



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES

BEATRIZ CHAGAS SILVA GOUVEIA

MÉTODOS DE PREVISÃO E DETERMINAÇÃO DE MÓDULO DINÂMICO DE
MISTURAS ASFÁLTICAS APLICADAS EM RODOVIAS BRASILEIRAS

FORTALEZA

2016

BEATRIZ CHAGAS SILVA GOUVEIA

MÉTODOS DE PREVISÃO E DETERMINAÇÃO DE MÓDULO DINÂMICO DE
MISTURAS ASFÁLTICAS APLICADAS EM RODOVIAS BRASILEIRAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de Concentração: Infraestrutura de Transportes.

Orientador: Prof. Jorge Barbosa Soares, Ph.D.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G738m Gouveia, Beatriz Chagas Silva.
Métodos de previsão e determinação de módulo dinâmico de misturas asfálticas aplicadas em rodovias
brasileiras / Beatriz Chagas Silva Gouveia. – 2016.
97 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. Jorge Barbosa Soares.

1. Mistura Asfáltica. 2. Módulo Dinâmico. 3. Rigidez. I. Título.

CDD 388

BEATRIZ CHAGAS SILVA GOUVEIA

MÉTODOS DE PREVISÃO E DETERMINAÇÃO DE MÓDULO DINÂMICO DE
MISTURAS ASFÁLTICAS APLICADAS EM RODOVIAS BRASILEIRAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes. Área de Concentração: Infraestrutura de Transportes.

Aprovada em: 31/10/2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Jorge Barbosa Soares, PhD (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profª. Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, PhD
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Francisco Thiago Sacramento Aragão, PhD
Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)

Esta dissertação é fruto de uma semente de raiz quadrada plantada ainda na minha infância, orgulhosamente, pelo meu querido pai, a quem dedico com amor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente...

Minha sincera gratidão a todas as pegadas que passaram pelo meu caminho.

Ao Daniel e à Lica, pela minha vida e pelos ensinamentos sobre amor, respeito e retidão, e também pelas lições de equações diferenciais e bordados.

Ao Manu, pelo amor e otimismo incondicionais.

À Diana e à Helen, por me ensinarem diariamente que a vida é bela.

Ao Professor Jorge, pela confiança em mim depositada, e por extrair de mim habilidades que eu mesma desconhecia.

Ao Chico Thiago, por todo o orgulho que eu sinto de sua trajetória, e pela imensa satisfação em tê-lo na minha banca.

Aos Professores Verônica e Manoel, pelos valiosos ensinamentos, e em nome dos quais agradeço a todos os demais professores do PETRAN.

Aos colegas de jornada, à Juceline pela amizade e suporte fundamental no laboratório, ao Jorge Luís pelas aulas particulares de UTM e imenso apoio na reta final, à Lilian e ao Johnny, pela ajuda precisa e preciosa com o reômetro, à Dani pela simples alegria de estar perto, ao Fernando pelo apoio operacional, à Annie e ao Jardel pela disponibilidade em ajudar. À Alessandra e ao Reuber, pela amizade e pelos dados fornecidos. E a todos os demais que me doaram algum tempo e conhecimento.

Ao Laboratório de Pavimentação da UFRGS e ao Grupo CCR, por todos os corpos de prova moldados e enviados ao LMP/UFC.

Ao Professor Luciano Specht pelos dados e amostras disponibilizados.

À Imperpav, pelo auxílio generoso na extração dos ligantes.

Aos companheiros do DNIT, especialmente ao Nelson, pelo incentivo diário e pela paciência nas minhas ausências.

“Quer-se resolver o enigma do mundo?
Só se o resolve, quando, em
contemplação, se conhece o ser humano,
pois ele próprio é a solução do enigma do
mundo.” (Rudolf Steiner)

RESUMO

O módulo dinâmico de uma mistura asfáltica é a propriedade mais utilizada em países avançados como parâmetro de rigidez para o dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos, e ainda tem sido utilizada como um indicador de previsão de desempenho. Apesar de bem estabelecido internacionalmente, ainda não há, no Brasil, normatização de ensaio para a determinação do módulo dinâmico, e ele não é considerado nos métodos empíricos oficiais de dimensionamento. Tendo consciência da importância do conhecimento deste indicador de rigidez das misturas, esta pesquisa se propôs a validar modelos de previsão encontrados na literatura a partir de parâmetros conhecidos de misturas típicas, de maneira que essa propriedade possa ser determinada e conhecida com uma boa aproximação. Ainda que seja determinado através de um modelo, espera-se que seja facilitada a aplicação, no Brasil, de métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento de estruturas de pavimentos que considerem o comportamento viscoelástico dos materiais asfálticos. Para validar os modelos semi-empíricos, foram realizados ensaios laboratoriais para caracterização de 6 misturas asfálticas, com a determinação do módulo dinâmico. Foram incluídos, ainda, dados secundários de 18 misturas. Realizadas as validações dos modelos existentes, foi proposta a calibração de um dos modelos testados, resultando numa equação simplificada e bem ajustada aos dados analisados.

Palavras-chave: Misturas Asfálticas. Rigidez. Módulo Dinâmico.

ABSTRACT

The dynamic modulus is a fundamental property that defines stiffness of Hot-Mix Asphalt (HMA), and is a primary material property that serves as an input in mechanistic-empirical pavement design methods. Although well-established worldwide, the dynamic modulus, $|E^*|$, does not have a standard yet in Brazil. Official design methodologies for both new and rehabilitation pavements do not consider this property. As a new national pavement design methodology is under construction, $|E^*|$ may be considered as the stiffness parameter of HMA. However, the experimental test to determine $|E^*|$ is still not compatible with most national facilities. So the objective of this research is to verify alternative methodologies to the traditional laboratory test. An alternative is to determine $|E^*|$ master curve through empirical equations, such as Witczak 1-40D and Hirsch models. In the pursuit of this objective, lab tests were performed on 6 HMA mixtures to evaluate the $|E^*|$ according to AASHTO T 342-11. All 6 mixtures, as well as 18 mixtures from secondary data, had their $|E^*|$ master curves modeled through Hirsch, Witczak 1-40D, and other equations from the open literature. Experimental master curves were compared to the modeled master curves, in order to test their accuracy. A calibration of one of the evaluated predictive equations was then proposed, which resulted in a simplified equation, well-adjusted to the analyzed data.

Keywords: Hot Mix Asphalt. Stiffness. Dynamic Modulus.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Representação esquemática das técnicas de previsão de módulo dinâmico	16
Figura 2 –	Desenho esquemático do comportamento viscoelástico sob carregamento harmônico de compressão, adaptado de Witzak <i>et al.</i> (2002)	21
Figura 3 –	Plano complexo, adaptado de Kim (2009)	22
Figura 4 –	Representação esquemática do ensaio de módulo dinâmico por compressão uniaxial	24
Figura 5 –	Desenho esquemático da camada asfáltica e as geometrias dos corpos de prova.....	25
Figura 6 –	Detalhe do corpo de prova (a) e direção do carregamento (b) no ensaio de módulo dinâmico por compressão diametral, em Kim (2009)	26
Figura 7 –	Resultados obtidos para o módulo dinâmico em uma mistura, por compressão diametral e compressão axial, em Babadopulos <i>et al.</i> (2014).....	28
Figura 8 –	Exemplo de trasladação horizontal e construção de curva de módulo dinâmico, em Bernucci <i>et al.</i> (2010)	29
Figura 9 –	Exemplo de gráfico <i>Cole-Cole</i> e espaço <i>Black</i> , adaptado de Kim (2009)	32
Figura 10 –	Esquema de aplicação de tensão de cisalhamento na amostra de ligante, adaptado de <i>Pavement Interactive</i> (2016)	33
Figura 11 –	Composição volumétrica típica de misturas asfálticas densas, conforme dados de NCHRP (2011)	34
Figura 12 –	Vazios da mistura asfáltica, adaptado de NCHRP (2011).....	35
Figura 13 –	Teor de ligante efetivo e teor de ligante absorvido, adaptado do NCHRP (2011)	37
Figura 14 –	Vazios do agregado mineral – VAM, é composto do ligante (área preta), mais os vazios de ar (área branca), adaptado de NCHRP (2011).....	38
Figura 15 –	Principais parâmetros volumétricos das misturas asfálticas, adaptado de <i>Pavement Interactive</i> (2016).....	39
Figura 16 –	Desenho esquemático da função sigmoideal, adaptado de Garcia e Thompson (2007).....	41
Figura 17 –	Fluxograma geral das atividades realizadas	55
Figura 18 –	Distribuição granulométrica	58

Figura 19 – CPs das misturas 1 e 4, preparadas para o ensaio de módulo dinâmico....	59
Figura 20 – Esquema de montagem dos LVDTs	60
Figura 21 – Prensa hidráulica UTM-25 utilizada nos ensaios	60
Figura 22 – Amostra de CAP submetida ao <i>frequency sweep</i> no <i>DSR AR-2000</i>	65
Figura 23 – Representação esquemática dos processos de extração e recuperação do ligante, adaptado de Oliveira (2014)	68
Figura 24 – Linha de regressão linear vs linha de igualdade, adaptado de El-Badawy <i>et al.</i> (2012).....	70
Figura 25 – Curvas mestras das misturas – $ E^* $ vs frequência reduzida.....	72
Figura 26 – Ângulo de fase vs frequência reduzida	73
Figura 27 – Resultados plotados no espaço <i>Black</i>	73
Figura 28 – Curvas mestras das misturas M. 1 e M. 2.....	74
Figura 29 – Curvas mestras das misturas M. 1 e M. 2.....	74
Figura 30 – Curvas mestras dos ligantes – $ G^* $ vs frequência reduzida.....	76
Figura 31 – Ângulos de fase vs frequência reduzida	76
Figura 32 – $ E^* $ medido vs $ E^* $ Witzcak, para os dados primários (112 pontos).....	78
Figura 33 – $\text{Log}(E^*)$ medido vs $\text{Log}(E^*)$ Witzcak, para o conjunto de dados primários e secundários (408 pontos)	78
Figura 34 – $ E^* $ medido vs $ E^* $ Hirsch, para os dados primários (112 pontos)	80
Figura 35 – $\text{Log}(E^*)$ medido vs $\text{Log}(E^*)$ Hirsch, para o conjunto de dados primários e secundários (408 pontos).....	80
Figura 36 – $ E^* $ medido vs $ E^* $ Mateos e Soares, para os dados primários (112 pontos)	81
Figura 37 – $\text{Log}(E^*)$ medido vs $\text{Log}(E^*)$ Mateos e Soares, para o conjunto de dados primários e secundários (408 pontos).....	81
Figura 38 – $ E^* $ medido vs $ E^* $ Sakhaeifar <i>et al.</i> , para os dados primários (112 pontos)	82
Figura 39 – $\text{Log}(E^*)$ medido vs $\text{Log}(E^*)$ Sakhaeifar <i>et al.</i> , para o conjunto de dados primários e secundários (408 pontos).....	82
Figura 40 – $ E^* $ medido vs $ E^* $ previsto para os 4 modelos testados.....	83
Figura 41 – Ajuste dos dados de calibração do modelo de Mateos e Soares (408 pontos).....	85
Figura 42 – Exemplo de planilha para cálculo de $ E^* $ utilizando a equação proposta .	86

Figura 43 – Sugestão de planilha para organização dos dados de calibração da equação proposta 87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Frequências e temperaturas das normas norte americanas	24
Tabela 2 –	Principais parâmetros da norma EN 12697-26:2012.....	24
Tabela 3 –	Coeficientes para cálculo de $ E^* $ e ν , adaptado de Kim <i>et al.</i> (2004)	27
Tabela 4 –	Constantes da equação de Arrhenius (6) encontradas na literatura, adaptada de Coutinho <i>et al.</i> (2010).....	30
Tabela 5 –	Constantes da equação de WLF (7) encontradas na literatura, adaptada de Coutinho <i>et al.</i> (2010).....	31
Tabela 6 –	Teores de ligante admitidos para misturas densas.....	36
Tabela 7 –	VAM mínimo segundo a norma DNIT 031/2006-ES (DNIT, 2006)	38
Tabela 8 –	Modelos históricos de previsão de módulo dinâmico, Bari e Witczak (2006).....	40
Tabela 9 –	Parâmetros requeridos como <i>input</i> nos modelos	53
Tabela 10 –	Matriz experimental dos ensaios de módulo dinâmico	56
Tabela 11 –	Principais características de projeto das misturas.....	58
Tabela 12 –	Tempo de equilíbrio de temperaturas recomendado.....	61
Tabela 13 –	Número total de ciclos por frequência de carregamento	61
Tabela 14 –	Tensões máximas aplicadas.....	62
Tabela 15 –	Constante <i>C</i> de <i>Arrhenius</i>	63
Tabela 16 –	Ligantes caracterizados e suas respectivas misturas.....	65
Tabela 17 –	Parâmetros do <i>strain sweep</i>	66
Tabela 18 –	Deformação controlada adotada no ensaio de varredura de frequência	66
Tabela 19 –	Parâmetros granulométricos e volumétricos das misturas.....	69
Tabela 20 –	Classificação do ajuste de dados, adaptado de Witczak <i>et al.</i> (2002)	70
Tabela 21 –	Coeficientes de ajuste da equação sigmoideal, T_{ref} 20°C.....	72
Tabela 22 –	Indicadores estatísticos reportados na literatura para a equação de Witczak, em escala logarítmica	78
Tabela 23 –	Indicadores estatísticos reportados na literatura para a equação Hirsch, em escala logarítmica	79
Tabela 24 –	Indicadores estatísticos em escala linear	83
Tabela 25 –	Indicadores estatísticos em escala logarítmica	83
Tabela 26 –	Avaliação das retas de regressão	84

Tabela 27 – Avaliação do τ de Kendall.....	84
Tabela 28 – Avaliação das retas de regressão da calibração proposta	85
Tabela 29 – Intervalo dos parâmetros da equação proposta.....	86

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Problema de Pesquisa	17
1.2	Objetivos	18
1.3	Organização do trabalho	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Módulo Dinâmico	20
<i>2.1.1</i>	<i>Determinação Experimental do Módulo Dinâmico de Misturas Asfálticas</i>	23
<i>2.1.2</i>	<i>Princípio de Superposição Tempo-Temperatura</i>	28
2.2	Reologia dos Ligantes	32
2.3	Volumetria de Misturas	33
<i>2.3.1</i>	<i>Volume de Vazios</i>	34
<i>2.3.2</i>	<i>Teor de Ligante</i>	35
<i>2.3.3</i>	<i>Volume Efetivo de Ligante – Vbe</i>	36
<i>2.3.4</i>	<i>Vazios do Agregado Mineral</i>	37
<i>2.3.5</i>	<i>Vazios Preenchidos com Ligante</i>	38
<i>2.3.6</i>	<i>Considerações acerca da Análise Volumétrica</i>	39
2.4	Modelos de Previsão de Módulo Dinâmico de Misturas Asfálticas	39
<i>2.4.1</i>	<i>Witczak 2006</i>	41
<i>2.4.2</i>	<i>Hirsch</i>	43
<i>2.4.3</i>	<i>Experiências de Aplicação, Avaliação e Calibração dos Modelos</i>	44
<i>2.4.3.1</i>	<i>Minnesota, EUA (Clyne et al., 2003)</i>	44
<i>2.4.3.2</i>	<i>Carolina do Norte, EUA (Kim et al., 2005; Sakhaeifar et al., 2015)</i>	45
<i>2.4.3.3</i>	<i>Flórida, EUA (Birgisson et al., 2004 e Yang et al. 2014)</i>	46
<i>2.4.3.4</i>	<i>Louisiana, EUA (Obulareddy, 2006)</i>	47
<i>2.4.3.5</i>	<i>Washington, EUA (Yu e Shen, 2012)</i>	48
<i>2.4.3.6</i>	<i>Idaho, EUA (El-Badawy et al., 2012)</i>	48
<i>2.4.3.7</i>	<i>Arizona, EUA (Biligiri e Way, 2014)</i>	49
<i>2.4.3.8</i>	<i>Argentina (Martinez e Angelone, 2009 e 2010)</i>	49
<i>2.4.3.9</i>	<i>Coréia do Sul (Cho et al., 2010)</i>	50
<i>2.4.3.10</i>	<i>Austrália (Yousefdoost et al., 2013)</i>	50
<i>2.4.3.11</i>	<i>Canadá (Esfandiarpour et al., 2015)</i>	51
<i>2.4.3.12</i>	<i>Espanha (Mateos e Soares, 2015)</i>	51
<i>2.4.3.13</i>	<i>Grécia (Georgouli et al., 2016)</i>	52
<i>2.4.3.14</i>	<i>Outras Considerações</i>	53
3	MATERIAIS E MÉTODOS	55

3.1	Misturas Asfálticas.....	55
3.1.1	<i>Mistura 1 – BR-222</i>	56
3.1.2	<i>Mistura 2 – Trecho experimental Insttale 1</i>	56
3.1.3	<i>Mistura 3 – Trecho experimental Insttale 2</i>	56
3.1.4	<i>Mistura 4 – CCR</i>	57
3.1.5	<i>Mistura 5 – LAPAV</i>	57
3.1.6	<i>Mistura 6 – Mistura de campo do trecho experimental Insttale 1</i>	57
3.1.7	<i>Resumo dos Dados Primários</i>	58
3.2	Ensaio Tradicional de Determinação do Módulo Dinâmico	59
3.2.1.	<i>Construção das Curvas Mestras</i>	62
3.3	Dados Secundários	63
3.3.1	<i>Dados Secundários do LMP/UFC</i>	64
3.3.2	<i>Dados Secundários da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM</i>	64
3.4	Caracterização Reológica dos Ligantes.....	65
3.4.1	<i>Extração e Recuperação de Ligante</i>	67
3.5	Parâmetros Granulométricos e Volumétricos	68
3.6	Avaliação dos Resultados.....	69
4	RESULTADOS.....	72
4.1	Módulo Dinâmico por Compressão Axial.....	72
4.2	Propriedades Viscoelásticas dos Ligantes	75
4.3	Avaliação dos modelos de previsão de módulo dinâmico	77
4.3.1	<i>Modelo Witzak 1-40D</i>	77
4.3.2	<i>Modelo Hirsch</i>	79
4.3.3	<i>Equação de Mateos e Soares (2015)</i>	80
4.3.4	<i>Modelo Simplificado Proposto por Sakhaeifar et al. (2015)</i>	81
4.3.5	<i>Avaliação dos Modelos Aplicados</i>	83
4.3.6	<i>Proposta de Calibração da equação de Mateos e Soares (2015)</i>	84
4.4	Roteiro para calibração sistemática da equação proposta.....	86
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	88
5.1	Conclusões.....	88
5.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	89
	REFERÊNCIAS.....	91

1 INTRODUÇÃO

Um bom projeto de pavimento é aquele que combina os materiais e as espessuras das camadas conforme a rigidez de cada uma dessas camadas, de modo a propiciar uma resposta estrutural do conjunto condizente com as solicitações do tráfego e do meio ambiente (Bernucci *et al.*, 2010). Portanto, o conhecimento da rigidez dos materiais do revestimento e das subcamadas é necessário para possibilitar a análise da estrutura global do pavimento, visto que possibilita o cálculo das respostas estruturais (tensões, deformações e deslocamentos) decorrentes das aplicações do carregamento sobre o sistema.

O módulo dinâmico ($|E^*|$) é um dos parâmetros mais importantes para caracterizar a rigidez de uma mistura asfáltica. Já vem sendo estudado e aplicado no dimensionamento de pavimentos e possui ensaio normatizado há algumas décadas em vários países, desde Estados Unidos e países da Comunidade Europeia, Austrália, China e Argentina.

Essa propriedade (módulo dinâmico) tem sido utilizada como principal parâmetro de rigidez da mistura asfáltica nos métodos de dimensionamento mecanístico-empíricos de pavimentos, a exemplo do guia norte americano *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide* – MEPDG, bem como tem sido avaliada como indicadora de desempenho, relacionando a rigidez da mistura com a deformação permanente e a vida de fadiga, observadas em campo (Witczak *et al.*, 2002; Clyne *et al.*, 2003; Gouveia *et al.*, 2016).

Apesar de bem estabelecido internacionalmente, com ensaios normatizados que datam dos anos 1970, ainda não há no Brasil normatização de ensaio para a determinação do módulo dinâmico, embora iniciativa recente da Comissão de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP) tenha colocado em pauta a produção de tal normativo. Ainda, os métodos de dimensionamento nacionais de novos pavimentos e de reabilitações não fazem uso dessa propriedade como *input*. Isto somado ao custo de aquisição e manutenção dos equipamentos necessários para a realização do ensaio leva a que poucos laboratórios brasileiros sejam hoje capazes de realizar a determinação do módulo dinâmico de misturas asfálticas. Ainda que a comunidade de pavimentação nacional deva trabalhar para transformar esta realidade no menor espaço de tempo possível, é bem provável que este avanço desejável na caracterização de misturas

asfálticas demore a acontecer. E, mesmo num momento futuro de utilização mais difundida do ensaio, é possível que nem todo projeto tenha a caracterização plenamente realizada, como projetos de menor relevância, ou projetos de baixo custo.

Atualmente, há um grande esforço sendo empreendido no Brasil com o objetivo de atualização do método de dimensionamento de pavimentos asfálticos em vigor, que data da década de 1960. Apesar de ainda não definido, dentro do novo método brasileiro, o módulo dinâmico pode eventualmente vir a ser a propriedade de rigidez da camada asfáltica necessária para a análise das tensões e das deformações das estruturas propostas, mesmo que num momento subsequente ao do lançamento do método, previsto para ocorrer num futuro breve. Assim, é importante que o conceito do módulo dinâmico seja cada vez mais difundido no âmbito da pavimentação nacional.

Como será descrito mais adiante, mesmo nos países que adotam o módulo dinâmico como caracterização da rigidez de misturas asfálticas, o ensaio para sua determinação é reconhecidamente demorado, podendo custar até uma semana de trabalho para uma única mistura. Como forma de reduzir o tempo e os custos requeridos para obtê-lo, vários pesquisadores vêm tentando prever o módulo das misturas de maneira semiempírica (Aragão *et al.*, 2010). Essas previsões se baseiam em técnicas que relacionam a rigidez da mistura com suas características volumétricas e com as propriedades dos seus constituintes, esquematicamente apresentadas na Figura 1, e subsequentemente detalhadas no Capítulo 2.

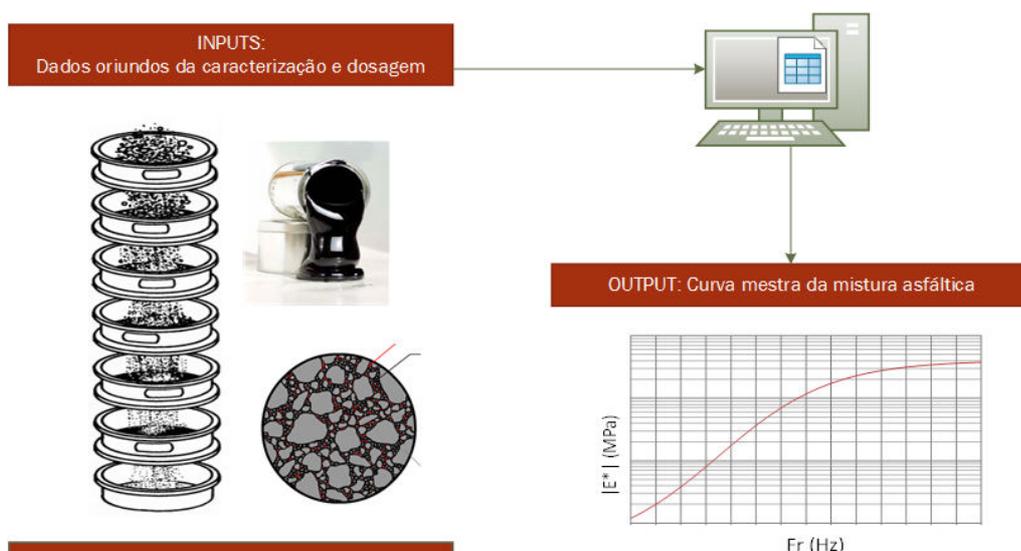


Figura 1: Representação esquemática das técnicas de previsão de módulo dinâmico

Tendo consciência da importância do conhecimento do módulo dinâmico das misturas, nesta pesquisa propõe-se estabelecer um modelo de previsão do mesmo a partir de parâmetros conhecidos de misturas típicas, de maneira que essa propriedade possa ser determinada e conhecida com uma boa aproximação. Ainda que seja determinado por meio de um modelo, espera-se contribuir para a aplicação no Brasil de métodos mecanístico-empíricos de dimensionamento de pavimentos que considerem o comportamento viscoelástico das camadas asfálticas. A importância da consideração da viscoelasticidade está sobretudo na possibilidade de levar em conta a frequência das cargas, ou seja, pavimentos dimensionados em vias urbanas e não urbanas são diferenciados, como de fato são por serem solicitados por veículos com velocidades bem diferentes. Some-se à consideração da frequência da carga, a consideração da temperatura na qual o revestimento se encontra, algo essencial para um material sabidamente com propriedades dependentes da temperatura.

1.1 Problema de Pesquisa

O módulo dinâmico de uma mistura asfáltica é a propriedade mais utilizada em países avançados como parâmetro de rigidez para o dimensionamento de estruturas de pavimentos asfálticos, e ainda tem sido usado como um indicador de previsão de desempenho. No entanto, como a sua determinação por meio de ensaios laboratoriais não é ainda normatizada no Brasil, e não é considerada nos métodos empíricos de dimensionamento oficiais, essa propriedade das misturas asfálticas de rodovias brasileiras é pouco difundida, em especial aquelas não concedidas à iniciativa privada. Some-se o fato de o equipamento necessário à execução do ensaio ser caro e sofisticado (requerendo mão de obra qualificada), o que torna difícil a sua utilização em larga escala neste momento, dado o porte da maioria dos laboratórios nacionais. Destaque-se que as dificuldades mencionadas não deveriam ser impeditivas para o uso do parâmetro, uma vez que investimentos em infraestrutura e em pessoal devem ser prioridade daqueles envolvidos com a pavimentação nacional, até por representarem uma fração pequena dos gastos envolvidos no setor. Contudo, é fato prático que mesmo com um aumento significativo de investimento, o Brasil, em toda a sua extensão territorial, ainda precisará de algum tempo para os devidos ajustes culturais de modo a concretizar uma análise avançada dos pavimentos asfálticos.

Apesar da existência de modelos de previsão de módulo dinâmico consagrados na literatura internacional, não é possível afirmar que estes modelos são aplicáveis para previsão de módulo dinâmico de misturas brasileiras. Os modelos existentes foram criados a partir de pesquisas que se utilizaram de dados de misturas com características diferentes das misturas locais, por exemplo, origem dos ligantes, características mineralógicas dos agregados e procedimentos de dosagem distintos.

Além disso, não é possível, através dos protocolos de ensaio tradicionais, a obtenção experimental do módulo dinâmico de amostras extraídas de camadas asfálticas aplicadas em campo. Isto porque a altura necessária aos corpos de prova é superior àquela das camadas asfálticas comumente aplicadas, especialmente em pavimentos brasileiros.

1.2 Objetivos

É objetivo geral desta pesquisa avaliar metodologia alternativa ao ensaio de módulo dinâmico de misturas asfálticas, tradicionalmente realizado seguindo protocolo demorado e em equipamento sofisticado.

São objetivos específicos:

- a) Avaliar a aplicabilidade de modelos de previsão de módulo dinâmico consagrados na literatura internacional para misturas asfálticas a partir de propriedades dos seus constituintes e da volumetria;
- b) Verificar qual modelo de previsão do módulo dinâmico avaliado é mais adequado, considerando-se características semelhantes às misturas estudadas;
- c) Propor uma calibração dos parâmetros do modelo mais adequado, incluindo um protocolo de ajuste à medida que o banco de dados nacional for incrementado.

