



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

GESSYCA MENEZES COSTA

**MÉTODO DE RESSONÂNCIA POR IMPACTO: OBTENÇÃO DE CURVAS
MESTRAS DE MÓDULO DINÂMICO E DE ÂNGULO DE FASE EM MISTURAS
ASFÁLTICAS BRASILEIRAS**

São Cristóvão, SE

Janeiro de 2017

GESSYCA MENEZES COSTA

**MÉTODO DE RESSONÂNCIA POR IMPACTO: OBTENÇÃO DE CURVAS
MESTRAS DE MÓDULO DINÂMICO E DE ÂNGULO DE FASE EM MISTURAS
ASFÁLTICAS BRASILEIRAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Sergipe como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Silva Albuquerque

São Cristóvão, SE

Janeiro de 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA PARA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO

Gessyca Menezes Costa

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE EM 27/01/2017

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fernando Silva Albuquerque
Orientador (PROEC/UFS)

Prof. Dr. Carlos Henrique de Carvalho
Examinador externo (IFS)

Prof^a. Dra. Gisélia Cardoso
Examinador interno (PROEC/UFS)

Prof. Dr. Erinaldo Hilário Cavalcante
Examinador interno (PROEC/UFS)

Luis Alberto Herrman do Nascimento
Examinador externo (CENPES-PETROBRÁS)

À minha família

AGRADECIMENTOS

A Deus, senhor do tempo, que tudo planeja e faz acontecer;

Aos meus pais, Gleide e Zurel, pelo incentivo e apoio. Sei o quanto torceram pelo meu sucesso;

Ao meu orientador Fernando pela paciência e compreensão, mas, principalmente, pela amizade construída ao longo desses anos;

Ao meu pequeno Theo pelo meu objetivo de ser, de lutar e de crescer. Você me fez mais forte;

Aos professores Ângela Sales e David Soares pelo tempo doado e o conhecimento compartilhado enquanto eu tentava juntar as peças desse complexo quebra cabeça;

Aos meus irmãos, Karolyne (e Ítalo), Thassia (Mário, Cauã e Lis), Guilherme e Ariel, pelo amor, ajuda e cuidados com Theo para que esse resultado fosse alcançado;

À Vanessa pela amizade de todos os dias;

Aos amigos do LTT, em particular, a Alexander que construiu boa parte do quebra cabeça comigo;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PROEC) pela oportunidade e infraestrutura;

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pela bolsa de estudos concedida e financiamento do projeto;

Ao Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES/ Petrobras) pelo auxílio fornecido a esta pesquisa;

A todos os amigos e familiares que torceram/rezaram pela vitória desse trabalho.

RESUMO

O módulo dinâmico é um importante parâmetro no dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos, pois apresenta a relação tensão x deformação para materiais viscoelásticos, tais como as misturas asfálticas. A obtenção do módulo dinâmico é realizada atualmente por meio do ensaio mecânico, consistindo em uma aplicação de carga senoidal axial de compressão e medição da deformação resultante. Deste modo, o ensaio requer uma aparelhagem robusta, dispendiosa e de difícil execução em obras. Para contornar essa limitação, este trabalho propõe uma metodologia alternativa, mais econômica e de fácil implementação nas obras de pavimentação, baseada na Mecânica das Vibrações e que é amplamente usada na caracterização de outros materiais, como o concreto de cimento Portland e a cerâmica. Esta metodologia permite a obtenção de Módulo Dinâmico e do Ângulo de Fase por meio da determinação da frequência natural do material ao se aplicar um impulso elástico, denominada como ensaio de Ressonância por Impacto (RI). O ensaio RI foi realizado sob uma ampla faixa de temperaturas, permitindo assim a construção da curva mestra de módulo dinâmico e de ângulo de fase para misturas asfálticas brasileiras. As curvas mestras foram obtidas ajustando os resultados do ensaio de ressonância aos modelos sigmoidais para o módulo dinâmico, e os polinomiais para o ângulo de fase.

PALAVRAS-CHAVES: misturas asfálticas, módulo dinâmico, ressonância por impacto.

RESONANCE IMPACT METHOD: OBTAINING OF MASTER CURVES OF DYNAMIC MODULE AND PHASE ANGLE IN BRAZILIAN ASPHALT MIXES

ABSTRACT

The dynamic modulus is an important parameter in the mechanistic and empirical pavement design. It presents the stress-strain relationship for viscoelastic materials, such as asphalt mixtures. Obtaining the dynamic modulus is currently performed by mechanical testing and consisting of an axial sinusoidal load applying compression and measuring the resulting deformation. Thus, the assay requires a robust system, expensive and difficult to implement in field. To work around this limitation, this paper proposes an alternative methodology, more economical and easy to implement in paving, based in Mechanical Vibrations and which is widely used in the characterization of other materials, such as Portland cement concrete and ceramics. This methodology allows to obtain dynamic modulus and phase angle by determining the natural frequency of the material to apply a resilient thrust, called as resonance Impact test (RI). RI assay was performed under a wide range of temperatures, thus allowing the construction of the dynamic modulus master curve for Brazilian asphalt mixtures. It was not possible, in turn, to obtain a master curve for the dynamic modulo directly from the test result, for that, it was necessary an elaboration of sigmoidal and polynomial models. The models have a good correlation with the conventional mechanical test.

Keywords: asphalt mixtures, dynamic modulus, resonance impact.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	11
LISTA DE TABELAS	16
1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	18
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.2 JUSTIFICATIVA	18
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 COMPORTAMENTO DO PAVIMENTO FRENTE À PASSAGEM DE CARGAS	21
2.2 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	24
2.2.1 COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS VISCOELÁSTICOS	25
2.2.1.1 SÓLIDO IDEAL E LÍQUIDO NEWTONIANO IDEAL.....	26
2.2.1.2 SÓLIDO DE KELVIN-VOIGT.....	28
2.2.1.3 FLUIDO DE MAXWELL	29
2.2.1.4 MODELO DE BURGER	30
2.3 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DINÂMICO	32
2.3.1 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DINÂMICO POR ENSAIO MECÂNICO.....	32
2.3.2 DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DINÂMICO POR RESSONÂNCIA POR IMPACTO.....	34
2.3.3 MECÂNICA DAS VIBRAÇÕES	34
2.3.3.1 O ENSAIO DE MÓDULO DINÂMICO POR RESSONÂNCIA POR IMPACTO	43
2.4 CURVA MESTRA PARA MÓDULO DINÂMICO E ÂNGULO DE FASE.....	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1 MATERIAIS	49
3.2 ENSAIOS DE MÓDULO DINÂMICO	50
3.2.1 MÓDULO DINÂMICO PELO ENSAIO MECÂNICO	50
3.2.2 MÓDULO DINÂMICO PELO ENSAIO POR RESSONÂNCIA POR IMPACTO.....	51
3.2.2.1 CARACTERÍSTICAS DO ENSAIO DE RI NA UFS	55
3.3 CURVA MESTRA DE MÓDULO DINÂMICO E ÂNGULO DE FASE	58
3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	62
4.1 MÓDULO DINÂMICO E ÂNGULO DE FASE PELO ENSAIO MECÂNICO.....	62
4.2 MÓDULO DINÂMICO E DO ÂNGULO DE FASE PELO ENSAIO DE RESSONÂNCIA POR IMPACTO .	71
4.2.1 OBTENÇÃO DE FREQUÊNCIA NATURAL AMORTECIDA E FATOR DE AMORTECIMENTO	71

4.2.1.1 COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE LARGURA DE BANDA E DECREMENTO LOGARÍTMICO .	75
4.2.2 OBTENÇÃO DE FREQUÊNCIA NATURAL E ÂNGULO DE FASE.....	76
4.3 CURVA MESTRA DE MÓDULO DINÂMICO OBTIDA PELO ENSAIO DE RESSONÂNCIA POR IMPACTO	89
4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	100
5 CONCLUSÃO.....	103
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	104
REFERÊNCIAS.....	105
APÊNDICE A.....	110
APÊNDICE B.....	125
APÊNDICE C.....	140
APÊNDICE D.....	153

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Componentes de força estática e dinâmica em pavimentos.....	22
Figura 2 - Formas de propagação de ondas de superfície: (I) Rayleigh; (II) Lamb simétrica (a) e anti-simétrica (b).....	23
Figura 3 - Modelos representativos: (a) Modelo sólido ideal (mola), (b) Modelo líquido newtoniano ideal (amortecedor), (c) Modelo sólido de Kelvin-Voigt, (d) Modelo Maxwell.....	26
Figura 4 - Representação do modelo mola e gráfico tensão/deformação <i>versus</i> tempo.....	27
Figura 5 - Modelo amortecedor e gráfico tensão/deformação <i>versus</i> tempo.....	28
Figura 6 - Modelo de Burguer.....	30
Figura 7 - Módulo Dinâmico para Mistura asfálticas em função da temperatura.....	32
Figura 8 - Resposta em função do tempo de um oscilador simples ao impacto.....	37
Figura 9 - Resposta da frequência a um impulso de um oscilador simples.....	38
Figura 10 - Esquema do disco cilíndrico. R= raio da circunferência e H= espessura, r = vetor raio, z = vetor espessura.....	41
Figura 11 - Esquema do ensaio de ressonância por impacto (a) Kweon & Kim (2006) (b) Rydén (2009).....	43
Figura 12 - Princípio de Superposição Tempo-Temperatura.....	45
Figura 13 - Construção da curva mestra para o ensaio de Módulo Dinâmico mecânico.....	45
Figura 14 – Fluxo estabelecendo a sequência de atividades realizadas na pesquisa.....	48
Figura 15 - Aparato para Módulo dinâmico convencional.....	51
Figura 16 - Diagramas para discos finos da primeira vibração natural.....	52
Figura 17 - Diagramas para discos finos da segunda vibração natural.....	53
Figura 18 - (a) Detalhe do 1º modo; (b) Detalhe do 2º modo.....	54
Figura 19 - (a) NDE 360 <i>Plataform</i> ; (b) Acelerômetro; (c) Martelo.....	56
Figura 20 - Câmara com pórtico e CP para ensaio de ressonância por impacto.....	57
Figura 21 - Apoios usados para realização dos ensaios.....	57
Figura 22 - Serra policorte usada na confecção do CPs.....	58
Figura 23 - Construção da curva mestra a partir dos resultados do ensaio IR.....	59
Figura 24- Resultado do ensaio mecânico de módulo dinâmico para o CP 05.....	63
Figura 25 - Figura 25 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C das misturas dosadas pelo método SUPERPAVE com CAP 30/45.....	65

Figura 26 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C das misturas dosadas pelo método SUPERPAVE com CAP 50/70.....	65
Figura 27 - Curva mestra de Módulo Dinâmico em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C da mistura dosada pelo método SUPERPAVE com CAPs 60/85.....	66
Figura 28 - Curva mestra de Módulo Dinâmico em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C da mistura dosada pelo método Marshall com CAP 50/70.....	67
Figura 29 - Curva mestra de Módulo Dinâmico em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C da mistura dosada pelo método Marshall com CAP 60/85.....	67
Figura 30 - Curvas mestras de Ângulo de Fase em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C das misturas dosadas pelo método SUPERPAVE com CAP 30/45.....	68
Figura 31 - Curvas mestras de Ângulo de Fase em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C das misturas dosadas pelo método SUPERPAVE com CAP 50/70.....	69
Figura 32 - Curva mestra de Ângulo de Fase em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C da mistura dosada pelo método SUPERPAVE com CAP 60/85.....	69
Figura 33 - Curva mestra de Ângulo de Fase em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C da mistura dosada pelo método Marshall com CAP 50/70.....	70
Figura 34 - Curva mestra de Ângulo de Fase em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C da mistura dosada pelo método Marshall com CAP 60/85.....	70
Figura 35 - Sinal medido no domínio do tempo para o disco fino do CP 05-1 a -5°C no modo 1 (a) e no modo 2 (b).....	72
Figura 36 - Sinal medido no domínio de frequência para o disco fino do CP 05-1 a -5°C no modo 1 (a) e no modo 2 (b).....	73

Figura 37 - Ângulo de Fase em função da temperatura para as misturas com CAP SUPERPAVE 30/45.....	77
Figura 38 - Ângulo de Fase em função da temperatura para as misturas com CAP SUPERPAVE 50/70.....	78
Figura 39 - Ângulo de Fase em função da temperatura para a mistura com CAP SUPERPAVE 60/85.....	78
Figura 40 - Ângulo de Fase em função da temperatura para a mistura com CAP Marshall 50/70.....	79
Figura 41 - Ângulo de Fase em função da temperatura para a mistura com CAP Marshall 60/85.....	79
Figura 42 - Frequências Naturais em função da temperatura para as misturas com CAP SUPERPAVE 30/45.....	80
Figura 43 - Frequências Naturais em função da temperatura para as misturas com CAP SUPERPAVE 50/70.....	80
Figura 44 - Frequências Naturais em função da temperatura para as misturas com CAP SUPERPAVE 60/85.....	81
Figura 45 - Frequências Naturais em função da temperatura para as misturas com CAP Marshall 50/70.....	81
Figura 46 - Frequências Naturais em função da temperatura para as misturas com CAP Marshall 60/85.....	82
Figura 47 - Módulos dinâmicos para os modos 1 e 2 em função da frequência ressonante natural para as misturas com CAP SUPERPAVE 30/45.....	84
Figura 48 - Módulos dinâmicos para os modos 1 e 2 em função da frequência ressonante natural para as misturas com CAP SUPERPAVE 50/70.....	85
Figura 49 - Módulos dinâmicos para os modos 1 e 2 em função da frequência ressonante natural para as misturas com CAP SUPERPAVE 60/85.....	85
Figura 50 - Módulos dinâmicos para os modos 1 e 2 em função da frequência ressonante natural para as misturas com Marshall 50/70.....	86
Figura 51 - Módulos dinâmicos para os modos 1 e 2 em função da frequência ressonante natural para as misturas com CAP Marshall 60/85.....	86

Figura 52 - Média dos Módulos dinâmicos em função da frequência ressonante natural para as misturas com CAP SUPERPAVE 30/45.....	87
Figura 53 - Média dos Módulos dinâmicos em função da frequência ressonante natural para as misturas CAP SUPERPAVE 50/70.....	87
Figura 54 - Média dos Módulos dinâmicos em função da frequência ressonante natural para a mistura com CAP SUPERPAVE 60/85.....	88
Figura 55 - Média dos Módulos dinâmicos em função da frequência ressonante natural para a mistura com CAP Marshall 50/70.....	88
Figura 56 - Média dos Módulos dinâmicos em função da frequência ressonante natural para a mistura com CAP Marshall 60/85.....	89
Figura 57 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura A-CE-5070.....	90
Figura 58 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura A-RJ-3045.....	93
Figura 59 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura B-RJ-3045.....	93
Figura 60 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura C-RJ-3045.....	94
Figura 61 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura A-RJ-5070.....	95
Figura 62 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura B-RJ-5070.....	95
Figura 63 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura C-RJ-5070.....	96
Figura 64 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura A-CE-5070.....	96
Figura 65 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura A-PE-6085.....	97
Figura 66 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura A-PR-6085.....	97
Figura 67 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura A-PR-5070.....	98
Figura 68 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura A-RJ-3045.....	99
Figura 69 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura B-RJ-3045.....	99
Figura 70 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura C-RJ-3045.....	99
Figura 71 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura A-RJ-5070.....	100
Figura 72 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura B-RJ-5070.....	100
Figura 73 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura C-RJ-5070.....	100

Figura 74 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura A-CE-5070.....	101
Figura 75 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura A-PE-6085.....	101
Figura 76 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura A-PR-6085.....	101
Figura 77 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura A-PR-5070.....	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dados de procedência das misturas asfálticas analisadas.....	49
Tabela 2 - Dados de dosagem das misturas asfálticas analisadas.....	50
Tabela 3 - Resultados do ensaio mecânico de módulo dinâmico para o CP 05.....	62
Tabela 4 - Fator de deslocamento e frequência reduzida usados para a curva mestra do CP 05.....	64
Tabela 5 - Frequências naturais do ensaio de ressonância por impacto para o modo 1 para o disco fino CP 05-1.....	73
Tabela 6 - Frequências naturais do ensaio de ressonância por impacto para o modo 2 para o disco fino CP 05-1.....	74
Tabela 7 - Fator de amortecimento para a mistura A-RJ-3045 pelo Método de Largura de Banda (ζ_1) e pelo Método do Decremento Logarítmico (ζ_2).....	76
Tabela 8 - Fator de amortecimento para a mistura A-CE-5070 pelo Método de Largura de Banda (ζ_1) e pelo Método do Decremento Logarítmico (ζ_2).....	76
Tabela 9 - Coeficientes da função sigmoidal para o Módulo Dinâmico.....	92
Tabela 10 - Coeficientes da função polinomial para o Ângulo de Fase.....	92
Tabela 11 - Coeficiente de correlação linear da curva mestra de referência e modelo sigmoidal para o módulo dinâmico e para o de ângulo de fase.....	103
Tabela 12 - Teste F para a comparação das variâncias de módulo dinâmico e ângulo de fase das curvas mestras de referência e modelo sigmoidal.....	103
Tabela 13 - Teste t para a comparação das médias de módulo dinâmico e ângulo de fase das curvas mestras de referência e modelo sigmoidal.....	104
Tabela 14 - Raiz do erro médio quadrático percentual (REMQ%) para os modelos de módulo dinâmico e para os de ângulo de fase.....	105

1 INTRODUÇÃO

O desempenho de um pavimento é influenciado por diversos fatores, podendo-se citar o tráfego atuante, o meio ambiente e as propriedades físicas e mecânicas das camadas que o constituem. Segundo a teoria das camadas elásticas, utilizada pela mecânica dos pavimentos, existe a necessidade de se conhecer as propriedades de deformabilidade e de resistência dos materiais, em especial, quando se trata de misturas asfálticas (HUANG, 2005).

As misturas asfálticas são materiais influenciados pela taxa de aplicação de cargas e pela variação de temperatura, principalmente devido à presença de ligante asfáltico. O seu comportamento mecânico, para baixas temperaturas e altas taxas de carregamento, é considerado viscoelástico linear, e, para altas temperaturas e baixas frequências de carregamento, está entre viscoelástico não linear e viscoplástico (SIDES et al., 1985).

