outros tipos de composições asfálticas com distintos materiais, segundo os parâmetros reológicos, de modo que se valide o Modelo Reológico Linear Huet-Sayegh;
b) Empregar outros modelos viscoelásticos, tais quais: Maxwell, Kelvin, Burguers, 2S1PD1, GHS;
c) Comparar modelos viscoelásticos, com o fito de verificar o melhor ajuste de curvas, baseado no coeficiente de determinação (R^2).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP N° 19.** Brasília: ANP, 2005.

ALMEIDA, Adosindro Joaquim de; MOMM, Leto; TRICHÊS, Glicério; SHINOHARA, Keyla Junko. Evaluation of the influence of water and temperature on the rheological behavior and resistance to fatigue of asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 401–409, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.030.

ALMEIDA, R. N. **O Método dos Mínimos Quadrados: Estudo e Aplicações para o Ensino Médio.** 2015. Dissertação (Mestrado em Matemática). Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2015.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T342:** Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA). Estados Unidos da América: AASHTO, 2009.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **C127:** Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. Estados Unidos da América: ASTM, 2015.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **C128:** Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. Estados Unidos da América: ASTM, 2015.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **C131:** Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. Estados Unidos da América: ASTM, 2014.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **C136/C136M:** Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Estados Unidos da América: ASTM, 2014.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **C188:** Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. Estados Unidos da América: ASTM, 2017.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **D2041/D2041M:** Standard Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures. Estados Unidos da América: ASTM, 2019.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **D2726:** Standard Test Method for Bulk Specific Gravity and Density of Non-Absorptive Compacted Bituminous Mixtures. Estados Unidos da América: ASTM, 2005.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING MATERIALS. **D3497:** Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures. Estados Unidos da América: ASTM, 2003.

ASPHALT INSTITUTE. **The Asphalt Handbook:** MS-4. Estados Unidos da América: Asphalt Institute, 2007.

AURANGZEB, Qazi; OZER, Hasan; L.AL-QADI, Imad; HILTON, Harry H. Viscoelastic and Poisson's ratio characterization of asphalt materials: critical review and numerical simulations. **Materials and Structures**, v. 50, n. 1, p. 1–12, 2017. DOI: http://doi.org/10.1617/s11527-016-0881-x.

BARBOSA, Cláudia Ávila. **Misturas do Tipo Stone Matrix Asphalt (SMA) com Agregados Alternativos, Fibra Do Curauá e Nanomaterial.** 2016. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2016.

BARKSDALE, R. G. Compreensive Stress Pulse Times in Flexible Pavements for Use in Dynamic Testing. **Highway Research Record**, v. 345, p. 32-44, 1971.

BARRA, Breno; MOMM, Leto; GUERRERO, Yader; AL-QURESHI, Hazim Ali; MIKOWSKI, Alexandre; MICHELS, Rodrigo. Temperature implications on rheological-mechanical behavior and design of high modulus dense asphalt mix. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 135–144, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.037

BARRA, Breno; MOMM, Leto; GUERRERO, Yader; BERNUCCI, Liedi Bariani. Fatigue behavior of dense asphalt mixes in dry and environmental-conditioning states. **Construction and Building Materials**, v.29, p. 128-134, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.003.

BARRA, Breno; NECKEL, Glauciano; MOMM, Leto; GUERRERO, Yader; MIKOWSKI, Alexandre; MELO, João Victor Staub de; NGUYEN, Mai-Lan; HUGHES, Gary B. Design parameters and associated quantitative damage analyses of an asphalt concrete airfield runway. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120809, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120809.

BETTEN, Josef. **Creep Mechanics**. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. p. 367.

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

CAVALCANTE, Daiana Góes; CRISÓSTOMO, Pedro Henrique da Silva; SILVA, Lourdes Cristina Porfirio; SOUZA, Reginaldo José Queiroz de; GUIMARÃES, Daniela Muniz D'Antona; FROTA, Consuelo Alves da. Levantamento Visual de Patologias na Cidade de Manaus-Am. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.19, p. 77-87, 2012. Disponível em: http://www.editoradunas.com.br/revistatpec/Art7_N19.pdf. Acesso em: 19 agosto 2020.

CHOUDHARY, Jayvant; KUMAR, Brind; GUPTA, Ankit. Utilization of solid waste materials as alternative fillers in asphalt mixes: A review. **Construction and Building**

Materials, n. 117271, v. 234, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117271.