1.3 Organização do trabalho

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos, a saber:

- a) O Capítulo 1 apresenta uma contextualização para melhor compreensão do problema de pesquisa, além do próprio problema de pesquisa e os objetivos geral e específicos da pesquisa desenvolvida;
- b) O Capítulo 2 relata a revisão bibliográfica realizada, contendo as principais definições necessárias ao entendimento da aplicação dos modelos de previsão de módulo dinâmico de misturas asfálticas e análise dos resultados decorrentes, assim como os principais normativos e pesquisas desenvolvidas que embasaram a metodologia adotada;
- c) O Capítulo 3 detalha os materiais utilizados na pesquisa – ligantes, agregados e misturas, assim como a metodologia empregada para a caracterização necessária, em especial a caracterização reológica dos ligantes e das misturas;
- d) O Capítulo 4 apresenta os resultados da caracterização dos materiais e da aplicação dos modelos de previsão de módulo dinâmico, assim como uma avaliação do ensaio por compressão diametral. Apresenta ainda uma proposta de equação simplificada para misturas nacionais;
- e) O Capítulo 5 traz as conclusões da pesquisa em face dos resultados obtidos, assim como considerações e sugestões para que trabalhos futuros possam ser desenvolvidos dentro do mesmo tema ou temas correlatos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As estruturas dos pavimentos estão sujeitas a cargas cíclicas provenientes do movimento dos veículos, sendo que a resposta estrutural do revestimento asfáltico é diferente para carregamentos estáticos e cíclicos, portanto sensível a diferentes frequências. Considerando as características do material que compõe esta camada, i.e., a mistura asfáltica, observa-se uma resposta mais próxima da elástica para carregamentos mais rápidos (maior frequência de carregamento), e uma resposta mais próxima da viscosa para cargas lentas ou estáticas (menor frequência de carregamento). Além da frequência de aplicação do carregamento, a temperatura é outro importante fator que influencia no comportamento mecânico das misturas asfálticas.

Esse comportamento mecânico, dependente do tempo e da temperatura, típico de materiais asfálticos é denominado comportamento viscoelástico, para as misturas asfálticas, e comportamento reológico, para os ligantes asfálticos. Para uma correta caracterização do comportamento viscoelástico dos materiais asfálticos, Huang (1993) afirma que é necessária a obtenção de parâmetros compatíveis com o comportamento viscoelástico, permitindo, assim, uma análise adequada das tensões e deformações de uma camada de mistura asfáltica.

O módulo dinâmico é uma propriedade viscoelástica da mistura que, aplicada em equações constitutivas conhecidas, possibilita determinar a resposta do material (deformação) para qualquer histórico de carregamento aplicado. Este parâmetro vem sendo adotado em diversos países como a propriedade fundamental de rigidez das misturas, tanto em análises do comportamento estrutural do pavimento, como em modelagens mais avançadas de desempenho do pavimento (Underwood *et al.*, 2011).

2.1 Módulo Dinâmico

Papazian (1962) foi um dos primeiros pesquisadores a observar o comportamento viscoelástico linear em misturas asfálticas. Ao submeter corpos de prova a tensões senoidais em várias frequências e temperatura controlada, e medir as deformações resultantes, concluiu que os conceitos de viscoelasticidade linear poderiam ser aplicados no estudo dos materiais asfálticos. Para materiais viscoelásticos lineares, a relação entre tensão e deformação sob um carregamento senoidal harmônico (Figura 2) é

definida pelo chamado módulo complexo E^* (Pritz, 1998). E^* é um número complexo que relaciona tensões e deformações em materiais viscoelásticos lineares submetidos a carregamento cíclico continuamente aplicado. É definido como a razão entre a tensão aplicada e a deformação decorrente, para um mesmo tempo e velocidade angular (Equação 1).

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_0 e^{i\omega t}}{\varepsilon_0 e^{i(\omega t - \delta)}} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta + i \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta \quad (1)$$

Onde: σ_0 é a amplitude da tensão de carregamento;

ε_0 é a amplitude da deformação recuperável;

δ é o ângulo de fase;

ω é a frequência angular; e

t é o tempo.

A relação entre as amplitudes de tensão e deformação define o valor absoluto deste parâmetro, $|E^*|$, designado como módulo dinâmico e definido matematicamente na Equação 2 (Papazian, 1962).

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad (2)$$

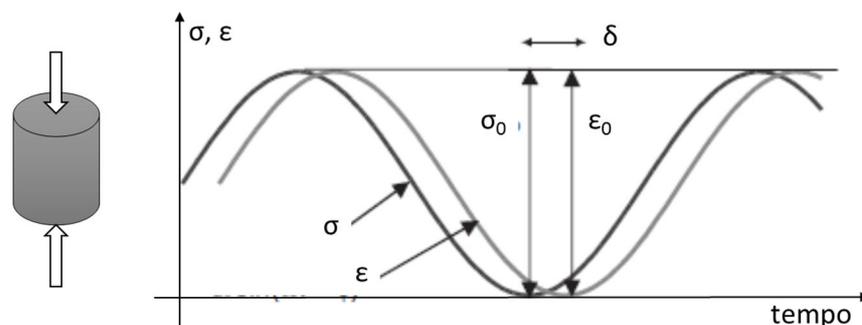


Figura 2: Desenho esquemático do comportamento viscoelástico sob carregamento harmônico de compressão, adaptado de Witczak *et al.* (2002)

No plano complexo, a parte real do módulo complexo também é chamada de módulo de armazenamento (E') e tem relação com a resposta elástica do material, enquanto a parte imaginária, ou módulo de perda (E''), tem relação com a resposta viscosa do material, vide Figura 3.

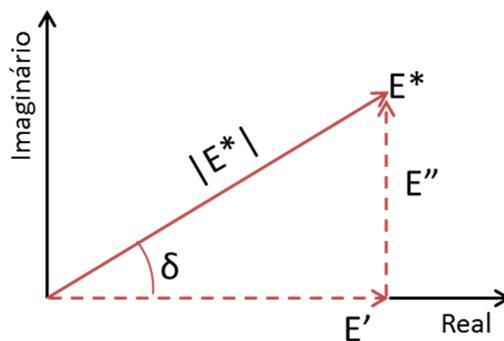


Figura 3: Plano complexo, adaptado de Kim (2009)

Para materiais elásticos, os picos de tensão e deformação coincidem no mesmo instante de tempo. Para os materiais asfálticos, entretanto, a deformação é defasada devido ao seu comportamento viscoelástico. Essa defasagem é associada ao chamado ângulo fase, representado por δ na Figura 2 e na Figura 3. Assim, um $\delta = 0^\circ$ é propriedade de materiais puramente elásticos, e $\delta = 90^\circ$ é propriedade de materiais puramente viscosos (Witczak, 2005). O módulo dinâmico e o ângulo de fase compõem as propriedades viscoelásticas lineares fundamentais, contabilizando os efeitos de diferentes temperaturas e frequências de carregamento neste comportamento.

Já está suficientemente estabelecida a dependência do comportamento do módulo dinâmico das misturas asfálticas em relação à temperatura e frequência (Kim, 2009). A queda do módulo a altas temperaturas e baixas frequências, assim como o seu crescimento em baixas temperaturas e altas frequências, são comportamentos observados e relatados desde as pesquisas mais clássicas (Bonnaure *et al.*, 1977). No entanto, as misturas asfálticas são compostos heterogêneos formados por agregados pétreos, ligante asfáltico (modificado ou não) e ar. Assim, cada componente da mistura, suas propriedades e proporções, influenciam na variabilidade do módulo dinâmico. Proporção de agregado (Bonnaure *et al.*, 1977; Ping e Xiao, 2007), percentual de vazios (Bonnaure *et al.*, 1977; Kim, 2009; Cho *et al.*, 2010; Mateos e Soares, 2014), Tamanho Máximo Nominal do Agregado – TMNA (Mohammad *et al.*, 2007; Robbins, 2009), tensão de confinamento (Birgisson *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2005; Huang *et al.*, 2008; Nega *et al.*, 2015), distribuição granulométrica (Andrei *et al.*, 1999; Birgisson *et al.*, 2004; Bari e Witczak, 2006; Almeida Junior, 2016), percentual de finos (Andrei *et al.*, 1999; Christensen *et al.*, 2003; Bari e Witczak, 2006; Kim, 2009), intertravamento do esqueleto mineral (Christensen *et al.*, 2003; Sakhaeifar *et al.*, 2015), propriedades de forma dos agregados

(Singh *et al.*, 2012; Pazos, 2015), teor de ligante (Andrei *et al.*, 1999; Christensen *et al.*, 2003; Bari e Witczak, 2006; Mateos e Soares, 2014), *Performance Grade* – PG, do ligante (Bari e Witczak, 2006; Mohammad *et al.*, 2007; Huang *et al.*, 2008; Robbins, 2009), modificações do ligante (Kim *et al.*, 2005; Aragão, 2007; Al-Katheeb *et al.*, 2006; Onofre, 2012; Nega *et al.*, 2015; Bruxel, 2015; Almeida Junior, 2016), teor de fresado (Mohammad *et al.*, 2007; Esfandiarpour *et al.*, 2015), envelhecimento (Babadopulos, 2014; Oliveira, 2014), geometria do corpo de prova (Kim *et al.*, 2004; Obulareddy, 2006; Aragão, 2007; Katicha, 2007; Martinez e Angelone, 2012; Babadopulos *et al.*, 2014) são fatores que contribuem para as variações do módulo dinâmico de misturas asfálticas.

2.1.1 Determinação Experimental do Módulo Dinâmico de Misturas Asfálticas

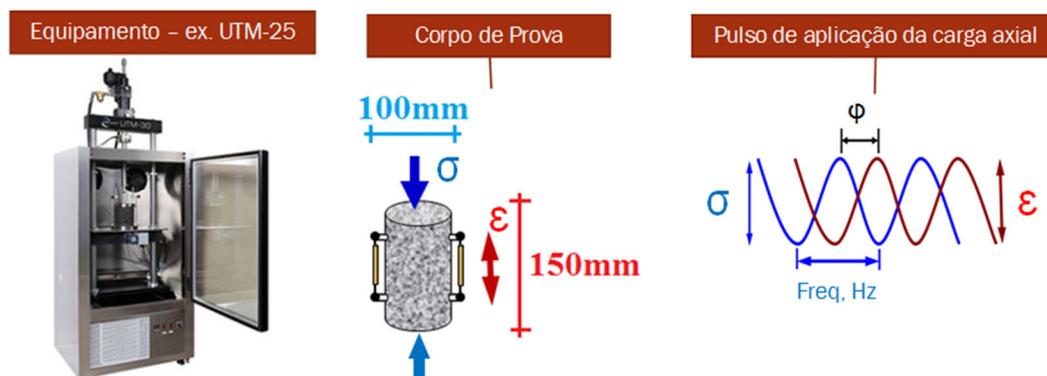
Conforme mencionado anteriormente, o ensaio para determinação experimental do módulo dinâmico de misturas asfálticas não está normatizado no Brasil, embora haja um encaminhamento inicial no âmbito da Comissão de Asfalto do Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP). No entanto, Nascimento (2008) relata que o ensaio para determinação do módulo dinâmico é o mais antigo e melhor documentado entre os ensaios de compressão uniaxial, sendo que a primeira versão da norma norte americana ASTM D 3497 – *Standard Test Method for Dynamic Modulus of Asphalt Concrete Mixtures*, data do ano de 1979.

Para a realização do ensaio são utilizadas referências encontradas na literatura e em normas de outros países. Há duas normas norte americanas que tratam da metodologia de ensaio: a ASTM D 3497-79 (2003) e a AASHTO T 342-11 (2011). Na Comunidade Europeia, o ensaio é normatizado pela EN 12697-26 (European Standards, 2012).

Nos normativos norte americanos, o ensaio consiste na aplicação de um carregamento uniaxial de compressão semi-senoidal harmônico, sobre um corpo de prova (CP) cilíndrico, de 150 mm de altura por 100 mm de diâmetro. A deformação do CP é obtida ao longo do ensaio por meio de LVDTs. A aplicação do carregamento é feita em diferentes frequências e temperaturas, variando de acordo com cada normativo, conforme detalhado na Tabela 1. A Figura 4 apresenta, esquematicamente, o ensaio de módulo dinâmico realizado conforme preconizado nas referidas normas.

Tabela 1: Frequências e temperaturas das normas norte americanas

Norma	Frequências (Hz)	Temperaturas (°C)
AASHTO T 342-11	0,1; 0,5; 1; 5; 10; 25	-10; 4,4; 21,1; 37,8; 54
ASTM D 3497-79	1, 4, 16	5, 25, 40

**Figura 4:** Representação esquemática do ensaio de módulo dinâmico por compressão uniaxial

Já a norma europeia, EN 12697-26:2012, traz a possibilidade da realização do ensaio em diferentes geometrias, e com diferentes formas de aplicação das cargas, conforme indicado na Tabela 2. Esta norma apenas sugere as frequências e temperaturas em que as aplicações de carga devem ser realizadas. Recomenda, ainda, que não se exceda a diferença de 10°C entre cada temperatura ensaiada, assim como sugere que a temperatura máxima não seja superior a 40°C.

Tabela 2: Principais parâmetros da norma EN 12697-26:2012

Geometrias	Carregamento	Frequências sugeridas (Hz)	Temperaturas sugeridas (°C)
Trapezoidal	2 pontos, em viga		
Prismática	2 pontos, em viga		
	3 pontos, em viga		
	4 pontos, em viga	0,1; 0,2; 0,5; 1;	-30; -20; -10; 0;
	Axial, tração direta	2; 5; 10; 20; 50	10; 15; 20; 30; 40
Cilíndrica	Tração indireta		
	Axial, tração-compressão		
	Axial, tração direta		

A norma australiana, a *Austroads Test Method* AGPT/T274 (AUSTROADS, 2015), se baseia na norma europeia, sugerindo as mesmas condições de frequências e temperaturas para realização do ensaio. No entanto, preconiza apenas uma geometria para o corpo de prova, que é a viga prismática, com 4 pontos de apoio/carga.

Além de metodologias normatizadas, a exemplo daquelas mencionadas acima, outros protocolos relatados na literatura podem ser adotados para a obtenção do módulo dinâmico. A configuração de ensaio por compressão diametral, também conhecida como tração indireta, é uma das mais utilizadas para caracterizar as misturas asfálticas (Witczak *et al.*, 2002). Ensaios de resistência por tração indireta, módulo de resiliência, vida de fadiga, entre outros, são realizados nesta configuração. A principal vantagem de se realizar ensaios por compressão diametral é que ele possibilita a utilização de CPs moldados na geometria *Marshall*, assim como CPs extraídos de pavimentos em serviço, inclusive de camadas asfálticas mais esbeltas (Katicha, 2007). A Figura 5 ilustra as geometrias de CPs em relação à camada asfáltica aplicada em campo.

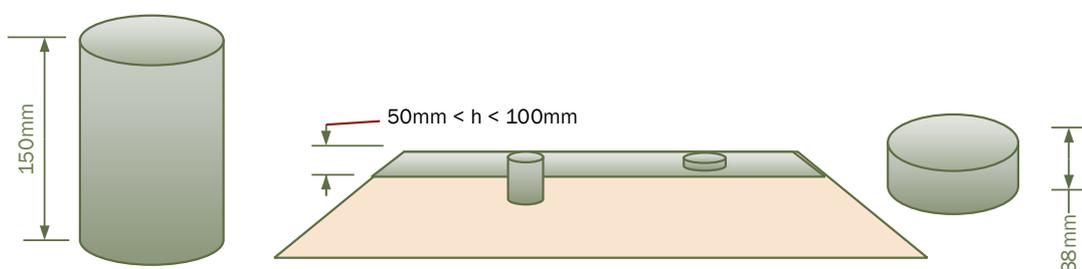


Figura 5: Desenho esquemático da camada asfáltica e as geometrias dos corpos de prova

Quando se trata de gerência de pavimentos, projetos de reabilitação, ou ainda de auditorias e perícias, o modo de determinação do módulo dinâmico se torna um importante entrave, visto que os protocolos mais comuns para sua obtenção prescrevem a aplicação de uma carga axial de compressão em CPs de 100 mm de diâmetro por 150 mm de altura. Assim, é quase sempre impossível obter CPs extraídos em campo com as dimensões necessárias à realização do ensaio convencional, que permitam a avaliação apropriada dos pavimentos existentes (Kim, 2009).

Neste contexto, Kim *et al.* (2004) realizaram um estudo analítico experimental com 24 misturas tipicamente executadas no estado norte americano da Carolina do Norte, visando a obtenção do módulo dinâmico de misturas asfálticas por meio do ensaio executado por compressão diametral, com CPs medindo 150 mm de diâmetro por apenas 38 mm de altura, conforme Figura 6. Essa geometria proposta viabiliza a obtenção do módulo dinâmico em amostras extraídas de campo. O estudo

concluiu que, de uma forma geral, as curvas mestras do ensaio por compressão diametral ficaram bem ajustadas às curvas determinadas a partir do ensaio tradicional por compressão axial.

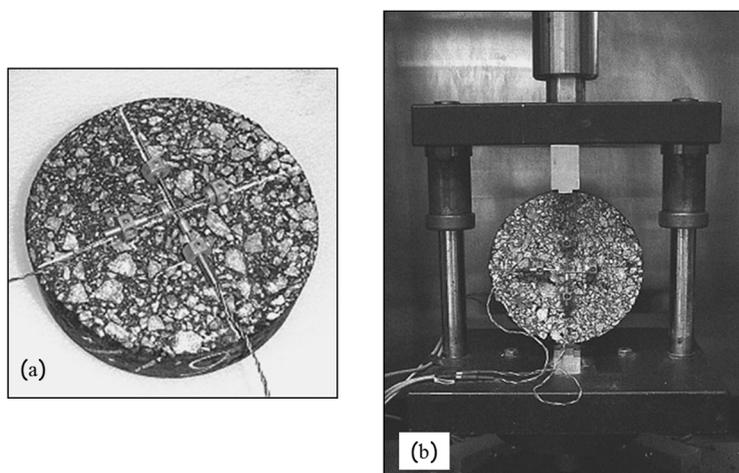


Figura 6: Detalhe do corpo de prova (a) e direção do carregamento (b) no ensaio de módulo dinâmico por compressão diametral, em Kim (2009)

Diferentemente do ensaio uniaxial apresentado anteriormente, a distribuição das tensões e deformações no ensaio por compressão diametral é biaxial, podendo incorrer em erros na determinação das propriedades viscoelásticas da mistura asfáltica (Kim, 2009). Soluções analíticas baseadas na viscoelasticidade linear foram desenvolvidas e apresentadas em Kim *et al.* (2004) para embasar a determinação do módulo por compressão diametral, tendo em vista o estado biaxial de tensões a que os corpos de prova são submetidos. A solução apresentada baseia-se em equações propostas por Hondros (1959) para as tensões e deformações ao longo do eixo horizontal do corpo de prova. As equações 3 e 4, são as apresentadas em Kim *et al.* (2004) para a determinação do módulo dinâmico e do coeficiente de *Poisson* (ν) da mistura asfáltica.

$$|E^*| = 2 \frac{P_0}{\pi a h} \cdot \frac{\beta_1 \gamma_2 - \beta_2 \gamma_1}{\gamma_2 V_0 - \beta_2 U_0} \quad (3)$$

$$\nu = \frac{\beta_1 U_0 - \gamma_1 V_0}{-\beta_2 U_0 + \gamma_2 V_0} \quad (4)$$

Onde: P_0 é a amplitude da carga;

U_0 é a amplitude do deslocamento horizontal;

V_0 é a amplitude do deslocamento vertical;

$\beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2$ são coeficientes em função da geometria do CP;

ν é o coeficiente de *Poisson*.

Kim *et al.* (2004), conforme apresentados na Tabela 3, propõem os valores para os coeficientes β_1 , β_2 , γ_1 , γ_2 , para diferentes diâmetros de CP e comprimento da medida do extensômetro (*gauge length*).

Tabela 3: Coeficientes para cálculo de $|E^*|$ e ν , adaptado de Kim *et al.* (2004)

Diâmetro do CP (mm)	<i>Gauge Length</i> (mm)	β_1	β_2	γ_1	γ_2
101,6	25,4	-0,0098	-0,0031	0,0029	0,0091
101,6	38,1	-0,0153	-0,0047	0,0040	0,0128
101,6	50,8	-0,0215	-0,0062	0,0047	0,0157
152,4	25,4	-0,0065	-0,0021	0,0020	0,0062
152,4	38,1	-0,0099	-0,0032	0,0029	0,0091
152,4	50,8	-0,0134	-0,0042	0,0037	0,0116

As curvas mestras obtidas por Kim *et al.* (2004) sugeriram que o módulo dinâmico obtido por compressão diametral é estatisticamente igual ao obtido por compressão axial. Aragão (2007) utilizou a metodologia proposta por Kim *et al.* (2004) para avaliar a rigidez de misturas asfálticas com adição de cal. Em seu estudo, o ensaio de módulo dinâmico por compressão diametral foi realizado em 3 temperaturas (-10; 10; e 35°C) e 8 frequências (25; 10; 5; 1; 0,5; 0,1; 0,05; e 0,01 Hz).

Também seguindo a metodologia proposta por Kim *et al.* (2004), Obulareddy (2006) fez um estudo para comparar os valores de módulo dinâmico obtidos por compressão axial e diametral. O ensaio por compressão diametral foi realizado em 3 temperaturas (4,4; 25; e 37,8°C) e 6 frequências (10; 5; 1; 0,5; 0,1; e 0,01 Hz). Uma análise estatística dos resultados demonstrou que as correlações entre os resultados variaram de muito ruim ($R^2 = 0,52$) para a temperatura mais baixa (4,4°C), a bom ($R^2 = 0,82$ e $0,86$) para as temperaturas de 25 e 37,8°C, respectivamente. O autor sugere que o módulo dinâmico de amostras extraídas de campo pode ser determinado pelo ensaio por compressão diametral em temperatura alta (37,8°C), o que permitiria avaliar a sua resistência à deformação permanente.

Martinez e Angelone (2012) também realizaram estudo comparativo entre a obtenção do módulo dinâmico de misturas asfálticas por compressão axial e diametral. Seis misturas diferentes foram testadas, e os ensaios foram realizados em 4 temperaturas (10; 20; 30; e 40°C) e 7 frequências (5; 4; 2; 1; 0,5; 0,25; e 0,1 Hz). A análise estatística dos dados experimentais indicou um coeficiente de correlação (R^2) de 0,91 entre os

módulos medidos por compressão axial e os módulos medidos por compressão diametral, resultado considerado excelente pelos pesquisadores.

Estudo semelhante foi reproduzido por Babadopulos *et al.* (2014), com uma mistura asfáltica típica do estado do Ceará. O ensaio por compressão diametral foi realizado em 3 temperaturas (-10; 4,4; e 21,1°C) e 6 frequências (25; 10; 5; 1; 0,5; e 0,1 Hz.). Inicialmente, os autores pretendiam realizar o ensaio nas 5 temperaturas preconizadas na norma AASHTO T 342-11 (2011), no entanto, para as duas temperaturas mais altas (37,8 e 54,4°C) não foi possível realizar o ensaio uma vez que a aplicação de cargas mínimas implicou em deformações de fluência que impediram a obtenção da parte harmônica da deformação. De acordo com os resultados do trabalho, apresentados na Figura 7, os autores entenderam que o ensaio de módulo dinâmico por compressão diametral pode ser uma ferramenta adequada, uma vez que os resultados das curvas mestras do módulo dinâmico por compressão axial e por compressão diametral se apresentaram semelhantes, embora a análise tenha sido apenas visual.

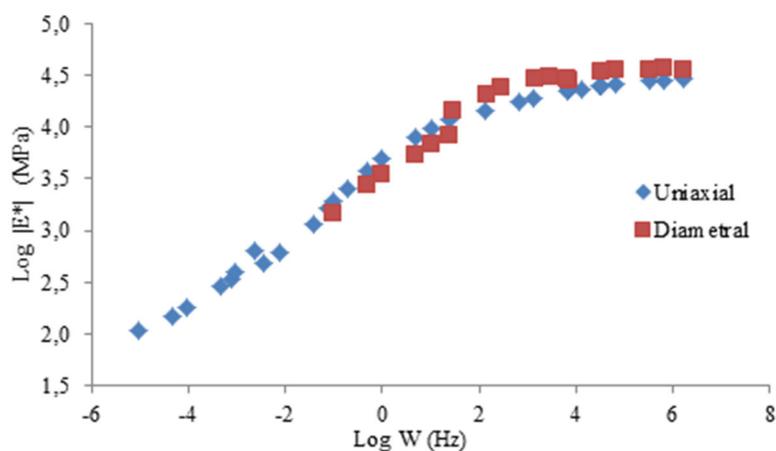


Figura 7: Resultados obtidos para o módulo dinâmico em uma mistura, por compressão diametral e compressão axial, em Babadopulos *et al.* (2014)

2.1.2 Princípio de Superposição Tempo-Temperatura

O princípio de superposição tempo-temperatura estabelece uma equivalência do comportamento estrutural das misturas asfálticas, no qual um aumento na temperatura do ensaio equivale, aproximadamente, a uma redução na frequência (aumento no tempo) de aplicação do carregamento (Kim, 2009). Assim, o denominado princípio de

superposição tempo-temperatura pode ser útil na caracterização experimental das misturas (Katicha, 2007).

Uma série de dados obtidos do ensaio de módulo dinâmico, realizado numa gama de frequências e temperaturas, poderá ser convertida em uma única curva, denominada curva mestra, plotada como função de uma frequência reduzida, após a transladação horizontal dos dados. Para a construção da curva mestra, os valores de $|E^*|$ provenientes do ensaio laboratorial, cujos protocolos serão descritos em detalhe posteriormente, em item específico, são plotados no espaço logarítmico como função da frequência, para cada uma das temperaturas testadas. Uma destas temperaturas é definida como temperatura de referência, e então os dados das demais temperaturas ensaiadas são trasladados horizontalmente para a construção da curva (Kim, 2009; Christensen *apud* Silva, 2009). O aumento da temperatura equivale à transladação dos dados para a esquerda. Do mesmo modo, a diminuição da temperatura equivale à transladação dos dados para a direita, sempre sem alterar a forma da curva original (Katicha, 2007). Assim, é possível a construção de uma curva contínua, como exemplifica a Figura 8.

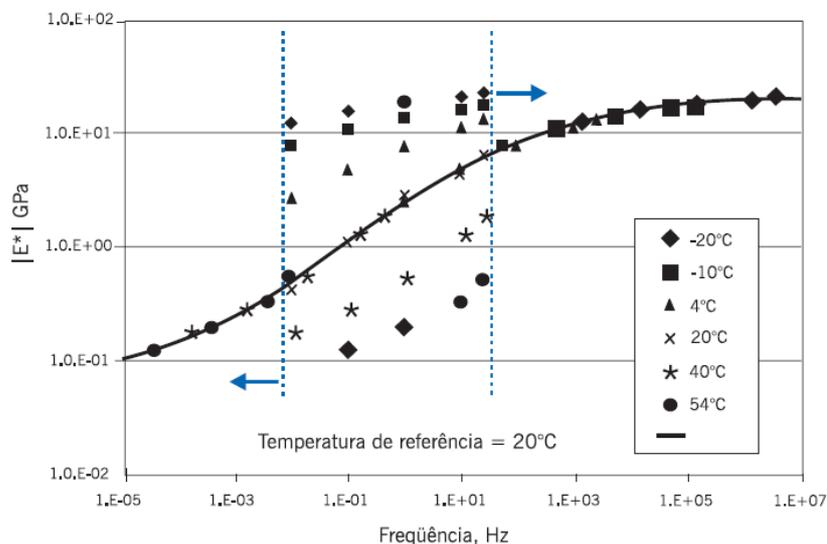


Figura 8: Exemplo de transladação horizontal e construção de curva de módulo dinâmico, em Bernucci *et al.* (2010)

O valor da transladação horizontal da curva de cada temperatura é chamado de fator de deslocamento tempo-temperatura (*time-temperature (t-T) shift factor*). Quando a frequência do ensaio – f , é dividida pelo fator de deslocamento – a_T da respectiva

temperatura, vide Equação 5, ela passa a ser referida como frequência reduzida $-f_r$ (Kim, 2009; Christensen *apud* Silva, 2009).

$$a_T = \frac{f}{f_r} \therefore f_r = \frac{f}{a_T} \therefore \log(f_r) = \log(f) - \log(a_T) \quad (5)$$

Várias metodologias diferentes podem ser adotadas para o cálculo do fator de deslocamento. Duas metodologias comuns encontradas na literatura para este cálculo são a equação de *Arrhenius* e a equação de *Williams-Landel-Ferry* – WLF, apresentadas nas Equações 6 e 7 a seguir.

$$\log(a_T) = C \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \quad (6)$$

Onde: a_T é o *shift fator* na temperatura T;

C é a constante de ajuste da curva;

T é a temperatura de obtenção dos dados, em Kelvin;

T_r é a temperatura de referência para construção da curva, em Kelvin.