Dessa forma, é necessário que, para o estudo do comportamento dessas misturas, essas influências sejam determinadas através de um parâmetro tal como o módulo dinâmico. O módulo dinâmico é a relação entre a tensão de carregamento aplicada e a deformação sofrida, constituindo-se do módulo do número complexo que representa a rigidez de uma mistura asfáltica em um comportamento viscoelástico. Este parâmetro pode ser obtido através da aplicação de um carregamento senoidal, e medindo-se a deformação. Ao longo do ensaio, varia-se a frequência de carregamento e a temperatura, permitindo que a condição aproximada de operação do pavimento seja representada (NUNES *et al.*, 2009). Esses resultados possibilitam a construção de uma curva que relaciona o valor de módulo dinâmico com a frequência e a temperatura, quando se considera o material como termologicamente simples. A essa curva dar-se-á o nome de curva mestra (FERRY, 1980).

Entretanto, as metodologias usadas para o dimensionamento de pavimentos no Brasil ainda não utilizam o parâmetro de módulo dinâmico, sobretudo por ser, geralmente, obtido por estado de compressão e necessitar de um equipamento extremamente robusto, tornando o ensaio inviável economicamente para se executar em obras (NUNES *et al.*, 2009).

Com objetivo de alterar esta realidade, uma nova metodologia para determinar este parâmetro vem sendo desenvolvida através da mecânica das vibrações, promovendo a rápida determinação do módulo dinâmico por um processo prático e com equipamento portátil (LUNDQVIST & RYDÉN, 2012).

Através da aplicação de um impulso e do registro da frequência natural dos materiais, é possível determinar o módulo dinâmico para misturas asfálticas considerando a viscoelasticidade linear dessas. Ainda, com a realização do ensaio sob diversas temperaturas, a curva mestra de módulo dinâmico em função da temperatura e da frequência pode ser construída (RYDÉN, 2009).

A mecânica das vibrações apresenta bons resultados em outras diversas áreas, sendo promissora para determinar parâmetros de módulo para misturas asfálticas. Dessa forma, torna possível contribuir para o avanço da utilização de características mais amplas no dimensionamento e controle de pavimentos asfálticos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a eficácia do método de ressonância por impacto na obtenção de curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase para misturas asfálticas brasileiras.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar a acurácia e repetibilidade do método de ressonância por impacto na obtenção de módulo dinâmico em misturas asfálticas brasileiras.
- b) Definir o método mais adequado para a obtenção do amortecimento viscoso em misturas asfálticas a partir das respostas obtidas no método de ressonância por impacto.
- c) Avaliar a dispersão entre as curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase obtidas a partir de ensaios mecânicos e pelo método de ressonância por impacto em misturas asfálticas brasileiras.

1.2 JUSTIFICATIVA

O módulo dinâmico de misturas asfálticas é um importante parâmetro na transição do dimensionamento de pavimentos da forma empírica para a analítica, considerando as propriedades viscoelásticas do material. Porém, a metodologia convencional para a obtenção desse módulo é dispendiosa e complexa, o que pode dificultar o processo de difusão da mecânica dos pavimentos.

Assim, o estudo de uma nova metodologia para a obtenção do módulo dinâmico surgiu por meio da mecânica das vibrações. O ensaio é realizado através da ressonância por impacto e consiste na captação da frequência natural dos materiais, por meio de um acelerômetro, quando o corpo de prova sofre a ação de uma carga externa sem provocar deformações permanentes.

A mecânica das vibrações vem sendo usada para caracterização elástica de materiais, tais como o concreto e a cerâmica, normatizados pela ASTM C215 e ASTM C1259, respectivamente. Para as misturas asfálticas, por sua vez, não existem normatizações, porém, estudos foram realizados por Kweon & Kim (2006), Rydén (2009) e Kim & Kim (2016), considerando a taxa de amortecimento sofrida por essas, a qual é desprezada nos outros tipos de materiais citados. Essas pesquisas obtiveram sucesso na determinação dos parâmetros módulo dinâmico e ângulo de fase, validando assim a utilização desse método.

Além disso, o aparato utilizado é compacto, simples e de fácil execução, tal que a aquisição deste nas obras é economicamente viável. O alto grau de repetibilidade dos resultados mesmo com operação manual é um fator diferencial no ensaio de módulo dinâmico por ressonância por impacto.

Ainda, com a realização do ensaio por ressonância por impacto sob várias temperaturas, é possível construir uma curva mestra de forma análoga ao ensaio convencional, tal como feito por Kweon e Kim (2006), Rydén (2009) e Kim e Kim (2016).

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O item 1 desta dissertação é referente ao conteúdo de Introdução ao tema proposto.

No item 2, tem-se a Revisão Bibliográfica. Nele são apresentados os conceitos fundamentais sobre o comportamento dos pavimentos frente ao carregamento, o comportamento mecânico de misturas asfálticas, a mecânica das vibrações e, também, pesquisas realizadas para a obtenção de módulo dinâmico pelo método de ressonância por impacto e pelo mecânico. Ainda neste capítulo é descrita a construção da curva mestra de módulo dinâmico em função da frequência reduzida e da temperatura.

No item 3, intitulado de Materiais e Métodos, são apresentadas as caracterizações dos materiais usados na pesquisa, além de descrever os procedimentos experimentais utilizados

para atingir os objetivos desta pesquisa. Ainda são determinados os testes estatísticos para análise dos dados.

No item 4, apresentam-se os resultados obtidos na pesquisa e a discussão sobre os mesmos.

No item 5, tem-se a conclusão sobre os resultados obtidos na pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos sobre o comportamento mecânico dos pavimentos, dando ênfase à descrição de como as misturas asfálticas respondem aos carregamentos oscilatórios, normalmente observados na sollicitação de veículos de carga em movimento.

2.1 Comportamento do pavimento frente à passagem de cargas

O pavimento é comumente definido como uma estrutura de múltiplas camadas que objetiva resistir aos esforços provenientes do tráfego de veículos e atenuá-los até o subleito. Deve, ainda, proporcionar aos usuários conforto e segurança (BERNUCCI *et al.*, 2008).

Na análise racional de pavimentos, seja qual for o método teórico adotado para análises de tensões, deformações e deslocamentos (sistemas de camadas finitas, elementos finitos etc.), avaliam-se os efeitos das cargas de tráfego em um sistema multicamadas interagindo entre si, sendo necessário o conhecimento das propriedades mecânicas de materiais de diversas naturezas. As tensões geradas pelo tráfego de veículos precisam chegar às camadas com taxas compatíveis a sua capacidade de resistir a tais esforços verticais (BALBO, 2007).

Entretanto, no Brasil, o método de dimensionamento do DNER (1966), vastamente utilizado nos dias atuais, não considera o estado tensão-deformação. O parâmetro base para o cálculo da estrutura ainda é obtido por meio da aplicação de uma carga estática. Isso não representa a sollicitação do tráfego que ocorre de forma dinâmica, sendo que o tempo de carregamento influencia diretamente no comportamento mecânico do pavimento (FERREIRA, 2013). Na Figura 1 observa-se a diferença existente entre as formas dos pulsos de carga estático (linear) e dinâmico (oscilatório). As cargas dinâmicas proporcionam efeito transiente à estrutura, onde seus picos ocorrem em frações do tempo, sendo dependente da frequência de aplicação, diferentemente das cargas estáticas.

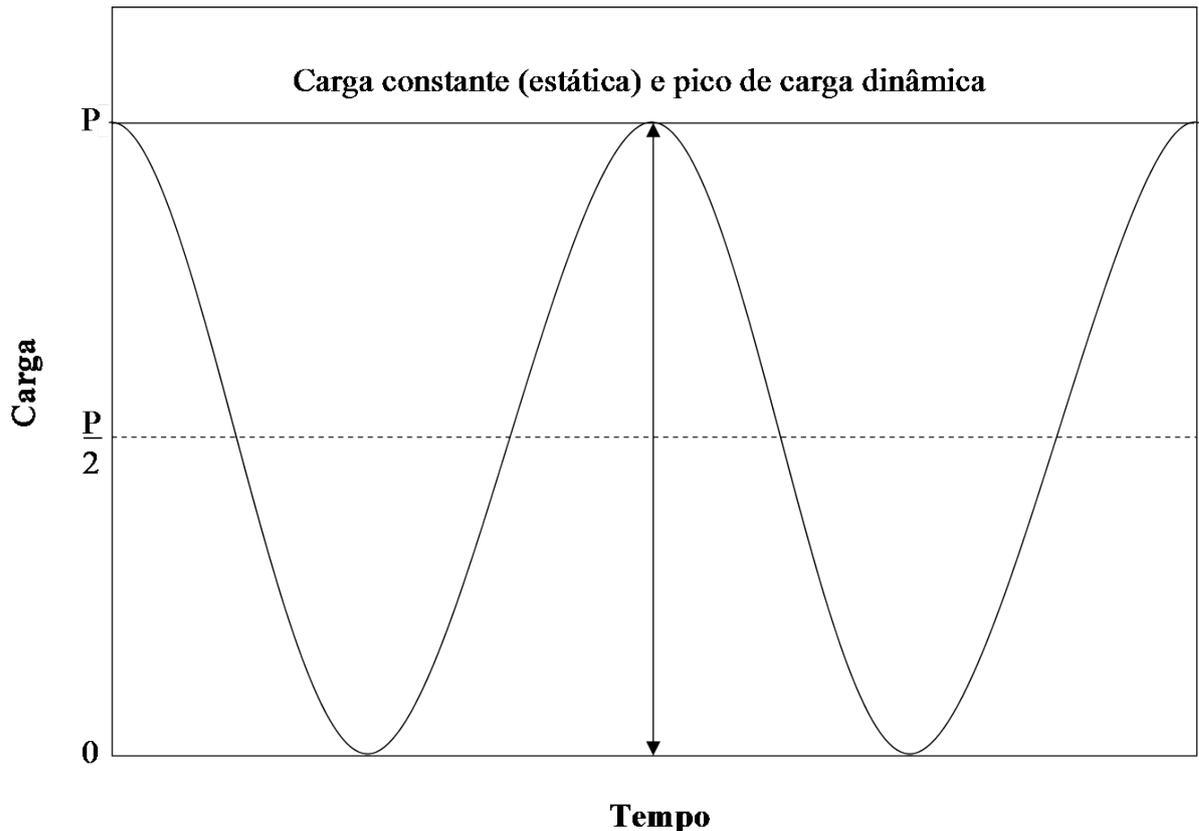


Figura 1 - Componentes de força estática e dinâmica em pavimentos. (Fontes adaptadas: FAA, 2011; MATOS, 2015)

Esse tempo (t) foi deduzido por Brown (1973) como uma função da velocidade (v) e da profundidade (d) (Equação 1), sendo essa o inverso da frequência angular da onda senoidal aplicada.

$$\log t = 0,5d - 0,2(1 - 4,7 \log v) \quad (1)$$

Barksdale e Hicks (1973) consideram o tempo de carregamento como a duração do pulso senoidal ou do pulso triangular, enquanto que McLean (1974) considerou o pulso de uma onda quadrada. A partir disso, torna-se possível simular, através de modelos, a interação entre os veículos e os pavimentos, de modo que se possa então determinar a resposta do sistema ao carregamento. Para essa representação, podem ser utilizados parâmetros como o módulo de Resiliência e o Módulo Dinâmico que expressam a relação tensão-deformação, através da aplicação de um pulso quadrático e um pulso senoidal, respectivamente.

As normas vigentes no Brasil para dimensionamento de pavimentos e seu controle não exigem a utilização de parâmetros de deformabilidade (módulos de resiliência ou dinâmico), o

que dificulta as suas difusões. Além disso, a sua utilização ainda não foi difundida devido à dificuldade de obtenção. Para a realização do ensaio em laboratório, é necessária uma aparelhagem robusta e de complexa operação, além de ter um custo elevado (NUNES *et al.*, 2009).

Visando alterar essa realidade, a Mecânica das Ondas está sendo base de pesquisas que buscam viabilizar a utilização dos módulos de forma econômica e operacional. Essa metodologia já vem sendo usada na análise de estruturas de concreto e de alvenaria, com o objetivo de determinar possíveis falhas e a sua localização (PÉREZ *et al.*, 2015).

A metodologia de ultrassom é bastante utilizada, pois apresentam resultados de fácil interpretação e equipamentos relativamente mais simples e baratos, porém não atingem grandes profundidades, sendo inviáveis para o uso em obras de pavimentação (AULD, 1990).

Dessa forma, faz-se uso das ondas guiadas (surface waves), as ondas de Lamb ou Rayleigh, pois elas podem se propagar na superfície da estrutura (Rayleigh) ou entre as superfícies (camadas) de uma estrutura (Lamb) (LOPES *et al.*, 2003), conforme demonstrado na Figura 2.

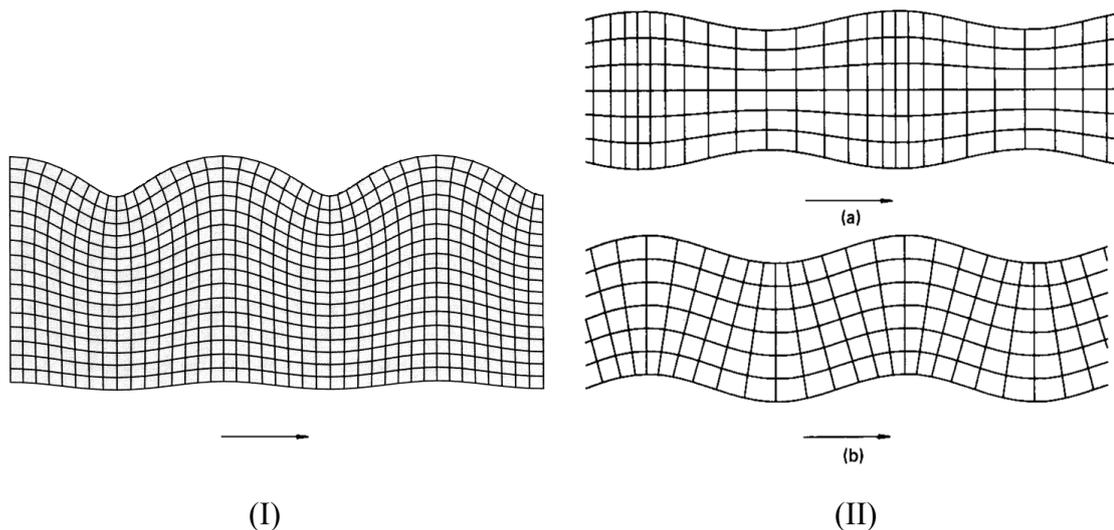


Figura 2 - Formas de propagação de ondas de superfície: (I) Rayleigh; (II) Lamb simétrica (a) e anti-simétrica (b). (Fonte adaptada: Rydèn, 2004).

Os ensaios realizados em campo, ensaios sísmicos ou eco-impacto, consistem na aplicação de um impacto estático elástico sobre a superfície de modo que tenha uma curta duração e gere ondas de tensão de baixa frequência que se propaguem no interior da estrutura (SANSALONE & STREET, 1997).

O ensaio produz gráficos de dispersão de onda (velocidade x frequência) as quais podem ser geradas para qualquer geometria (placas, dutos, barras, discos, estruturas multicamadas) que funcione como um guia de onda (LAGASSE, 1973).

Apesar da praticidade do ensaio, a metodologia das ondas geradas possui uma grande dificuldade: a complexidade da solução das equações que regem o problema (CORREIA, 2014). Ferramentas matemáticas, tais como Transformada de Laplace, Séries de Fourier e, principalmente, técnica de inversão, são necessárias para traduzir a curva de dispersão obtida no ensaio sísmico em um gráfico de velocidade de onda de cisalhamento com o perfil de profundidade (RYDÉN E LOWE, 2004).

Rydén *et al.* (2001) apresentou uma metodologia, PSAS (Portable Seismic Acquisition System), para determinar a espessura e a rigidez de camadas de concreto e asfaltos usando apenas um computador, um ou dois acelerômetros e um martelo para a aplicação do impulso. Reduzindo, dessa forma, o custo e simplificando o ensaio.

Utilizando os mesmos conceitos da mecânica das vibrações, Kweon & Kim (2006) e Rydén (2009) obtiveram o módulo dinâmico de misturas asfálticas, desta vez em laboratório, através da aplicação de um impulso e da captação do sinal a partir de um acelerômetro. Desta forma, este parâmetro fundamental para o projeto mecanístico de pavimentos pode ser obtida de forma simplificada.

No item seguinte são apresentados os conceitos fundamentais do comportamento viscoelástico de misturas asfálticas, os quais são necessários para a compreensão dos métodos de obtenção de módulo dinâmico.

2.2 Características mecânicas das misturas asfálticas

As misturas asfálticas se caracterizam por serem materiais flexíveis compostos, em sua grande maioria, de ligantes asfálticos e agregados. Tem-se que os agregados são materiais minerais sem forma predefinida e são geralmente inertes, tais como as areias e os pedregulhos, que podem ser naturais ou artificiais. Já os ligantes asfálticos são provenientes da destilação do petróleo, possuindo propriedades de impermeabilidade à água, pouca reatividade, além de ser um adesivo termoviscoelástico (BERNUCCI *et al.*, 2008).

A combinação desses materiais depende, dentre outros fatores, da finalidade dessa mistura. Pode-se considerar o agregado como responsável pelas propriedades volumétricas de

uma mistura, o que acaba influenciando também na rigidez, resistência ao cisalhamento e na vida de fadiga (PEREIRA, 2012).

Por outro lado, os ligantes asfálticos são materiais de natureza complexa e que possuem a propriedade de aglutinar as partículas e de se recuperar das deformações impostas pelo carregamento, sendo o principal responsável à vida de fadiga de misturas asfálticas. Apesar de ser considerado um material flexível, os ligantes são fluidos newtonianos a temperatura de mistura e viscoelásticos na temperatura de uso (GRAÇA *et al.*, 2014).

Assim, ao se tratar de misturas asfálticas, torna-se importante o conhecimento da teoria da viscoelasticidade, já que, para estas, os níveis de deformação variam com a frequência de carregamento e com a temperatura de exposição.