CHUPIN, O.; CHABOT, A; PIAU, J.-M; DUHAMEL, D. Influence of sliding interfaces on the response of a layered viscoelastic medium under a moving load. **International Journal of Solids and Structures**, v. 47, n. 25–26, p. 3435–3446, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.08.020.

CHUPIN, O.; MARTIN, A; PIAU, J.-M; HICHER, P.-Y. Calculation of the dynamic response of a viscoelastic railway structure based on a quasi-stationary approach. **International Journal of Solids and Structures**, v. 51, n. 13, p. 2297–2307, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.02.035.

COLPO, Gracieli Bordin. **Análise de fadiga de misturas asfálticas através do ensaio de flexão em viga quatro pontos**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES. **Pesquisa CNT de Rodovias.** Brasília: CNT, 2019.

CUNHA, M. J. A. **Comportamento mecânico de misturas asfálticas com agregados sinterizados de argila calcinada**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014.

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). **Revista Matéria**, v. 23. n. 1, 2018. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0306, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-EM 367:** Material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro: DNER, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 031:** Pavimentos flexíveis – concreto asfáltico – especificação do serviço. Rio de Janeiro: DNER, 2006a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **DNER-ES 043:** Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro: DNER, 1995.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro: DNIT, 2006b.

FINDLEY, William Nichols.; LAI, James S; ONARAN, Kasif. **Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials:** with and introduction to linear viscoelasticity. Estados Unidos da América: North Holland, 1976. p. 380.

FONTES, L. P. T. L. **Optimização do desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha para reabilitação de pavimentos.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Braga, 2009.

FROTA, C. A., NUNES, F. R.G, SILVA, C. L. Estudo da Substituição do Seixo por Agregados Sintéticos de Argila Calcinada em Misturas Asfálticas. *In:* Reunião de Pavimentação Urbana, 12, 2003, Aracaju. **Anais** [...] Aracaju: RAPv, 2003.

FROTA, C. A., SILVA, C. L., NUNES, F. R.G. Análise do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas Confeccionadas com Agregados Sintéticos de Argila Calcinada. *In*: Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos, V, 2006, Recife. **Anais** [...] Recife: Políticas e Tecnologias, 2006b.

FROTA, C. A., SILVA, C. L., NUNES, F. R.G. Estudo da Exploração de Argila para Fins de Calcinação, Visando a Construção de Pavimentos Na Província Petrolífera de Urucu AM-Brasil. *In*: Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos, V, 2006, Recife. **Anais** [...] Recife: Políticas e Tecnologias, 2006a.

FROTA, C. A., SILVA, C. L., SANTOS, M. G. R., PEREIRA, R. V. S. Caracterização de Solos para Obtenção de Agregados Sintéticos de Argila Calcinada. *In*: Reunião Anual de Pavimentação, 35, 2004, Rio de Janeiro. **Anais** [...] Rio de Janeiro: RAPv, 2004.

FROTA, C. A; NUNES, F. R. G; SILVA, C. L; MELO, D. M; SANTOS, M. G. R. Desempenho mecânico de misturas asfálticas confeccionadas com agregados sintéticos de argila calcinada. **Cerâmica**, v. 53, n. 327, p. 255–262, 2007. DOI: https://doi.org/10.1590/S0366-69132007000300007.

HUANG, Yang H. **Pavement Analysis and Design**. Estados Unidos: Pearson, 2004. 2 ed. 775 p.

HUET, Chistian. **Etude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbones**. Tese (Doutorado em Ciências), Faculdade de Ciências de Paris, França, Paris, 1963.

ISLAM, Shahidul; BUTTLAR, William G. Effect of Pavement Roughness on User Costs. **Transportation Research Record**, Washington, n. 2285, p. 47–55, 2012. DOI: http://dx.doi.org/10.3141/2285-06.

KIM, Young Richard. **Modeling of Asphalt Concrete**. Estados Unidos: McGraw-Hill Professional Publishing, 2007. 460 p.

LEANDRI, P.; LOSA, M.; DI NATALE, A. Field validation of recycled cold mixes viscoelastic properties. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 275–282, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.028.

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

MALCOM, Williams; LANDEL, Robert; FERRY, John. The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids. **Journal of**

the American Chemical Society, v.77, n. 14, p. 3701–3707, 1955. DOI: https://doi.org/10.1021/ja01619a008.