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T-T_r)}{C_2+T-T_r} \quad (7)$$

Onde: C_1 e C_2 são constantes de ajuste da curva.

Os coeficientes de ajuste das equações devem ser selecionados de forma que a construção da curva mestra seja a mais suave possível, e dependem do material e da temperatura de referência escolhida. Coutinho *et al.* (2010) apresentaram uma relação de valores da constante C de *Arrhenius* encontradas na literatura, reproduzidas na Tabela 4. Os pesquisadores apresentaram, ainda, valores das constantes C_1 e C_2 da equação WLF (7) para misturas asfálticas encontradas na literatura, reproduzidos na Tabela 5.

Tabela 4: Constantes da equação de Arrhenius (6) encontradas na literatura, adaptada de Coutinho *et al.* (2010)

Material	Aditivo	C (K)	Referência
CAP PG 70-28	SBS	2.298,0	Salomon <i>et al.</i> (2002)
CAP PG 70-28	-	3.551,4	Salomon <i>et al.</i> (2002)
CAP 50/70	-	3.264,2	Nascimento <i>et al.</i> (2008)
	SBR, Neoprene	10.920,0	Francken <i>et al.</i> (1988)
	-	13.631,0	Christensen <i>et al.</i> (1992)
	-	13.060,0	Lytton <i>et al.</i> (1993)
Mistura asfáltica	-	7.680,0	Jacobs <i>et al.</i> (1995)
	-	10.706,6	Pellinen <i>et al.</i> (2002)
	SBS	10.209,4	Medani <i>et al.</i> (2003)
	-	11.348,0	Arambula (2007)
	-	17.438,0	Arambula (2007)

Tabela 5: Constantes da equação de WLF (7) encontradas na literatura, adaptada de Coutinho *et al.* (2010)

Material	C_1	C_2 (K)	Referência
	9,5	95	Sayegh (1967)
Mistura asfáltica	19	92	Lytton <i>et al.</i> (1993)
	12	101,9	Medani <i>et al.</i> (2003)

Ainda segundo Coutinho *et al.* (2010), a equação de *Arrhenius* costuma ser o método mais utilizado para determinação do fator de deslocamento (a_T) para a construção de curvas mestras de misturas asfálticas, pois oferece um melhor ajuste dos dados. No estudo, diferentes métodos para a construção de curvas mestras de materiais asfálticos foram avaliados, e os autores concluíram que, para as misturas asfálticas, a utilização da equação de *Arrhenius* apresentou o melhor ajuste dos dados. Eles sugeriram, ainda, que o melhor ajuste se dá quando a constante C é encontrada por interpolação dos dados experimentais.

Para a transladação horizontal das isotermas e construção das curvas mestras experimentais do presente trabalho foi adotada a técnica sugerida por Coutinho *et al.* (2010), através da equação de *Arrhenius*. A determinação da constante C se deu através de interpolação dos dados experimentais de cada mistura, com a posterior utilização da ferramenta *Solver* do Excel, para minimização da soma dos quadrados dos desvios do modelo em relação aos resultados experimentais, o que permitiu a otimização da equação de *Arrhenius* para cada mistura ensaiada.

Além da curva mestra, os dados também podem ser apresentados em outros dois tipos de gráficos. Para Kim (2009), a apresentação dos dados no plano complexo, ou *Cole-Cole*, que é a plotagem de E' (parte real, elástica) *versus* E'' (parte imaginária, viscosa), permite analisar os valores de ponto máximo do módulo de perda de energia (porção viscosa) de diferentes misturas. Já a plotagem dos dados no espaço *Black* ($\log |E^*|$ *versus* ângulo de fase), pode ser útil para avaliar a qualidade dos dados dos ensaios. A Figura 9 apresenta exemplo dos gráficos.

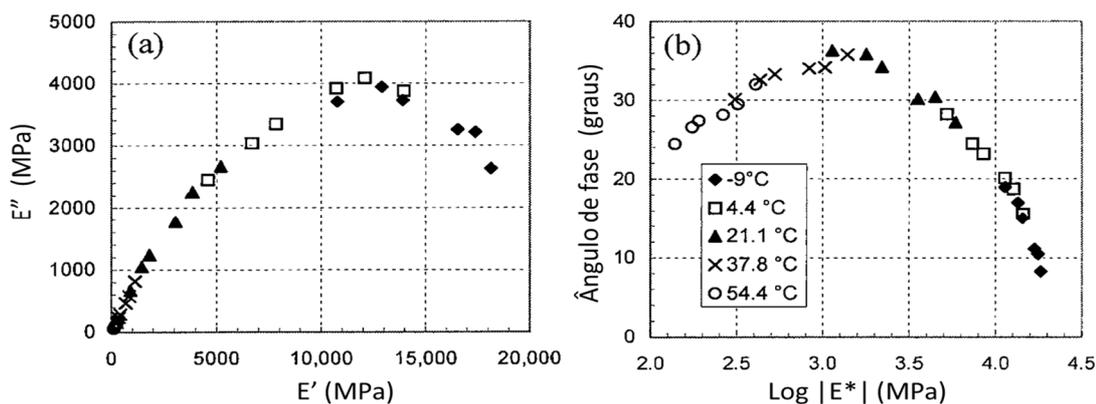


Figura 9: Exemplo de gráfico *Cole-Cole* e espaço *Black*, adaptado de Kim (2009)

2.2 Reologia dos Ligantes

O comportamento mecânico das misturas asfálticas decorre diretamente da natureza reológica do ligante asfáltico (Sakhaeifar *et al.*, 2015). Reologia é a ciência que estuda o fluxo e a deformação de materiais cujas respostas estruturais variam com a amplitude do carregamento, assim como com taxa de aplicação do carregamento (Kim, 2004). Kim (2004) indica que, em dada combinação de tempo e temperatura, as propriedades que melhor caracterizam o comportamento reológico dos ligantes são: a resistência total a deformação, e a distribuição desta resistência entre uma parte elástica e uma parte viscosa.

As propriedades reológicas dos ligantes são parâmetros fundamentais dos modelos de previsão de módulo dinâmico (Andrei *et al.*, 1999; Christensen *et al.*, 2003; Bari e Witzak, 2006; Garcia e Thompson, 2007). Assim, a compreensão dessas propriedades é fundamental para o entendimento da modelagem aplicada na presente dissertação. Embora existam vários métodos para caracterizar as propriedades reológicas dos ligantes, Kim (2004) aponta que um dos melhores métodos é por meio da utilização de um reômetro de cisalhamento dinâmico (*dynamical shear rheometer* – DSR). Neste ensaio, é possível se obter os parâmetros reológicos: módulo dinâmico de cisalhamento ($|G^*|$) e ângulo de fase (φ).

No ensaio realizado no DSR, uma pequena amostra de ligante é submetida a tensões de cisalhamento oscilatórias, entre duas placas paralelas (Bernucci *et al.*, 2010), vide Figura 10. O equipamento é capaz de aplicar uma varredura de frequências e temperaturas, a tensão ou deformação controlada. Matematicamente, $|G^*|$ e φ podem ser definidos conforme as equações 8 e 9 (Bernucci *et al.*, 2010).

$$|G^*| = \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}} \quad (8)$$

Onde: τ_{max} é a amplitude da tensão de cisalhamento;

γ_{max} é a amplitude da deformação decorrente da tensão aplicada.

$$\varphi = \omega \cdot \Delta t \quad (9)$$

Onde: ω é a frequência angular;

Δt é tempo de defasagem.

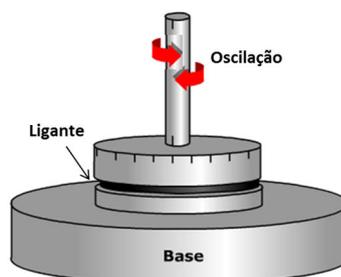


Figura 10: Esquema de aplicação de tensão de cisalhamento na amostra de ligante, adaptado de *Pavement Interactive* (2016)

Kim (2004) indica que, em baixas temperaturas e altas frequências, a rigidez do ligante ($|G^*|$) atinge valores próximos a 1,0 GPa, e o ângulo de fase (φ) se aproxima de 0° , o que indica uma natureza quase completamente elástica do ligante neste espectro de temperaturas e frequências. O inverso ocorre quando o ligante está submetido a altas temperaturas e baixas frequências, quando φ se aproxima de 90° e o ligante se aproxima de um comportamento completamente viscoso. Os valores mínimos de $|G^*|$, no entanto, variam significativamente, dependendo de outras propriedades do ligante (consistência, composição química, envelhecimento, entre outros).

2.3 Volumetria de Misturas

A compreensão da terminologia utilizada para descrever a composição volumétrica das misturas asfálticas é essencial para o bom entendimento da modelagem aplicada no decorrer da presente dissertação. As misturas asfálticas são compostos essencialmente formados por três fases: agregados, ligante asfáltico e ar, também designado pelo termo “vazios”. Algumas misturas possuem, ainda, quantidades mínimas de aditivos, como fibras, polímeros ou borracha moída, que promovem melhorias em

algum aspecto da mistura, como trabalhabilidade ou desempenho em serviço, por exemplo.

A análise volumétrica consiste na caracterização da composição de uma mistura asfáltica através das proporções relativas do volume de agregados, ligante e ar. Uma mistura típica de concreto asfáltico apresenta 84 a 90% de seu volume de agregados, 6 a 12% de ligante e cerca de 4% de volume de vazios (ar) (NCHRP, 2011), vide Figura 11. Serão apresentados a seguir os principais parâmetros volumétricos das misturas asfálticas, assim como uma breve discussão acerca do efeito de cada parâmetro no desempenho das misturas, conforme bem detalhado no NCHRP *Report 673* (NCHRP, 2011).

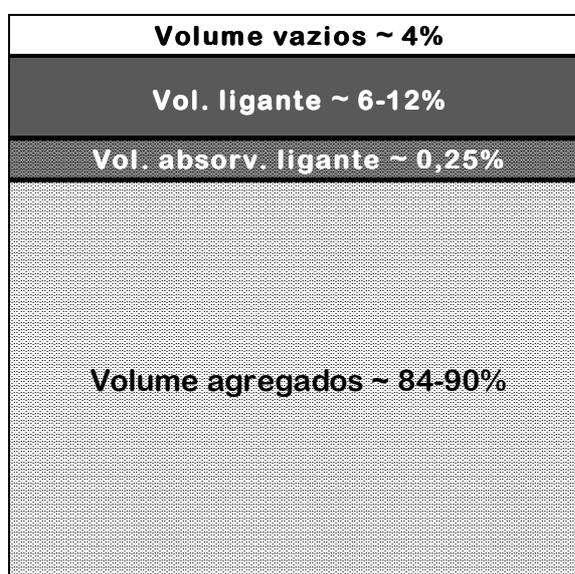


Figura 11: Composição volumétrica típica de misturas asfálticas densas, conforme dados de NCHRP (2011)

2.3.1 Volume de Vazios – V_v

Quando se trata de misturas asfálticas, “vazios” são pequenos bolsões de ar incorporados dentro do ligante asfáltico, ou ainda entre o ligante e as partículas de agregados. O volume de vazios de uma mistura asfáltica não contempla os vazios existentes dentro das partículas dos agregados, nem o ar contido nos poros microscópicos da superfície do agregado, vide Figura 12.

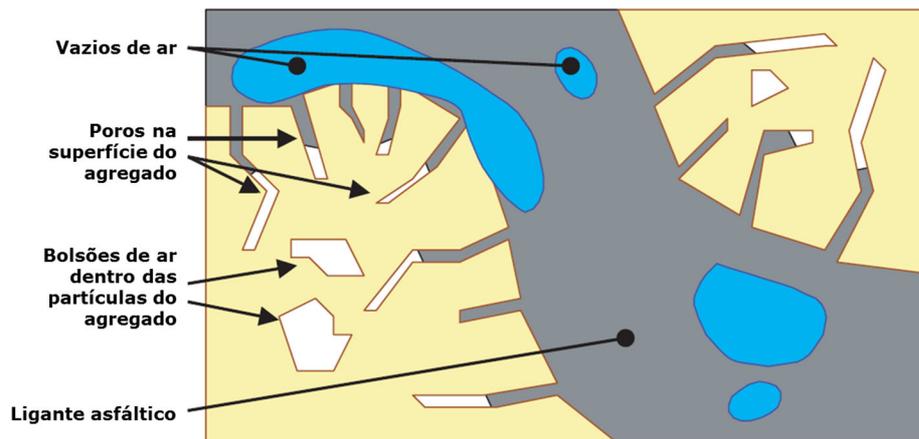


Figura 12: Vazios da mistura asfáltica, adaptado de NCHRP (2011)

Projetar e garantir *in loco* o volume de vazios de uma mistura asfáltica se faz necessário por uma série de motivos. Quando o volume de vazios é muito alto, o revestimento se torna muito permeável à água e ao ar, resultando em dano por umidade induzida e rápido envelhecimento da camada. Por outro lado, se o volume de vazios é baixo, o teor de ligante é maior, e o revestimento se torna suscetível à deformação permanente.

A metodologia de dosagem norte americana *Superpave* preconiza um volume de vazios de 4% para as misturas dosadas em laboratório. Já na metodologia Marshall, ainda de uso dominante no Brasil, o volume de vazios das misturas dosadas em laboratório pode variar entre 3 e 5%, para misturas densas a serem aplicadas em camadas finais de rolamento (DNIT, 2006). Na dosagem de camadas de ligação (*binder*), o volume de vazios poderá variar entre 4 e 6% (DNIT, 2006).

Após a compactação em campo, misturas recém aplicadas apresentam volume de vazios variando entre 6 e 11% (Prowell e Brown, 2007), sendo esperado que o volume de vazios determinado na dosagem seja atingido em dois anos após a abertura do tráfego.

2.3.2 Teor de Ligante – Pb

O uso de uma quantidade adequada de ligante é essencial para o bom desempenho em campo de uma mistura asfáltica, sendo o teor de ligante uma de suas principais características. Uma mistura com baixo teor de ligante tende a ser seca e rígida, de difícil trabalhabilidade, espalhamento e compactação em campo, resultando em uma camada susceptível a danos por fadiga e baixa durabilidade. Por outro lado, muito ligante

resulta num revestimento antieconômico e susceptível à deformação permanente, exsudação e corrugação.

O teor de ligante de uma mistura é normalmente especificado em percentual do peso total da mistura. Assim, uma tonelada de mistura asfáltica cujo teor de ligante é de 6,0% conterá 60 kg de ligante asfáltico. Misturas dosadas pela metodologia *Superpave* apresentam teor de ligante variando entre 3,0% ou menos, no caso de camadas de ligação, até 6,0% ou mais, no caso de camadas de rolamento mais robustas, dimensionadas para durabilidade e resistência à fadiga excepcionais (NCHRP, 2011). No Brasil, a norma DNIT 031/2006-ES (DNIT, 2006) admite o intervalo de 4,5% a 9,0% para o teor de ligante de misturas dosadas para as camadas de rolamento, e de 4,0% a 7,0% para as chamadas camadas de ligação (*binder*). A Tabela 6 apresenta os valores típicos de teores de ligante para camadas densas de rolamento.

Tabela 6: Teores de ligante admitidos para misturas densas

Método de dosagem	Teor de ligante (Misturas densas)
Marshall (DNIT 031/2006-ES)	4,5 – 9%
Superpave (NCHRP, 2011)	3 – 6%

Ao se realizar uma análise volumétrica, no entanto, é ideal que se faça referência ao teor de ligante também em percentual de volume, notado como V_b . De fato, é o percentual de ligante em volume, e não em peso, que dita o desempenho da mistura (NCHRP, 2011). Em teoria, a forma mais eficiente de se caracterizar e especificar o teor de ligante de uma mistura é através do V_b . No entanto, o V_b só pode ser determinado por meio de uma análise volumétrica, sem um grau de precisão elevado, já que a capacidade de absorção dos agregados varia bastante (NCHRP, 2011). No entanto, esta é uma referência que não é observada em dosagens feitas no Brasil.

2.3.3 Volume Efetivo de Ligante – VBE

Devido à absorção, uma porção de ligante é absorvida pelos poros da superfície das partículas do agregado. O volume de ligante absorvido não é levado em

conta no volume efetivo de ligante. Assim, o volume efetivo de ligante é definido como o volume total de ligante descontado do volume absorvido pelo agregado, vide Figura 13.

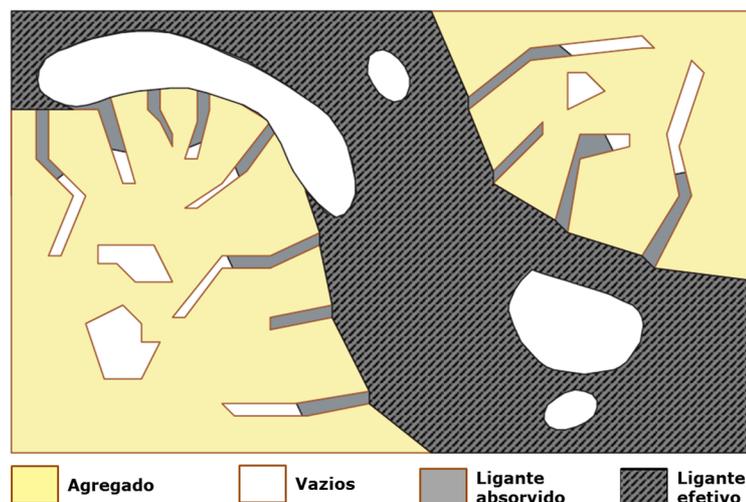


Figura 13: Teor de ligante efetivo e teor de ligante absorvido, adaptado do NCHRP (2011)

Sendo conhecidas as densidades aparente (ρ_{ap}) e efetiva (ρ_{ef}) do agregado graúdo e a densidade do asfalto (ρ_b), pode-se calcular a taxa de absorção de asfalto pelos agregados ($P_{b,abs}$), assim como o teor de asfalto efetivo na mistura (Gouveia, 2006), vide equações 10 e 11.

$$P_{b,abs} = 100 \times \frac{\rho_{ef} - \rho_{ap}}{\rho_{ef} \times \rho_{ap}} \times \rho_b \quad (10)$$

$$VBE = (P_b - P_{b,abs}) \times \frac{G_{mb}}{\rho_b} \quad (11)$$

2.3.4 Vazios do Agregado Mineral – VAM

Os vazios do agregado mineral de uma mistura asfáltica se referem ao percentual volumétrico do espaço entre suas partículas de agregado, ou seja, representam o que não é agregado numa mistura – os vazios com ar e o ligante efetivo, vide Figura 14. Assim, o VAM equivale, numericamente, ao volume de vazios somado com o volume efetivo de ligante. Quando se controla o volume de vazios e o VAM de uma mistura, o volume efetivo de ligante também é controlado.

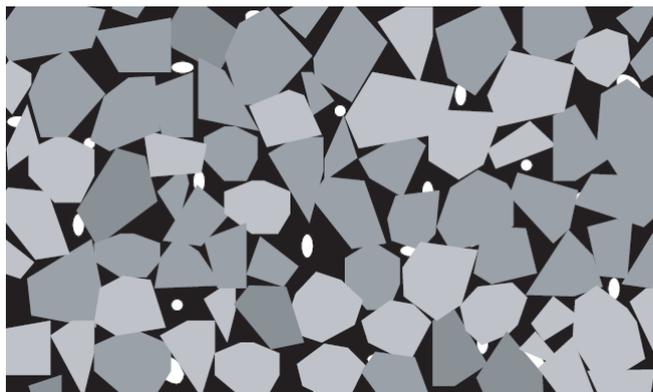


Figura 14: Vazios do agregado mineral – VAM, é composto do ligante (área preta), mais os vazios de ar (área branca), adaptado de NCHRP (2011)

A especificação do DNIT 031/2006-ES (DNIT, 2006) estipula o teor de vazios do agregado mineral mínimo para dosagens de concreto asfáltico em função do tamanho nominal máximo do agregado, de acordo com a Tabela 7. De acordo com Bernucci *et al.* (2010), a metodologia de dosagem *Superpave* preconiza VAM > 11% como requisito volumétrico. Segundo Ceratti *et al.* (2015), o VAM pode ser ajustado a partir de mudança na origem ou na granulometria dos agregados. O VAM tende a aumentar ao se afastar a curva granulométrica da linha de densidade máxima, ao se reduzir o percentual passante na peneira de 0,075mm, e ao se selecionar agregados com textura superficial mais rugosa (Ceratti *et al.*, 2015).

Tabela 7: VAM mínimo segundo a norma DNIT 031/2006-ES (DNIT, 2006)

Tamanho Nominal Máximo do Agregado		VAM mínimo, %
#	mm	
1 ½"	38,1	13
1"	25,4	14
¾"	19,1	15
½"	12,5	16
3/8"	9,5	18

2.3.5 Vazios Preenchidos com Ligante – VFA

Os vazios preenchidos com ligante representam o percentual do VAM que contém ligante, sendo numericamente igual à relação entre o volume efetivo de ligante – VBE, e os vazios do agregado mineral – VAM. Assim, esses três parâmetros volumétricos são conceitualmente relacionados, vide Equação 12.

$$VFA = \frac{VBE}{VAM} \quad (12)$$

Na metodologia de dosagem Marshall, o VFA é equivalente à Relação Betume/Vazios – RBV, que também é relação entre o volume efetivo de ligante e os vazios do agregado mineral. A especificação do DNIT 031/2006-ES (DNIT, 2006) determina que a RBV deve ter valores entre 75 e 82% para misturas asfálticas densas. De acordo com Bernucci *et al.* (2010), a metodologia de dosagem *Superpave* indica que a RBV deve apresentar valores entre 65 e 75%, o que pode indicar que o intervalo de valores adotados no Brasil são elevados.

2.3.6 Considerações acerca da Análise Volumétrica

Na prática, os parâmetros V_v e VAM são obtidos a partir do teor do ligante – P_b , assim como das densidades: máxima teórica da mistura – G_{mm} , da mistura compactada – G_{mb} , e dos agregados – G_{sb} (Coree, 1998). A Figura 15 apresenta esquematicamente os principais parâmetros volumétricos de uma mistura asfáltica.

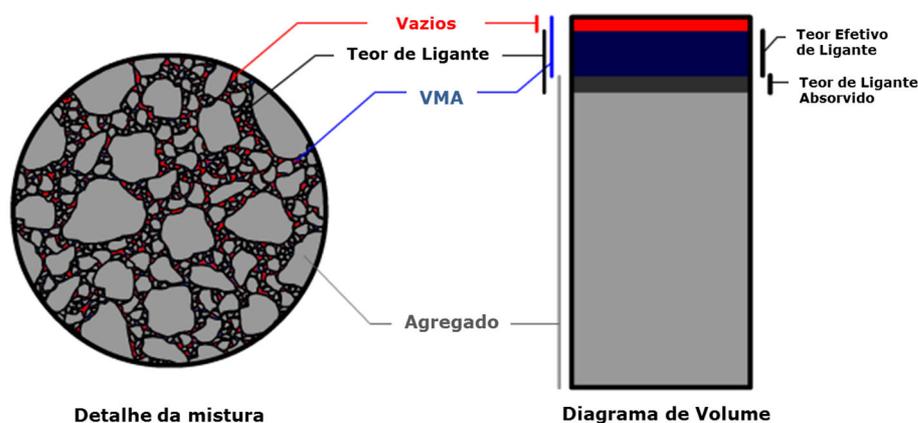


Figura 15: Principais parâmetros volumétricos das misturas asfálticas, adaptado de Pavement Interactive (2016)

2.4 Modelos de Previsão de Módulo Dinâmico de Misturas Asfálticas

Diversos modelos de previsão de módulo dinâmico têm sido desenvolvidos nas últimas décadas com o objetivo de estimar a curva do módulo como uma alternativa aos ensaios de laboratório, que podem requerer dias de preparação de CPs, calibração de temperaturas e aplicação dos carregamentos. Historicamente, os modelos e equações

preditivas foram desenvolvidos por meio de regressão linear ou não-linear de múltiplas variáveis a partir de dados de ensaios de laboratório e propriedades das misturas asfálticas e seus componentes. Bari e Witzak (2006) apresentaram uma relação de modelos preditivos significantes desenvolvidos nos últimos 60 anos, reproduzidos na Tabela 8.

Tabela 8: Modelos históricos de previsão de módulo dinâmico, Bari e Witzak (2006)

Modelo de Previsão do Módulo Dinâmico	Ano de Publicação
Van der Poel (Shell Oil's Early Version) Model	1954
Shook and Kallas' Model	1969
Witzak's Early Model	1972
Bonnaure (Shell Oil's Early Version) Model	1977
Witzak and Shook's Model	1978
Witzak's 1981 Model	1981
Witzak, Miller and Uzan's Model	1983
Witzak and Akhter's Models	1984
Witzak, Leahy, Caves and Uzan's Model	1989
Witzak and Fonseca's Model	1996
Andrei, Witzak and Mirza's Revised Model	1999
Hirsh Model of Christensen, Pellinen and Bonaquist	2003

Os mais usados são os modelos de previsão de Witzak (Andrei *et al.*, 1999; Bari e Witzak, 2006) que são baseados em uma análise de regressão multivariável convencional de dados de laboratório (Ceylan *et al.*, 2009), visto que estão integrados no guia norte americano de dimensionamento de pavimentos, o já referido *MEPDG*. Diversos pesquisadores (Andrei *et al.*, 1999; Pellinen *et al.*, 2004; Bari e Witzak, 2006; Garcia e Thompson, 2007) mostraram que curvas mestras do módulo dinâmico de misturas asfálticas podem ser modeladas matematicamente por uma função sigmoideal, como a representada pela Equação 13 e pela Figura 16. A construção da curva mestra se dá pelo ajuste da curva de uma função sigmoideal aos valores dos módulos dinâmicos obtidos dos ensaios.

$$\log(|E^*|) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma \log(t_r)}} \quad (13)$$

Onde: t_r é o tempo de carregamento na temperatura de referência;

δ é valor mínimo do módulo dinâmico;

$\delta + \alpha$ é o valor máximo do módulo dinâmico;

β e γ são parâmetros que descrevem a forma da função sigmoideal.