2.2.1 Comportamento dos materiais viscoelásticos

A teoria da viscoelasticidade está baseada em dois conceitos fundamentais: da elasticidade e da viscosidade. Tem-se que um sólido é considerado linear elástico quando as tensões (σ) são linearmente proporcionais às deformações (ε) por meio do Módulo de Elasticidade ou Módulo de Young (E), conforme:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Entretanto, tem-se que um fluido é viscoso quando as tensões (σ) são linearmente proporcionais à derivada da deformação ($\partial\varepsilon/\partial t$) e à viscosidade (η), como mostra a equação seguinte (HUANG, 2004):

$$\sigma = \eta \cdot \partial\varepsilon/\partial t \quad (3)$$

Assim, o fluido pode ser considerado viscoelástico quando se comporta de ambas as formas. Inicialmente, ao ser solicitado por altas forças de cisalhamento, ele se comporta como um sólido e apresenta uma resistência contrária à deformação. Em seguida, ocorre a deformação dos segmentos de ligação que auxiliam no afastamento das moléculas e na fluidez delas de forma irreversível na direção da força aplicada (SCHRAMM, 2006).

Para analisar o comportamento dos materiais quando submetidos a determinadas forças, faz-se uso de modelos mecânicos. Na teoria da viscoelasticidade, as molas representam a componente elástica dos materiais, devido a sua capacidade de recuperação imediata após sofrer uma taxa de deformação. Já os amortecedores representam a componente viscosa, pela recuperação mais lenta e em função da viscosidade (HUANG, 2004).

No entanto, a tensão aplicada pode ser considerada constante (em regime estacionário) ou oscilante e uma função sinusoidal do tempo ($\sigma = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t)$; onde σ_0 é a tensão total). O princípio matemático será o mesmo, porém, o equacionamento ocorrerá de forma diferente. Os principais modelos, representados na Figura 3, serão resumidamente discutidos na sequência (SCHRAMM, 2006).

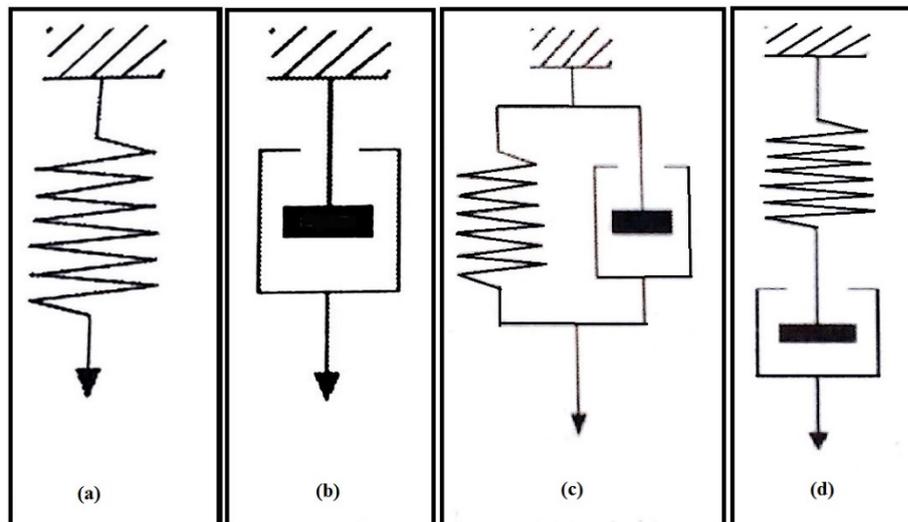


Figura 3 - Modelos representativos: (a) Modelo sólido ideal (mola), (b) Modelo líquido newtoniano ideal (amortecedor), (c) Modelo sólido de Kelvin-Voigt, (d) Modelo Maxwell.

(Fonte: Theisen, 2006).

2.2.1.1 Sólido ideal e líquido newtoniano ideal

Os modelos apresentados na Figura 3a e 3b são a representação das teorias apresentadas por Young e Newton para elasticidade e viscosidade, respectivamente. Portanto, em regime estacionário, seguem as Equações 2 e 3.

Quando o carregamento é oscilante, tem-se que os dados de viscosidade e elasticidade obtidos serão em função da frequência ou velocidade angular ω .

Para o modelo massa-mola (sólido ideal), tem-se que a deformação inicial é igual a ε_0 e a equação da deformação em função do tempo t pode ser escrita como a Equação 4. Dessa forma, a tensão σ descrita pela Equação 5, estará em fase com a deformação, ou seja, quando a deformação for máxima, a tensão resultante também será (Figura 4) (SCHRAMM, 2006).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (4)$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t) \quad (5)$$

Onde:

E = módulo elástico.

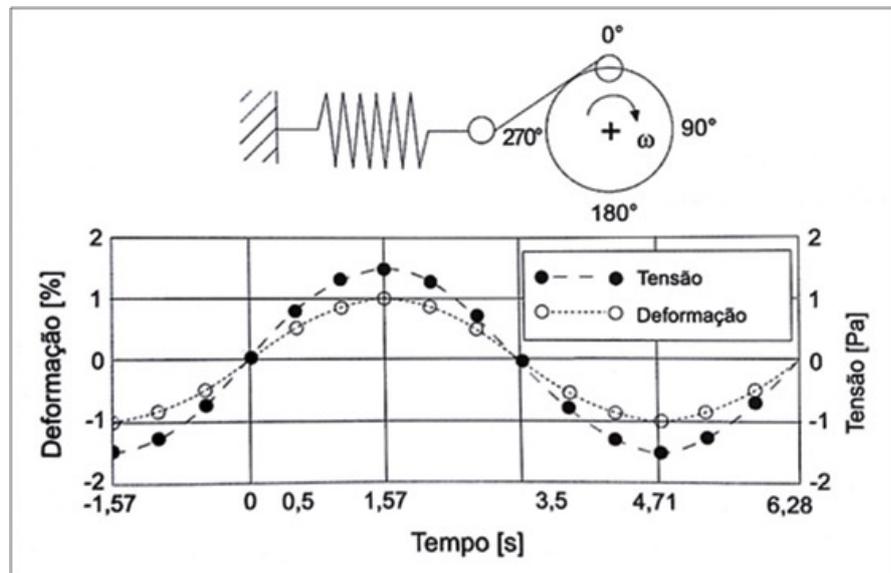


Figura 4 - Representação do modelo mola e gráfico tensão/deformação *versus* tempo. (Fonte: Schramm, 2006).

Por outro lado, para um amortecedor, tem-se que a equação da deformação pode ser escrita pela Equação 4 e que está fora de fase com a equação de tensão (Equação 6) como apresentado pela Figura 5.

$$\sigma = \eta \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t + \delta) \quad (6)$$

Onde:

δ é o ângulo de fase, ou seja, a defasagem entre as curvas de tensão e deformação da Figura 5.

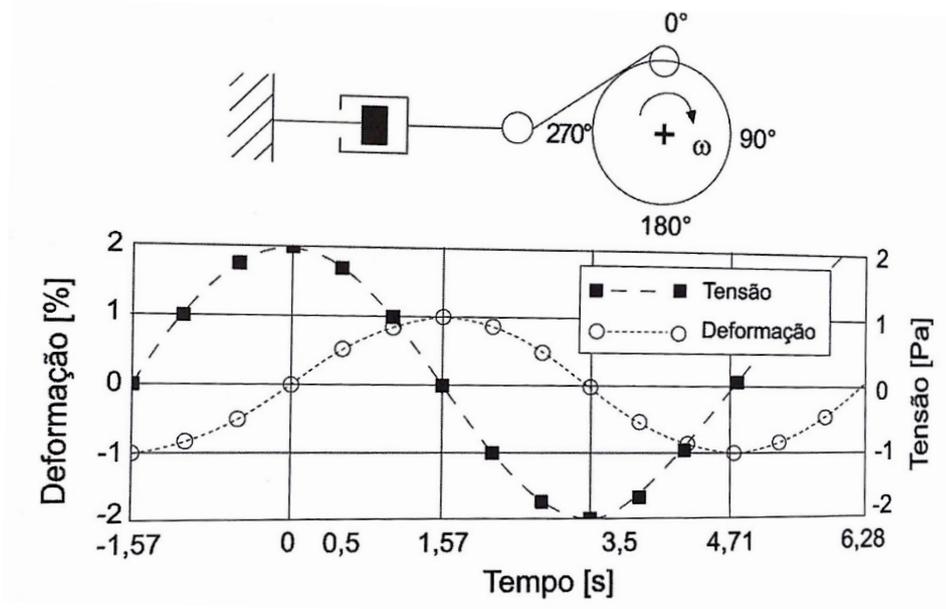


Figura 5 - Modelo amortecedor e gráfico tensão/deformação *versus* tempo. (Fonte: Schramm, 2006).

2.2.1.2 Sólido de Kelvin-Voigt

Este modelo é a combinação do sistema mola com o sistema amortecedor em paralelo (Figura 3c). Ele determina que as deformações totais (ε) na mola e (ε_0) no amortecedor são iguais (BALBO, 2007).

Em regime estacionário, tem-se que a equação da deformação pode ser escrita como a Equação 7. E quando o tempo tende ao infinito, a Equação 7 pode ser escrita como a Equação 8 e representa a resposta final da mola que é retardada pelo amortecedor (HUANG, 2004):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_1 \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{\lambda_1}\right)} \right]} \quad (7)$$

Onde:

$$\lambda_1 = \frac{\eta_1}{E_1} = \text{tempo de retardo}$$

$$\varepsilon_{(t \rightarrow \infty)} = \frac{\sigma}{E_1} \quad (8)$$

Quando o carregamento é oscilatório, a equação da tensão total pode ser escrita como a Equação 9, de modo que para esse modelo será igual a soma das tensões em ambos os elementos (SCHRAMM, 2006).

$$\sigma = E_1 \cdot \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t) + \eta_1 \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega t) \quad (9)$$

Onde:

E_1 = Módulo de Elasticidade para o sólido de Kelvin-Voigt;

η_1 = Viscosidade para o sólido de Kelvin-Voigt;

2.2.1.3 Fluido de Maxwell

Para Maxwell, a mola e o amortecedor são colocados em série (Figura 3d). Isso ocasiona em tensões de cisalhamento sempre iguais em ambos os elementos e a deformação como a soma das taxas de deformação de cada um (BALBO, 2007).

Quando submetido à uma tensão constante, o modelo reage primeiro a uma deformação na parte elástica (mola), e, em seguida, apresenta a resposta viscosa e crescente ao longo do tempo de aplicação dessa tensão. Quando a tensão é removida em um tempo t_i , a deformação do sistema cai imediatamente para um novo nível constante no tempo, como consequência da liberação da mola (TARECO, 2014). A deformação permanente é resultado da parcela fluida como (THEISEN, 2006):

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\eta_0} t + \frac{\sigma_0}{E_0} \quad (10)$$

Enquanto que para a tensão oscilatória, a equação de tensão pode ser escrita como:

$$\sigma = \left[\frac{E_0 \lambda_0^2 \omega^2}{1 + \lambda_0^2 \omega^2} \right] \sin(\omega t) + \left[\frac{E_0 \lambda_0 \omega}{1 + \lambda_0^2 \omega^2} \right] \cos(\omega t) \quad (11)$$

Onde:

E_0 = Módulo de Elasticidade para o fluido de Maxwell;

η_0 = Viscosidade para o fluido de Maxwell;

$$\lambda_0 = \frac{\eta_0}{E_0} = \text{tempo de relaxação.}$$

2.2.1.4 Modelo de Burger

É correto afirmar que o comportamento dos materiais viscoelásticos é muito mais complexo que um sistema massa-mola-amortecedor. Por isso, Burger (1981) propôs ligar o sólido de Kelvin-Voigt a um fluido de Maxwell em série (Figura 6). Deste modo, a tensão em cada um será igual à tensão total e a deformação é a soma das deformações em ambos os componentes. Assim, tem-se que para o estado estacionário (SCHRAMM, 2006):

$$\epsilon(t) = \frac{\sigma_0 t}{\lambda_0} + \frac{\sigma_0}{E_0} + \frac{\sigma_0}{E_1} \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{\lambda_1}\right)} \right] \quad (12)$$

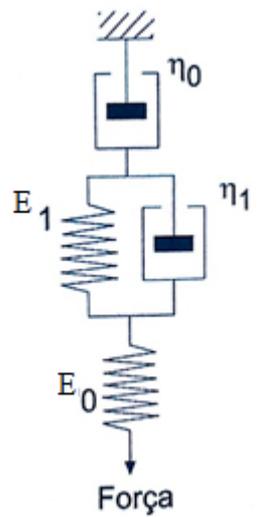


Figura 6 - Modelo de Burguer. (Fonte: Schramm, 2006).

Quando se refere ao estado oscilatório, a combinação de modelos exige que o conceito de módulo dinâmico ($|E^*|$) seja introduzido e pode ser definido como (BALBO, 2007):

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (13)$$

O módulo dinâmico representa a resistência total de uma substância que foi submetida a uma deformação oscilatória com frequência ω , $\epsilon = \epsilon_0 \sin(\omega t - \delta)$, $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$. Este parâmetro também pode ser definido através de uma componente real e outra imaginária, as

quais são denominadas de módulo elástico de armazenamento (E') e módulo viscoso de perda (E''), apresentados pelas Equações 14 e 15, respectivamente (BALBO, 2007):

$$E' = E^* \cos(\delta) = \frac{\sigma_0 \cdot \cos(\delta)}{\varepsilon_0} \quad (14)$$

$$E'' = E^* \sin(\delta) = \frac{\sigma_0 \cdot \sin(\delta)}{\varepsilon_0} \quad (15)$$

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} = \frac{\sigma_0 \cdot e^{i(\omega t)}}{\varepsilon_0 \cdot e^{i(\omega t - \delta)}} = \frac{\sigma_0 e^{i\delta}}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} (\cos \delta + i \cdot \sin \delta) = E' + iE'' \quad (16)$$

Entende-se por E' a parte onde a energia de tensão é temporariamente armazenada e posteriormente recuperada, enquanto E'' é a energia irreversivelmente perdida, transformada em calor de cisalhamento (SCHRAMM, 2006).

Através dos modelos vistos anteriormente, é possível perceber a relação do módulo dinâmico com o tempo de carregamento. Contudo, os materiais viscoelásticos são influenciados também pela temperatura à qual são expostos. Geralmente, a temperatura média da camada do pavimento, ou seja, as variações sazonais, é relacionada com a variação da rigidez, entretanto, as variações que ocorrem diariamente também possuem um papel importante e são negligenciadas na elaboração do projeto. (VASSOLER et al, 2011).

Em termos de Módulo Dinâmico, a relação com o tempo-temperatura é claramente demonstrada na Figura 7 por meio da construção de curvas para diferentes temperaturas. Percebe-se que o módulo dinâmico é diretamente proporcional a frequência de carregamento, porém, perde rigidez com o aumento da temperatura. Este comportamento é esperado para materiais viscoelásticos. A partir do Princípio de Superposição Tempo-Temperatura, as curvas para temperaturas diferentes se sobrepõem e podem ser transformadas em uma única curva (RYDEN, 2009). Essas curvas são chamadas de curvas mestras e serão melhor definidas no adiante deste capítulo.

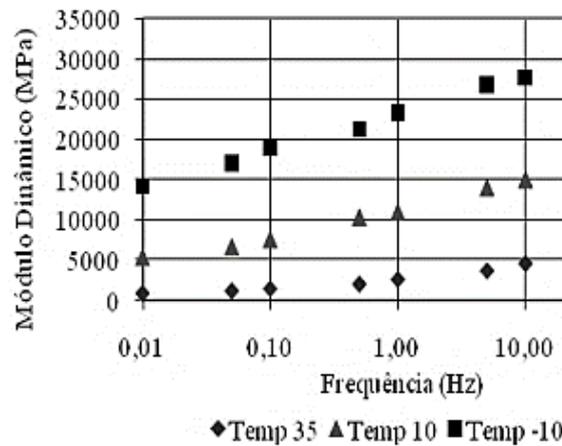


Figura 7 - Módulo Dinâmico para Mistura asfálticas em função da temperatura. Fonte: (Nunes *et al.*, 2009).

2.3 Determinação do Módulo Dinâmico

O módulo dinâmico ($|E^*|$), como já foi mostrado, é um importante parâmetro para o dimensionamento estrutural de pavimentos, pois, como mostra a Eq. 13, representa a relação entre tensão e deformação de materiais viscoelásticos, tal qual nas misturas asfálticas.

Para a obtenção deste parâmetro em laboratório serão apresentadas duas metodologias, uma convencional (denominada de ensaio mecânico para diferenciar em termos de nomenclatura, já que ambos são ensaios mecânicos) e outra alternativa (o ensaio por ressonância por impacto).

2.3.1 Determinação do Módulo dinâmico por ensaio mecânico

Este ensaio consiste na aplicação de uma carga senoidal axial de compressão e no registro da resposta dada pelo material a uma determinada temperatura e frequência de carregamento. O teste é realizado para várias temperaturas sob várias faixas de frequência de carregamento, de modo a registrar um conjunto de valores de módulo (AASHTO T 342, 2011).

Após determinada a tensão e a deformação axial recuperável, o módulo dinâmico pode ser obtido pela Equação 13, para cada temperatura e frequência do teste. O comportamento termoreologicamente simples do material asfáltico para uma faixa de deformação faz com que os fenômenos ocorridos devido a frequência e a temperatura possam se sobrepor e formar

uma única curva. A curva mestra é a curva que caracteriza esse comportamento. Além disso, é usada no projeto de pavimentos e na análise estrutural deles, podendo ser em função do valor de módulo dinâmico e também do ângulo de fase (Nascimento, 2015). Ela será detalhada no Item 2.4.

O módulo dinâmico é então um importante parâmetro na caracterização dos materiais ao longo do tempo e para determinação da previsão de desempenho dos pavimentos. Este parâmetro já é utilizado nos métodos de dimensionamento de alguns países (Ex.: Estados Unidos, França, Austrália etc.); entretanto, no Brasil, ainda não foi disseminado nas obras, devido ao tipo de equipamento requisitado (GOUVEIA, 2014).