MELLO, Luiz Guilherme Rodrigues de. **A teoria do dano em meio contínuo no estudo da fadiga em misturas asfálticas**. 2008. Tese (Doutorado em Geotecnia) —Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

MELO, João Victor Staub de. **Desenvolvimento e estudo do comportamento reológico e desempenho mecânico de concretos asfálticos modificados com nanocompósitos**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

MINHOTO, Manuel Joaquim de Costa. **Consideração da temperatura no comportamento à reflexão de fendas dos reforços de pavimentos rodoviários flexíveis**. 2005. 368 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2005.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. **Designing and Constructing SMA Mixtures**: State of the Practice. Estados Unidos da América: Quality Improvement Series 122, 2002

NAVARRO, Rômulo Feitosa. Modelos viscoelásticos aplicáveis a materiais reais: uma revisão. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**. v. 12, n. 1, p. 1-20, 2017. Disponível em: http://www2.ufcg.edu.br/revista-remap/index.php/REMAP/article/download/597/423. Acesso em: 07 jan 2020.

NORME EUROPÉENNE. **EN 12697-26:** Bituminous Mixtures: Test Methods for Hot Mix Asphalt, Part 26: Stiffness. Brussels: CEN, 2014.

NUNES, Fábio Roberto Garcia; SILVA, Cleudinei Lopes da; FROTA, Consuelo Alves da. Obtenção do Módulo Dinâmico de Misturas Asfálticas com Agregados Sintéticos de Argila Calcinada, Utilizando o Ensaio de Compressão Diametral. **Transportes**, v. 17, n. 1, p. 5-13, 2008. DOI: https://doi.org/10.14295/transportes.v17i1.71.

OLARD, François; BENEDETTO, Hervé Di. General "2S2P1D" model and relation between the linear viscoelastic behaviors of bituminous binders and mixes. **International Journal of Road Materials and Pavement Design**, v. 4, p. 185-224, 2003. DOI: https://doi.org/10.1080/14680629.2003.9689946.

OTTO, Gustavo Garcia; SIMONIN, Jean-Michel; PIAU, Jean-Michel; COTTINEAU, Louis-Marie; CHUPIN, Olivier; MOMM, Leto; VALENTE, Amir Mattar. Weigh-in-motion (WIM) sensor response model using pavement stress and deflection. **Construction and Building Materials**, v. 156, n. 15, p. 83-90, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.085.

PEREIRA, Mariana Minitti Leite. **Estudo de mistura asfáltica de módulo elevado para camadas de base de pavimento**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade São Paulo, São Paulo, 2012.

PEREIRA, R. V. S. **Estudo de Agregados de Argila Calcinada para Construção de Pavimentos, Visando à Preservação de Matérias-primas Naturais**. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2004.

PÉREZ, I.; PASANDÍN, A. R.; MEDINA, L. Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates. **Materials & Design**, v. 36, p. 840–846, 2012. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.12.058.

PRETESEILLE, M.; LENOIR, T.; HORNYCH, P. Sustainable upgrading of fine-grained soils present in the right-of-way of High Speed Rail projects. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 48–53, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.022.

PRONK, Adriaan C. The Huet-Sayegh Model: A simple and excellent rheological model for master curves of asphalt mixes. **Asphalt Concrete**, p. 73-82, 2003. DOI: https://doi.org/10.1061/40825(185)8.

QUININO, Roberto C; REIS, Edna A; BESSEGATO, Lupércio F. Using the Coefficient of Determination R^2 to Test the Significance of Multiple Linear Regression. **Teaching Statistics: An International Journal for Teachers**, v. 35, n. 2, p. 84-88, 2013.

ROCHA FILHO, Daniel. **Viabilidade econômica da produção do ASAC para uso no concreto asfáltico.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2020.

SARGES, Roseane Ribeiro; NOGUEIRA, Afonso César Rodrigues; FROTA, Consuelo Alves da; SILVA, Cleudinei Lopes da. Depósitos Argilosos Cenozóicos do Estado do Amazonas: Utilização como Agregados de Argilas Calcinadas para Pavimentações na Região Amazônica. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research médium**, v. 1, n. 1, p. 33 – 49, 2010.

SAYEGH, G: **Contribution à l'étude des propriétés viscoélastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux.** Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Ciências, Paris, 1965.

SHAMES, Irving Herman.; COZZARELLI, Francis A.; **Elastic and inelastic stress analysis**. Nova Jersey: CRC, 1997. p. 738.

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

SILVA, A. C. L., FROTA, C. A. Estudo Da Viabilidade Econômica Para Produção de Agregado Sinterizado de Argila Calcinada. **Cerâmica**, v. 59, n. 352, p. 508-517, 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132013000400004.