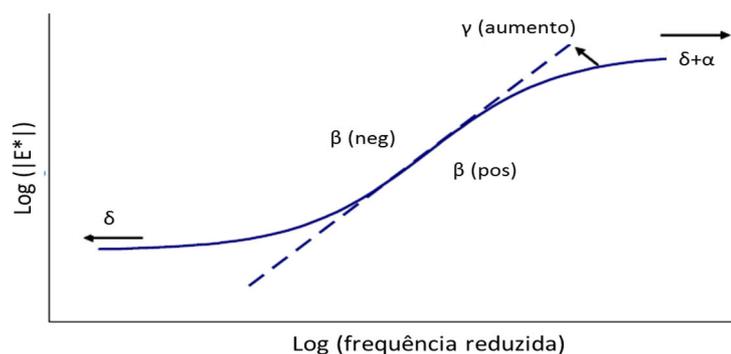


Figura 16: Desenho esquemático da função sigmoideal, adaptado de Garcia e Thompson (2007)

A utilização de uma função sigmoideal para representar o módulo dinâmico por compressão axial de uma mistura baseia-se em observações de seu comportamento físico. O intervalo superior da função sigmoideal se aproxima de modo assintótico à rigidez máxima da mistura, que depende da rigidez limite do ligante em baixas temperaturas. Já em altas temperaturas, a influência do esqueleto mineral é mais dominante no comportamento da mistura sob carregamento axial de compressão do que a influência do comportamento viscoso do ligante. Assim, a rigidez se aproxima de um valor de equilíbrio, que depende da distribuição granulométrica do agregado (Garcia e Tompson, 2007).

Cada parâmetro da função sigmoideal tem um significado físico distinto. O parâmetro δ representa o valor mínimo do módulo dinâmico da mistura; $\delta+\alpha$ representa o valor máximo do módulo dinâmico, que é a assíntota máxima da curva; β é o ponto da curva que determina a posição horizontal onde ocorre a mudança de sinal da curvatura; e γ representa a inclinação máxima da curva (Mateos e Soares, 2015).

Assim, a função sigmoideal capta o comportamento físico da mistura asfáltica observado nos ensaios mecânicos de carga cíclica compressiva, ao longo de todo o intervalo de temperaturas (Pellinen e Witzak, 2002). A seguir, são apresentados os modelos de previsão de módulo dinâmico mais consagrados internacionalmente, assim como experiências de aplicação e calibração dos mesmos.

2.4.1 Witzak 2006 (Bari e Witzak, 2006)

A versão da equação de previsão de módulo dinâmico de Witzak, de 1999, considerava como variáveis alguns parâmetros volumétricos e de graduação dos

agregados da mistura asfáltica, a viscosidade do ligante e a frequência de carregamento (que se relaciona com a velocidade do tráfego). O modelo resultou de uma análise de regressão multivariável de 2.750 dados experimentais obtidos de 205 misturas (Andrei *et al.*, 1999).

Em 2006, Bari e Witczak revisaram a versão de 1999, usando 7.400 dados experimentais de 346 misturas, representando um incremento de 4.650 novos dados. Outra melhoria foi o uso do módulo dinâmico em cisalhamento ($|G_b^*|$) e do ângulo de fase (ϕ_b) do ligante, ao invés da viscosidade e da frequência de carregamento (Aragão *et al.*, 2010). Azari *et al.* (2007) relataram que, embora a substituição da viscosidade do ligante pelo seu módulo dinâmico de cisalhamento no modelo revisado de Witczak tenha melhorado sua acurácia, a inclusão do ângulo de fase do ligante não apresentou efeito significativo. A versão de 2006 do modelo de Witczak é apresentada na Equação 14. Os parâmetros de entrada estão notados como na equação original, de maneira a manter sua integridade.

$$\log(|E^*|) = -0,349 + 0,754|G_b^*|^{-0,0052} \cdot \left(6,65 - 0,032\rho_{200} + 0,0027\rho_{200}^2 + 0,011\rho_4 - 0,0001\rho_4^2 + 0,006\rho_{38} - 0,00014\rho_{38}^2 - 0,08V_a - 1,06 \cdot \left(\frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} \right) \right) + \frac{\left[2,56 + 0,03V_a + 0,71 \cdot \left(\frac{V_{beff}}{V_a + V_{beff}} \right) + 0,012\rho_{38} - 0,0001\rho_{38}^2 - 0,01\rho_{34} \right]}{1 + e^{(-0,7814 - 0,5785\log|G_b^*| + 0,8834\log\delta_b)}} \quad (14)$$

Onde: $|E^*|$ é o módulo dinâmico axial da mistura, em psi;
 $|G_b^*|$ é o módulo dinâmico em cisalhamento do ligante, em psi;
 δ_b é o ângulo de fase do ligante, em graus;
 ρ_{200} é o percentual, em massa, do agregado que passa a peneira nº 200;
 ρ_4 , ρ_{38} e ρ_{34} são o percentual, em massa, do agregado retido nas peneiras nº 4, 3/8" e 3/4", respectivamente;
 V_a é volume de vazios da mistura, em % (ou Vv nesta dissertação);
 V_{beff} é o volume efetivo de ligante, em % (ou VBE nesta dissertação).

Ao final, Bari e Witczak (2006) reportaram um ajuste dos dados observados ao resultado correspondente do modelo (R^2) de 80% em escala linear e de 90% em escala logarítmica.

Uma série de estudos indica que os modelos de Witczak apresentam resultados muito dispersos, especialmente nos extremos das curvas (altas e baixas temperaturas) (Schwartz, 2005; Bari e Witczak, 2006; Azari *et al.*, 2007; Ceylan *et al.*, 2009). Schwartz (2005) sugeriu, ainda, que os modelos de previsão de Witczak têm grande influência da temperatura, enquanto minimizam a influência de outros parâmetros da mistura. Entretanto, o mesmo estudo examinou os efeitos decorrentes da utilização de módulos dinâmicos previstos através do modelo de Witczak, em substituição aos valores medidos, no desempenho de um pavimento. Concluiu que, embora a previsão de desempenho da mistura asfáltica seja sensível à diferença do valor do módulo medido e calculado, o dimensionamento da estrutura do pavimento, que considera ainda as características das subcamadas, e os efeitos do clima, do tráfego e de outros fatores de campo, apresentou sensibilidade muito pequena, mesmo com grande variação entre os valores do módulo medido e calculado. Para Underwood *et al.* (2011), este achado sugere que mesmo com grandes diferenças entre os valores do módulo dinâmico, o dimensionamento do pavimento não irá apresentar diferenças significativas. Mais adiante são apresentados resultados de uma série de avaliações decorrentes da aplicação dos modelos de previsão.

2.4.2 Hirsch (Christensen *et al.*, 2003)

O modelo de Hirsch é um modelo semiempírico proposto por Christensen *et al.* (2003), que também é bastante usado por pesquisadores e técnicos. Esse modelo é baseado na lei das misturas, desenvolvida por Y. J. Hirsch na década de 1960. Conforme descrito pelos autores, o princípio da lei das misturas descreve que as propriedades de um compósito podem ser tratadas como a combinação das propriedades de seus componentes. A influência de cada componente é proporcional ao seu volume na mistura.

O desenvolvimento do modelo resultou numa equação de previsão simples, que inclui parâmetros volumétricos da mistura, rigidez do ligante e o volume de contato do agregado (Christensen *et al.*, 2003), um parâmetro introduzido pelos autores e definido na Equação 16.

Para os referidos autores, o modelo proposto é racional e efetivo, onde o módulo dinâmico da mistura asfáltica pode ser estimado diretamente a partir de parâmetros volumétricos (vazios de agregado mineral e vazios preenchidos com asfalto),

e rigidez do ligante ($|G_b^*|$). O modelo foi desenvolvido a partir de 206 dados de 18 misturas, que é considerado pelos autores um volume razoável de dados para o desenvolvimento inicial do modelo. A expressão final para a versão simplificada do modelo é apresentada nas equações 15 e 16. A notação dos parâmetros de entrada está apresentada como na equação original, de maneira a manter sua integridade. Ao final, Christensen *et al.* (2003) reportaram um ajuste dos dados observados ao resultado correspondente do modelo (R^2) de 96,8%.

$$|E^*| = P_c \left[4.200.000 \left(1 - \frac{VMA}{100} \right) + 3|G_b^*| \left(\frac{VFA.VMA}{10.000} \right) \right] + (1 - P_c) \left[\frac{1 - \frac{VMA}{100}}{4.200.000} + \frac{VMA}{3.VFA.|G_b^*|} \right]^{-1} \quad (15)$$

$$P_c = \frac{\left(20 + \frac{VFA.3|G_b^*|}{VMA} \right)^{0,58}}{650 + \left(\frac{VFA.3|G_b^*|}{VMA} \right)^{0,58}} \quad (16)$$

Onde: $|E^*|$ é o módulo dinâmico da mistura, em psi;
 $|G_b^*|$ é o módulo dinâmico em cisalhamento do ligante, em psi;
 P_c é volume de contato do agregado;
VMA é o vazão do agregado mineral, em % (ou VAM nesta dissertação);
VFA é o vazão preenchido com asfalto, em %.

Um estudo bastante extenso apresentado por Sakhaeifar *et al.* (2015) revelou a importância da granulometria dos agregados na mistura para prever o seu comportamento mecânico, e concluiu que o modelo Hirsch apresenta uma insensibilidade em algumas condições de carregamento e frequência, possivelmente em decorrência da falta de parâmetros granulométricos.

2.4.3 Experiências de Aplicação, Avaliação e Calibração dos Modelos

2.4.3.1 Minnesota, EUA (Clyne *et al.*, 2003)

Clyne *et al.* (2003) ensaiaram 4 misturas tipicamente aplicadas em rodovias estaduais do estado norte americano de Minnesota, para determinar os respectivos módulos dinâmicos e ângulos de fase, com o objetivo de validar equações de previsão de módulo dinâmico propostas no MEPDG. Os valores foram obtidos por meio de ensaio de aplicação de carga de compressão axial, nas temperaturas de -20; -10; 4; 20; 40; e 54°C e frequências de 25; 10; 1; 0,1; e 0,01 Hz. A partir dos dados, as curvas mestras dos

módulos foram modeladas para cada mistura, através de uma função sigmoïdal. Não foi possível a construção de curvas mestras suaves para os ângulos de fase, sendo que os pontos referentes às altas temperaturas ficaram dispersos.

O módulo dinâmico de cada mistura foi, então, calculado a partir de duas equações disponíveis na versão do MEPDG de 2002 – sendo denominadas, no relatório, de Witzak 1995 e Witzak 2000. Os valores calculados foram comparados com os resultados dos ensaios laboratoriais.

Como resultado, os autores relataram que os valores de módulo calculados usando a equação de previsão Witzak 2000 se aproximaram dos módulos ensaiados em apenas 2 das 4 misturas testadas. Nas outras 2 misturas, as diferenças encontradas foram significativas. Os autores sugerem a utilização da equação mencionada com cautela. Sugere, ainda, que mais pesquisas são necessárias para a validação das equações preditivas.

2.4.3.2 Carolina do Norte, EUA (Kim *et al.*, 2005; Sakhaeifar *et al.*, 2015)

Kim *et al.* (2005) ensaiaram 42 misturas tipicamente aplicadas em rodovias do estado norte americano da Carolina do Norte, com o objetivo de obter experimentalmente os valores de módulo dinâmico das misturas. As 42 misturas pesquisadas possuíam diferentes origens dos agregados, diferentes granulometrias, e diferentes tipos e teores de ligante.

Além da elaboração de banco de dados, os pesquisadores utilizaram os dados obtidos no ensaio uniaxial para avaliar a acurácia de dois modelos de previsão de módulo dinâmico disponíveis na versão do MEPDG de 2002, denominadas Witzak 2000 e Hirsch. Os autores relataram que o modelo de previsão Witzak 2000 é mais preciso a baixas temperaturas quando comparado com temperaturas mais elevadas. Os autores classificaram como muito pobre o desempenho do modelo de Hirsch em temperaturas de 10°C, assim como o desempenho do modelo Witzak nas temperaturas mais altas.

Os dados também foram utilizados para investigar os efeitos das diferentes variáveis das misturas no módulo dinâmico. Os pesquisadores reportaram que as variáveis dos ligantes, isto é, origem, classificação e teor, apresentaram efeitos mais significativos do que as características dos agregados, isto é, origem e granulometria.

Em outro estudo realizado na Carolina do Norte (Sakhaeifar *et al.*, 2015), foram desenvolvidos modelos de regressão para previsão de módulo dinâmico levando em consideração os conceitos de viscoelasticidade, e diferentes propriedades físicas e mecânicas de ligantes e misturas. Os pesquisadores contaram com uma base de dados total de 1008 misturas, divididas em 2 grupos. Um grupo de 223 misturas testadas no laboratório da *North Carolina State University* – NCSU (dados primários) foi utilizado para o desenvolvimento dos modelos, e um segundo grupo, em sua maioria composto por dados secundários, foi utilizado para a calibração. Ao final, os autores apresentaram 2 modelos, denominados de modelo global (*global model*) e modelo global simplificado (*simplified global model*). O modelo simplificado, Equação 17, apresentou $R^2 = 0,96$ na escala aritmética e $R^2 = 0,98$ na escala logarítmica para os dados primários utilizados na pesquisa.

$$\log(|E^*|) = 6,4197 - 0,00014\rho_{34}^2 - 0,00547\rho_{38} - 0,11786\rho_{200} - 0,05528V_a - 0,16266V_{beff} + 0,00487V_{beff}^2 + \frac{[0,57677 + 0,00713\rho_{38} + 0,16167\rho_{200} - 0,0052\rho_{200}^2 + 0,01889V_a + 0,16031V_{beff} - 0,00592V_{beff}^2]}{1 + e^{(1,8645 - 0,95991\log|G_b^*|)}} \quad (17)$$

Onde: $|E^*|$ é o módulo dinâmico axial da mistura, em psi;
 $|G_b^*|$ é o módulo dinâmico em cisalhamento do ligante, em psi;
 ρ_{200} é o percentual, em massa, do agregado que passa a peneira nº 200;
 ρ_{38} e ρ_{34} são o percentual, em massa, do agregado retido nas peneiras 3/8" e 3/4", respectivamente;
 V_a é volume de vazios da mistura, em % (ou V_v nesta dissertação);
 V_{beff} é o volume efetivo de ligante, em % (ou VBE nesta dissertação).

2.4.3.3 Flórida, EUA (Birgisson *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 2014)

Entre outros objetivos, Birgisson *et al.* (2004) pesquisaram o desempenho da equação preditiva do módulo dinâmico proposta na versão do *MEPDG* de 2002, especificada no estudo como Witczak 2002. Um total de 29 misturas típicas do estado norte americano da Flórida foram ensaiadas em diferentes frequências e temperaturas, usando um protocolo de ensaio triaxial. Os resultados demonstraram que, de uma maneira geral, o modelo de previsão Witczak 2002 apresentou um bom desempenho ao prever o módulo dinâmico das misturas da Flórida, sendo que o modelo se adequou melhor numa

faixa de temperaturas mais altas (10 a 40°C), o que contradiz os achados de vários outros estudos.

Em outro estudo mais recente, Yang *et al.* (2014) apresentaram o desenvolvimento de um modelo simplificado de previsão de módulo dinâmico para caracterizar misturas asfálticas típicas da Flórida. Os pesquisadores avaliaram um total de 20 misturas, de diferentes granulometrias e dosagens. No entanto, todas apresentavam ligante com classificação *Superpave* PG 67-22. Ao final do estudo, foi proposto um modelo simplificado, baseado na função sigmoideal e semelhante à equação de Witczak 2006. Os pesquisadores relataram um coeficiente de correlação $R^2 = 0,957$ em escala logarítmica. A Equação 18 apresenta o modelo proposto por Yang *et al.* (2014).

$$\log(|E^*|) = 2,312 + 0,01\rho_{200} + 0,01\rho_8 - 0,013\rho_4 - 0,002\rho_{38} + 0,024P_b - 0,043VFA + \frac{[-1,34 - 0,019\rho_8 + 0,022\rho_4 + 0,004\rho_{38} - 0,055P_b - 0,052VFA]}{1 + e^{(-8,267 - 0,722 \log f + 5,397 \log T)}} \quad (18)$$

Onde: $|E^*|$ é o módulo dinâmico axial da mistura, em 10^5 psi;
 ρ_{200} é o percentual, em massa, do agregado que passa a peneira nº 200;
 ρ_8 , ρ_4 , ρ_{38} e ρ_{34} são o percentual, em massa, do agregado retido nas peneiras nº 8, nº 4, 3/8" e 3/4", respectivamente;
 VFA é volume de vazios preenchidos com ligante;
 f é a frequência, em Hz;
 T é a temperatura, em °C.

2.4.3.4 Louisiana, EUA (Obulareddy, 2006)

Obulareddy (2006) desenvolveu um estudo, no qual um dos objetivos era avaliar o desempenho dos modelos Witczak e Hirsch. Um total de 11 misturas aplicadas em trechos de rodovias do estado norte americano de Louisiana foram avaliadas, com a comparação dos dados experimentais e dados resultantes da aplicação dos modelos. Ao final, o pesquisador concluiu que tanto a equação Witczak quanto Hirsch apresentaram um desempenho considerado bom a excelente, sendo que o modelo Hirsch apresentou uma maior acurácia.

Mohammad *et al.* (2014) também avaliaram o desempenho dos modelos Witczak e Hirsch, em um total de 28 misturas aplicadas na Louisiana. O modelo Witczak apresentou uma correlação (R^2) de 0,83 em escala logarítmica, com uma pequena

tendência a subestimar os módulos. Já o modelo Hirsch apresentou R^2 de 0,93 em escala logarítmica. Esses resultados corroboram o estudo anterior (Obulareddy, 2006), e os autores concluíram que os resultados indicam uma boa acurácia de ambos os modelos.

2.4.3.5 Washington, EUA (Yu e Shen, 2012)

Yu e Shen (2012) pesquisaram o desempenho de 3 modelos de previsão de módulo dinâmico, as equações Witzak 1-37A e Witzak 1-40D, e o modelo Hirsch, com os dados de 7 misturas aplicadas em campo no estado norte americano de Washington. As misturas estudadas possuíam ligante, agregados e dosagens tipicamente utilizadas nas rodovias do estado.

Após a realização dos ensaios e comparação dos resultados de laboratório com os resultados decorrentes da aplicação dos modelos de previsão, os autores concluíram que a equação Witzak 1-37A subestima os valores de módulo em baixas temperaturas e superestima em altas temperaturas. Já a equação Witzak 1-40D apresentou boa previsão nas temperaturas extremas (altas e baixas), no entanto subestimou o módulo nas temperaturas intermediárias. Já o modelo Hirsch apresentou o melhor ajuste dos dados nas temperaturas baixas a médias, superestimando o módulo em temperaturas mais altas. Ao final, os autores propuseram uma modificação do modelo Hirsch, o que gerou uma equação com melhor ajuste entre os dados experimentais e previstos para as misturas estudadas.

2.4.3.6 Idaho, EUA (El-Badawy et al., 2012)

El-Badawy et al. (2012) pesquisaram o desempenho de 2 modelos de previsão de módulo dinâmico integrantes do MEPDG vigente à época, quais sejam, a equação Witzak 1-37A e Witzak 1-40D. Basicamente, a diferença entre as duas é o parâmetro de rigidez do ligante, viscosidade ou módulo dinâmico de cisalhamento, respectivamente.

A pesquisa envolveu a caracterização de 27 misturas tipicamente aplicadas no estado norte americano de Idaho, com o objetivo de calibrar os modelos para as misturas locais. Os resultados apontaram que o desempenho dos modelos variou em função da temperatura, assim como do método de caracterização da rigidez do ligante. Em resumo, o desempenho da equação Witzak 1-37A, com a caracterização da rigidez

do ligante através da viscosidade se mostrou superior aos demais, com melhor ajuste e menor viés estatístico. Com base nos resultados dos estudos, foi proposta uma calibração do referido modelo para as misturas de Idaho.

2.4.3.7 Arizona, EUA (Biligiri e Way, 2014)

O objetivo do estudo conduzido por Biligiri e Way (2014) foi prever o módulo dinâmico de misturas já aplicadas em campo no estado norte americano do Arizona, utilizando um banco de dados de mais de 25 anos, com duas condições de envelhecimento, quais sejam, original (sem envelhecimento) e RTFOT.

Três modelos de previsão de módulo, quais sejam, as equações Witczak 1-37A, Witczak 1-40D e Hirsch foram testados, para um total de 3 diferentes misturas, elaboradas com 3 ligantes distintos, e testadas em 4 temperaturas e uma frequência. Após a comparação dos dados reais das misturas com os valores calculados de módulo dinâmico das misturas, os pesquisadores concluíram que o modelo que apresentou um melhor ajuste foi o Witczak 1-40D, que se mostrou uma ferramenta adequada para previsão de módulo dinâmico de misturas já aplicadas em campo, uma vez que a determinação do módulo através de ensaio não é prática ou possível de ser conduzida, já que a geometria necessária ao ensaio, de 150 mm de altura, é inviável para extração em camadas de revestimento asfáltico de espessuras inferiores. Os pesquisadores observaram, ainda, que todos os modelos apresentaram um viés significativo quando em altas temperaturas, em especial nas misturas que utilizaram ligantes mais rígidos.

2.4.3.8 Argentina (Martinez e Angelone, 2009 e 2010)

O estudo conduzido por Martinez e Angelone (2009) avaliou 8 misturas dosadas e compactadas em laboratório e 42 tipos de misturas extraídas de campo. Os dados foram utilizados para avaliar os modelos Witczak 1-37A, Hirsch e a equação de Heukelom e Klomp, desenvolvida em 1964. Os resultados indicaram que os modelos Witczak e Hirsch apresentam acurácias semelhantes ao prever os módulos dinâmicos nas misturas argentinas. Ambos apresentaram um bom ajuste para previsões em baixas temperaturas. Já em altas temperaturas, os modelos apresentaram uma tendência de superestimar os módulos.

Embora o estudo tenha concluído que o módulo dinâmico de misturas típicas argentinas pode ser estimado através dos 3 modelos estudados, os mesmos pesquisadores (Martinez e Angelone, 2010) propuseram uma melhoria nas previsões, por meio de uma abordagem diferenciada, utilizando a técnica de Redes Neurais Artificiais (*Artificial Neural Network – ANN*). Neste segundo estudo, que utilizou uma base de dados de 51 misturas típicas argentinas, os autores concluíram que os modelos desenvolvidos com o suporte de ANN são muito promissores para estimar os valores de módulo dinâmico.

2.4.3.9 Coréia do Sul (Cho *et al.*, 2010)

O objetivo da pesquisa conduzida por Cho *et al.* (2010) era desenvolver um modelo de previsão de módulo dinâmico de misturas asfálticas confiável para utilização junto ao método de dimensionamento de pavimento da Coréia do Sul, de maneira que os projetistas possam usar o módulo dinâmico como parâmetro de rigidez sem a realização de ensaio laboratorial específico. O comportamento de 6 misturas foi avaliado sob a aplicação de carregamento em diferentes frequências e em diferentes temperaturas. Os pesquisadores variaram ainda o volume de vazios das amostras.

A equação de previsão do módulo dinâmico foi modelada com base na função sigmoideal, considerando as condições do ensaio, as propriedades das misturas e os valores experimentais dos módulos, através de uma análise de regressão não-linear. Ao final do estudo, os pesquisadores apresentaram um modelo de previsão de módulo dinâmico que apresentou correlação (R^2) de 0,98 em escala aritmética aos dados das misturas típicas da Coréia.

2.4.3.10 Austrália (Yousefdoost *et al.*, 2013)

Yousefdoost *et al.* (2013) conduziram um estudo para avaliar se os modelos norte americanos, dentre eles os já citados Witczak 1-37A, Witczak 1-40D e Hirsch, seriam apropriados para misturas típicas da Austrália. O estudo determinou as curvas de módulo dinâmico de 28 misturas, em um espectro de diferentes temperaturas e frequências de carregamento, assim como as características intrínsecas de cada mistura.

Os resultados apontaram que os modelos Witczak 1-37A e Hirsch previram valores menores de módulo em comparação com os valores dos ensaios. Já o modelo

Witczak 1-40D previu valores maiores, e apresentou grande viés nos resultados. O desempenho dos modelos foi considerado inconsistente ao longo da variação de temperatura. Uma análise de sensibilidade mostrou que características relacionadas aos ligantes têm mais influência sobre o módulo dinâmico previsto, o que corrobora com as conclusões de Sakhaeifar *et al.* (2015).

2.4.3.11 Canadá (Esfandiarpour *et al.*, 2015)

Esfandiarpour *et al.* (2015) conduziram um estudo para avaliar o modelo Witczak 1-37A para misturas utilizadas no estado canadense de Manitoba, com diferentes percentuais de adição de fresado, e avaliar a aplicabilidade, ou não, do modelo, que é integrado ao *AASHTOWare Pavement ME Design, software* de dimensionamento de pavimentos baseado no *MEPDG*. Misturas contendo percentuais de fresado variando de 0 a 50% foram ensaiadas em laboratório para obtenção das curvas do módulo dinâmico, que foram comparadas às curvas geradas pelo modelo.

Após análise dos dados, os autores concluíram que o modelo avaliado subestima em até 100% os valores do módulo em altas temperaturas. Já para baixas temperaturas, ocorre o inverso: uma superestimação dos valores de módulo da ordem de 50%. Os autores, no entanto, não propuseram uma calibração local dos coeficientes, nem um modelo simplificado, e sugeriram que o módulo dinâmico das misturas locais deve ser determinado experimentalmente para realização do dimensionamento de pavimentos através do *software AASHTOWare Pavement*.

2.4.3.12 Espanha (Mateos e Soares, 2015)

Mateos e Soares (2015) propuseram uma validação dos modelos Witczak e Hirsch, com dados de misturas diversas daquelas utilizadas em suas respectivas calibrações. Tiveram por objetivo avaliar a aplicabilidade desses modelos para misturas asfálticas e rotinas de ensaios tipicamente usadas na Espanha. Os autores obtiveram dados experimentais de 8 misturas asfálticas espanholas, e a realização do ensaio para obtenção de $|E^*|$ foi baseado na norma europeia EN 12697-26:2004.

Na avaliação dos autores, os modelos Witczak (baseado na viscosidade do ligante) e Hirsch apresentaram excelentes correlações quando comparados com os

resultados experimentais, com R^2 de 96,2% e 95,7%, em escala logarítmica, respectivamente. Para frequências reduzidas mais baixas, os dois modelos subestimaram os módulos. Já para frequências reduzidas mais altas (baixas temperaturas), o modelo Witzak (baseado na viscosidade do ligante) superestimou a rigidez, enquanto o modelo Hirsch apresentou excelente previsão. Considerando a versão de 2006 do modelo Witzak, a conclusão dos autores é que este superestimou os módulos, e as previsões apresentaram um R^2 de 76,3% em escala logarítmica. Outra conclusão do estudo foi a baixa sensibilidade dos modelos ao teor de ligante das misturas.

Tendo em vista as conclusões do estudo, Mateos e Soares (2015) propuseram um modelo simplificado para a previsão de módulo dinâmico, baseado nos dados de suas misturas. Assim, foram apresentados os seguintes valores para os parâmetros δ , $\delta+\alpha$, β e γ para a função sigmoïdal (vide equação 13) apresentada na Equação 19.

$$\begin{aligned}\delta &= 1,572 \\ \delta + \alpha &= 4,466 \\ \beta &= -1,177 + 9,316VA - 0,5345 \cdot \log(G_{ref}) \\ \gamma &= -0,2094 + 0,09201 \cdot \beta \\ \log(a_T) &= -0,1304 \cdot (T - T_{ref})\end{aligned}\tag{19}$$

Onde: G_{ref} é o módulo dinâmico em cisalhamento do ligante a 20°C, em MPa;
VA é o percentual de vazios da mistura (Vv nesta dissertação).

O modelo apresentou um excelente ajuste aos dados das misturas, com um R^2 de 98,7% em escala logarítmica.