Por se tratar de um ensaio trabalhoso e que requer um grande tempo para moldagem dos corpos de provas e execução, os modelos de previsão surgiram em função das características volumétricas, embora sejam importantes apenas em anteprojeto. O modelo de Witczak (Equação 17) é um exemplo. Atualizado em 1999, foi baseado em 2750 pontos de teste e 205 diferentes tipos de mistura asfálticas. Todas atendendo à especificação SUPERPAVE, das quais 34 eram misturas com ligantes modificados e a maioria das 205 possuíam graduação densa, com ligantes não modificados (WITCZAK, 2004).

$$\log|E^*| = a_1 + \frac{a_2}{1+e^{(a_3-a_4 \log f_{red})}} \quad (17)$$

Onde: $a_1 = -1,249937 + 0,02932\rho_{200} - 0,001767(\rho_{200})^2 - (0,002841\rho_4) - (0,058097V_a) - 0,802208\left(\frac{V_{beff}}{V_{beff}-V_a}\right)$
 $a_2 = 3,871977 - 0,021\rho_4 + 0,003958\rho_{38} - 0,000017(\rho_{38})^2 + 0,005470\rho_{34}$; $a_3 = -0,603313 - 0,393532 \log(\eta)$;

$a_4 = 0,313351$;

η : viscosidade a temperatura de interesse;

V_a : volume de vazios;

V_{beff} : volume efetivo de betume;

ρ_{200} , ρ_4 , ρ_{38} e ρ_{34} : porcentagens retidas acumuladas nas peneiras 0,075mm, 4,76 mm, 9,5 mm e 19mm, respectivamente.

Assim como os modelos de previsão, o conceito de ressonância por impacto é estudado como uma alternativa ao complexo e dispendioso ensaio mecânico de módulo dinâmico, com

o objetivo de facilitar o uso do módulo dinâmico na produção de revestimentos em misturas asfálticas.

2.3.2 Determinação do Módulo Dinâmico por ressonância por impacto

O comportamento mecânico dos materiais também pode ser definido através das vibrações mecânicas. O conceito de vibração é definido pelo movimento que se repete após um intervalo de tempo (RAO, 2009). E todo corpo sólido, inclusive os átomos, estão em movimento de vibração, também chamado de vibração natural ou frequência natural, devido às energias internas de agitação.

Os conceitos fundamentais da mecânica das vibrações, pré-requisitos para o entendimento do método de ressonância por impacto, são apresentados na sequência.

2.3.3 Mecânica das vibrações

Os movimentos de vibração podem ser classificados de acordo com a sua periodicidade (harmônico e não-harmônico), com a existência ou ausência de uma força externa (forçado ou livre), de acordo com o amortecimento (amortecido ou não amortecido) e com a natureza matemática (discretos e contínuos) (SOLETO & FRANÇA, 2006; RAO, 2009).

Tem-se o movimento harmônico quando a oscilação for repetida em intervalos de tempos iguais (movimento periódico). Trata-se do tipo mais simples, mas não representa a maioria dos sistemas vibratórios, contudo, a função periódica de tempo pode ser representada por séries de Fourier como uma soma infinita de seno e cosseno e, portanto, o movimento harmônico é admitido (RAO, 2009).

Quando o sistema está sujeito a uma ação externa, tem-se então a vibração forçada (a ausência da força externa torna o movimento livre). Quando a frequência desta carga externa coincide com a frequência natural do sistema, tem-se a ressonância. A amplitude da frequência de ressonância pode ser medida através de um acelerômetro (RAO, 2009).

O movimento de vibrações pode ser classificado também em função do amortecimento do sistema, ou seja, da dissipação de energia. Em grande parte dos sistemas, o amortecimento é desprezado, entretanto, este torna-se bastante importante quando se trata de sistema vibratórios próximos à ressonância. O amortecimento será fundamental na determinação do

módulo dinâmico para misturas asfálticas, pois, além de ser obtido por ressonância por impacto, trata-se de materiais viscoelásticos que sofrem perda de energia em função do tempo e da temperatura. Portanto, a frequência obtida será a frequência natural amortecida (PRODONOFF, 1990).

De modo semelhante à teoria da viscoelasticidade, a mecânica das vibrações utiliza os elementos de mola e amortecedor para representar os fenômenos que a caracteriza. Assim, a mola linear será a recuperação da energia e o amortecedor a perda.

Dessa forma, pode-se determinar algebricamente os fenômenos ocorridos durante os movimentos vibratórios. Considera-se que os sistemas possam ter de 1 a n graus de liberdade, supondo que grau de liberdade seja igual ao número de variáveis independentes que descrevam o deslocamento do sistema (PRODONOFF, 1990).

O sistema massa-mola (Figura 3a) pode ser escrito pela equação de movimento pela segunda lei de Newton e resulta na Equação 18, representando uma vibração livre de um sistema não amortecido de grau de liberdade igual a 1.

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (18)$$

Onde:

k = constante elástica da mola;

x = deslocamento da massa;

m = massa do corpo;

$\ddot{x} = \frac{d^2x(t)}{dt^2}$ = aceleração da massa.

O Princípio de D'Alembert, o Princípio dos Deslocamentos Virtuais e o Princípio da Conservação de energia também podem ser usados para escrever a equação do movimento e todos resultam na Equação 18 descrita anteriormente. Desse modo, qualquer um desses princípios pode ser utilizado para descrever o movimento de vibrações (RAO, 2009).

Quando se trata da vibração livre com amortecimento viscoso com um grau de liberdade (Figura 3c), a equação do movimento pela 2ª Lei de Newton pode ser escrita com a Equação 19 (SOLETO & FRANÇA, 2006).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (19)$$

Onde:

c = coeficiente de amortecimento;

\dot{x} = derivada primeira do movimento.

Admitindo uma solução do tipo $x(t) = Ce^{st}$, onde C e s são constantes indeterminadas, a solução geral é dada por (SOLETO E FRANÇA, 2006):

$$x(t) = C_1 e^{\left\{-\frac{c}{2m} + \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}\right\}t} + C_2 e^{\left\{-\frac{c}{2m} - \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}\right\}t} \quad (20)$$

Onde:

C_1 e C_2 são constantes a serem determinadas pelas condições do sistema.

Quando o termo $\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - k/m$ for nulo, o amortecimento será crítico e a razão entre a constante de amortecimento (c) e a constante de amortecimento crítico (c_c) será igual ao fator de amortecimento (ζ):

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (21)$$

Quando $\zeta < 1$, o sistema é classificado em subamortecido e a amplitude diminui exponencialmente com o tempo. A Equação 22 estabelece a relação entre a frequência natural amortecida (f_d) e a frequência natural (f_n) (RAO, 2009):

$$f_d = \sqrt{1 - \zeta^2} \cdot f_n \quad (22)$$

Quando $\zeta = 1$, o sistema é classificado em criticamente amortecido. Visto que as raízes são iguais, a solução é dada pela Equação 23 e o movimento eventualmente se reduzirá a zero:

$$x(t) = (C_1 + C_2 t)e^{-f_n t} \quad (23)$$

Quando $\zeta > 1$, o sistema é superamortecido. E não há movimento vibratório devido ao amortecimento ser muito grande (SOLETO & FRANÇA, 2006).

O amortecimento pode ser determinado através de dois métodos: o decremento logarítmico e a largura de banda. O decremento logarítmico representa a taxa de redução da amplitude de uma vibração livremente amortecida e pode ser obtida através da razão entre duas amplitudes sucessivas de sinal. A Figura 8 demonstra esse decréscimo e a Equação 24 determina o amortecimento (ζ) em função do decréscimo logarítmico (k) (COSSOLINO & PEREIRA, 2010).

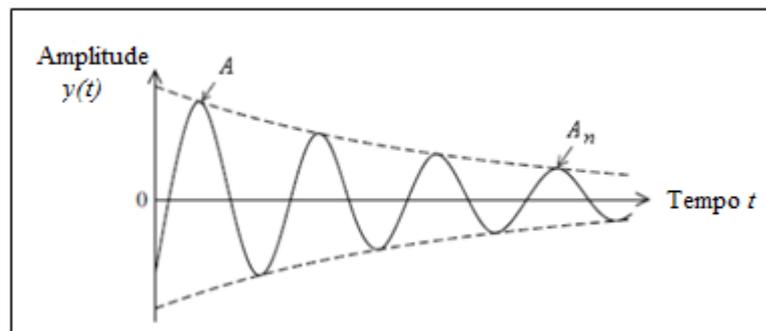


Figura 8 - Resposta em função do tempo de um oscilador simples ao impacto. (Fonte: COSSOLINO & PEREIRA, 2010).

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{k}\right)^2}} \quad (24)$$

Onde:

$$k = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{A}{A_n} \right);$$

n = Número da amplitude sucessiva;

A = 1ª amplitude;

A_n = Enésima amplitude.

Já o método da largura de banda depende do valor da máxima amplitude do sistema (Q) (Figura 9). A largura de banda do sistema é igual a diferença entre os pontos de meia-potência, ou seja, em $\frac{Q}{\sqrt{2}}$, pois a potência absorvida pelo amortecedor (ΔU), que responde

harmonicamente a uma dada frequência, é proporcional ao quadrado da amplitude (Equação 28) (SOLETO & FRANÇA, 2006).

$$\Delta U = \pi \cdot c \cdot f \cdot Q^2 \quad (25)$$

Onde:

c = coeficiente de amortecimento;

f = frequência do sistema.

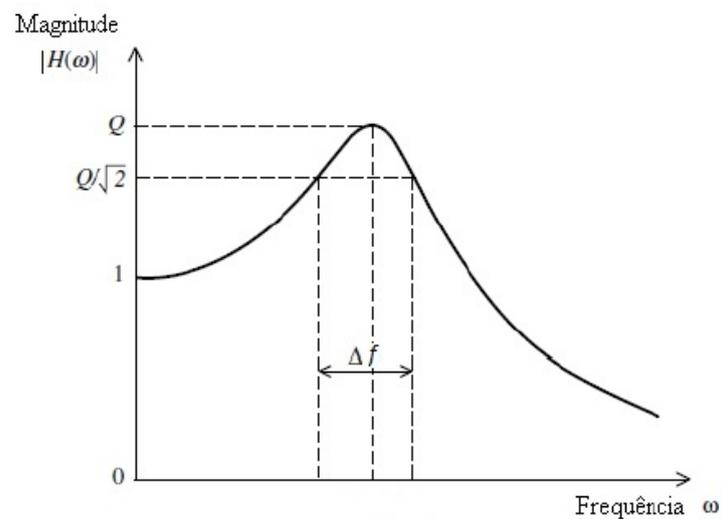


Figura 9 - Resposta da frequência a um impulso de um oscilador simples. (Fonte: SILVA, 2007).

Assim, aplicando os pontos de meia potência em uma vibração excitada harmonicamente, tem-se que o amortecimento será dado por:

$$\zeta = \frac{\Delta f}{2f_R} \quad (26)$$

Onde:

Δf : é a largura de banda 0,707 do pico máximo;

f_R : é a frequência natural amortecida máxima.

Os conceitos aplicados para o movimento harmônico livre também são válidos para o movimento excitado harmonicamente, de modo que, para um sistema viscoso, a equação do movimento pode ser escrita por (PRODONOFF, 1990).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P_0 \text{sen}(\omega t) \quad (27)$$

Onde:

c = coeficiente viscoso do amortecedor;

\dot{x} = velocidade da massa;

k = constante elástica da mola;

x = deslocamento da massa;

m = massa do corpo;

$\ddot{x} = \frac{d^2x(t)}{dt^2}$ = aceleração da massa.

Dessa forma, a solução admitida será $X(t) = X(\omega) \cdot \sin(\omega t + \delta)$, pois trata-se de uma função periódica em relação ao tempo, onde δ é igual ao ângulo de defasagem do sistema.

A Equação 27 caracteriza o sistema em discreto por ser estabelecido por equações diferenciais ordinárias, com um número finito de incógnitas, apenas em função do tempo. Entretanto, na realidade, os sistemas existentes são contínuos e estes são estabelecidos por equações diferenciais parciais e condições de contorno em função de variáveis espaciais x , y e z e do tempo t . Ou seja, existe um número infinito de frequências e infinitos modos naturais de vibração correspondentes. A equação do movimento para n graus de liberdade pode ser escrita por (SOLETO & FRANÇA, 2006):

$$[m]\{\ddot{x}\} + [c]\{\dot{x}\} + [k]\{x\} = \{F\} \quad (28)$$

Onde:

$[m]$ = matriz de massa;

$[c]$ = matriz de amortecimento;

$[k]$ = matriz de rigidez;

$\{x\}$ = vetor de deslocamento ou vetor posição;

$\{F\}$ = vetor das forças externas.

Percebe-se, então, que a equação diferencial é de difícil resolução. Entretanto, existem métodos mais práticos para se determinar a frequência natural, como o Método de Rayleigh e, posteriormente, Rayleigh-Ritz, usado por So & Leissa (1997) para determinação das frequências em corpos cilíndricos ou anelares e também por Rydén (2009), Kweon & Kim (2006) e Kim & Kim (2016) na determinação da frequência ressonante por impacto, para determinar o módulo dinâmico de misturas asfálticas.

O método de energia de Rayleigh parte do princípio de conservação de energia, o qual sugere que a soma das energias potenciais e cinéticas em instantes diferentes serão iguais. Portanto, quando o corpo se encontra em equilíbrio estático, a energia potencial será nula enquanto a cinética será máxima. Quando o deslocamento de massa for máximo, a energia cinética será nula e a potencial será máxima. Dessa forma, a Equação 29 representa esses dois instantes (SOLETO & FRANÇA, 2006; RAO, 2009):

$$T_{máx} = U_{máx} \quad (29)$$

Desse modo, com a função admissível e as condições de contorno, torna-se possível obter as frequências naturais do sistema. Posteriormente, Ritz aprimorou o Método de Rayleigh, usando a combinação linear como um número finito de funções admissíveis ψ_i . De modo que, ao minimizar a relação entre as energias potenciais e cinéticas, obtém-se a frequência natural do sistema em vários modos (RAO, 2009):

$$\Omega^2 = \min \frac{\bar{U}}{\bar{T}} \quad (30)$$

Partindo desse princípio, So & Leissa (1997) determinaram que para um disco cilíndrico (Figura 10), os deslocamentos podem ser escritos em funções polinomiais e que na direção de θ podem ser expressos em Séries de Fourier (Equações 31, 32, 33).

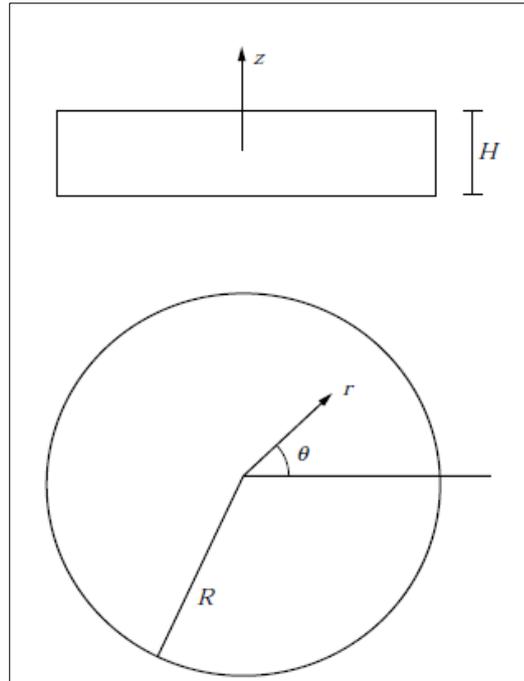


Figura 10 - Esquema do disco cilíndrico. R= raio da circunferência e H= espessura, r = vetor raio, z = vetor espessura. (Fonte: So & Leissa, 1997).

$$u(\xi, \theta, \zeta, t) = U(\xi, \zeta) \cos(n\theta) \sin(\omega t + \delta)$$

$$U(\xi, \zeta) = \left(\sum_{i=0}^I \sum_{j=0}^J A_{ij} \xi^i \zeta^j \right) \quad (31)$$

$$v(\xi, \theta, \zeta, t) = V(\xi, \zeta) \sin(n\theta) \sin(\omega t + \delta)$$

$$V(\xi, \zeta) = \left(\sum_{k=0}^K \sum_{l=0}^L B_{kl} \xi^k \zeta^l \right) \quad (32)$$

$$\omega(\xi, \theta, \zeta, t) = W(\xi, \zeta) (n\theta) \sin(\omega t + \delta)$$

$$W(\xi, \zeta) = \left(\sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N C_{mn} \xi^m \zeta^n \right) \quad (33)$$

Onde:

$\xi = r/R_0$; $\zeta = Z/L$; R_0 = raio do cilindro; L = espessura do cilindro; ω = frequência natural; δ = ângulo de fase arbitrário; I, J, K, L, M, N são inteiros e $n = 0, 1, 2, \dots$; u, v, w são deslocamentos na direção radial, tangencial e longitudinal.

A máxima energia cinética durante o ciclo vibratório é dada por (SO & LEISSA, 1997; POPOVICS & SUBRAMANIAM, 1998):

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{G}{2} L \int_{-1/2}^{1/2} \int_0^1 \left\{ \begin{array}{l} \frac{2\mu}{1-2\mu} \left(U_{,\xi} + \frac{U}{\xi} + \frac{n}{\xi} V + \frac{R_0}{L} W_{,\zeta} \right)^{2\Gamma_1} + \\ 2 \left[(U_{,\xi})^2 + \left(\frac{U}{\xi} + \frac{n}{\xi} V \right)^2 + \left(\frac{R_0}{L} W_{,\zeta} \right)^2 \right] \Gamma_1 + \\ \left[\left(\frac{-n}{\xi} U + V_{,\xi} - \frac{V}{\xi} \right)^2 + \left(\frac{R_0}{L} V_{,\zeta} - \frac{n}{\xi} W \right)^2 \right] \Gamma_2 \\ + \left(\frac{R_0}{L} U_{,\zeta} + W_{,\xi} \right)^2 \Gamma_1 \end{array} \right\} \xi d\xi d\zeta \quad (34)$$

Onde:

$$\Gamma_1 = \int_0^{2\pi} \cos^2 n\theta d\theta = \begin{cases} 2\pi & \text{se } n = 0 \\ \pi & \text{se } n > 0 \end{cases} \quad \text{e} \quad \Gamma_2 = \int_0^{2\pi} \sin^2 n\theta d\theta = \begin{cases} 0 & \text{se } n = 0 \\ \pi & \text{se } n > 0 \end{cases}$$

G= m3dulo de cisalhamento;

μ = coeficiente de Poisson.