SILVA, A. C. L.; FROTA, C. A. Análise Teórico-Experimental do Módulo Dinâmico de Compósitos Asfálticos Com Argila Calcinada. **Cerâmica**, v. 62, n. 364, p. 392-399, 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/0366-69132016623642117.

SILVA, C. L, NUNES, F. R. G., FROTA, C.A. Obtenção Do Módulo Dinâmico de Misturas Asfálticas Com Agregados Sintéticos de Argila Calcinada (ASAC) *In:* Reunião de Pavimentação Urbana, 15, 2008, Salvador. **Anais** [...] Salvador: RAPv, 2008.

SILVA, C. L. SILVA, A. C. L., FROTA, C. A. Módulo Dinâmico de Compósitos Asfálticos Com Agregados Sinterizados de Argila Calcinada. **Cerâmica**, v. 60, n. 353, p. 10-21, 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132014000100003, 2014.

SILVA, C. L., MELO, D. M, SANTOS, M. G. R., FROTA, C. A. Evolução do Processo Produtivo na Obtenção de Agregados Sintéticos de Argila Calcinada Para a Região Amazônica. *In*: Jornadas Luso-Brasileiras de Pavimentos, VII, 2008. São Paulo. **Anais** [...] São Paulo: 2008.

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. 5, p. 281-288, 2015.

SILVA, C. L; SILVA, A. C. L; FROTA, C. A. Módulo dinâmico de compósitos asfálticos com agregados sinterizados de argila calcinada, **Cerâmica**, v. 60, n. 353, p. 10–21, 2014. DOI: https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000100003.

SILVA, Carmem Lúcia.; SILVA, Cleudinei Lopes da; REBELO, Eude de Paula; FROTA, Consuelo Alves da. Processo produtivo de agregados sinterizados de argila calcinada para a região Amazônica. **Estudos Tecnológicos (Online)**, v. 5, p. 374-388, 2010. DOI: https://doi.org/10.4013/ete.2009.53.09

SILVA, Cleudinei Lopes da. **Determinação do Módulo Dinâmico de Misturas Asfálticas Confeccionadas com ASAC**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2011.

SILVA, Cleudinei Lopes da; FROTA, Hidembergue Ordozgoith da; FROTA, Consuelo Alves da. Sintered Calcined Clay as an Alternative Coarse Aggregate for Asphalt Pavement Construction. **Open Journal of Civil Engineering**, v. 5, p. 281 – 288, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.4236/ojce.2015.53028.

SPÍNOLA, Juliano Rodrigues; SILVA, Antônio Cleiton Lopes da; PEREIRA, Alex Gomes; FROTA, Consuelo Alves da. Flexural Tensile Strength of Asphalt Composites with Calcined Clay under Four-Point Bending. **American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)**, v. 61, n. 1, p. 119–134, 2019. Disponível em: https://asrjetsjournal.org/index.php/American_Scientific_Journal/article/view/5335. Acesso em: 05 out 2020.

TANGELLA, S. C. S. Rao.; CRAUS, J.; DEACON, J. A.; MONISMITH, C. L. **Summary Report on Fatigue Response of Asphalt Mixtures.** Berkeley: University of California, 1990.

TIMOSHENKO, Stephen; GOODIER, James Norman. **Theory of Elasticity**. Estados Unidos: Penguin Books Ltd, 2017. 506 p.

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

VALENÇA, P. M. A., FROTA, C.A., BERDOLDO, R. A., CUNHA, T. M. F. 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**, v. 20, n. 2, p. 11–19, 2011.

VENDRUSCULO, Jennifer Ilha; PASCOAL, Paula Taiane; SANTOS, Thaís Aquino; BUENO, Lucas Dotto; PINHEIRO, Rinaldo José Barbosa. Comparação entre Pavimentos Dimensionados com os Métodos do DNER (1981) E MeDina (2018): Estudo De Caso Com Solos De Subleito Da Cidade De Santa Maria/Rs. *In:* Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, 32, 2018, Gramado. **Anais** [...] Gramado: ANPET, 2018, p. 1190 – 1199.

YAO, Bo; CHENG, Gang; WANG, Xiao; CHENG, Cheng; LIU, Songyu. Linear viscoelastic behaviour of thermosetting epoxy asphalt concrete - Experiments and modeling. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 540–547, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.066.

ZBICIAK, A.; MICHALCZYK, R. Characterization of the complex moduli for asphalt-aggregate mixtures at various temperatures. **Procedia Engineering**, v. 91, p. 118–123, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.032.