2.4.3.13 Grécia (Georgouli *et al.*, 2016)

A pesquisa apresentada em Georgouli *et al.* (2016) teve por objetivo avaliar o desempenho de modelos de previsão de módulo dinâmico existentes, para materiais de pavimentação típicos da Grécia. Foram avaliados os modelos Witzak 1-37A, Hirsch, Witzak 1-40D. Um total de 15 misturas gregas foram testadas em laboratório para determinação experimental do módulo dinâmico, de acordo com o protocolo AASHTO T 342-11 (2011). Os pesquisadores concluíram que a equação Witzak 1-40D superestimaram os valores de módulo dinâmico, enquanto que a equação Hirsch subestimou os módulos. Já a equação Witzak 1-37A apresentou resultados mais

próximos aos valores medidos. Ao final, os pesquisadores propuseram uma calibração da equação Witczak 1-37A, através de uma otimização não linear dos dados experimentais, para aplicação da equação calibrada em método de dimensionamento empírico mecanístico a ser implementado na Grécia.

2.4.3.14 Outras Considerações

Considerando os achados dos estudos relatados nesta revisão bibliográfica, a acurácia dos modelos de previsão de módulo dinâmico deve ser avaliada para as misturas locais. Os modelos podem e devem ser calibrados localmente, já que seu desempenho varia conforme as avaliações locais. As calibrações locais devem contribuir para uma previsão mais acurada do módulo dinâmico, levando em conta as características específicas das misturas e seus constituintes – por exemplo, origem, constituição e especificação dos ligantes, origem e características dos agregados e parâmetros próprios de dosagem. A Tabela 9 apresenta um resumo dos parâmetros considerados nos modelos locais e/ou simplificados apresentados nesta seção.

Tabela 9: Parâmetros requeridos como *input* nos modelos

Descrição	Representação original na equação	Witczak 1-40D (2006)	Hirsch (2003)	Yang <i>et al.</i> (2014)	Sakhaeifar <i>et al.</i> (2015)	Mateos e Soares (2015)
% passante na peneira 200	ρ_{200}	X	-	X	X	-
% retido na peneira 8	ρ_8	-	-	X	-	-
% retido na peneira 4	ρ_4	X	-	X	-	-
% retido na peneira 3/8	ρ_{38}	X	-	X	X	-
% retido na peneira 3/4	ρ_{34}	X	-	-	X	-
Volume de Vazios	V_a	X	-	-	X	X
Vazio no agregado mineral	VMA	-	X	-	-	-
Vazio preenchido com ligante	VFA	-	X	X	-	-
Volume efetivo de ligante	V_{beff}	X	-	-	X	-
Módulo dinâmico do ligante	$ G^* $	X	X	-	X	X
Ângulo de fase do ligante	δ_b	X	-	-	-	-
Frequência	f	-	-	X	-	-
Temperatura	T	-	-	X	-	-

Embora Schwartz (2005) indique que diferenças do valor do módulo medido e previsto apresentem sensibilidade muito pequena no dimensionamento da espessura da camada asfáltica de um pavimento, quando se trata de prever o desempenho do pavimento, Kim *et al.* (2005) relataram que diferenças de 50% entre módulo medido e

previstos acarretam erros de 25 a 50% na previsão da vida de fadiga e erros de até 80% na previsão do desempenho quanto à deformação permanente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia que guiou a execução da presente pesquisa. A Figura 17 foi elaborada para apresentar o fluxograma geral das atividades desempenhadas para atingir os objetivos propostos.

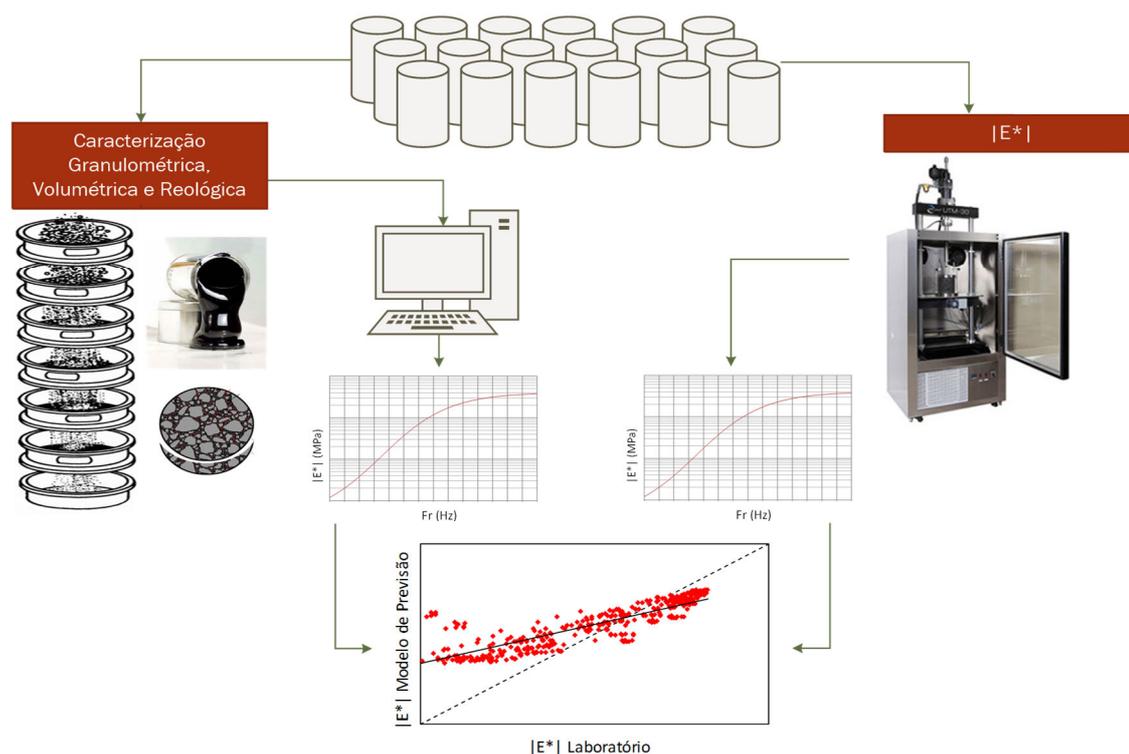


Figura 17: Fluxograma geral das atividades realizadas

3.1 Misturas Asfálticas

Um total de 6 misturas foi utilizado como fonte primária de dados para este estudo. Quatro misturas pertencem a projetos em execução e análise no Laboratório de Mecânica dos Pavimentos – LMP, da Universidade Federal do Ceará – UFC. As outras 2 misturas foram cedidas pela concessionária de rodovias CCR e pelo Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LAPAV/UFRGS.

No laboratório, as dosagens das misturas 1, 2 e 3 foram reproduzidas com a moldagem dos CPs, nas quantidades mínimas detalhadas na Tabela 10. Os CPs das misturas 4 e 5 foram enviados ao LMP, já moldados. Os CPs da mistura 6 foram moldados em laboratório utilizando amostra da mistura preparada em usina.

Tabela 10: Matriz experimental dos ensaios de módulo dinâmico

Mistura	Origem	Número de Corpos de Prova
1	BR-222	3 CPs
2	Installe 1 LAB	3 CPs
3	Installe 2 LAB	3 CPs
4	CCR	3 CPs
5	LAPAV	3 CPs
6	Installe 1 CAMPO	3 CPs

3.1.1 Mistura 1 – BR-222

Mistura aplicada na restauração da Rodovia Federal BR-222/CE, que liga Fortaleza a Teresina, no segmento entre os km 64 e 122. Esta mistura foi executada no trecho conhecido como “Curva da Morte”, cujo desempenho está sendo monitorado pelo LMP/UFC, no âmbito do Projeto Rede Temática de Asfalto em cooperação com a Petrobras. O trecho foi executado com uma camada de concreto asfáltico de 5 cm de espessura, aplicada sobre camada de ligação (*binder*) de 6 cm de espessura.

Os materiais utilizados para moldagem dos CPs foram cedidos pelo DNIT ao LMP/UFC. O ligante utilizado na mistura 1 foi o CAP 50/70 fornecido pela Petrobras/Lubnor em Fortaleza, com um teor de 5,8%. O consórcio executor das obras utilizou, ainda, um aditivo melhorador de adesividade, DOPE, num teor de 0,3% em massa do ligante.

3.1.2 Mistura 2 – Trecho experimental Insttale 1

Mistura dosada no LMP/UFC, com ligante e agregados graúdos da mesma origem da mistura 1 (DNIT). Toda a areia contida na mistura 1 foi retirada e sua curva granulométrica foi enquadrada na Faixa B do DNIT, com o objetivo de melhorar o desempenho quanto à deformação permanente. A mistura foi dosada pelo protocolo *Superpave*, e resultou num teor de ligante de 4,5%.

3.1.3 Mistura 3 – Trecho experimental Insttale 2

Mistura dosada no LMP/UFC, a partir da mistura 2, com adição de 18% de material fresado, e mantendo-se o mesmo teor final de ligante, 4,5%. A dosagem também

foi feita com o objetivo de melhorar sua resistência à deformação permanente e de aplicá-la em trecho monitorado submetido ao carregamento de simulador de grande porte.

3.1.4 Mistura 4 – CCR

Mistura cedida pelo Centro de Pesquisas Rodoviárias da Concessionária CCR/Nova Dutra, aplicada em trecho da Rodovia Nova Dutra, cuja operação é concedida à iniciativa privada no Estado de São Paulo. O ligante utilizado na mistura 4 é classificado como 30/45 pela especificação nacional vigente, com um teor de 4,7%. Sua granulometria está encaixada na Faixa III DERSA. Quatro CPs já moldados foram recebidos pelo LMP/UFC, para a realização do ensaio de módulo dinâmico. Foi encaminhada, ainda, amostra do ligante utilizado na mistura para a realização dos ensaios reológicos.

3.1.5 Mistura 5 – LAPAV

Trata-se de uma mistura cedida pelo LAPAV/UFRGS, aplicada na execução de trecho monitorado no âmbito do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul. O trecho está localizado na Rodovia BR-290/RS, que liga Osório a Porto Alegre, atualmente sob concessão privada à empresa Triunfo Concepa.

Conforme descrito por Mattos (2014), a estrutura típica do pavimento empregado consiste em 60 cm de reforço de subleito, 30 cm de sub-base, 15 cm de base de brita graduada e 8 cm de revestimento de concreto asfáltico. A camada asfáltica foi executada em duas camadas idênticas de 4 cm, e dosada pela metodologia Marshall. Apresenta um teor de 4,7% de ligante modificado por polímero – o FLEXPAVE 60/85 da Greca Asfaltos, agregados pétreos de origem basáltica com granulometria distribuída conforme a Faixa C da norma DNIT 031/2006-ES (DNIT, 2006). Um total de 30 CPs já moldados foram recebidos pelo LMP/UFC, sendo 4 deles para a realização do ensaio de módulo dinâmico.

3.1.6 Mistura 6 – Mistura de campo do trecho experimental Insttale 1

A mistura 6 é a mesma mistura 2, sendo produzida em usina, quando da construção de trecho experimental. Uma amostra da mistura foi coletada em campo e

levada ao laboratório para a moldagem dos corpos de prova. Assim, apresenta a mesma distribuição granulométrica e teor de ligante. No entanto, quando da caracterização reológica do ligante, percebeu-se que os ligantes são reologicamente distintos, mesmo que ambos sejam classificados como CAP 50/70 de acordo com a classificação por penetração vigente no país.

3.1.7 Resumo dos Dados Primários

A Tabela 11 apresenta as principais características de projeto das misturas. Já a Figura 18 apresenta a curva de distribuição granulométrica de cada mistura. A curva granulométrica da mistura 6 não foi incluída na Figura 18, uma vez que é a mesma da mistura 2.

Tabela 11: Principais características de projeto das misturas

Mistura:	M. 1	M. 2	M. 3	M. 4	M. 5	M. 6
Tipo de ligante	50/70 (LMP)	50/70 (LMP)	50/70 + Fresado	30/45	60/85 Flexpave	50/70 (campo)
Teor de ligante (%)	5,8	4,5	4,5	4,7	4,7	4,5
Volume de vazios(%)	4,2	3,9	3,6	4,0	4,5	3,9
Gmm	2,423	2,538	2,534	2,478	2,529	2,538
TMN (mm)	12,5	19	19	12,5	19	19
Granulometria	Faixa C DNIT	Faixa B DNIT	Faixa B DNIT	Faixa III DERSA	Faixa C DNIT	Faixa B DNIT

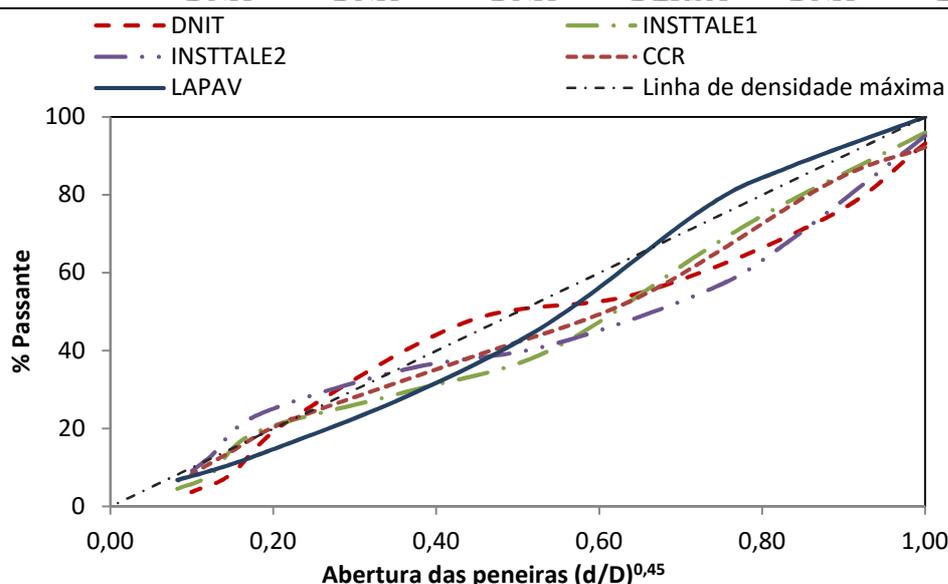


Figura 18: Distribuição granulométrica

3.1.8 Moldagem dos Corpos de Prova

As misturas 1, 2 e 3, produzidas no LMP/UFC, e a mistura 6, produzida em usina, foram moldadas em compactador giratório, em corpos de prova de 100 mm de diâmetro e 150 mm de altura, geometria final requerida para o ensaio de obtenção do módulo dinâmico, conforme preconizado pela norma AASHTO T-342-11. Antes da compactação, uma amostra de mistura solta foi utilizada para determinar a densidade máxima teórica – Gmm, de maneira que o volume de vazios pudesse ser calculado.

Já os CPs das misturas 4 e 5, foram recebidos no LMP já moldados na geometria do ensaio. A mistura 4 foi a única mistura da pesquisa moldada em cilindro de 150 mm de diâmetro, e os CPs de 100 mm foram extraídos do miolo (*coring*). A Figura 19 apresenta a geometria de alguns dos CPs investigados. Todos os CPs destinados ao ensaio de módulo dinâmico foram moldados com volume de vazios alvo de 4%, com tolerância de $\pm 0,3\%$.



Figura 19: CPs das misturas 1 e 4, preparadas para o ensaio de módulo dinâmico

3.2 Ensaio de Determinação do Módulo Dinâmico

O ensaio foi realizado seguindo, em geral, as recomendações contidas na norma norte americana AASHTO T 342-11, descrita brevemente a seguir. Neste protocolo, os CPs possuem geometria cilíndrica, com 150 mm de altura por 100 mm de diâmetro, e são dotados de 3 dispositivos do tipo *Linear Variable Differential Transform*es – LVDT, colocados a cada 120° no terço médio do corpo de prova, vide Figura 20. Os CPs foram ensaiados num equipamento do tipo *Universal Testing Machine* – UTM-25, disponível no LMP/UFC, Figura 21.

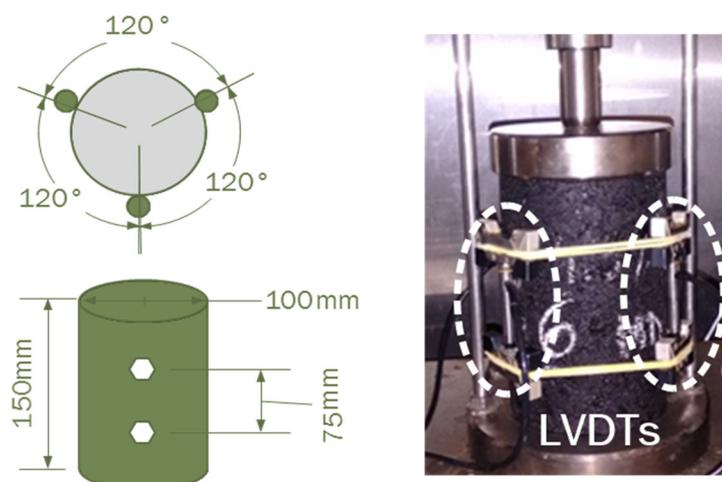


Figura 20: Esquema de montagem dos LVDTs



Figura 21: Prensa hidráulica UTM-25 utilizada nos ensaios

O carregamento senoidal foi aplicado no CP na direção axial, nas temperaturas -10; 4,4; 21,1; 37,8; e 54°C, nas frequências 25; 10; 5; 1; 0,5; e 0,1 Hz, sempre iniciando da temperatura mais baixa e da frequência mais alta. A Tabela 12 apresenta as recomendações de condicionamento da temperatura, e a Tabela 13 apresenta o número de ciclos de aplicação de carga, segundo a AASHTO T 342-11, e que foram seguidas na realização dos ensaios.

Tabela 12: Tempo de equilíbrio de temperaturas recomendado

Temperatura de ensaio, °C	Tempo de equilíbrio desde a temperatura ambiente	Tempo desde a temperatura anterior do ensaio
-10	Durante a noite	Durante a noite
4,4	Durante a noite	4 horas
21,1	1 hora	3 horas
37,8	2 horas	2 horas
54	3 horas	1 hora

Tabela 13: Número total de ciclos por frequência de carregamento

Frequência, Hz	Número de Ciclos
25	200
10	200
5	100
1	20
0,5	15
0,1	15

A escolha dos níveis de tensão aplicados no carregamento foi determinada através da realização prévia de um *fingerprint*. O ensaio chamado de *fingerprint* designa uma varredura de frequências em um CP de cada mistura, onde a cada temperatura de ensaio é aplicado um número de ciclos reduzido, com níveis de carga aplicados em ensaios anteriores realizados no LMP. As deformações lidas foram inseridas numa planilha de Excel elaborada no LMP que otimiza os níveis de tensão para uma deformação alvo de 34 $\mu\epsilon$. Esse procedimento visa garantir que o ensaio está sendo realizado na zona viscoelástica linear do material, com deformações máximas da ordem de 70 $\mu\epsilon$ (Carpenter *et al.*, 2003). Assim, para cada par frequência-temperatura foi obtido um valor de tensão máxima, que foram então adotadas para o ensaio. As tensões máximas aplicadas em cada mistura são apresentadas na Tabela 14. Já as tensões mínimas são da ordem de 20% das tensões máximas.

Tabela 14: Tensões máximas aplicadas

Temp. de ensaio, °C	Freq., Hz	Tensão Máxima aplicada no ensaio, kPa					
		M. 1	M. 2	M. 3	M. 4	M. 5	M. 6
-10	25	2066	2417	3114	2552	1832	2342
	10	1954	2278	2896	2553	1780	2240
	5	1900	2202	2784	2493	1728	2157
	1	1787	2074	2568	2349	1586	2018
	0,5	1732	2014	2471	2180	1519	1932
	0,1	1578	1849	2290	1778	1381	1767
4,4	25	1536	1811	2095	2372	1479	1964
	10	1440	1660	1970	2242	1379	1790
	5	1367	1552	1892	2159	1302	1691
	1	1180	1340	1680	1889	1102	1436
	0,5	1099	1215	1588	1744	1018	1319
	0,1	918	986	1381	1500	837	1081
21,1	25	813	1161	1405	1252	752	1161
	10	692	989	1247	1121	620	989
	5	600	840	1129	1015	538	840
	1	402	499	840	750	341	499
	0,5	323	383	739	648	274	383
	0,1	194	209	524	440	154	209
37,8	25	332	475	609	616	315	315
	10	240	351	490	495	239	239
	5	178	265	397	400	187	187
	1	82	140	215	222	98	98
	0,5	57	93	158	160	72	72
	0,1	28	55	84	84	41	41
54,4	25	112	142	240	168	96	96
	10	57	88	128	103	58	58
	5	39	62	89	71	43	43
	1	15	28	38	30	20	20
	0,5	12	22	31	20	19	19
	0,1	9	17	20	12	17	17

3.2.1. Construção das Curvas Mestras

A construção da curva mestra de cada mistura foi realizada utilizando a teoria descrita no item 2.1.2 deste trabalho. A equação de *Arrhenius* foi aplicada para determinar os fatores de trasladação das curvas isotermas, para a temperatura de referência de 20°C. A constante C da equação de *Arrhenius* otimizada para cada mistura é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15: Constante C de *Arrhenius*

Mistura	C (°K)
1	11.752,2
2	11.736,9
3	11.866,1
4	11.756,1
5	11.753,1
6	11.205,8

A partir da transladação das curvas isotermas, foi possível a construção da curva mestra do módulo dinâmico em função da frequência reduzida, para a temperatura de referência. Com os dados de módulo dinâmico por frequência reduzida de cada mistura, a curva sigmoïdal foi ajustada. Os parâmetros da equação sigmoïdal (vide equação 9) foram determinados, e são apresentados no Capítulo 4. O ajuste das curvas foi feito com o auxílio do *software LAB Fit* (Silva e Silva, 2011), desenvolvido para auxiliar o tratamento e análise de dados experimentais, inclusive com ajuste de curvas através de regressão não linear.

3.3 Dados Secundários

Com o objetivo de tornar a avaliação dos modelos mais robusta, foram utilizados dados secundários de outras misturas nacionais. Quatro grupos de informações deveriam ser conhecidos para que o aproveitamento de dados secundários obtivesse sucesso:

- a) Os valores experimentais de módulo dinâmico para cada par frequência-temperatura;
- b) O percentual retido em cada peneira da curva granulométrica dos agregados;
- c) Os parâmetros volumétricos: teor de ligante, volume de vazios do CP submetido ao ensaio de módulo dinâmico e Gmm da mistura; e
- d) Caracterização reológica do ligante, nas mesmas frequências e temperaturas do ensaio de módulo dinâmico da mistura.

Os dados de um total de 18 misturas nacionais foram coletados e incluídos nas avaliações dos modelos. A origem dos dados é apresentada brevemente a seguir.

3.3.1 Dados Secundários do LMP/UFC

Trabalhos recentes desenvolvidos no LMP/UFC, que continham resultados de módulo dinâmico, foram avaliados para identificar se as demais informações necessárias também eram conhecidas. Assim foram identificadas duas fontes de dados secundários.

No trabalho de Freire (2015), uma mistura que utilizou o CAP 50/70, o mesmo utilizado nas misturas 1 e 2, foi submetida ao ensaio de módulo dinâmico. Assim os dados experimentais de módulo dinâmico, granulometria e volumetria, obtidos diretamente com o autor, foram acrescentados aos dados da caracterização reológica do CAP 50/70-LMP. Essa mistura será referida neste trabalho como RAF, que indicam as iniciais do autor.

Procedimento idêntico foi realizado com a mistura de referência de Oliveira (2014), que utilizou o mesmo CAP 50/70 e que também realizou ensaio de módulo dinâmico. Os dados experimentais de módulo dinâmico, granulometria e volumetria, foram obtidos diretamente com a autora. Essa mistura será referida neste trabalho como AHO, que indicam as iniciais da autora.

3.3.2 Dados Secundários da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

Os dados provenientes do Laboratório de Pavimentação Asfáltica da Universidade Federal de Santa Maria – GEPPASV/UFSM integram o trabalho desenvolvido por Almeida Junior (2016). O autor fez uma ampla investigação da influência da granulometria, do tipo e do teor de ligante asfáltico, e do método de dosagem no comportamento mecânico das misturas asfálticas. Um total de 16 misturas foi caracterizado, inclusive com a realização do ensaio de módulo dinâmico. Os dados de módulo dinâmico, volumetria e granulometria necessários foram coletados diretamente com o autor da pesquisa. No entanto os dados necessários de reologia dos 2 ligantes utilizados não estavam disponíveis. Assim, foram enviadas amostras virgens do CAP 50/70 e do COMPAFLEX AMP CAP 60-85E, ambos utilizados na pesquisa. Esses CAPs foram submetidos ao mesmo condicionamento e caracterização reológica dos dados primários, discutidos no item a seguir. No presente trabalho, as misturas serão designadas UFSM 1 a UFSM 16.

3.4 Caracterização Reológica dos Ligantes

Um total de 5 ligantes com características reológicas distintas compõe as misturas do estudo apresentado nesta dissertação como dados primários. Outros 2 ligantes distintos foram utilizados nos dados secundários coletados junto à UFSM. As informações dos ligantes caracterizados neste estudo estão apresentadas na Tabela 16.

Tabela 16: Ligantes caracterizados e suas respectivas misturas

CAP	MISTURAS
50/70 LMP	M.1; M.2; RAF; AHO
50/70 + FRESADO	M.3
30/45	M.4
60/85 FLEXPAVE	M.5
50/70 CAMPO	M.6
50/70 UFSM	UFSM 1 a 4; UFSM 9 a 12
60/85 COMPAFLEX	UFSM 5 a 8; UFSM 13 a 16

As propriedades viscoelásticas de cada ligante foram obtidas por meio de um reômetro de cisalhamento dinâmico (*dynamic shear rheometer* – DSR) modelo AR-2000, da *TA Instruments*, disponível no LMP/UFC. O ensaio foi realizado utilizando a geometria de placas paralelas de 8mm de diâmetro, conforme recomendações contidas na norma norte americana AASHTO T 315-12. Para a execução do controle da temperatura, foi acoplado na base do reômetro um acessório denominado placa *peltier*, capaz de aplicar variações de temperatura na amostra, vide Figura 22.



Figura 22: Amostra de CAP submetida ao *frequency sweep* no DSR AR-2000

Para cada ligante foi realizada uma varredura de frequências, a deformação controlada. Para definição da deformação a ser controlada em cada amostra, de maneira a garantir o ensaio na zona viscoelástica linear do material, uma varredura de deformações (*strain sweep*) foi realizada previamente. Um amplo estudo conduzido por Bahia *et al.* (2011) com ligantes modificados adotou níveis de deformação que variaram de 0,01 a 10% para avaliação de suas propriedades reológicas. A Tabela 17 apresenta os parâmetros adotados para a realização do *strain sweep* e a Tabela 18 apresenta o nível de deformação que foi adotado para a realização da varredura de frequências de cada tipo de ligante, em decorrência dos resultados do *strain sweep*.

Tabela 17: Parâmetros do *strain sweep*

Varredura	Temperatura (°C)	Frequência (Hz)	<i>Strain sweep</i> (%)
1	50	0,1	0,1 – 3,0
2	50	25	0,1 – 3,0
3	4,4	0,1	0,1 – 3,0
4	4,4	25	0,1 – 3,0

Tabela 18: Deformação controlada adotada no ensaio de varredura de frequência

CAP	Nível de deformação (%)
50/70 LMP	0,5
50/70 + FRESADO	0,4
30/45	0,4
60/85FLEXPAVE	0,5
50/70 CAMPO	0,5
50/70 UFSM	0,5
60/85 COMPAFLEX	0,5

Realizado o *strain sweep*, e determinado o nível de deformação a ser aplicado, uma nova amostra de cada ligante foi preparada para a varredura de frequências. O intervalo de frequências partiu de 0,1 Hz até 25 Hz. As temperaturas testadas foram as mesmas utilizadas no ensaio de módulo dinâmico das misturas (54,4; 37,8; 21,1; e 4,4 °C), exceto -10°C por restrições do equipamento, e incluindo a temperatura de 20°C. A varredura de frequências foi realizada sempre iniciando da temperatura mais alta para a mais baixa, e da frequência mais baixa para a mais alta, conforme recomenda a norma AASHTO T 315-06 para a geometria de 8 mm, com intervalo mínimo de 10 minutos para o equilíbrio de cada temperatura. Embora essa mesma norma preconize que a geometria de 8 mm só deve ser utilizada para temperaturas de no máximo 40°C, a varredura de frequências também foi realizada na temperatura de 54,4°C nessa geometria, com o

objetivo de evitar a alteração da geometria do ensaio para uma única temperatura. Anderson *et al.* (1994) sugerem que a geometria de 25 mm seja utilizada quando $|G^*|$ variar entre 10^3 e 10^5 Pa, enquanto a geometria de 8 mm seja utilizada quando $|G^*|$ variar entre 10^5 e 10^7 Pa.