Enquanto que a energia potencial ser3a:

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{\rho \omega^2 R_0^2 L}{2} \int_{-1/2}^{1/2} \int_0^1 (U^2 \Gamma_1 + V^2 \Gamma_2 + W^2 \Gamma_1) \xi d\xi d\zeta \quad (35)$$

Onde ρ 3a a densidade e ω 3a a frequ3ncia de vibra3o livre. As frequ3ncias de vibra3o livres s3o determinadas aplicando as condi3o3es de minimiza3o pelo M3todo de Rayleigh-Ritz:

$$\begin{aligned} \frac{\delta}{\delta A_{ij}} (V_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{a}x}) &= 0 \\ \frac{\delta}{\delta B_{kl}} (V_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{a}x}) &= 0 \\ \frac{\delta}{\delta C_{mn}} (V_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{a}x}) &= 0 \end{aligned} \quad (36)$$

Sabe-se que se trata de uma solu3o n3o trivial e, portanto, os valores de frequ3ncia ressonante s3o obtidos atrav3s dos zeros de uma matriz na forma n3o-dimensional de $\omega R_0 \sqrt{\rho/G}$ com aux3lio de Softwares (SUBRAMANIAM, 2000).

2.3.3.1 O ensaio de módulo dinâmico por ressonância por impacto

O teste de ressonância por impacto consiste na indução de uma excitação em uma amostra, através de um impacto em uma das extremidades, enquanto o acelerômetro registra a frequência de onda na extremidade oposta conforme apresentado no esquema da Figura 11a (KWEON & KIM, 2006).

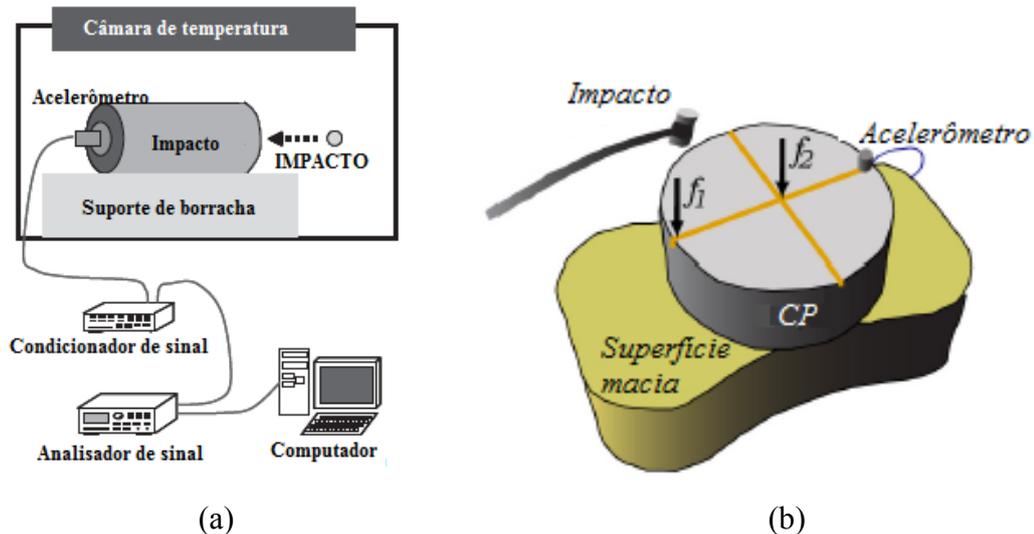


Figura 11 - Esquema do ensaio de ressonância por impacto (a) Kweon & Kim (2006) (b) Rydén (2009).

A técnica da determinação das propriedades elásticas dos materiais já vem sendo usada para diversos tipos como o concreto e a cerâmica, normatizados, respectivamente pela ASTM C125 (2008) e ASTM C1259 (2008). Entretanto, elas não consideram o amortecimento, pois tratam-se de materiais com baixas taxas deste. Kweon & Kim (2006), baseando-se nessas normatizações e no método de Rayleigh-Ritz, determinaram o valor de método dinâmico através da ressonância por impacto.

Kweon & Kim (2006) consideraram o tipo de propagação da onda através de um sólido cilíndrico com proporção $L/D > 2$. Três tipos de onda podem se propagar nessa condição geométrica: longitudinal, transversal e torsional. A longitudinal possui direção de carga e propagação de onda paralelas. Já na transversal são perpendiculares entre si, e, por fim, na torsional, a carga é aplicada tangencialmente, provocando uma torção na propagação da onda. As características elásticas são melhores determinadas no modo longitudinal e torsional, pois, estes modos são menos complexos e permitem obter o Módulo de Young e o Módulo de

Cisalhamento, respectivamente. Entretanto, isso não se aplica para figuras geométricas diferentes de barras circulares e quadráticas.

Kweon & Kim (2006) determinaram a curva mestra para misturas asfálticas utilizando apenas o modo longitudinal apresentado no esquema da Figura 11a, encontrando boa correlação com o $|E^*|$ determinado no ensaio mecânico. Porém, a relação $L/D > 2$ não é usual na pavimentação asfáltica, visto que muitos corpos de prova são moldados em laboratório ou extraídos em campo e possui relação L/D menores que esta (Rydén, 2009).

Por sua vez, Rydén (2009) utilizou a metodologia de discos finos para o ensaio de ressonância, admitindo qualquer relação de L/D . Para isso, ele utilizou dois modos de vibração: modo flexural assimétrico fundamental (f_1) e modo longitudinal simétrico (f_2) (Figura 11b). Apesar de determinar os valores de módulo com temperaturas até 54°C , Rydén (2009), não comparou os seus resultados com o módulo dinâmico pelo ensaio mecânico, apenas com o modelo de previsão de Witczak (2004).

Essa metodologia também pode ser encontrada na ASTM E1876 (2009), sem especificação do material, e em Kim & Kim (2016), para misturas asfálticas. Estes últimos apresentaram duas formas de se obter o módulo dinâmico de misturas asfálticas: a primeira seguindo a ASTM E1876 e a segunda pelo estudo realizado por Leming *et al.* (1996). Kim & Kim (2016) compararam essas duas metodologias para 3 diferentes misturas com o módulo dinâmico mecânico obtido pela metodologia AASHTO T342-11. A comparação entre as curvas mestras para os ensaios por ressonância e o convencional praticamente se coincidiram.

Este método se configura numa alternativa para a obtenção de forma confiável do módulo dinâmico, além de viável economicamente e em velocidade de execução.

2.4 Curva mestra para módulo dinâmico e ângulo de fase

O ensaio de módulo dinâmico, detalhado no item 2.3.1, representa o comportamento viscoelástico das misturas asfálticas através da varredura de temperaturas e frequências (PEREIRA, 2012). A partir do Princípio da Superposição Tempo-Temperatura, é possível construir uma curva, chamada de curva mestra, que relaciona o módulo dinâmico com as frequências de carregamento, reduzidas a uma determinada temperatura de referência T_{ref} .

O Princípio de Superposição Tempo-Temperatura estabelece que o tempo e a temperatura provocam efeitos equivalentes sobre materiais viscoelásticos e que, por essa

razão, as curvas, em relação ao módulo dinâmico, são semelhantes (Figura 12). A partir disso, as curvas podem ser deslocadas para uma temperatura de referência ao longo do eixo logarítmico t , superpondo-se em alguns pontos (AKCELRUD, 2007).

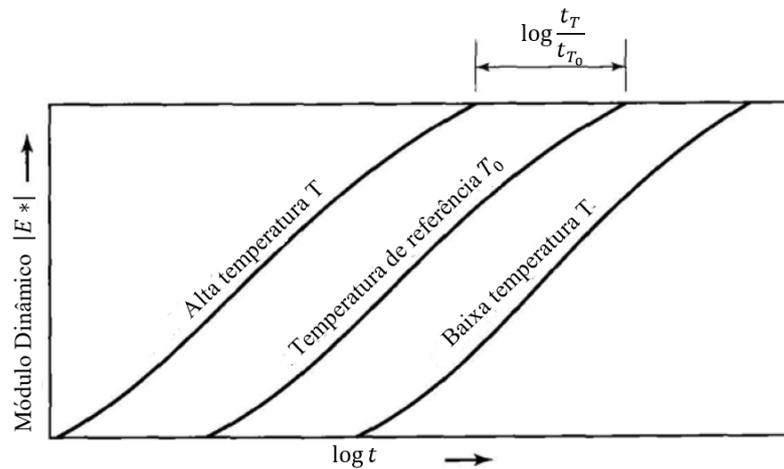


Figura 12 - Princípio de Superposição Tempo-Temperatura. (Fonte traduzida: HUANG, 2004).

O ensaio mecânico de módulo dinâmico, normatizado pela AASHTO T342-11, resulta em uma curva mestra. Entretanto, a construção dessa curva se dá a partir das curvas referentes a cada temperatura como mostra o lado esquerdo da Figura 13. Assim, é necessário estabelecer um fator de deslocamento que as unifique em uma curva tal qual apresentado no lado direito da Figura 13.

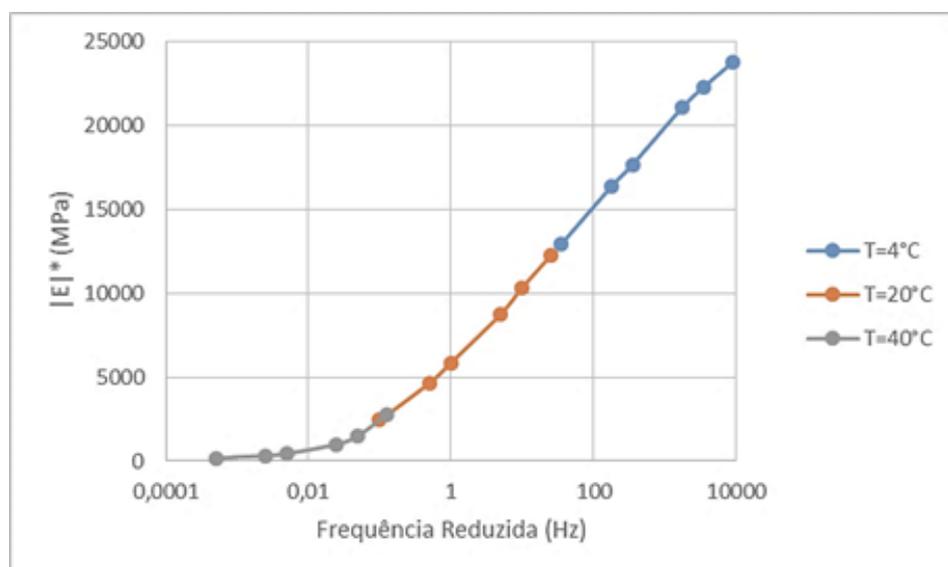


Figura 13 - Construção da curva mestra para o ensaio de Módulo Dinâmico mecânico.

O fator de deslocamento usado por Rydén (2009) e Kweon & Kim (2006) foi o determinado por William-Landel-Ferry (1955) (Equação 37). Já Kim & Kim (2016) utilizaram a Equação 38 que se trata de uma equação polinomial de segundo grau proposta por Sakhaei Far (2011) para misturas asfálticas americanas, Nascimento (2015), por sua vez, propôs uma equação polinomial de segundo grau para misturas asfálticas brasileiras. Além desses, a Equação 40 de Arrhenius também pode ser usada.

a) WLF (William- Landel- Ferry) (1955):

$$\log a_T = -\frac{C_1(T-T_{ref})}{C_2+T-T_{ref}} \quad (37)$$

Onde:

$a_T \rightarrow$ é o fator de deslocamento (*shift factor*);

C_1 e $C_2 \rightarrow$ são constantes desconhecidas, usadas no alinhamento da curva;

$T \rightarrow$ é a temperatura do ensaio, e

$T_{ref} \rightarrow$ é a temperatura de referência escolhida.

b) Sakhaei Far (2011):

$$\log a_T = 0,0011T^2 - 0,1727 T + 3,018 \quad (38)$$

Onde:

$T =$ temperatura.

A temperatura de referência é igual a 20°C.

c) Nascimento (2015):

$$\log(\alpha_T) = \alpha_1 T^2 + \alpha_2 T + \alpha_3 \quad (39)$$

Onde:

$\alpha_{1,2 e3} =$ são coeficientes de ajuste;

$T =$ temperatura.

d) Arrhenius:

A equação de Arrhenius é a mais usada para determinar o fator de deslocamento de misturas asfálticas, porém se adequa melhor quando (Referência) é igual ou menor que 20° e pode ser escrita como:

$$\log a_T = C \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) = \frac{E_a}{2,303R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (40)$$

Onde:

C = constante do material;

E_a = energia de ativação $\left(\frac{J}{mol} \right)$;

R = constante dos gases ideais $\left(8,314 \frac{J}{mol \cdot K} \right)$.

Assim, com o fator de deslocamento determinado (a_T), o eixo log de frequência pode ser deslocado através da seguinte relação:

$$f_{red} = a_T f \quad (41)$$

Porém, quando o módulo dinâmico for obtido através do ensaio de RI, apenas um valor de frequência natural é determinado, não existindo, portanto, a sobreposição de pontos, não impedindo, porém, a construção da curva, pois, é possível realizar o deslocamento horizontal dos pontos a partir de um fator de deslocamento (KWEON & KIM, 2006).

Além disso, os valores de frequência natural obtidos no ensaio de RI são consideravelmente superiores às frequências de carregamento do ensaio mecânico. Desta forma, seria errôneo compará-los sem a construção da curva mestra.

A faixa de temperatura do ensaio de ressonância por impacto tende a ser inferior quando comparada ao ensaio convencional, pois existe a dificuldade na captação do sinal pelo acelerômetro. Contudo, há o caso de Rydén (2009) que encontrou valores de módulo dinâmico por RI até 54°C.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi realizada através de uma cooperação entre a Universidade Federal de Sergipe (UFS) e o Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES/Petrobras), localizado no Rio de Janeiro. As duas instituições realizaram partes das atividades experimentais necessárias para responder aos objetivos da pesquisa, cabendo a UFS, adicionalmente, a análise final dos dados.

Neste capítulo é apresentada a caracterização dos materiais utilizados, os métodos de ensaio e as análises propostas para a pesquisa. Todas estas etapas estão resumidamente apresentadas na Figura 14.

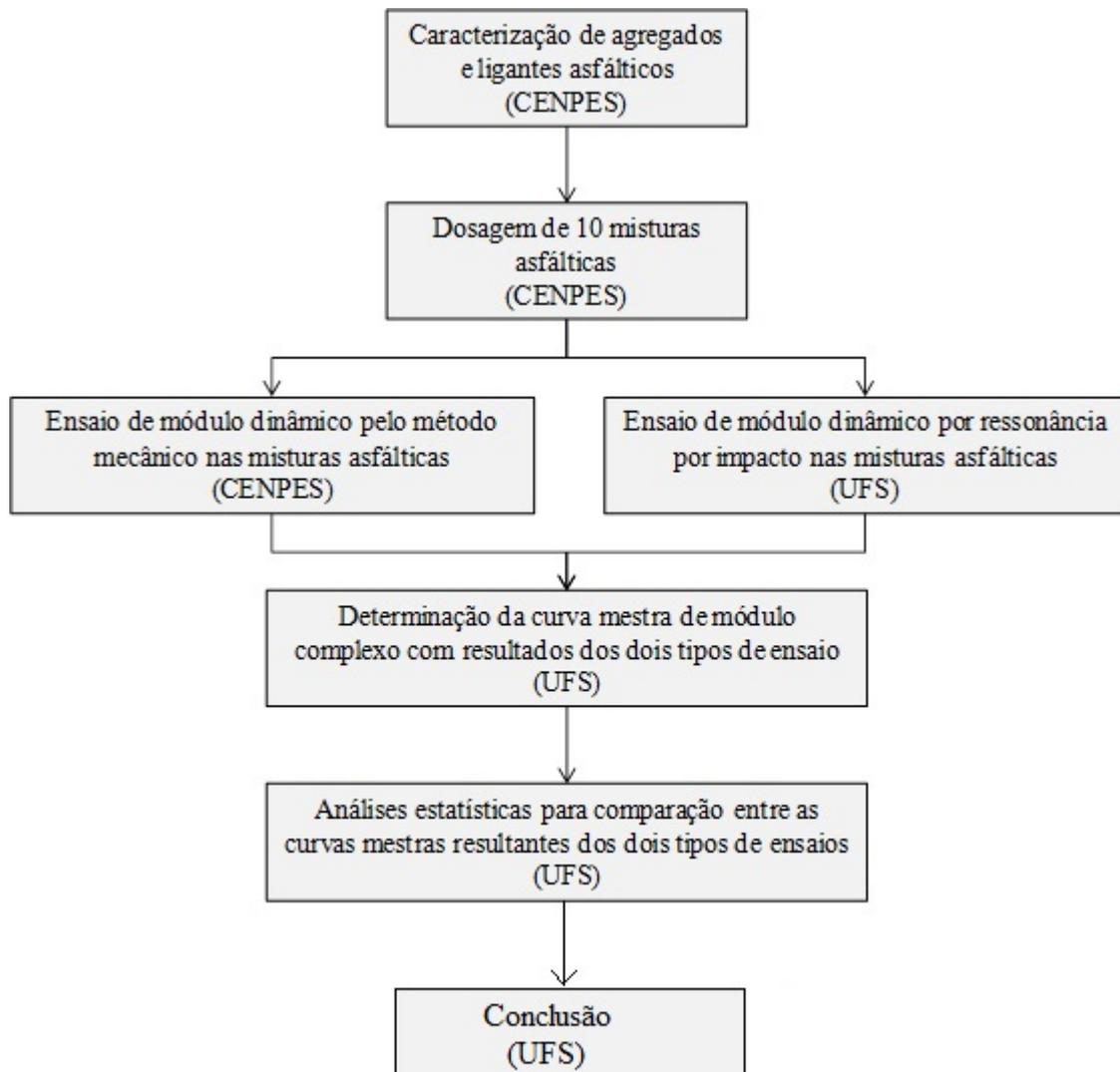


Figura 14 - Fluxo estabelecendo a sequência de atividades realizadas na pesquisa.

3.1 Materiais

As misturas asfálticas analisadas nesta pesquisa foram dosadas e fornecidas pelo CENPES. Trata-se de dez misturas asfálticas diferentes, das quais duas são provenientes de materiais do estado do Paraná, uma do estado de Pernambuco, uma do Ceará e outras seis misturas do Rio de Janeiro.

Apenas as misturas do Paraná foram realizadas seguindo a dosagem Marshall. Já as demais misturas foram dosadas de acordo com a metodologia SUPERPAVE. Entretanto, todos os corpos de prova analisados nessa pesquisa, independente do tipo de dosagem, foram obtidos por meio de um compactador giratório.

Para cada mistura foram moldados três exemplares, numeradas de 1 a 30, para a realização dos ensaios de módulo dinâmico mecânico e por ressonância por impacto. A Tabela 1 apresenta a procedência das misturas e o tipo de ligante utilizado.

Tabela 1- Dados de procedência das misturas asfálticas analisadas.

ID	Tipo de ligante	Agregados	Procedência
DOSAGEM SUPERPAVE			
A-RJ-3045	30/45	Sepetiba	RJ
B-RJ-3045	30/45	Sepetiba	RJ
C-RJ-3045	30/45	Sepetiba	RJ
A-CE-5070	50/70	Sítio Maninho	CE
A-RJ-5070	50/70	Sepetiba	RJ
B-RJ-5070	50/70	Sepetiba	RJ
C-RJ-5070	50/70	Sepetiba	RJ
A-PE-6085	60/85	Paraíso	PE
DOSAGEM MARSHALL			
A-PR-5070	50/70	J Malucelli	PR
A-PR-6085	60/85	Ped Catedral	PR

As características das dosagens realizadas estão apresentadas na Tabela 2. As mesmas foram agrupadas por tipo de dosagem aplicada (SUPERPAVE ou Marshall) e por tipo de ligante testado (classificação), independentemente da origem do mesmo (local de extração e refinaria). Três tipos de ligantes asfálticos foram avaliados na dosagem SUPERPAVE (30/45, 50/70 e 60/85), enquanto na dosagem Marshall foram dois (50/70 e 60/85).

Tabela 2 - Dados de dosagem das misturas asfálticas analisadas.

ID	Fíler	Gsb	Teor Lig %	Vvdes%	VAM	RBV	Relação Fíler/Betume
DOSAGEM SUPERPAVE							
A-RJ-3045	Não	2,677	5,5	4,0	14,8	73,0	0,69
B-RJ-3045	Não	2,677	5,5	4,0	14,8	73,0	0,69
C-RJ-3045	Não	2,677	5,5	4,0	14,8	73,0	0,69
A-CE-5070	Não	-	5,0	4,0	-	-	-
A-RJ-5070	Não	2,677	5,5	4,0	14,8	73,0	0,69
B-RJ-5070	Não	2,677	5,5	4,0	14,8	73,0	0,69
C-RJ-5070	Não	2,677	5,5	4,0	14,8	73,0	0,69
A-PE-6085	Não	2,662	5,8	4,0	17,2	76,7	1,10
DOSAGEM MARSHALL							
A-PR-5070	Não	2,897	4,0	5,0	13,6	63,2	1,20
A-PR-6085	1% de cal	2,865	4,5	5,5	16,6	67,3	0,99

3.2 Ensaios de módulo dinâmico

As 10 (dez) misturas asfálticas dosadas no CENPES para esta pesquisa foram submetidas ao ensaio de módulo dinâmico com carregamento axial e pelo método de ressonância por impacto. Apesar de ambos os ensaios serem mecânicos, o ensaio com carregamento axial foi denominado ensaio mecânico como forma de diferenciá-los.

Para o número de réplicas, nos ensaios mecânicos foram utilizados 03 (três) corpos de prova confeccionados com as proporções estabelecidas no projeto das misturas. Devido ao ensaio mecânico não ser destrutivo, esses mesmos corpos de prova foram reaproveitados e devidamente cortados em 05 (cinco) partes cada para o ensaio no método de ressonância por impacto, totalizando 15 discos por mistura. Os dois ensaios de módulo dinâmico são descritos adiante.

3.2.1 Módulo dinâmico pelo ensaio mecânico

O ensaio mecânico de módulo dinâmico determinou os valores de módulo dinâmico e ângulo de fase para uma determinada faixa de temperatura e frequências de carga, através de uma aplicação de carga axial senoidal de compressão (AASHTO T342, 2011). Esse ensaio foi

realizado pelo CENPES para as misturas asfálticas estudadas. O procedimento de ensaio atendeu ao que é definido na norma AASHTO T342 (2011).

O equipamento também foi composto por uma câmara de resfriamento na qual o corpo de prova será submetido às temperaturas de 4, 20 e 40° C. Para cada temperatura, o corpo de prova sofreu aplicação de carga em frequências de 25, 10, 5, 1, 0,5, 0,1 Hz, sempre da maior frequência para a menor. Foi utilizada uma máquina servo-hidráulica MTS modelo 810 para a aplicação da carga e dois extensômetros para a medida da deformação, fixados a 180° com o auxílio de elásticos (Figura 15) (Nascimento, 2015).

Para cada mistura foram ensaiados três corpos de prova. Os resultados dos ensaios para cada uma das misturas asfálticas estudadas foram apresentados em forma gráfica na seção de resultados.

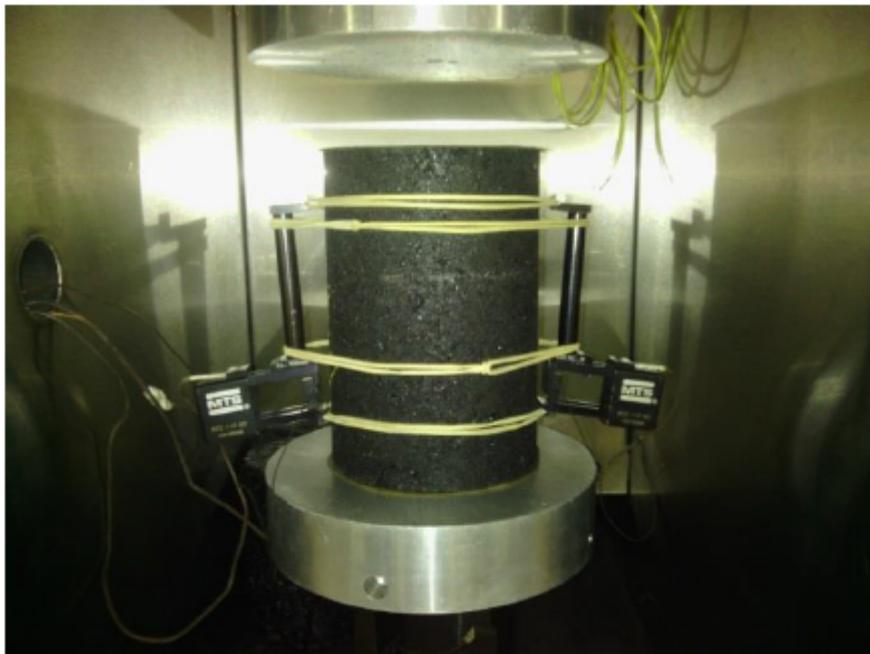


Figura 15 - Aparato para Módulo dinâmico convencional. (Fonte: Nascimento, 2015).

3.2.2 Módulo dinâmico pelo ensaio por ressonância por impacto

O ensaio de ressonância por impacto (RI) é utilizado na determinação das características elásticas nas ciências dos materiais, por se tratar de um ensaio de alta precisão e velocidade na sua execução. Todavia, sabe-se que é uma técnica nova e ainda pouco explorada (KWEON e KIM, 2006).

Na ausência de especificações para determinar o módulo dinâmico de misturas asfálticas por RI, este trabalho utilizou como base para a execução do ensaio as especificações ASTM E1876 (2009) e ASTM C215 (2008), além das metodologias desenvolvidas por Kweon e Kim (2006), Rydén (2009) e Kim e Kim (2016).

O ensaio consiste no registro de frequência natural do material, através de um acelerômetro, quando ocorre uma perturbação externa do sistema. Dessa forma, segundo ASTM C2159 (2008), a frequência natural pode ser obtida nos modos de vibração flexural e no modo torsional, de forma que seja possível obter, respectivamente, o módulo elástico dinâmico de Young e o módulo de rigidez para corpos de prova prismáticos. Ambos os módulos são usados na determinação do Coeficiente de Poisson.

No entanto, para corpos de prova em forma de discos finos ($L/D > 0,25$), a ASTM E1876 (2009) estabelece como determinar o Coeficiente de Poisson, através da relação entre as frequências naturais obtidas pela primeira e segunda vibrações naturais e as dimensões do corpo de prova. Para isso, a primeira vibração natural deve ser aquela que as deformações na seção transversal do CP são normais ao plano e simétricas em torno de dois diâmetros ortogonais ao plano do disco, produzindo uma torção no disco (Figura 16). Desta forma, o acelerômetro foi fixado na extremidade do disco e a 45° de um ponto de apoio e, também, o impulso foi aplicado a 180° do acelerômetro.

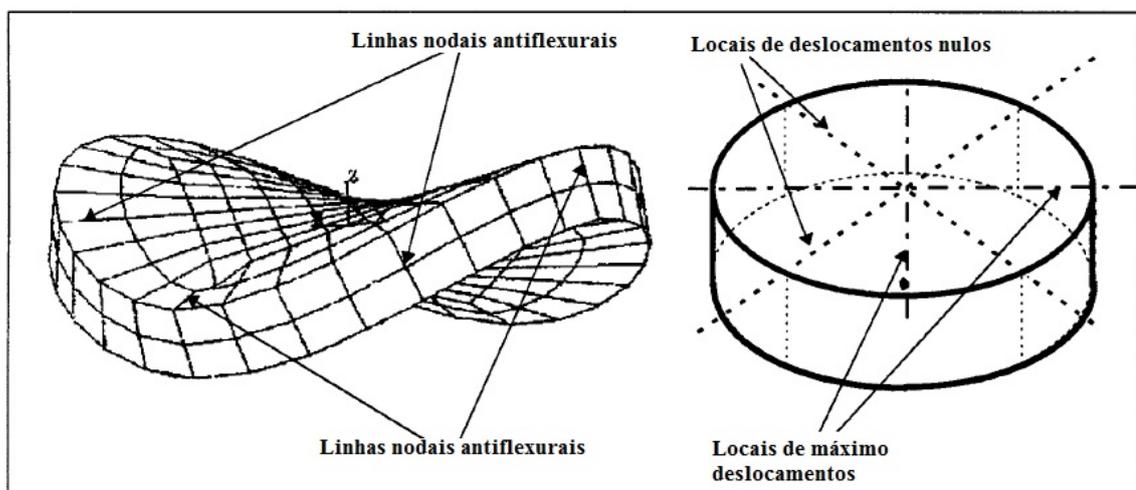


Figura 16 - Diagramas para discos finos da primeira vibração natural. (Fonte traduzida: ASTM C1259, 2008).

Na segunda vibração natural, as deformações na seção transversal são normais ao plano e uniformes ao longo de uma distância radial a partir do centro e em torno de todo o CP

(Figura 17). Com a finalidade de se obter a segunda vibração natural, o acelerômetro foi então colocado na extremidade da seção transversal do corpo de prova, enquanto o impulso ocorreu no centro da amostra.

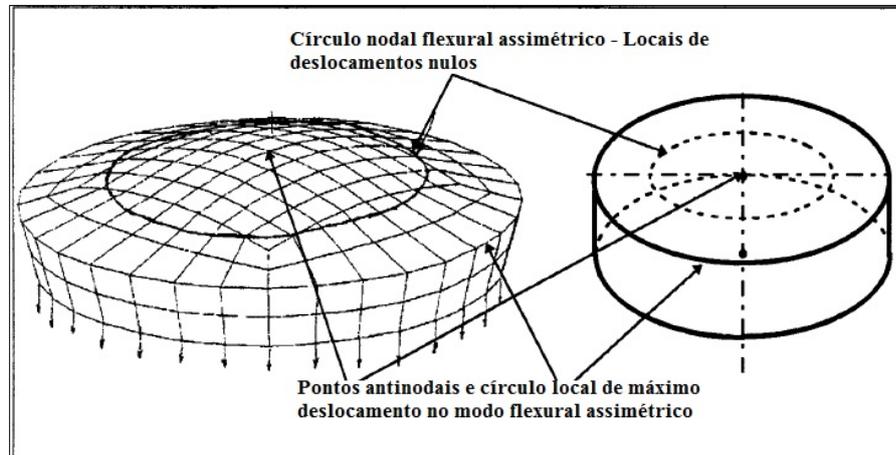


Figura 17 - Diagramas para discos finos da segunda vibração natural. (Fonte traduzida: ASTM C1259, 2008).

O diâmetro do círculo nodal (local onde as deformações são zero) pôde ser calculado como 0,681 do diâmetro do CP. Os quatro pontos de apoio foram posicionados sob distâncias iguais ou a 90° entre si a partir do centro do CP. O correto posicionamento do CP nos pontos nodais favoreceu a obtenção da frequência no modo desejado, além de minimizar as interferências (ASTM E1876, 2009).

Entretanto, esta normatização não considera a influência do amortecimento na obtenção das frequências naturais. Assim, Kweon e Kim (2006) e Rydén et al (2009) obtiveram o amortecimento através do método de largura de banda (Equação 26). Relacionou-o, assim, a frequência natural amortecida, obtida no ensaio, com a frequência natural não amortecida desejada como demonstrado na Equação 22.

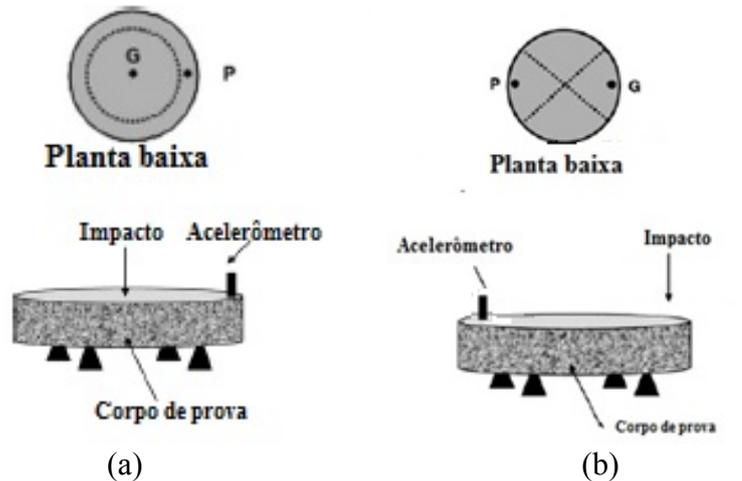


Figura 18 - (a) Detalhe do 1º modo; (b) Detalhe do 2º modo. (Fonte traduzida: KIM *et al.*, 2015).

Kim e Kim (2016) apresentaram dois métodos para obtenção do módulo dinâmico de misturas asfálticas, usando ressonância por impacto. Os 1º e 2º modos da Figura 18 (a e b) são semelhantes à metodologia proposta pela ASTM E1876 (2009), considerando por sua vez o fator de amortecimento. Neste mesmo trabalho Kim e Kim (2016) apresentaram um terceiro modo de vibração que foi desenvolvido por Leming *et al.* (1996). Para o terceiro modo, apenas uma frequência é obtida, através do modo longitudinal (quando a oscilação é paralela ao comprimento) e, desta forma, o coeficiente de Poisson passa a ser um parâmetro estimado.

Para este trabalho, foram aplicados os 1º e 2º modos apresentados por Kim e Kim (2016), adaptado da norma ASTM E1876 (2009), para determinar o módulo dinâmico das 10 misturas asfálticas. Assim, tem-se que para cada modo de vibração foi determinado um valor de módulo de armazenamento:

$$E_{Si} = \frac{48\rho f_{ni}^2 R^4 \pi^2 (1-\nu^2)}{K_i^2 h^2} \quad (42)$$

Onde:

E_{Si} = módulo de armazenamento (o índice i representa os modos de vibração 1 ou 2),

f_{ni} = frequência ressonante natural,

ν = coeficiente de Poisson, obtido na norma ASTM E1876 (2009) utilizando a relação entre f_{d2}/f_{d1} e h/r ,

K_i = fator geométrico, obtido na norma ASTM E1876 (2009) como uma função de h/r e o coeficiente de Poisson,

h = espessura do corpo de prova, e

r = raio do corpo de prova.

Para a conversão do módulo de armazenamento, foi necessário obter o ângulo de fase (ϕ). Este pôde ser determinado como função do fator de amortecimento (ζ):

$$\phi = \tan^{-1}(2\zeta) \quad (43)$$

Pôde-se calcular, portanto, o módulo dinâmico para cada modo de vibração pela Equação 47. O valor final do módulo dinâmico foi a média dos módulos dinâmicos nos modos de vibração 1 e 2 (Equação 45).

$$|E^*|_i = \frac{E_{Si}}{\cos(\phi_i)} \quad (44)$$

$$|E^*| = \frac{|E^*|_1 + |E^*|_2}{2} \quad (45)$$

3.2.2.1 Características do ensaio de RI na UFS

O equipamento que foi utilizado para o ensaio de RI na UFS foi o *Nondestructive Evaluation 360 Plataforma* (NDE 360), que foi desenvolvido pela *Oslon Instruments Inc.* e adquirido em 2012 para o Laboratório de Topografia e Transportes (LTT/UFS). Trata-se de um equipamento versátil e de fácil utilização. Seus principais componentes são: um pequeno martelo para a aplicação do impulso (por impacto), um acelerômetro para medir a resposta da amostra ao sofrer o impulso e uma unidade de aquisição de dados que possui um processador para os cálculos necessários, como também para a representação gráfica do espectro medido com o acelerômetro (Figura 19). O sistema do *NDE 360 Plataforma* permite que o usuário reveja os dados, salve, recupere e transfira para um notebook (OSLON, 2012).