As curvas mestras de rigidez dos ligantes foram construídas pelo *software* de análise de dados do equipamento DSR utilizado no ensaio, com aplicação do princípio de superposição tempo-temperatura. A temperatura de referência de 20°C foi adotada, e as curvas das demais temperaturas trasladadas com o fator de trasladação correspondente, determinados pela equação WLF.

As propriedades reológicas dos ligantes a serem utilizadas nos modelos de previsão devem refletir a condição real de envelhecimento da mistura (Mateos e Soares, 2015). Assim, dada a necessidade de manter as mesmas condições de envelhecimento da mistura moldada em laboratório, as amostras de ligante foram ensaiadas após serem submetidas ao envelhecimento no *Rolling Thin Film Oven Test* – RTFOT. Este procedimento simula o envelhecimento ocorrido durante a preparação e compactação da mistura asfáltica, e consiste em expor a amostra de ligante à oxidação e evaporação, conforme descrito em Bernucci *et al.* (2010).

3.4.1 Extração e Recuperação de Ligante

Para realizar a caracterização reológica de dois dos ligantes, foi necessário extrair amostras de ligante dos corpos de prova moldados. A extração do ligante da mistura 3 foi necessária para que as características reológicas obtidas no ensaio levassem em conta a parte do teor de ligante advindo do material fresado. Já para a mistura 5, a extração foi necessária porque a quantidade de ligante recebida foi insuficiente para a realização do ensaio. Assim, foi realizado o procedimento de extração e recuperação dos ligantes de um CP de cada uma dessas misturas, dentre os que não haviam sido utilizados no ensaio de módulo dinâmico. Os CPs foram enviados para o laboratório da empresa Imperpav Projetos e Consultoria, na cidade de São Paulo, que realizou a extração.

O procedimento realizado para extração e recuperação do ligante está bem descrito em Oliveira (2014). Resumidamente, a extração foi realizada por meio de um conjunto de vidrarias (*Soxlet*), dentro da qual a amostra da mistura é lavada por vapores de solvente, e filtrada em seguida. O produto resultante da extração, composto por ligante

e solvente, foi centrifugado e submetido à recuperação por destilação com o uso do método *Abson*, vide Figura 23. Oliveira (2014) alerta que o processo de destilação requer muito cuidado, visto que deverá promover a completa retirada do solvente, para a correta caracterização do ligante após a recuperação. Como os ligantes das misturas 3 e 5 foram extraídos e recuperados de CPs previamente compactados, as amostras não foram submetidas ao envelhecimento no RTFOT antes da realização da caracterização reológica, uma vez que já tinham envelhecido em decorrência dos procedimentos de mistura e compactação.

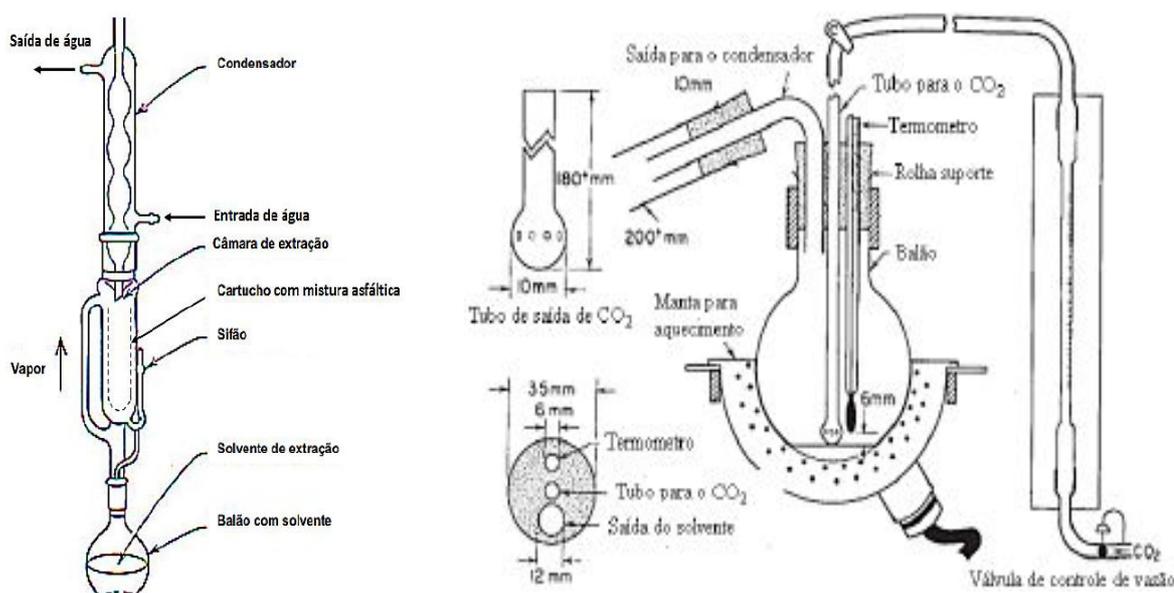


Figura 23: Representação esquemática dos processos de extração e recuperação do ligante, adaptado de Oliveira (2014)

3.5 Parâmetros Granulométricos e Volumétricos

Os parâmetros granulométricos e volumétricos de cada mistura investigada são apresentados na Tabela 19, considerando o volume de vazios dos CPs moldados de 4%, que serão os dados de entrada para aplicação das equações de previsão.

Tabela 19: Parâmetros granulométricos e volumétricos das misturas.

Parâmetro	M.1	M. 2	M. 3	M. 4	M. 5	M. 6
ρ_{200}	3,70	4,51	6,47	8,30	6,82	4,51
ρ_4	45,20	60,14	58,73	46,10	53,03	60,14
ρ_{38}	25,30	34,16	44,77	16,80	23,22	34,16
ρ_{34}	0,00	3,99	4,86	0,00	0,00	3,99
V_V	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
VAM	16,66	14,15	14,14	14,38	14,59	14,15
VFA	75,99	71,74	71,70	72,18	72,59	71,74
VBE	12,66	10,15	10,14	10,38	10,59	10,15

3.6 Avaliação dos Resultados

O desempenho dos modelos será avaliado pela comparação dos valores de módulo medidos em laboratório com os valores calculados por meio dos modelos de previsão. Isto será possível ao se plotar os valores em um gráfico, com os valores de módulo medidos *versus* valores de módulo previstos. O ajuste dos pontos plotados em relação à linha de igualdade será determinado pelos parâmetros estatísticos R^2 e Se/Sy , onde R^2 é o coeficiente de correlação entre os valores medidos e estimados de $|E^*|$, e Se/Sy é a razão entre o erro padrão dos valores estimados de $|E^*|$ e o desvio padrão dos valores medidos de $|E^*|$, a exemplo da análise realizada em outros estudos (Robbins, 2009; El-Badawy *et al.*, 2012; Mohamad *et al.*, 2014). A razão Se/Sy reflete a melhoria na acurácia da previsão de uma equação preditiva. Valores menores (mais próximos de 0) indicam previsões melhores. Os valores de R^2 , Se e Sy podem ser determinados por meio das Equações 20, 21 e 22.

$$R^2 = 1 - \frac{(n-k)}{(n-1)} \left(\frac{Se}{Sy} \right)^2 \quad (20)$$

$$Se = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-k)}} \quad (21)$$

$$Sy = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{(n-1)}} \quad (22)$$

Onde: y_i é cada módulo dinâmico axial medido;
 \hat{y}_i é cada módulo dinâmico axial previsto;
 \bar{y} é a média do módulo dinâmico axial medido;
 n é o tamanho da amostra;
 k é o número de variáveis independentes do modelo investigado (vide Tabela 9).

Uma segunda análise realizada se refere à inclinação e ao intercepto da linha de regressão linear dos pontos plotados no mesmo gráfico acima, em relação à linha de igualdade, conforme realizado no estudo de El-Badawy *et al.* (2012), vide Figura 24. A equação de regressão linear dos dados experimentais em um ajuste ideal deverá apresentar inclinação próxima de 1, e intercepto próximo de 0.

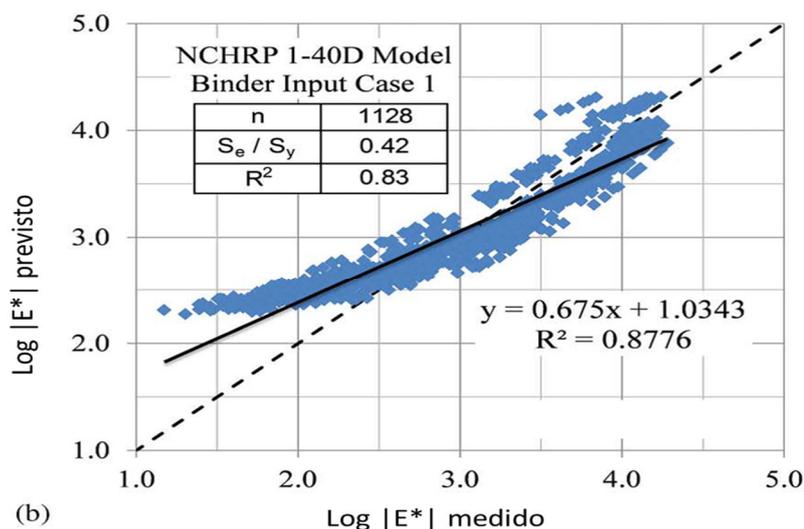


Figura 24: Linha de regressão linear vs linha de igualdade, adaptado de El-Badawy *et al.* (2012)

Witczak *et al.* (2002) propõem critérios para avaliação dos parâmetros estatísticos de ajuste dos dados, reproduzidos na Tabela 20.

Tabela 20: Classificação do ajuste de dados, adaptado de Witczak *et al.* (2002)

Critério	R^2	Se/Sy
Excelente	> 0,90	< 0,35
Bom	0,70-0,89	0,36-0,55
Razoável	0,40-0,69	0,56-0,75
Ruim	0,20-0,39	0,76-0,90
Muito Ruim	< 0,19	> 0,90

Uma terceira análise realizada nos dados avaliou as alterações no ranqueamento das misturas em função do seu módulo dinâmico medido e previsto. Se a rigidez medida de uma mistura A, em dada frequência e temperatura, é superior à rigidez de uma mistura B, então a rigidez prevista da mistura A também deve ser superior à rigidez prevista da mistura B. Caso contrário, o modelo de previsão fornecerá uma indicação incorreta do desempenho relativo das misturas avaliadas. Para tanto, é possível

a determinação do coeficiente τ de Kendall, conforme análise realizada na pesquisa de Ceylan *et al.* (2009). O referido coeficiente é capaz de quantificar o grau de correspondência entre dois *rankings*. Considerando uma lista dos valores de $|E^*|$ medidos em dada frequência e temperatura, em ordem decrescente, pareada com a lista dos respectivos valores de $|E^*|$ previstos, o coeficiente τ de Kendall para os valores previstos será dado pela Equação 23.

$$\tau = \frac{4P}{n(n-1)} - 1 \quad (23)$$

Onde: P é o número de itens da lista dos valores previstos que estão ranqueados corretamente;

n é o tamanho da amostra.

Conforme descrito por Ceylan *et al.* (2009), um valor de τ igual a 1 indica que o *ranking* dos valores medidos é igual ao dos valores previstos, enquanto τ igual a 0 indica que os *rankings* são completamente independentes.

Considerando que o módulo dinâmico não é um número, mas uma curva, para ranquear as misturas é necessário considerar um único par frequência-temperatura. Para o ranqueamento das misturas investigadas na presente pesquisa, foi considerada a frequência de ensaio de 1 Hz, e na temperatura de ensaio de 54,4°C, visto que os valores de módulo dinâmico apresentam boa correlação com o *Flow Number* (Gouveia *et al.*, 2016). Assim, essa avaliação é capaz de demonstrar quais equações melhor se aplicam para uma análise de previsão de desempenho quanto à deformação permanente que utilizem o módulo dinâmico como parâmetro, a exemplo das pesquisas relatadas por Onofre (2012) e Gouveia *et al.* (2016).

Os resultados das análises estatísticas são apresentados no Capítulo 4.

4 RESULTADOS

Nos itens a seguir são apresentados os resultados e as análises decorrentes das investigações realizadas na presente pesquisa.

4.1 Módulo Dinâmico por Compressão Axial

A Figura 25 apresenta as curvas mestras experimentais das misturas M. 1 a M. 6. A temperatura de referência das curvas é de 20°C. A Tabela 21 apresenta os parâmetros de ajuste de cada curva sigmoideal. A Figura 26 apresenta as curvas dos ângulos de fase. A Figura 27 apresenta os resultados no espaço *Black*.

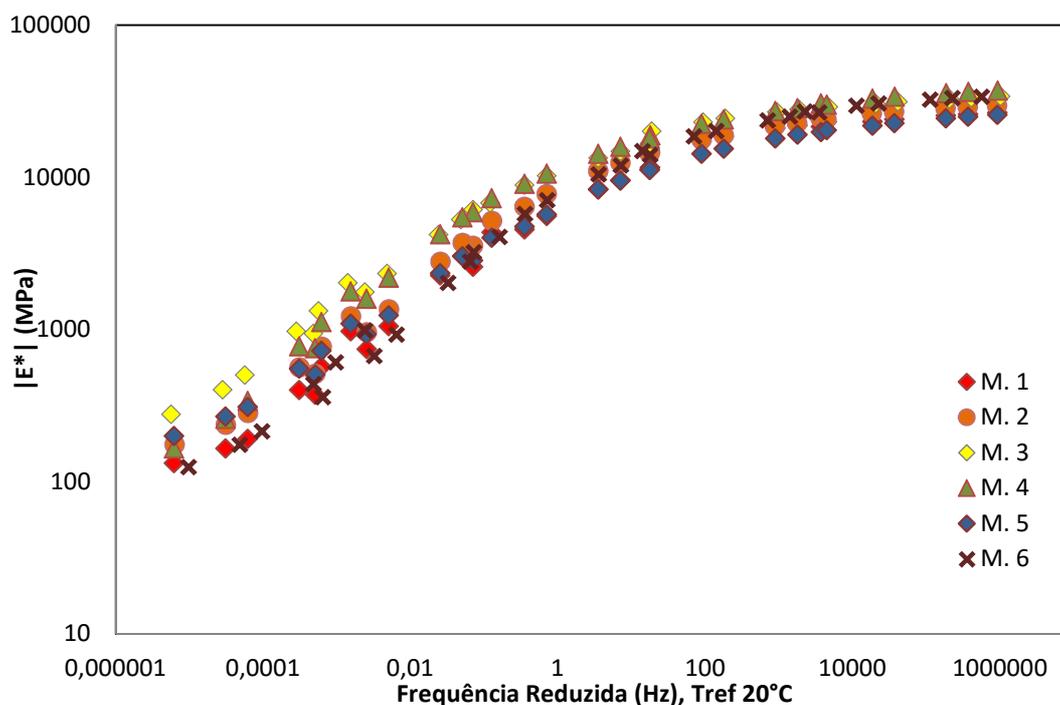


Figura 25: Curvas mestras das misturas – $|E^*|$ vs frequência reduzida

Tabela 21: Coeficientes de ajuste da equação sigmoideal, T_{ref} 20°C

	M. 1	M. 2	M. 3	M. 4	M. 5	M.6
δ	1,4346	1,6470	1,6179	0,9337	1,7024	1,5912
α	3,0300	2,8370	2,9479	3,6594	2,7450	2,9634
β	-1,3262	-1,3981	-1,5484	-1,76866	-1,1773	-1,2011
γ	-0,5104	-0,5342	-0,4818	-0,4676	-0,4782	-0,5608
R^2	0,995	0,997	0,998	0,998	0,998	0,995

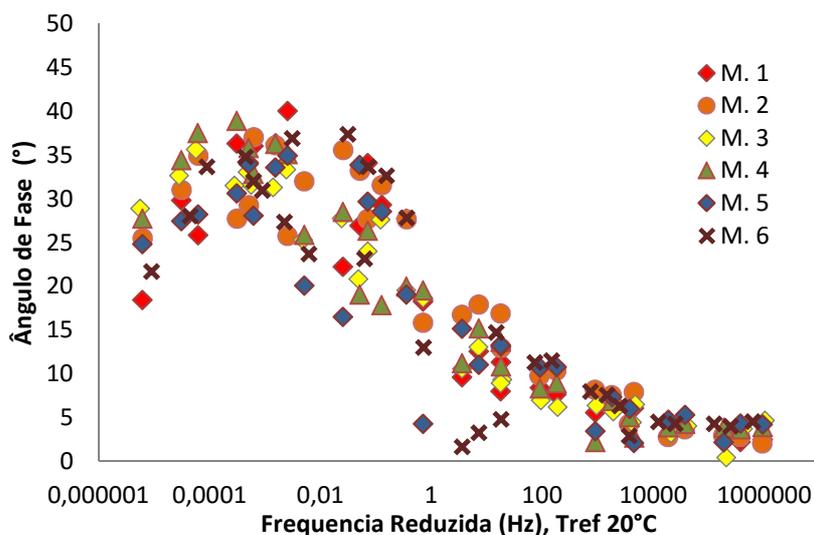


Figura 26: Ângulo de fase vs frequência reduzida

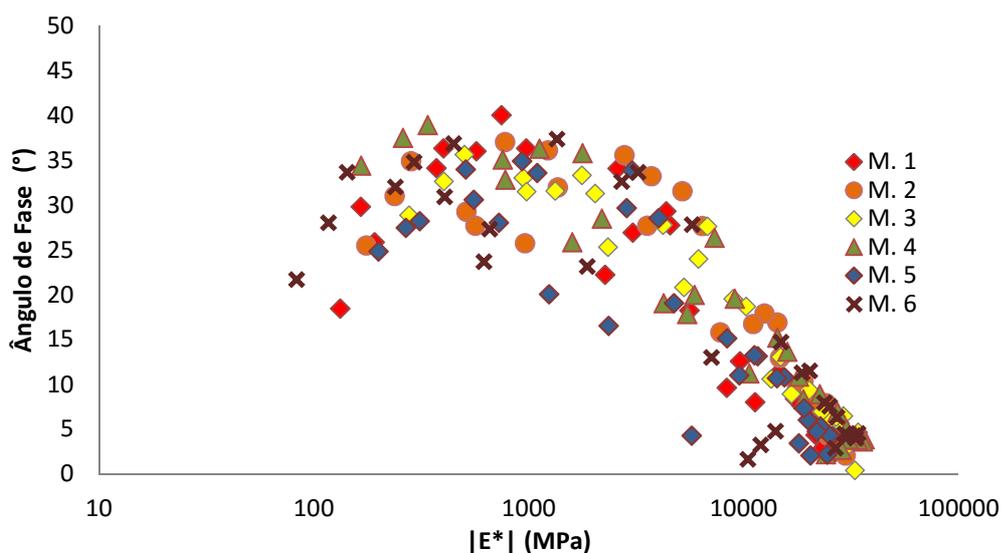


Figura 27: Resultados plotados no espaço *Black*

Como esperado, as misturas elaboradas com os ligantes mais consistentes (M. 3 e M. 4), apresentaram rigidezes superiores às demais, em especial nas temperaturas médias a altas. Os resultados das misturas M. 1 e M. 2, vide Figura 28, que utilizam ligante idêntico, indicam que um teor de ligante e uma curva granulométrica bem projetados podem produzir misturas com maior rigidez em temperaturas médias a altas, contribuindo para um melhor desempenho da mistura quanto à deformação permanente (Onofre, 2012; Gouveia *et al.*, 2016).

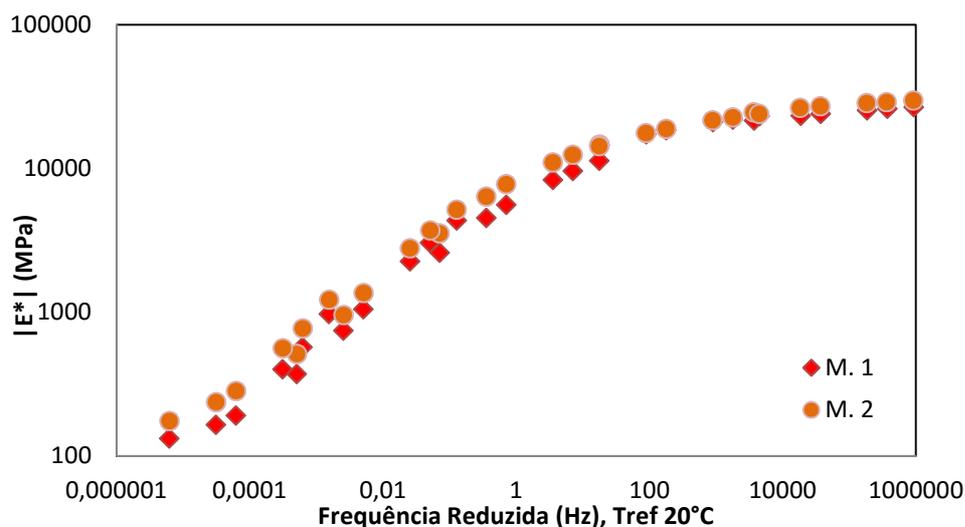


Figura 28: Curvas mestras das misturas M. 1 e M. 2

As curvas mestras das misturas M. 2 e M. 6 são apresentadas na Figura 29. Estas misturas possuem teor de ligante e curva granulométrica idênticas, e ligantes de mesma classificação 50/70 e mesmo fornecedor. Os ligantes, porém, apresentam comportamentos reológicos distintos, acarretando diferenças no comportamento viscoelástico das misturas. O resultado indica que é interessante conhecer o comportamento reológico do ligante quando da seleção de materiais para o projeto de dosagem, independente da classificação por penetração. Indicam, ainda, a necessidade de se caracterizar mecanicamente uma mistura de campo, sempre que houver mudanças no lote do ligante fornecido, quando da construção de um pavimento.

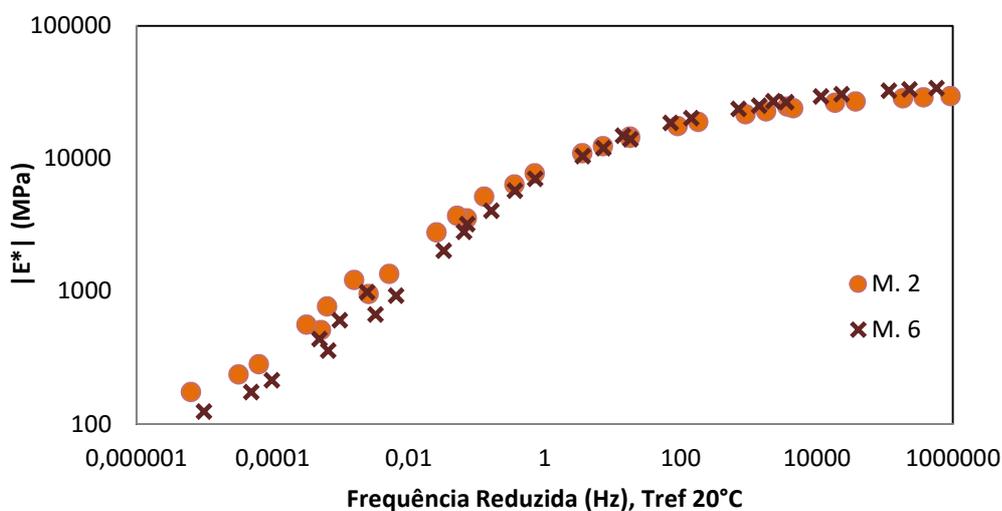


Figura 29: Curvas mestras das misturas M. 1 e M. 2

A mistura M. 5, dosada com ligante modificado por polímero, apresenta um comportamento particular, uma vez que é mais rígida que as demais nas faixas de temperatura mais altas, e menos rígida que as demais nas faixas de temperaturas mais baixas, indicando que ela pode ter um melhor comportamento em campo tanto quanto à fadiga, quanto à deformação permanente.

Os dados experimentais das curvas mestras de módulo dinâmico foram ajustados na equação sigmoïdal (equação 13), com coeficientes de correlação (R^2) entre 0,99 e 1,00, demonstrando que a equação modela com precisão o comportamento das misturas asfálticas sob carregamento harmônico.

Quanto aos ângulos de fase, os gráficos mostram uma dispersão nos dados experimentais. Daniel *et al.* (2004) investigaram interferências nas medições do módulo dinâmico de misturas asfálticas, e perceberam a existência de fatores dinâmicos e eletrônicos durante o ensaio que geram erros nas leituras de ângulo de fase. Os pesquisadores concluíram que essas interferências são muito difíceis de eliminar.

4.2 Propriedades Viscoelásticas dos Ligantes

A Figura 30 apresenta as curvas mestras experimentais do módulo dinâmico de cisalhamento ($|G^*|$) e a Figura 31 os respectivos ângulos de fase (ϕ) dos ligantes que constam nas misturas investigadas. A temperatura de referência das curvas é de 20°C.

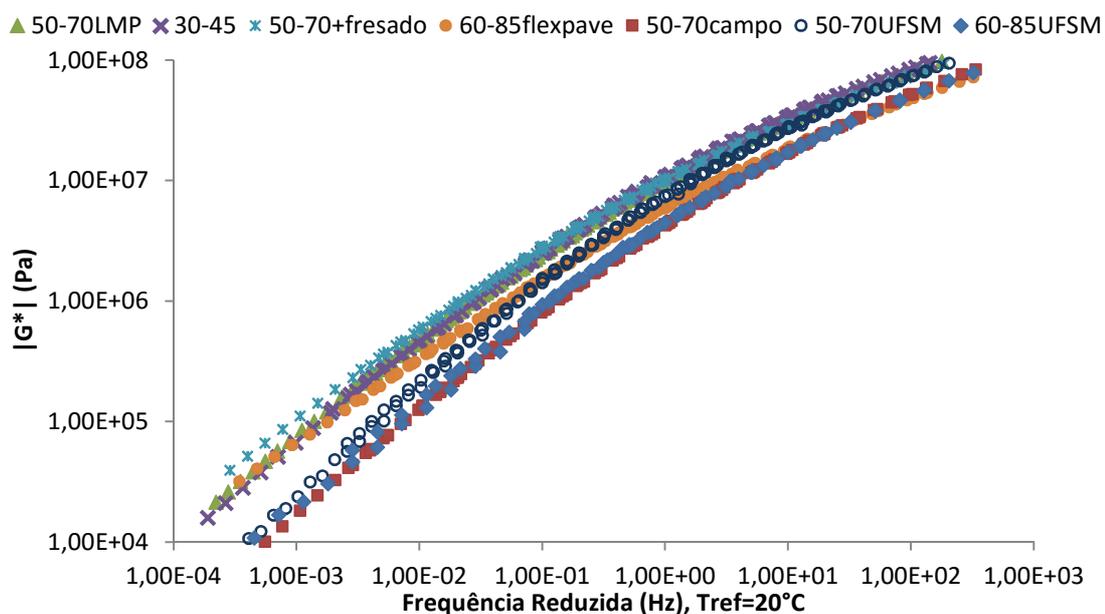


Figura 30: Curvas mestras dos ligantes – $|G^*|$ vs frequência reduzida

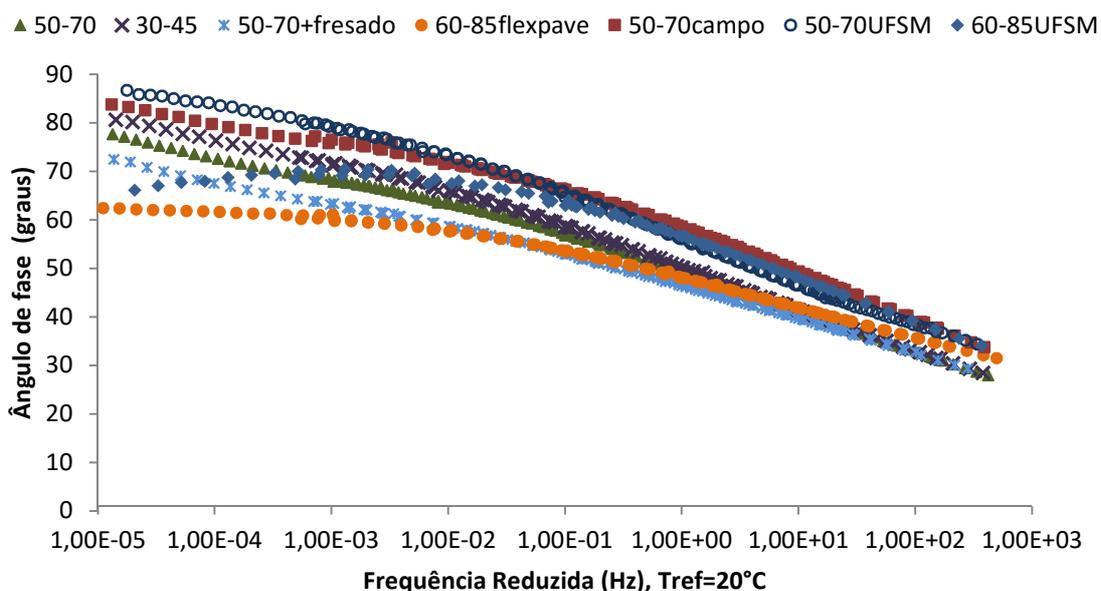


Figura 31: Ângulos de fase vs frequência reduzida

Como esperado, os ligantes mais consistentes (CAP 30/45 e CAP50/70+fresado), apresentaram rigidezes superiores aos demais ligantes. Cabe destacar, ainda, que o CAP 50/70LMP apresentou curva de rigidez semelhante ao CAP 30/45, e muito distinta do CAP 50/70campo, indicando que a classificação por penetração vigente no Brasil não necessariamente reflete as propriedades reológicas dos ligantes. Já o ligante modificado 60/85Flexpave apresenta rigidez semelhante ao CAP 30/45 nas temperaturas mais altas, enquanto apresenta rigidez semelhante ao CAP 50/70campo nas

temperaturas mais baixas, comportamento esperado de ligantes modificados por polímeros (Pamplona *et al.*, 2012).

A análise das curvas mestras dos ângulos de fase também sugere que a classificação por penetração não reflete as propriedades reológicas dos ligantes, uma vez que os ligantes classificados como CAP 50/70 obtiveram resultados bastante distintos. Quanto aos ligantes modificados, estes apresentaram uma suavização (60/85Flexpave) e até uma redução (60/85Compaflex) do ângulo de fase na região de temperaturas mais altas.

Embora à temperatura de 54,4°C o valor de $|G^*|$ de todos os ligantes testados tenham ficado abaixo de 10^5 Pa, rigidez para a qual Anderson *et al.* (1994) sugerem a geometria de 25 mm no ensaio do DSR, é possível perceber que tanto as curvas mestras de $|G^*|$ como do ângulo de fase se mantiveram suaves nesta região, indicando que possivelmente não houve prejuízo à realização do ensaio.

Para a realização da caracterização reológica de cada ligante, desde a moldagem da amostra, até o final da varredura de frequências, foi necessário um tempo máximo de duas horas, assim como uma quantidade mínima de ligante, cerca de 0,1g por amostra de 8 mm.

4.3 Avaliação dos modelos de previsão de módulo dinâmico

4.3.1 Modelo Witzak 1-40D

A Figura 32 apresenta os resultados da previsão das curvas de módulo dinâmico das misturas através da equação Witzak 1-40D, para as 6 misturas dos dados primários (valores de $|E^*|$ em Mpa). Já a Figura 33 apresenta os resultados da mesma equação aplicada para o conjunto dos dados primários e secundários (valores dos eixos em função de $\text{Log}|E^*|$, para permitir a inclusão da reta de regressão no gráfico). Para o conjunto de 408 pontos de dados primários e secundários, o modelo apresentou um R^2 de 0,46 e Se/Sy de 0,75 em escala logarítmica e R^2 de 0,24 e Se/Sy de 0,90 em escala linear. A Tabela 22 apresenta alguns resultados reportados na literatura, para efeito de comparação.

Tabela 22: Indicadores estatísticos reportados na literatura para a equação de Witczak, em escala logarítmica

Referência	R ²
Presente pesquisa	0,46
Bari e Witczak (2006)	0,90
Mohamad <i>et al.</i> (2014)	0,83
Mateos e Soares (2015)	0,76
Khatab <i>et al.</i> (2014)	0,82

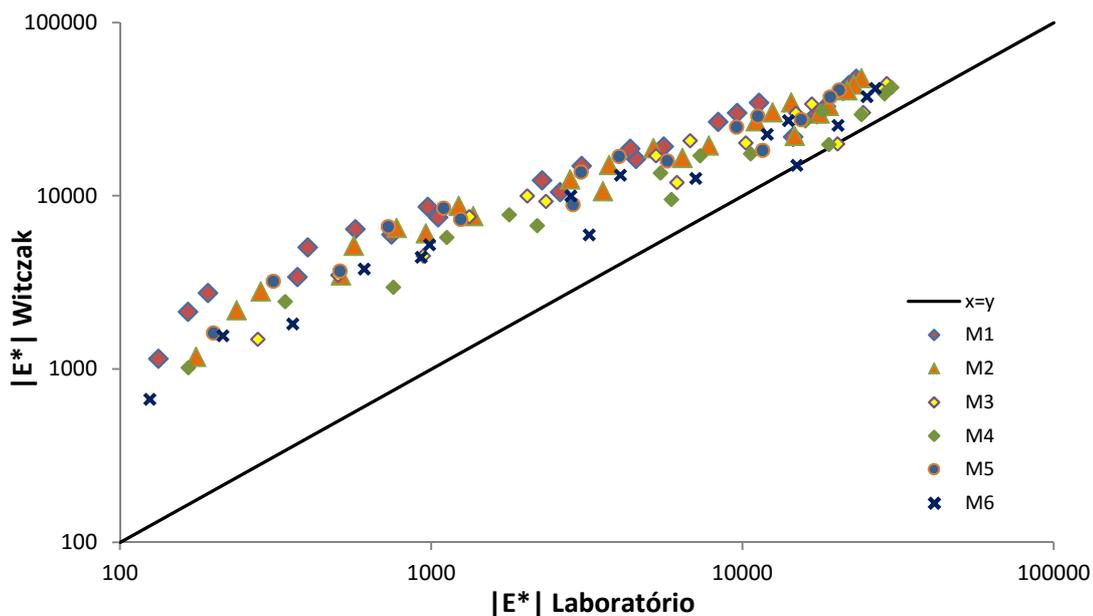


Figura 32: $|E^*|$ medido vs $|E^*|$ Witczak, para os dados primários (112 pontos)

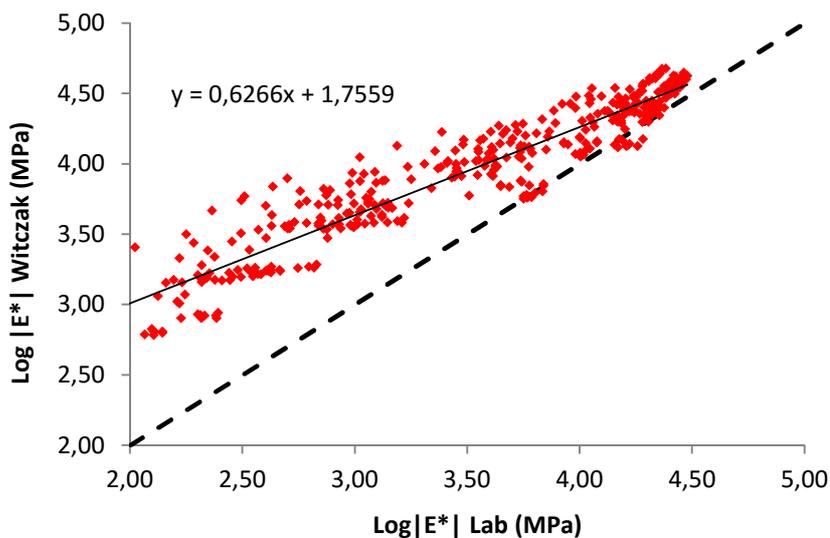


Figura 33: $\text{Log}(|E^*|)$ medido vs $\text{Log}(|E^*|)$ Witczak, para o conjunto de dados primários e secundários (408 pontos)

Os dados plotados na Figura 33 indicam que a equação Witzczak tende a superestimar os valores de módulo dinâmico, especialmente nas temperaturas mais altas. Esse resultado corrobora os resultados reportados por Azari *et al.* (2007), Robbins (2009), Mateos e Soares (2015).

4.3.2 Modelo Hirsch

A Figura 34 apresenta os resultados da previsão das curvas de módulo dinâmico das misturas através da equação Hirsch, para as 6 misturas dos dados primários (valores de $|E^*|$ em Mpa). Já a Figura 35 apresenta os resultados da mesma equação aplicada para o conjunto dos dados primários e secundários (valores dos eixos em função de $\text{Log}|E^*|$). Para o conjunto de 408 pontos de dados primários e secundários, o modelo apresentou um R^2 de 0,57 e Se/Sy de 0,66 em escala logarítmica e R^2 de 0,64 e Se/Sy de 0,60 em escala linear. A Tabela 23 apresenta alguns resultados reportados na literatura, para efeito de comparação.

Tabela 23: Indicadores estatísticos reportados na literatura para a equação Hirsch, em escala logarítmica

Referência	R^2
Presente pesquisa	0,57
Christensen <i>et al.</i> (2003)	0,98
Mohamad <i>et al.</i> (2014)	0,93
Mateos e Soares (2015)	0,96
Robbins (2009)	0,71

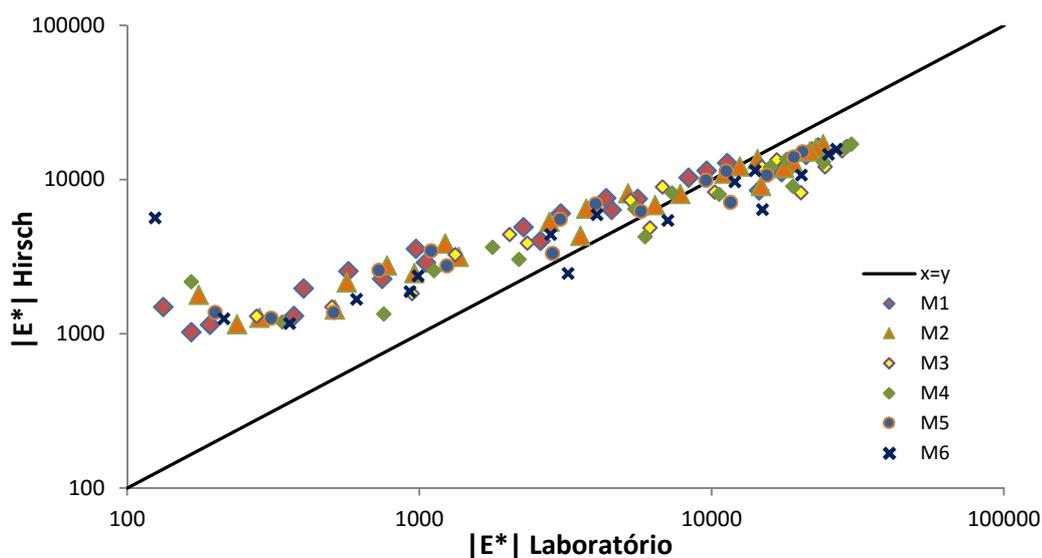


Figura 34: $|E^*|$ medido vs $|E^*|$ Hirsch, para os dados primários (112 pontos)

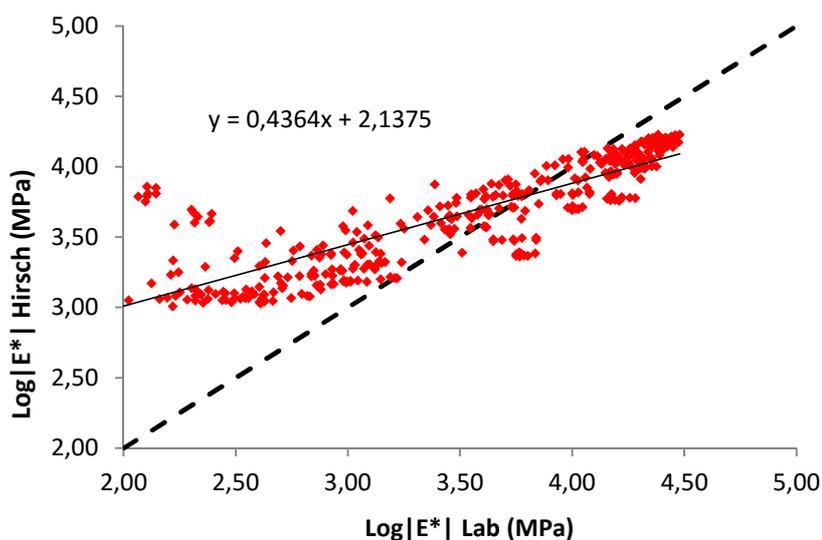


Figura 35: $\text{Log}(|E^*|)$ medido vs $\text{Log}(|E^*|)$ Hirsch, para o conjunto de dados primários e secundários (408 pontos)

4.3.3 Equação de Mateos e Soares (2015)

A Figura 36 apresenta os resultados da previsão das curvas de módulo dinâmico das misturas através da equação simplificada proposta por Mateos e Soares (2015), para as 6 misturas dos dados primários (valores de $|E^*|$ em Mpa). Já a Figura 37 apresenta os resultados da mesma equação aplicada para o conjunto dos dados primários e secundários (valores dos eixos em função de $\text{Log}|E^*|$). Para o conjunto de 408 pontos de dados primários e secundários, o modelo apresentou um R^2 de 0,92 e Se/Sy de 0,28

em escala logarítmica e R^2 de 0,87 e Se/Sy de 0,37 em escala linear. Mateos e Soares (2015) relataram um R^2 de 0,96 em escala linear e de 0,99 em escala logarítmica para os dados que deram origem à equação.

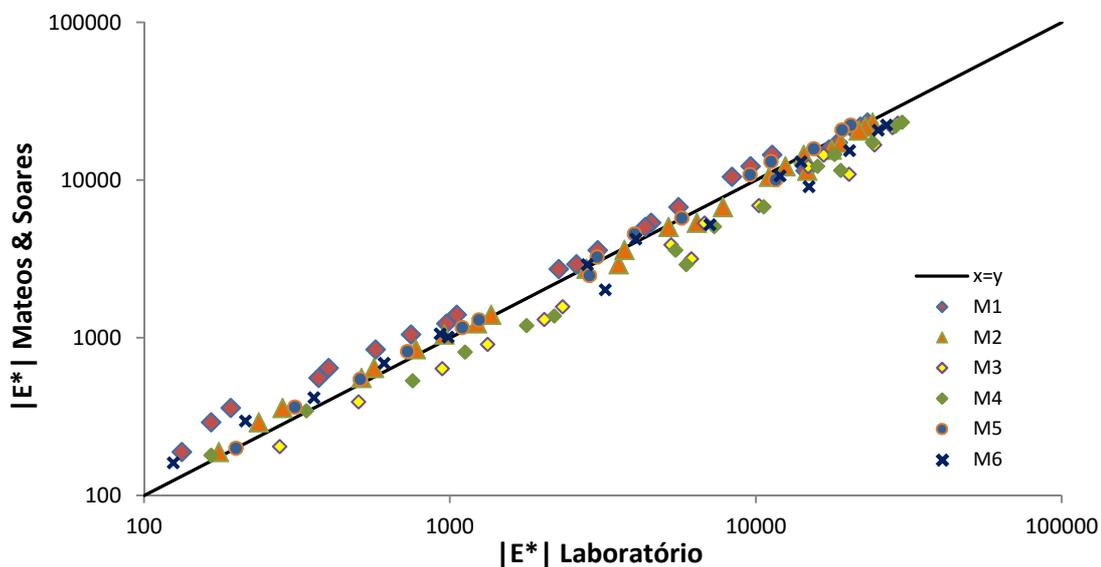


Figura 36: $|E^*|$ medido vs $|E^*|$ Mateos e Soares, para os dados primários (112 pontos)

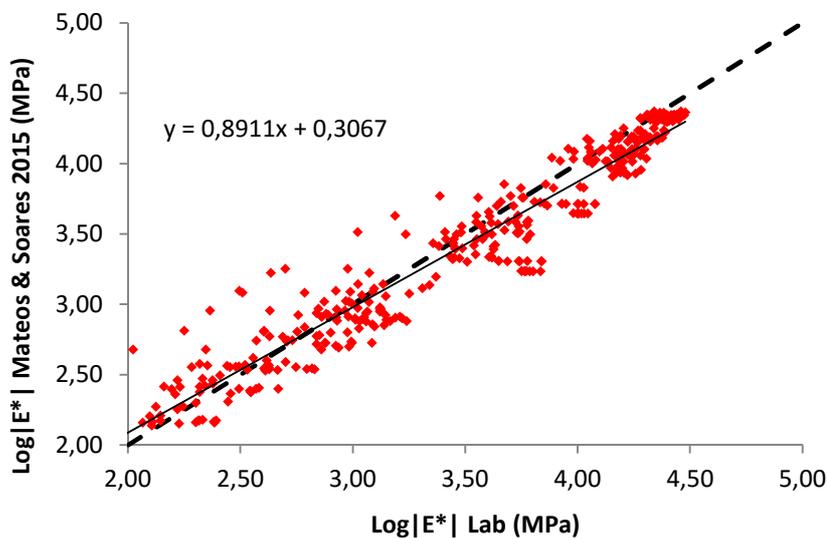


Figura 37: $\text{Log}(|E^*|)$ medido vs $\text{Log}(|E^*|)$ Mateos e Soares, para o conjunto de dados primários e secundários (408 pontos)

4.3.4 Modelo Simplificado Proposto por Sakhaeifar et al. (2015)

A Figura 38 apresenta os resultados da previsão das curvas de módulo dinâmico das misturas através da equação simplificada proposta por Sakhaeifar *et al.*

(2015), para as 6 misturas dos dados primários (valores de $|E^*|$ em Mpa). Já a Figura 39 apresenta os resultados da mesma equação aplicada para o conjunto dos dados primários e secundários (valores dos eixos em função de $\text{Log}|E^*|$). Para o conjunto de 408 pontos de dados primários e secundários, o modelo apresentou um R^2 de 0,82 e Se/Sy de 0,44 em escala logarítmica e R^2 de 0,87 e Se/Sy de 0,37 em escala linear. Sakhaeifar *et al.* (2015) relataram um R^2 de 0,96 em escala linear e de 0,98 em escala logarítmica para os dados que deram origem à equação simplificada.

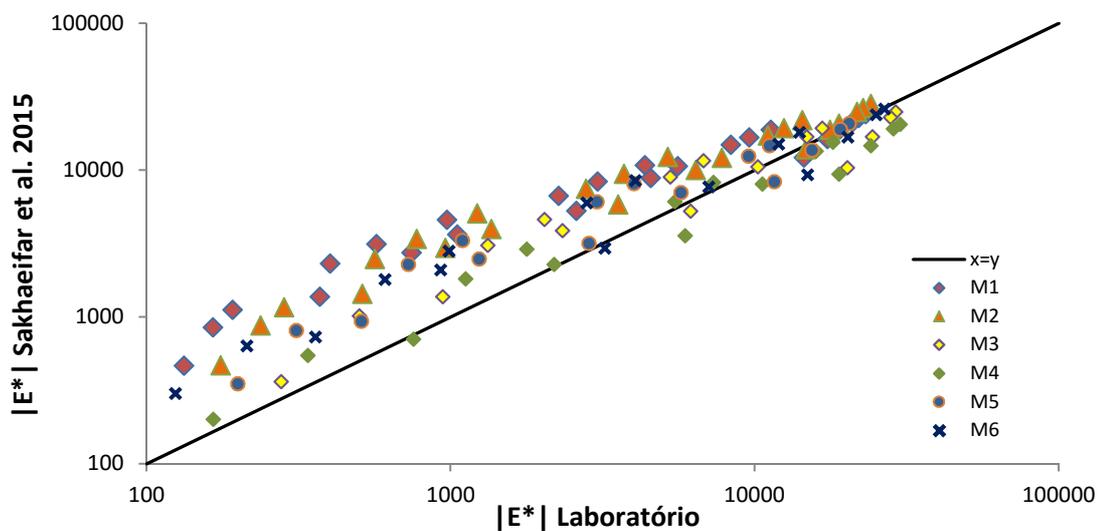


Figura 38: $|E^*|$ medido vs $|E^*|$ Sakhaeifar *et al.*, para os dados primários (112 pontos)

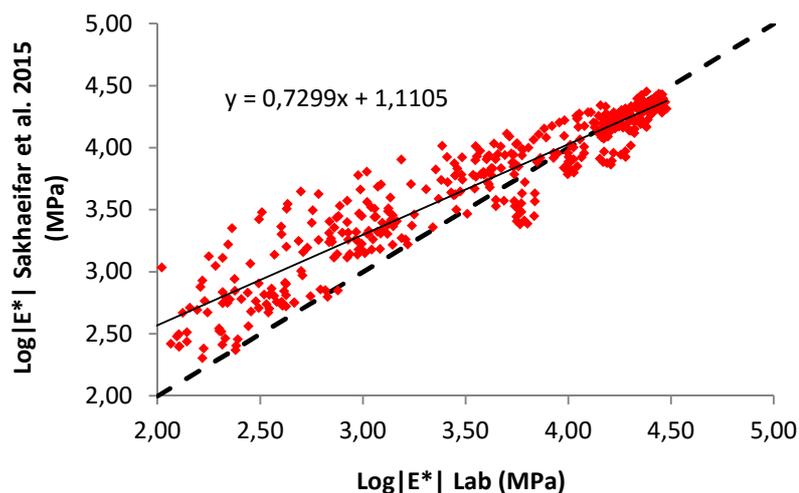


Figura 39: $\text{Log}(|E^*|)$ medido vs $\text{Log}(|E^*|)$ Sakhaeifar *et al.*, para o conjunto de dados primários e secundários (408 pontos)

4.3.5 Avaliação dos Modelos Aplicados

A Figura 40 apresenta os resultados das 4 equações de previsão de módulo dinâmico aplicadas para o conjunto dos dados primários e secundários. A Tabela 24 apresenta os indicadores estatísticos de ajuste dos dados experimentais aos dados modelados, em escala linear, e a Tabela 25 em escala logarítmica, considerando a conceituação de desempenho proposta na Tabela 20.

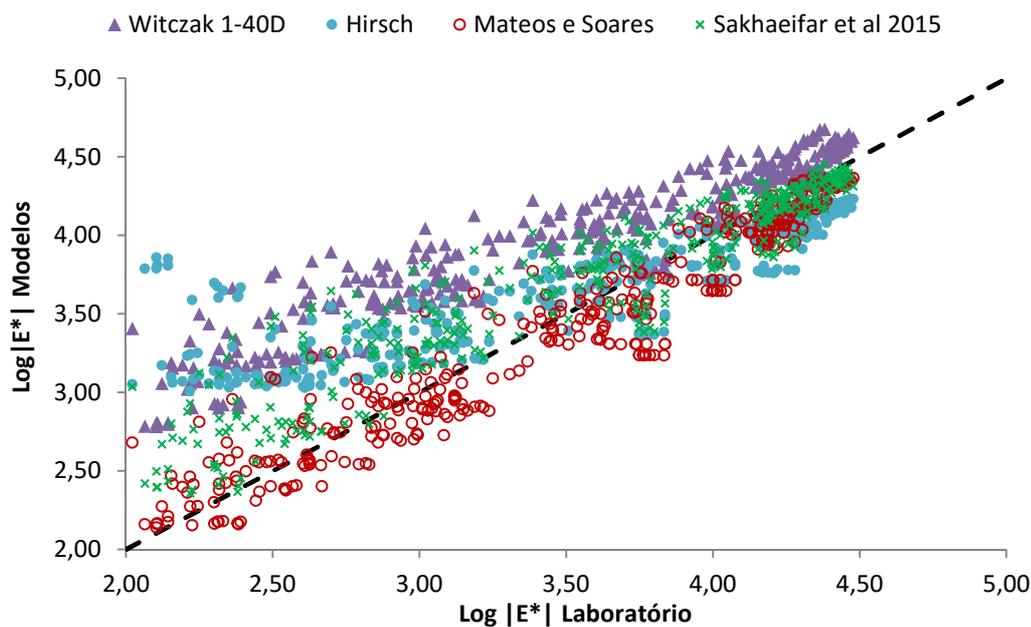


Figura 40: $|E^*|$ medido vs $|E^*|$ previsto para os 4 modelos testados

Tabela 24: Indicadores estatísticos em escala linear

Modelo	R^2	Se/Sy	Desempenho
Witczak 1-40D	0,24	0,90	Ruim
Hirsch	0,64	0,60	Razoável
Mateos e Soares	0,87	0,37	Bom
Sakhaeifar <i>et al.</i>	0,87	0,37	Bom

Tabela 25: Indicadores estatísticos em escala logarítmica

Modelo	R^2	Se/Sy	Desempenho
Witczak 1-40D	0,46	0,75	Razoável
Hirsch	0,57	0,66	Razoável
Mateos e Soares	0,92	0,28	Excelente
Sakhaeifar <i>et al.</i>	0,82	0,44	Bom

Uma análise do intercepto e da inclinação das retas de regressão das nuvens de pontos dos modelos apresentadas nos gráficos acima também refletem o desempenho

dos modelos. A Tabela 26 os resultados dessa avaliação, sendo que uma inclinação mais próxima de 1 e um intercepto mais próximo de 0 indicam um melhor ajuste da nuvem de pontos à linha de igualdade.

Tabela 26: Avaliação das retas de regressão

Modelo	Inclinação	Intercepto
Witczak 1-40D	0,6227	1,7721
Hirsch	0,4343	2,1464
Mateos e Soares	0,8859	0,3284
Sakhaeifar <i>et al.</i>	0,7250	1,1305

A análise realizada para avaliar o ranqueamento das misturas investigadas nesta Dissertação, em função do módulo dinâmico medido e previsto na frequência de 1 Hz e temperatura de 54,4°C, permitiu o cálculo do coeficiente τ de Kendall. Os resultados dessa análise são apresentados na Tabela 27. Valores de τ mais próximos de 1 indicam que o modelo avaliado tende a reproduzir o *ranking* dos valores medidos.