Para a análise dos resultados e extração das representações gráficas dos ensaios, foi utilizado o software fornecido pela *Oslon Instruments Inc.*, o *WinFTS*. Desse modo, foi possível obter os valores precisos dos resultados, bem como os dados necessários para o cálculo do fator de amortecimento e do módulo dinâmico.

Foi desenvolvido um suporte (Figura 21) para a realização do ensaio, conforme requisitos da norma ASTM E1876 (2009). Este suporte e o corpo de prova a ser ensaiado foram inseridos em uma câmara térmica existente no LTT/UFS. Ela é capaz de manter

temperaturas com estabilidade de $\pm 0,5^\circ \text{C}$, e em um intervalo mínimo de -10°C a 60°C (Figura 20).

Para ajustar-se aos requisitos de ensaio da norma ASTM E1876 (2009), os corpos de prova resultantes da moldagem no compactador giratório tiveram suas dimensões modificadas para obedecer à relação $L/D \leq 0,25$ (altura pelo diâmetro do CP - forma de disco) por meio de uma serra policorte (Figura 22). Assim, foram obtidos cinco discos delgados a partir de um corpo de prova, totalizando 15 discos delgados por mistura. Cada disco teve no mínimo 5 repetições de ensaio para cada temperatura. A faixa de temperatura que foi utilizada nos ensaios de módulo dinâmico variou de -5°C a 60°C . Desse modo, tornou-se possível a obtenção da curva mestra de módulo dinâmico para misturas asfálticas.



(a)



(b)



(c)

Figura 19 - (a) *NDE 360 Plataforma*; (b) *Acelerômetro*; (c) *Martelo*.



Figura 20 - Câmara com pórtico e CP para ensaio de ressonância por impacto.



Figura 21 - Apoios usados para realização dos ensaios.



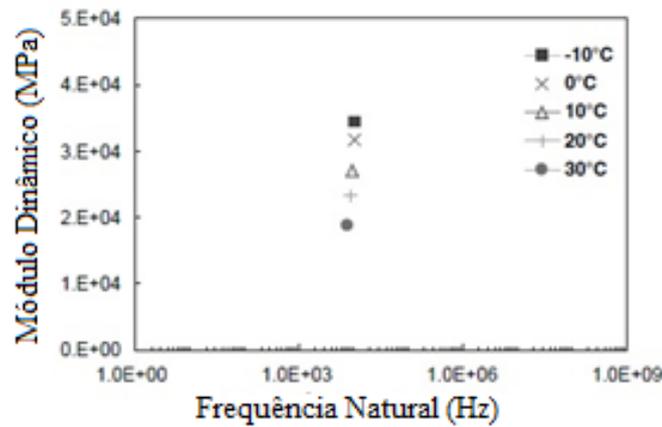
Figura 22 - Serra policorte usada na confecção do CPs.

3.3 Curva Mestra de Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase

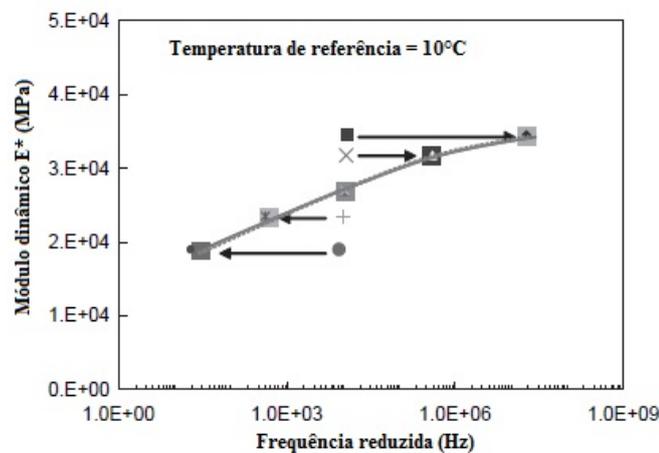
A curva mestra relaciona às frequências de carregamento aos valores de módulo dinâmico, e ângulo de fase, em uma temperatura de referência. Os ensaios descritos no item anterior foram comparados através da chamada curva mestra. Entretanto, os resultados destes necessitaram estar, sobretudo, em função das frequências reduzidas (Equação 41), pois, as frequências ressonantes determinadas por RI foram consideravelmente superiores as frequências de carregamento usadas no ensaio mecânico.

No ensaio por RI determinou-se apenas um valor de módulo dinâmico para cada temperatura (Figura 23a), por isso a curva mestra não apresentou a superposição de dados tal como na curva do ensaio mecânico. Portanto, para se construir a curva, tornou-se necessária a determinação prévia do fator de deslocamento (*shift factor*), de modo que a curva foi

construída horizontalmente, deslocando o módulo dinâmico encontrado em diferentes temperaturas de ensaio ao longo do eixo log de frequência (Figura 23b) (Kweon e Kim, 2006).



(a)



(b)

Figura 23 - Construção da curva mestra a partir dos resultados do ensaio IR. (Fonte traduzida: Kweon & Kim, 2006).

O fator de deslocamento foi obtido a partir de modelos de regressão não lineares em funções polinomiais de segundo grau. Esses modelos foram gerados por meio do ajuste da curva mestra de módulo dinâmico do ensaio mecânico com os dados do ensaio de ressonância por impacto. Observou-se ainda que os modelos apresentados na Revisão Bibliográfica desse trabalho não construíram curvas mestras uniformes e contínuas para o ensaio mecânico. Observou-se também a não coincidência do fator de deslocamento nas temperaturas equivalentes para os dois métodos de ensaio, mecânico e ressonância por impacto. A determinação do fator de deslocamento está melhor detalhada na seção dos Resultados e Discussão desse trabalho.

Kewon & Kim (2006) e Rydén (2009) utilizaram o modelo de previsão de Witzack (2004) para completar a curva mestra de módulo dinâmico obtida no ensaio de ressonância por impacto na região de baixa frequência. Neste trabalho, por sua vez, fez-se uso de um modelo sigmoidal construído com os próprios dados do ensaio de ressonância por impacto, sendo possível, além de complementar a curva na área de baixa frequência, realizar teste estatísticos quanto à acurácia do modelo sigmoidal e a curva resultante do ensaio mecânico. O detalhamento deste método está na seção dos Resultados e Discussão desse trabalho.

A curva mestra de ângulo de fase foi construída a partir do fator de deslocamento determinado para a curva mestra de módulo dinâmico.

3.4 Análise dos resultados

Os resultados de módulo dinâmico pelo ensaio mecânico e pelo ensaio de ressonância por impacto podem não resultar em um fator de deslocamento equivalente. Dessa forma, foi necessário criar um modelo de regressão não linear do fator de deslocamento para ajuste das curvas, por meio de uma função polinomial de segundo grau. Posteriormente, um modelo de função sigmoidal do módulo dinâmico obtido por ressonância por impacto foi gerado para obter resultados de módulo dinâmico em baixas frequências e realizar a análise estatística para os dois métodos de ensaio. Estes procedimentos foram realizados no software Statística 7.

Para isso, os seguintes testes foram realizados, admitindo a normalidade dos dados:

- Teste de igualdade de duas médias (teste t): a hipótese nula (H_0) foi que as curvas mestras de módulo dinâmico dos dois ensaios têm médias iguais a um nível de significância de 95% em relação ao modelo sigmoidal de módulo dinâmico criado;

$$t_{calculado} = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (46)$$

Onde:

\bar{x} : valor da média amostral;

μ_0 : valor da média populacional sob a hipótese nula;

s : valor do desvio padrão amostral;

n : tamanho da amostra.

- Teste de igualdade de duas variâncias (teste F): a hipótese nula (H_0) foi que as curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase dos dois ensaios têm variâncias iguais a um nível de significância de 95% em relação ao modelo sigmoidal de módulo dinâmico criado;

$$F_{calculado} = \frac{s_1^2}{s_2^2} \quad (47)$$

Onde:

s_n^2 = variância das amostras comparadas.

- Raiz do erro médio quadrático percentual (REMQ%): o valor de REMQ% deve ser menor que 10% na comparação entre os resultados de módulo dinâmico para cada frequência reduzida estabelecida (MONTGOMERY & RUNGER, 2014).

$$REMQ\% = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left(\frac{|E^*|_{med} - |E^*|_{cal}}{|E^*|_{med}} \right)^2} \times 100 \quad (48)$$

Onde:

n : número de observações;

$|E^*|_{med}$: Módulo dinâmico medido;

$|E^*|_{cal}$: Módulo dinâmico calculado.

Nos testes t e F, caso a hipótese nula (H_0) seja aceita, não se pode afirmar que há diferenças significativas entre os resultados dos dois ensaios para obtenção de módulo dinâmico e ângulo de fase. Para a realização dos testes foi utilizado o software *Microsoft Excel*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, os resultados referentes aos ensaios de módulo dinâmico, pelos métodos mecânicos e por ressonância por impacto, foram apresentados e discutidos. Para isso, foram construídas as curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase para cada método de ensaio e elaborados modelos polinomiais para o fator de deslocamento e sigmoidais para o módulo dinâmico.

4.1 Módulo Dinâmico e Ângulo de Fase pelo Ensaio Mecânico

O ensaio mecânico de módulo dinâmico resulta em uma tabela com os dados de módulo dinâmico e ângulo de fase, referentes a cada frequência de carregamento aplicada sob determinadas temperaturas. Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos para o CP 05, referente à mistura A-CE-5070. Para as demais misturas os resultados são apresentados no Apêndice A.

Tabela 3 - Resultados do ensaio mecânico de módulo dinâmico para o CP 05.

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	11659,24	6,24E-05	23729,85	5,50
10	4	11042,33	6,29E-05	22291,37	8,05
5	4	10227,15	6,16E-05	21073,99	8,92
1	4	8929,083	6,44E-05	17662,63	10,96
0,5	4	8103,407	6,32E-05	16333,06	12,18
0,1	4	6380,104	6,29E-05	12922,79	15,33
25	20	6071,049	6,3E-05	12236,41	17,50
10	20	5152,895	6,32E-05	10347,88	20,07
5	20	4311,616	6,24E-05	8770,425	21,58
1	20	2876,616	6,25E-05	5859,271	26,27
0,5	20	2248,6	6,15E-05	4653,044	29,20
0,1	20	1167,367	6,11E-05	2431,384	34,83
25	40	1372,866	6,29E-05	2771,954	36,12
10	40	759,1093	6,36E-05	1515,81	40,03
5	40	519,6682	6,55E-05	1007,325	41,21
1	40	220,8038	6,24E-05	450,5381	38,51
0,5	40	160,8318	6,17E-05	331,6348	36,41
0,1	40	91,36977	6,47E-05	179,7357	30,76

A partir desses resultados tornou-se possível obter um gráfico em função da temperatura e da frequência de carregamento (Figura 24a). Foi possível observar a relação diretamente proporcional do módulo dinâmico com a frequência de carregamento, pois, para a curva de igual temperatura, o valor do módulo aumenta com o incremento positivo da frequência, embora de forma não linear, o que influencia bastante a construção de curvas mestras com resultados de alta frequência. Do mesmo modo, também pôde-se perceber que para uma mesma frequência, o módulo dinâmico decresce à medida que se observa uma curva de maior temperatura.

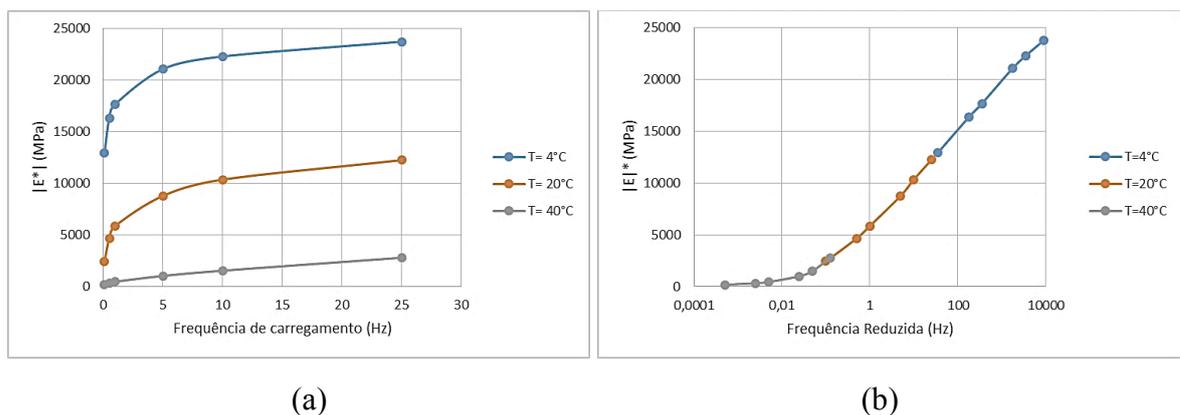


Figura 24 - Resultado do ensaio mecânico de módulo dinâmico para o CP 05.

Para unificar as curvas apresentadas na Figura 24a em uma mesma temperatura de referência (igual a 20°C neste trabalho), obteve-se o fator de deslocamento para deslocar horizontalmente as curvas obtidas em outras temperaturas e obter, em uma única curva, as influências das diferentes frequências de carregamento na rigidez de uma mistura asfáltica. Vale ressaltar que nenhum dos modelos de fator de deslocamento referenciados nesse trabalho se ajustou perfeitamente aos dados analisados nessa pesquisa, pois, não se trata de um material termoreologicamente simples. Assim, o fator de deslocamento de cada mistura foi determinado manualmente de modo que construísse uma curva contínua (Figura 24b). Os valores de fator de deslocamento e da frequência reduzida usados para o CP 05, referente à mistura A-CE-5070, estão apresentados na Tabela 4 e para as demais misturas encontram-se no Apêndice B desse trabalho.

As curvas mestras de módulo dinâmico em função da frequência reduzida, por sua vez, foram apresentadas nas Figuras 25, 26 e 27 para diferentes tipos de CAPs, moldadas pelos métodos SUPERPAVE e Marshall para a temperatura de referência igual a 20°C.

Tabela 4 - Fator de deslocamento e frequência reduzida usados para a curva mestra do CP 05.

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	 E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)
25	4	23729,85	350	8750
10	4	22291,37	350	3500
5	4	21073,99	350	1750
1	4	17662,63	350	350
0,5	4	16333,06	350	175
0,1	4	12922,79	350	35
25	20	12236,41	1	25
10	20	10347,88	1	10
5	20	8770,425	1	5
1	20	5859,271	1	1
0,5	20	4653,044	1	0,5
0,1	20	2431,384	1	0,1
25	40	2771,954	0,005	0,125
10	40	1515,81	0,005	0,05
5	40	1007,325	0,005	0,025
1	40	450,5381	0,005	0,005
0,5	40	331,6348	0,005	0,0025
0,1	40	179,7357	0,005	0,0005

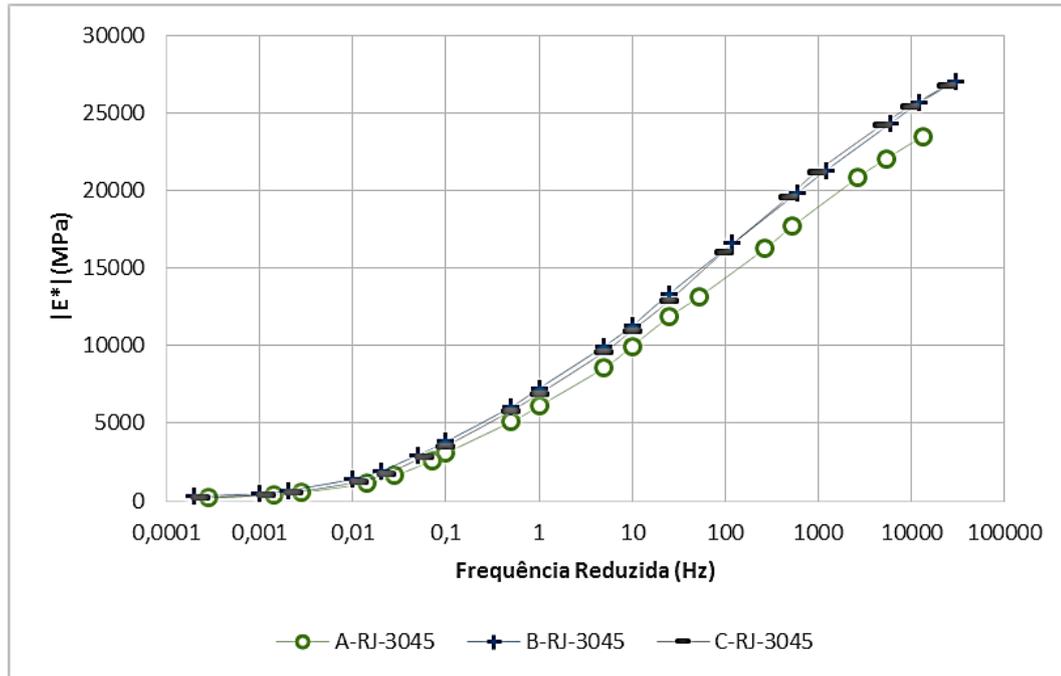


Figura 25 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C das misturas dosadas pelo método SUPERPAVE com CAP 30/45

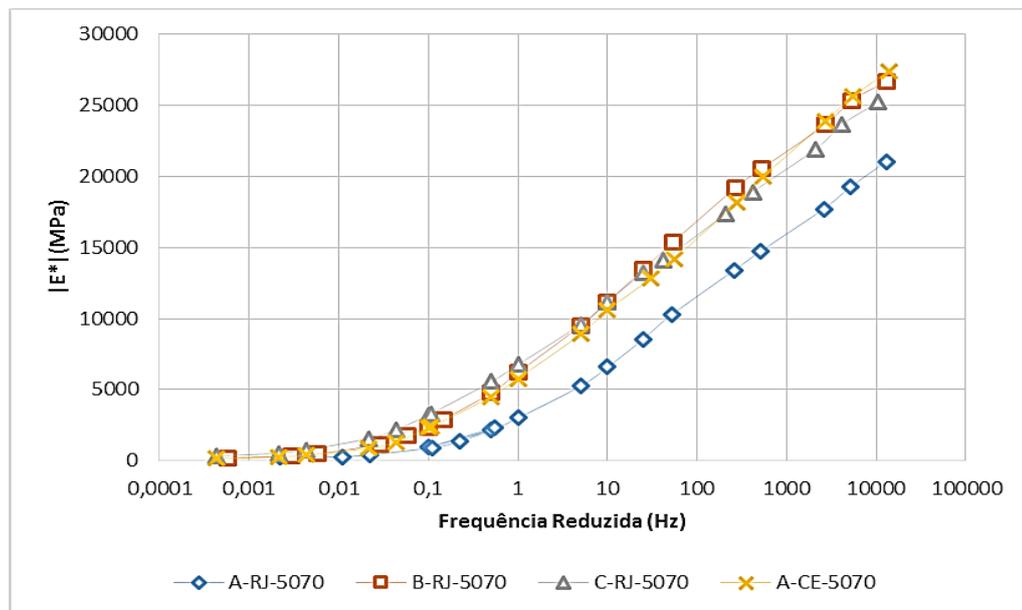


Figura 26 - Curvas mestras de Módulo Dinâmico em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C das misturas dosadas pelo método SUPERPAVE com CAP 50/70.