Tabela 27: Avaliação do τ de Kendall

Modelo	τ
Witczak 1-40D	0,6
Hirsch	0,6
Mateos e Soares	0,6
Sakhaeifar <i>et al.</i>	0,1

4.3.6 Proposta de Calibração da equação de Mateos e Soares (2015)

A investigação dos modelos indica que a equação proposta por Mateos e Soares (2015) apresentou o melhor ajuste dos dados, vide Tabelas 25, 26 e 27. Os termos (δ , α , β e γ) da equação proposta originalmente por Mateos e Soares (Equação 19), que são apresentados pelos autores separadamente, foram inseridos na função sigmoideal (Equação 13), resultando na forma exibida na Equação 24. Assim, foi proposta uma otimização dos coeficientes da equação, visando a um ajuste ainda melhor. A equação otimizada para os dados desta pesquisa é apresentada a seguir (Equação 25). O ajuste dos coeficientes foi realizado com todos os 408 dados primários e secundários, resultando em um R^2 de 0,95 e um Se/Sy de 0,23 em escala logarítmica e R^2 de 0,90 e Se/Sy de 0,31 em escala linear. Conforme os critérios apresentados na Tabela 20, a equação calibrada pode ser classificada como excelente. O gráfico de $\text{Log}(|E^*|)$ previsto pela equação proposta *versus* $\text{Log}(|E^*|)$ medido em laboratório é apresentado na Figura 41.

$$\log(|E^*|) = 1,572 + \frac{2,894}{1+e^{(-1,495+10,173Vv-0,5837\log(|G^*|))}} \quad (24)$$

$$\log(|E^*|) = 2,052 + \frac{2,520}{1+e^{(1,9931-38,3868Vv-1,3792\log(|G^*|))}} \quad (25)$$

Onde: $|G^*|$ é o módulo dinâmico em cisalhamento do ligante na mesma frequência e temperatura da mistura, MPa;

Vv é o percentual de vazios da mistura.

Uma análise da reta de regressão da nuvem de pontos também indica que a calibração da equação de Mateos e Soares otimizou o ajuste dos dados, vide Tabela 28. Observa-se que a inclinação da reta de regressão se aproximou de 1, e o intercepto se aproximou de zero. Na mesma Tabela 28, o coeficiente τ de Kendall também indica que a equação calibrada proposta foi capaz de ranquear as misturas com mais precisão, quando comparado ao ranqueamento dos dados experimentais.

Tabela 28: Avaliação das retas de regressão da calibração proposta

Modelo	Inclinação	Intercepto	τ
Mateos e Soares	0,8911	0,3067	0,6
Calibração proposta	0,9363	0,2241	0,9

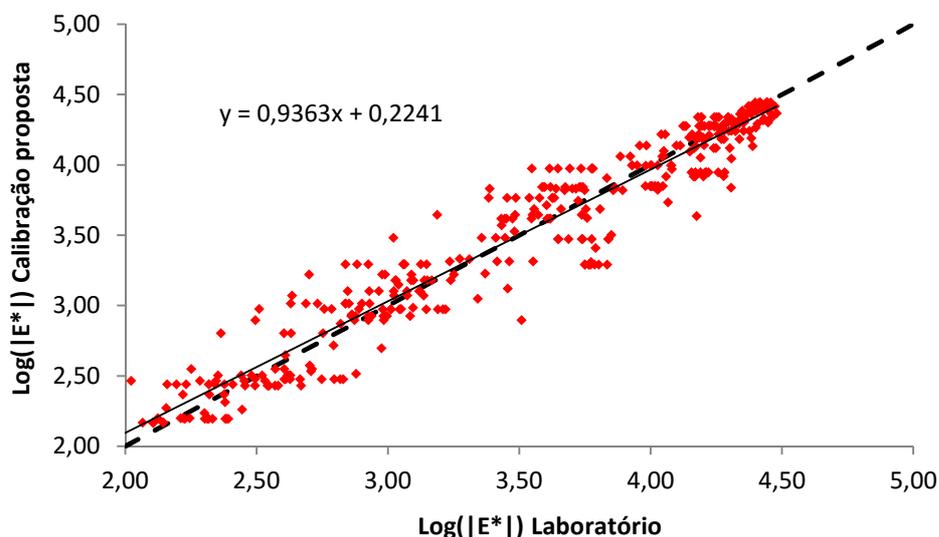


Figura 41: Ajuste dos dados de calibração do modelo de Mateos e Soares (408 pontos)

Para utilização da equação proposta, uma sugestão de uma planilha simples é apresentada, vide Figura 42. A informação volume de vazios advém da dosagem da

mistura, já temperatura, frequência e $|G^*|$, colunas 1, 2 e 3, advém da caracterização reológica do ligante. Importante ressaltar que a equação proposta foi calibrada com parâmetros contidos nos intervalos indicados na Tabela 29, que limitam, portanto, sua aplicação.

Vv	0,045		
TEMP (°C)	FREQ (Hz)	$ G^* $ (MPa)	$ E^* $ modelo
21,1	25	4,45E+01	18770,21
21,1	10	2,97E+01	15996,35
21,1	5	2,13E+01	13700,06
21,1	1	9,04E+00	8319,58
21,1	0,5	6,02E+00	6248,96
21,1	0,1	2,18E+00	2737,87

Figura 42: Exemplo de planilha para cálculo de $|E^*|$ utilizando a equação proposta

Tabela 29: Intervalo dos parâmetros da equação proposta

Parâmetro	Intervalo
Vv	4,0 – 5,5%
Temperatura	4,4 – 54,4°C
Frequência	0,1 – 25Hz

4.4 Roteiro para calibração sistemática da equação proposta

A calibração continuada da equação proposta a partir do incremento do banco de dados existente é possível e desejável. Para tanto, um passo a passo é sugerido a seguir:

- Moldar os CPs da mistura investigada, com o Vv desejado e anotar;
- Realizar o ensaio de módulo dinâmico nos CPs, numa determinada varredura de frequências e temperaturas;
- Realizar o ensaio reológico no ligante no DSR, após envelhecimento no RTFOT, nas mesmas frequências e temperaturas utilizadas no ensaio de módulo dinâmico da mistura (passo b);
- Realizados os passos a, b, c, todos os *inputs* da equação proposta serão conhecidos, e deverão ser organizados em planilha, vide sugestão na Figura 43;

N	Temperatura	Frequência	E* MEDIDO	LOG E* MEDIDO = Y	X1 = Vv	G*	LOG G* = X2
1	4,4°C	25	23154,33	4,3646	0,04	119,9	2,078819183
2	4,4°C	10	21955,33	4,3415	0,04	90,3	1,95568775
3	4,4°C	5	21001,00	4,3222	0,04	70,57	1,848620117
4	4,4°C	1	18513,67	4,2675	0,04	37,06	1,568905415
5	4,4°C	0,5	17317,67	4,2385	0,04	27,51	1,43949059
6	4,4°C	0,1	14526,00	4,1621	0,04	12,42	1,094121596
7	21°C	25	11299,00	4,0530	0,04	44,45	1,647871765
8	21°C	10	9595,00	3,9820	0,04	29,73	1,473194909
9	21°C	5	8337,00	3,9210	0,04	21,3	1,328379603
10	21°C	1	5585,33	3,7470	0,04	9,036	0,955976222
11	21°C	0,5	4543,00	3,6573	0,04	6,019	0,779524343
12	21°C	0,1	2590,67	3,4134	0,04	2,175	0,337459261

Figura 43: Sugestão de planilha para organização dos dados de calibração da equação proposta

- e) Inserir os dados em *software* de análise de dados, a exemplo do *LABfit* utilizado nesta pesquisa, para ajustar os dados à Equação 26, que resultará na obtenção das constantes calibradas da equação proposta.

$$Y = A + \frac{B}{1 + e^{(C - D.X1 - E.X2)}} \quad (26)$$

Onde: A, B, C, D e E são as constantes da equação, que serão calibradas;

Y é o Log do módulo dinâmico medido, para cada par frequência-temperatura;

X1 é o volume de vazios da mistura correspondente, em %;

X2 é o Log do módulo dinâmico de cisalhamento do ligante, no mesmo par frequência-temperatura da mistura.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nos itens a seguir são apresentadas as conclusões decorrentes das investigações realizadas na presente pesquisa, assim como sugestões de trabalhos a serem realizados no futuro, como forma de ampliar o conhecimento dos temas abordados.

5.1 Conclusões

Uma das principais conclusões da pesquisa empreendida nesta Dissertação é a real possibilidade de caracterização viscoelástica das misturas asfálticas nacionais, mesmo sem a realização do ensaio laboratorial de módulo dinâmico, permitindo, inclusive, projetar pavimentos através de métodos mecanístico-empíricos. À medida que os laboratórios de pavimentação no Brasil se modernizarem, espera-se que os profissionais da área já estejam familiarizados com o módulo dinâmico e com a sua utilização no dimensionamento de pavimentos novos e reabilitados, e também na previsão de desempenho, uma vez que a utilização de uma abordagem viscoelástica representa um salto de qualidade no dimensionamento de pavimentos asfálticos em relação à abordagem elástica.

As equações de previsão de módulo dinâmico são amplamente utilizadas internacionalmente, mesmo em países que contam com estruturas laboratoriais modernas bem difundidas e uma cultura mecanística na pavimentação já consolidada. Para tanto, os coeficientes das equações são calibrados para as características locais das misturas, ou ainda, são propostas equações mais simplificadas.

Dos modelos avaliados na presente pesquisa, a equação proposta por Mateos e Soares (2015) para misturas espanholas apresentou os melhores indicadores estatísticos quando aplicado às misturas nacionais. Seus coeficientes foram calibrados para o banco de dados investigado, resultando na proposição de uma equação para determinação do módulo dinâmico de misturas densas nacionais.

A utilização da metodologia proposta na presente Dissertação depende de uma informação volumétrica da mistura (volume de vazios requerido), assim como da caracterização reológica do ligante. O volume de vazios da mistura advém do projeto de dosagem. A caracterização reológica do ligante, no entanto, depende da realização de um ensaio mais avançado, com a utilização de um reômetro de cisalhamento dinâmico,

conforme descrito no item 3.4. No entanto, já há infraestrutura instalada no país capaz de realizar a caracterização reológica dos ligantes comercializados, possibilitando a utilização da metodologia proposta.

É importante estar atento às limitações da equação proposta, uma vez que esta possui uma base de dados limitada, que conta com um espectro de parâmetros também limitado. Fazem parte das misturas do banco de dados da presente Dissertação misturas densas, com teor de ligante variando entre 3,7 e 5,8%, e ligantes classificados como 50/70, 30/45 e 60/85 modificado com polímero, além de uma mistura com adição de fresado. Granulometrias distintas (Faixas C e B do DNIT, Faixa III DERSA), assim como misturas dosadas através das metodologias *Superpave* e *Marshall* também compõem a base de dados da pesquisa.

Por fim, o incremento do banco de dados da presente pesquisa é desejável e encorajado, com a inclusão de dados de misturas diversas, que possuam os resultados do ensaio de módulo dinâmico, a caracterização reológica do ligante após RTFOT nas mesmas frequências e temperaturas adotadas para o ensaio de módulo dinâmico da mistura, e cujo volume de vazios dos CPs submetidos ao ensaio seja conhecido. Com esses dados, a otimização dos coeficientes da equação proposta pode ser feito utilizando ferramentas simples, como o *solver* do Excel, e seguindo o roteiro indicado no Capítulo 4.

5.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

A seguir, são apresentadas sugestões de trabalhos que podem ser realizados no futuro, de maneira que a presente pesquisa tenha continuidade:

- a) Avaliar a sensibilidade da análise estrutural, bem como de modelos de desempenho de pavimentos asfálticos, em decorrência das diferenças entre os módulos medidos e calculados, na linha da pesquisa desenvolvida por Kim *et al.* (2005) e Underwood *et al.* (2011);
- b) Avaliar a aplicabilidade da equação proposta para misturas de características diversas, como por exemplo, um espectro maior de volume de vazios, uma vez que a pesquisa realizada nesta Dissertação avaliou misturas com apenas dois percentuais de V_v (4,0 e 5,5%); além de misturas

mornas, e misturas descontínuas, que não compõem a base de dados desta pesquisa;

- c) Avaliar a aplicabilidade da equação proposta para misturas com ligantes reologicamente diferentes, por exemplo, ligantes fornecidos por refinarias distintas, ou ainda ligantes modificados por aditivos diversos;
- d) Avaliar a possibilidade de obtenção do módulo dinâmico da mistura asfáltica por meio da execução de ensaios laboratoriais em escala reduzida (ex. matriz de agregados finos);
- e) Avaliar a aplicabilidade de diferentes abordagens de previsão de módulo dinâmico, por exemplo: abordagem 2S2P1D, introduzido pela *Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat* – ENTPE, da Universidade de Lyon, que assim como outros modelos mecânicos do comportamento viscoelástico de materiais asfálticos, tem como objetivo prever a resposta do material quando submetido a certa tensão ou deformação sob diferentes frequências e temperaturas (na linha do que foi feito por Dias, 2016); e uma abordagem de redes neurais artificiais, que são modelos computacionais inspirados pelo sistema nervoso central, capazes de realizar o aprendizado de máquina bem como o reconhecimento de padrões, seguindo a linha de pesquisas desenvolvidas por Ceylan *et al.* (2008), Martinez e Angelone (2010) e Singh *et al.* (2012).

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3497-79**: Standard test method for dynamic modulus of asphalt mixtures. West Conshohocken, 2003.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO Designation T 342-11**: Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt (HMA). Washington, 2011.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO Designation T 315-12**: Standard Method of Test for Determining the Rheological Properties of Asphalt Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR). Washington, 2012.

AL-KHATEEB, G. *et al.* A new simplistic model for dynamic modulus predictions of asphalt paving mixtures. **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 75, 2006.

ALMEIDA JUNIOR, P. O. B. **Comportamento mecânico de concretos asfálticos com diferentes granulometrias, ligantes e métodos de dosagem**. 2016. 217 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

ANDERSON, D. A. *et al.* Binder characterization and evaluation, volume 3: Physical characterization. **Strategic Highway Research Program, National Research Council, Report No. SHRP-A-369**, 1994.

ANDREI, D.; WITCZAK, M. W.; MIRZA, W. Development of revised predictive model for the dynamic (complex) modulus of asphalt mixtures. **Development of the 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, NCHRP**, 1999.

ARAGÃO, F. **Effects of aggregates on properties and performance of mastics and Superpave hot mix asphalt mixtures**. 2007. 136f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – University of Nebraska, Lincoln, 2007.

ARAGÃO, F. *et al.* Semiempirical, analytical, and computational predictions of dynamic modulus of asphalt concrete mixtures. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2181, p. 19-27, 2010.

AUSTROADS. **Austrroads Test Method AGPT/T274: Characterisation of Flexural Stiffness and Fatigue Performance of Bituminous Mixes**. Organization of Australasian Road Transport and Traffic Agencies, 2015.

AZARI, H. *et al.* Comparison of Simple Performance Test $|E^*|$ of Accelerated Loading Facility Mixtures and Prediction $|E^*|$: Use of NCHRP 1-37A and Witczak's New Equations. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1998, p. 1-9, 2007.

BABADOPULOS, L. F. de A. L. *et al.* Avaliação do módulo dinâmico de misturas

asfálticas a partir de diferentes modos de carregamento. *In: 21º ENCONTRO DO ASFALTO*, Rio de Janeiro, 2014.

BABADOPULOS, L. F. de A. L. **A Contribution to couple aging to hot mix asphalt (HMA) mechanical characterization under load-induced damage**. 2014. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

BAHIA, H. U. *et al.* **Characterization of modified asphalt binders in superpave mix design**, 2001.

BARI, J.; WITCZAK, M. W. Development of a new revised version of the Witczak E* predictive model for hot mix asphalt mixtures (with discussion). **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 75, 2006.

BERNUCCI, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2010.

BILIGIRI, K. P.; WAY, G. B. Predicted E* dynamic moduli of the Arizona mixes using asphalt binders placed over a 25-year period. **Construction and Building Materials**, v. 54, p. 520-532, 2014.

BIRGISSON, B. *et al.* The use of complex modulus to characterize the performance of asphalt mixtures and pavements in Florida. **Final Report**, p. 4910-4501, 2004.

BONNAURE, F. *et al.* New method of predicting the stiffness of asphalt paving mixtures. *In: Association of Asphalt Paving Technologists Proc.* 1977.

BRUXEL, D. F. **Estudo do comportamento viscoelástico de concretos asfálticos convencionais e modificados através de ensaios de laboratório e de análise de desempenho**. 2015. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

CARPENTER, S.; GHUZLAN, K.; SHEN, S. Fatigue endurance limit for highway and airport pavements. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1832, p. 131-138, 2003.

CERATTI, J. A.; BERNUCCI, L. B.; SOARES, J. B. **Utilização de Ligantes Asfálticos em Serviços de Pavimentação**. Rio de Janeiro: ABEDA, 2015.

CEYLAN, H.; GOPALAKRISHNAN, K.; KIM, S. Advanced approaches to hot-mix asphalt dynamic modulus prediction. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 35, n. 7, p. 699-707, 2008.

CEYLAN, H. *et al.* Accuracy of predictive models for dynamic modulus of hot-mix asphalt. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 21, n. 6, p. 286-293, 2009.

CHRISTENSEN JR, D. W.; PELLINEN, T.; BONAQUIST, R. F. Hirsch model for estimating the modulus of asphalt concrete. **Journal of the Association of Asphalt**

Paving Technologists, v. 72, 2003.

CHO, Y.H; PARK, D.W.; HWANG, S.D. A predictive equation for dynamic modulus of asphalt mixtures used in Korea. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 4, p. 513-519, 2010.

CLYNE, T. R. *et al.* **Dynamic and resilient modulus of Mn/DOT asphalt mixtures**. 2003.

COREE, B. J. HMA Volumetrics Revisited - A New Paradigm, Presented to the Annual meeting. **Transportation Research Board, Washington, DC**, 1998.

COUTINHO, R.P. *et al.* Avaliação de Procedimentos para Construção de Curvas Mestras para Materiais Asfálticos. *In: 20º ENCONTRO DO ASFALTO*, Rio de Janeiro, 2010.

DANIEL, J. S.; CHEHAB, G. R.; KIM, Y. R. Issues affecting measurement of the complex modulus of asphalt concrete. **Journal of Materials In Civil Engineering**, v. 16, n. 5, p. 469-476, 2004.

DIAS, D. M. **Estimativa de propriedades viscoelásticas lineares de misturas asfálticas completas a partir da caracterização da matriz de agregados finos**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Especificação de Serviço DNIT ES 031/06: Pavimentos Flexíveis – Concreto asfáltico**. Rio de Janeiro, 2006.

EL-BADAWY, S.; BAYOMY, F.; AWED, A. Performance of MEPDG dynamic modulus predictive models for asphalt concrete mixtures: local calibration for Idaho. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 24, n. 11, p. 1412-1421, 2012.

ESFANDIAPOUR, S. *et al.* An Evaluation of Pavement ME Design Dynamic Modulus Prediction Model for Asphalt Mixes Containing RAP. *In: TAC 2015: GETTING YOU THERE SAFELY-2015 CONFERENCE AND EXHIBITION OF THE TRANSPORTATION ASSOCIATION OF CANADA*, Charlottetown, 2015.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 12697-26:2012 Bituminous mixtures: Test methods for hot mix asphalt – Part 26: Stiffness**, Bruxelas, 2012.

FREIRE, R. A. **Evaluation of the coarse aggregate influence in the fatigue damage using fine aggregate matrices with different maximum nominal sizes**. 2015. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

GARCIA, G.; THOMPSON, M. **HMA dynamic modulus predictive models (a review)**. 2007.

GEORGOULI, K.; LOIZOS, A.; PLATI, C. Calibration of dynamic modulus predictive model. **Construction and Building Materials**, v. 102, p. 65-75, 2016.

GOUVEIA, B. C. S.; BASTOS, J. B. S.; SOARES, J. B. Contribuições quanto à resistência à deformação permanente de misturas asfálticas. *In*: 49º Reunião Anual de Pavimentação, Brasília, 2016.

GOUVEIA, L. T. **Contribuições ao estudo da influência de propriedades de agregados no comportamento de misturas asfálticas densas**. 2006. 309 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

HONDROS, G. The evaluation of Poisson's ratio and the modulus of materials of a low tensile resistance by the Brazilian (indirect tensile) test with particular reference to concrete. **Australian Journal of Applied Science**, v. 10, n. 3, p. 243-268, 1959.

HUANG, B.; SHU, X.; BASS, J. Investigation of simple performance characteristics of plant-produced asphalt mixtures in Tennessee. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2057, p. 140-148, 2008.

HUANG, Y. H. **Pavement analysis and design**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1993.

KATICHA, S. W. **Analysis of hot-mix asphalt (HMA) linear viscoelastic and bimodular properties using uniaxial compression and indirect tension (IDT) tests**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2007.

KHATTAB, A. M.; EL-BADAWY, S. M.; ELMWAFI, M. Evaluation of Witczak E* predictive models for the implementation of AASHTOWare-pavement ME design in the kingdom of Saudi Arabia. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 360-369, 2014.

KIM, Y. R. *et al.* Dynamic modulus testing of asphalt concrete in indirect tension mode. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 1891, p. 163-173, 2004.

KIM, Y. R.; KING, M.; MOMEN, M. **Typical dynamic moduli for North Carolina asphalt concrete mixes**, 2005.

KIM, Y. R. **Modeling of asphalt concrete**. Reston: ASCE Press, 2009.

LEE, H. S. Application of the Viscoelastic Continuum Damage Mechanics to Asphalt Mixtures under Indirect Tensile Load. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 141, n. 5, p. 04014154, 2014.

MARTINEZ, F. O.; ANGELONE, S. M. Evaluation of different predictive dynamic modulus models of asphalt mixtures used in Argentina. *In*: BEARING CAPACITY OF ROADS, RAILWAYS AND AIRFIELDS. 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE (BCR2A'09), Champaign, 2009.

MARTINEZ, F.; ANGELONE, S. The estimation of the dynamic modulus of asphalt mixtures using artificial neural networks. *In: PROCEEDINGS OF THE 11TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ASPHALT PAVEMENTS*, Nagoya, 2010.

MARTINEZ, F.; ANGELONE, S. The indirect tensile test configuration in the determination of the complex modulus of asphalt mixtures. *In: 5TH EURASPHALT & EUROBITUME CONGRESS*, Istanbul, 2012.

MATEOS, A.; SOARES, J. B. Validation of a dynamic modulus predictive equation on the basis of Spanish asphalt concrete mixtures. **Materiales de Construcción**, v. 65, n. 317, p. 047, 2015.

MATTOS, J. R. G. **Monitoramento e análise do desempenho de pavimentos flexíveis da ampliação da rodovia BR-290/RS: a implantação do Projeto Rede Temática de Asfalto no Rio Grande do Sul**. 2014. 250 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

MOHAMMAD, L. N. *et al.* Characterization of Louisiana asphalt mixtures using simple performance tests. **Journal of Testing and Evaluation**, v. 36, n. 1, p. 1-12, 2007.

MOHAMMAD, L. N. *et al.* Characterization of Louisiana asphalt mixtures using simple performance tests and MEPDG. **LTRC Report No. FHWA/LA**, v. 11, p. 499, 2014.

NASCIMENTO, L. A. H. **Nova abordagem da dosagem de misturas asfálticas densas com uso do compactador giratório e foco na deformação permanente**. 2008. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2008.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. **A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary**. Transportation Research Board, 2011.

NEGA, A.; GHADIMI, B.; NIKRAZ, H. Developing Master Curves, Binder Viscosity and Predicting Dynamic Modulus of Polymer-Modified Asphalt Mixtures. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 7, n. 3, p. 190, 2015.

OBULAREDDY, S. **Fundamental characterization of Louisiana HMA mixtures for the 2002 mechanistic-empirical design guide**. 2006. 213 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – College of Engineering, Andhra University, Visakhapatnam, 2006.

OLIVEIRA, A. H. **Avaliação do potencial antioxidante do líquido da castanha de caju (LCC) para materiais asfálticos através de diferentes métodos de envelhecimento**. 2014. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

ONOFRE, F. C. **Avaliação do comportamento mecânico de misturas asfálticas produzidas com ligantes asfálticos modificados por ácido polifosfórico e aditivos poliméricos, enfatizando a resistência à deformação permanente**. 2012. 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará,

Fortaleza, 2012.

PAMPLONA, T. F. *et al.* Asphalt binders modified by SBS and SBS/nanoclays: effect on rheological properties. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 23, n. 4, p. 639-647, 2012.

PAPAZIAN, H. S. The response of linear viscoelastic materials in the frequency domain with emphasis on asphaltic concrete. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS*, Michigan, 1962.

PAVEMENT INTERACTIVE. **HMA Weight-Volume Terms and Relationships**. Disponível em: <<http://www.pavementinteractive.org/article/hma-weight-volume-terms-and-relationships/>>. Acesso em: 27 janeiro 2016.

PAZOS, A. G. **Efeitos de propriedades morfológicas de agregados no comportamento mecânico de misturas asfálticas**. 2015. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2015.

PELLINEN, T. K.; WITCZAK, M. W. Stress dependent master curve construction for dynamic (complex) modulus (with discussion). **Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists**, v. 71, 2002.

PELLINEN, T. K.; WITCZAK, M. W.; BONAQUIST, R. F. Asphalt mix master curve construction using sigmoidal fitting function with non-linear least squares optimization. *In: RECENT ADVANCES IN MATERIALS CHARACTERIZATION AND MODELING OF PAVEMENT SYSTEMS*. New York, 2004.

PING, W. V.; XIAO, Y. **Evaluation of the dynamic complex modulus test and indirect diametral test for implementing the AASHTO 2002 design guide for pavement structures in Florida**. Tallahassee, 2007.

PROWELL, B. D.; BROWN, E. R. **Superpave mix design: verifying gyrations levels in the Ndesign table**. Transportation Research Board, 2007.

ROBBINS, M. **An investigation into dynamic modulus of hot-mix asphalt and its contributing factors**. 2009. 174 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Auburn University. Auburn, 2009.

SAKHAEIFAR, M. S.; KIM, Y. R.; KABIR, P. New predictive models for the dynamic modulus of hot mix asphalt. **Construction and Building Materials**, v. 76, p. 221-231, 2015.

SILVA, H. N. **Caracterização viscoelástica linear de misturas asfálticas: operacionalização computacional e análise pelo método dos elementos finitos**. 2009. 191 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. **LAB fit curve fitting software** (nonlinear regression and treatment of data program) V 7.2. 48 (1999–2011). Disponível em: <www.labfit.net>

Download em: 09 fevereiro 2016.

SCHWARTZ, C. W. Evaluation of the Witczak dynamic modulus prediction model. *In: 84TH ANNUAL MEETING OF THE TRANSPORTATION RESEARCH BOARD*, Washington, 2005.

SINGH, D.; ZAMAN, M.; COMMURI, S. Artificial neural network modeling for dynamic modulus of hot mix asphalt using aggregate shape properties. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 25, n. 1, p. 54-62, 2012.

UNDERWOOD, S.; ASHOURI, M.; KIM, Y. R. Effect on dynamic modulus measurement protocol on predicted pavement performance. **Asphalt Paving Technology: Association of Asphalt Paving Technologists-Proceedings of the Technical Sessions**. p. 65-98, 2011.

WITCZAK, M. W. *et al.* **Simple performance test for superpave mix design**, NCHRP **Report 465**. Transportation Research Board, 2002.

WITCZAK, M. W. **Simple performance tests: Summary of recommended methods and database**. Transportation Research Board, 2005.

YANG, E. *et al.* Predicting Dynamic Modulus of Florida Hot Mix Asphalt Mixtures. **Challenges and Advances in Sustainable Transportation Systems: Plan, Design, Build, Manage, and Maintain**, p. 282, 2014.

YOUSEFDOOST, S. *et al.* Evaluation of dynamic modulus predictive models for typical Australian asphalt mixes. *In: 15TH AAPA INTERNATIONAL FLEXIBLE PAVEMENTS CONFERENCE*, Brisbane, 2013.

YU, H.; SHEN, S. An investigation of dynamic modulus and flow number properties of asphalt mixtures in Washington State. **Report No. TNW**, v. 2, 2012.