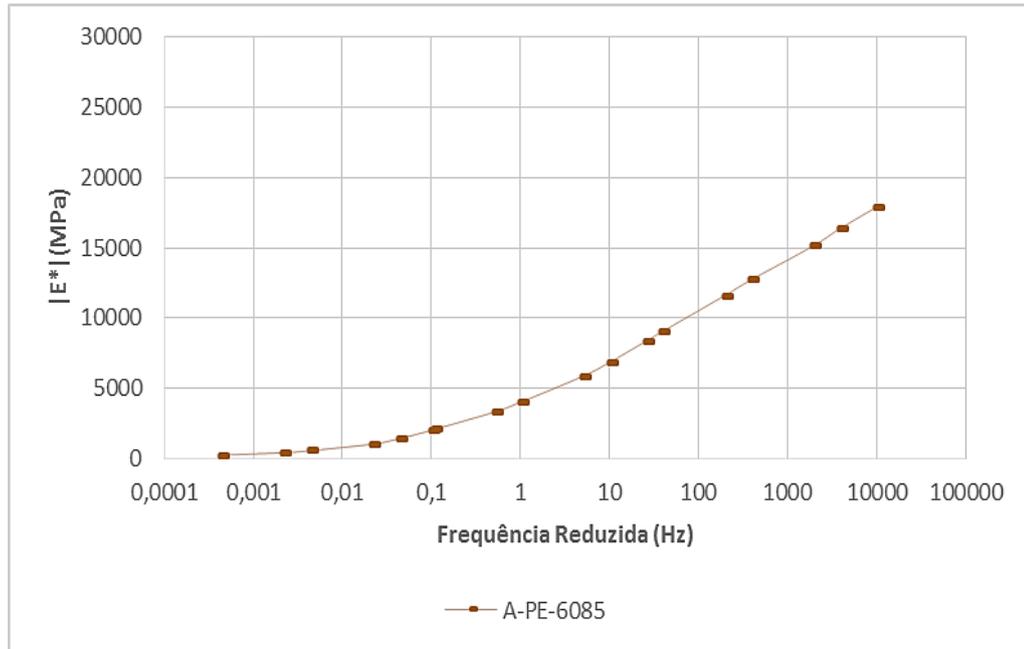


Figura 27 - Curva mestra de Módulo Dinâmico em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C da mistura dosada pelo método SUPERPAVE com CAPs 60/85.

Pode-se observar, pela Figura 25, que a mistura A-RJ-3045 possui uma discrepância em relação as misturas com mesmas características (mesma procedência de material, mesmo teor e tipo de ligante e mesmo método de dosagem da mistura). Essa discrepância se deve a fabricação dos ligantes usados, pois, apesar de serem de mesmo tipo, foram fabricados em locais diferentes.

As curvas mestras apresentadas nas Figuras 28 e 29 comportaram-se tal como esperado, contínuas e sinuosas, sobrepondo-se em alguns pontos pelo princípio de superposição tempo-temperatura.

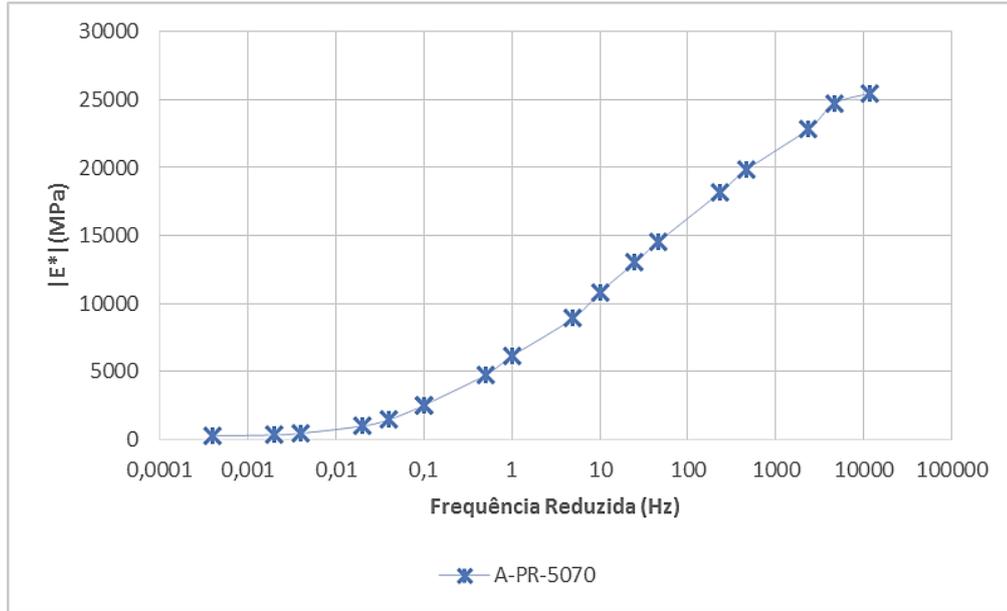


Figura 28 - Curva mestra de Módulo Dinâmico em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C da mistura dosada pelo método Marshall com CAP 50/70.

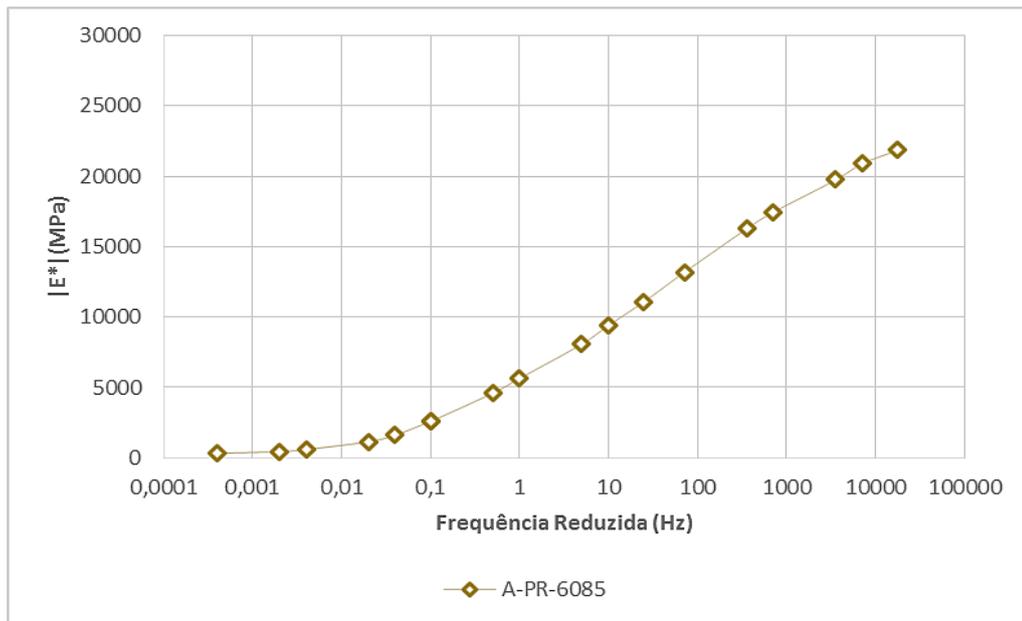


Figura 29 - Curva mestra de Módulo Dinâmico em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C da mistura dosada pelo método Marshall com CAP 60/85.

As curvas mestras de ângulo de fase em função da temperatura e da frequência de carregamento foram obtidas utilizando o fator de deslocamento resultante das curvas mestras de módulo dinâmico. Dessa forma, nas Figuras 30, 31, 32 são apresentadas as curvas mestras de ângulo de fase para as misturas dosadas pelo método SUPERPAVE para os CAPs 30/45, 50/70, e 60/85, respectivamente. Por outro lado, na Figura 26 são apresentadas as curvas mestras de ângulo de fase para as misturas dosadas pelo método Marshall para os CAPs 50/70 e 60/85, respectivamente.

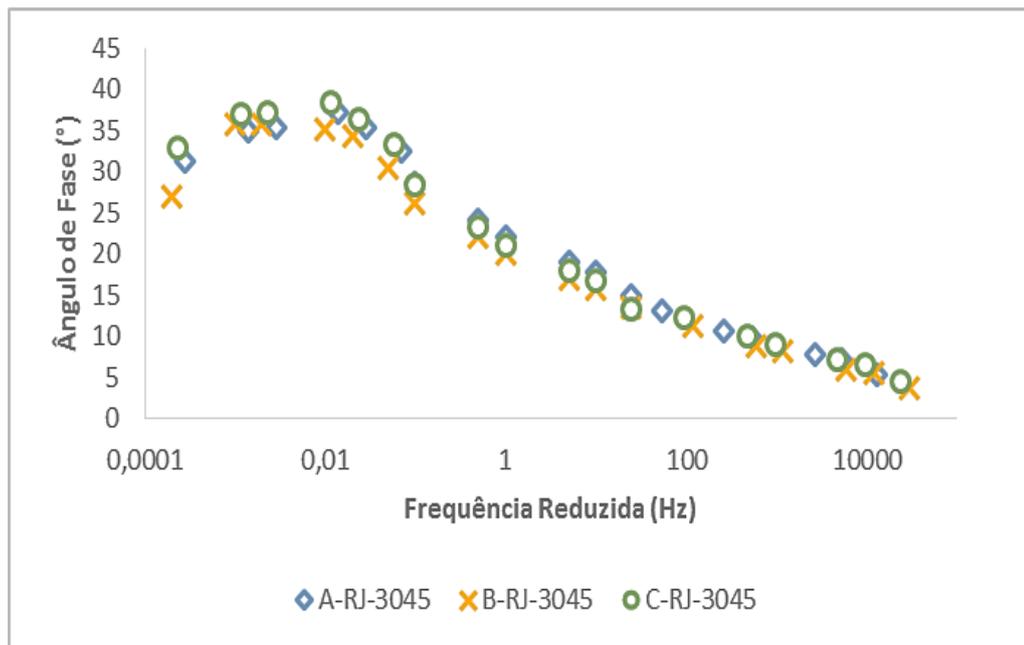


Figura 30 - Curvas mestras de Ângulo de Fase em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C das misturas dosadas pelo método SUPERPAVE com CAP 30/45.

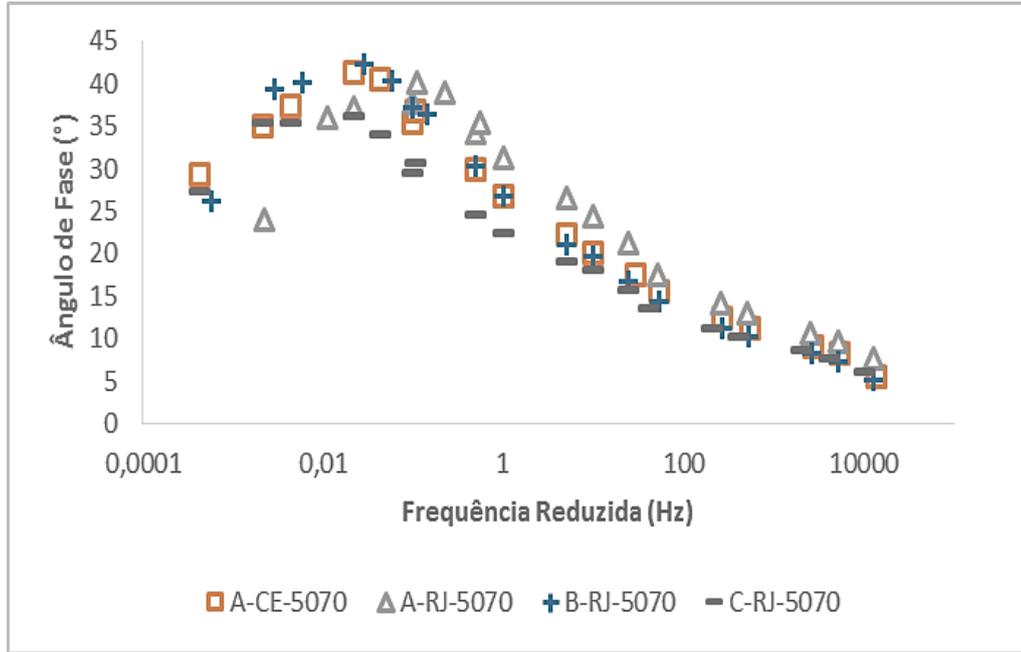


Figura 31 - Curvas mestras de Ângulo de Fase em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C das misturas dosadas pelo método SUPERPAVE com CAP 50/70.

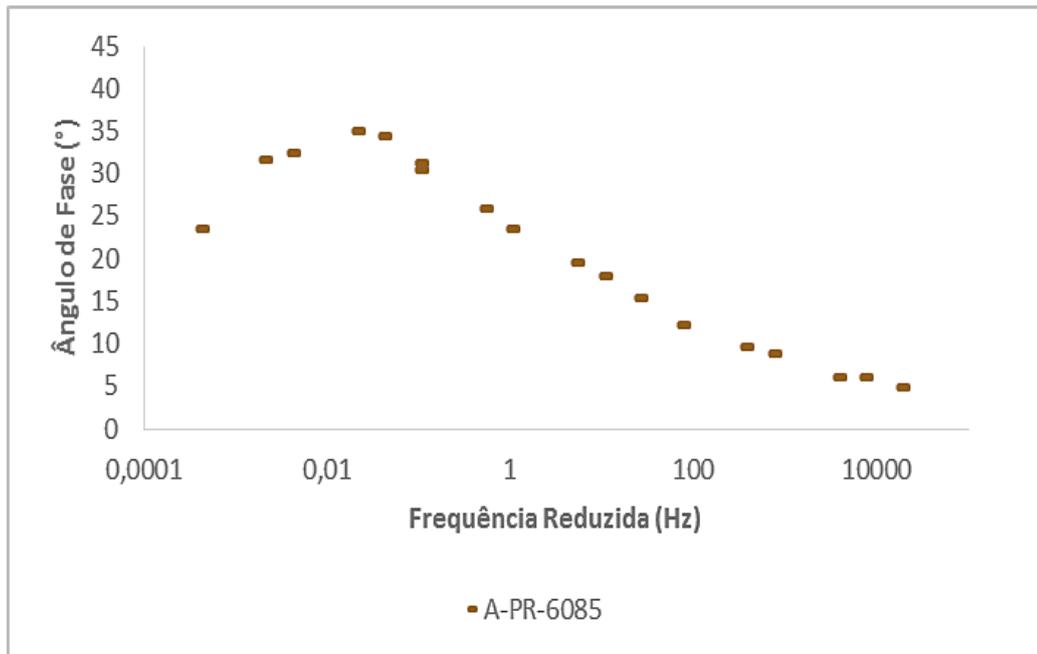


Figura 32 - Curva mestra de Ângulo de Fase em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C da mistura dosada pelo método SUPERPAVE com CAP 60/85.

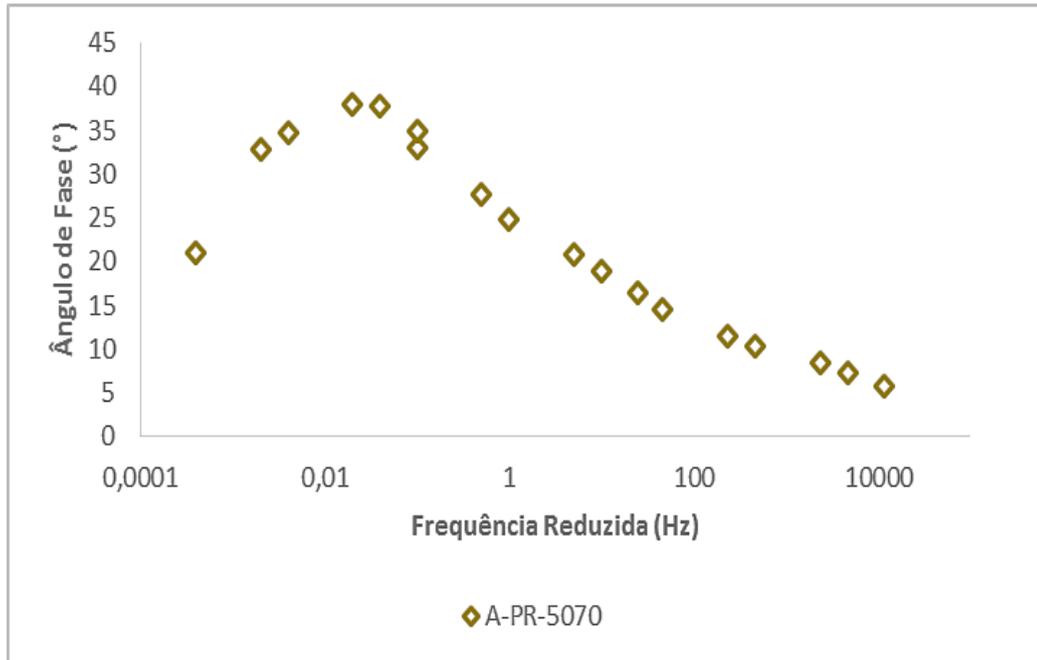


Figura 33 - Curva mestra de Ângulo de Fase em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C da mistura dosada pelo método Marshall com CAP 50/70.

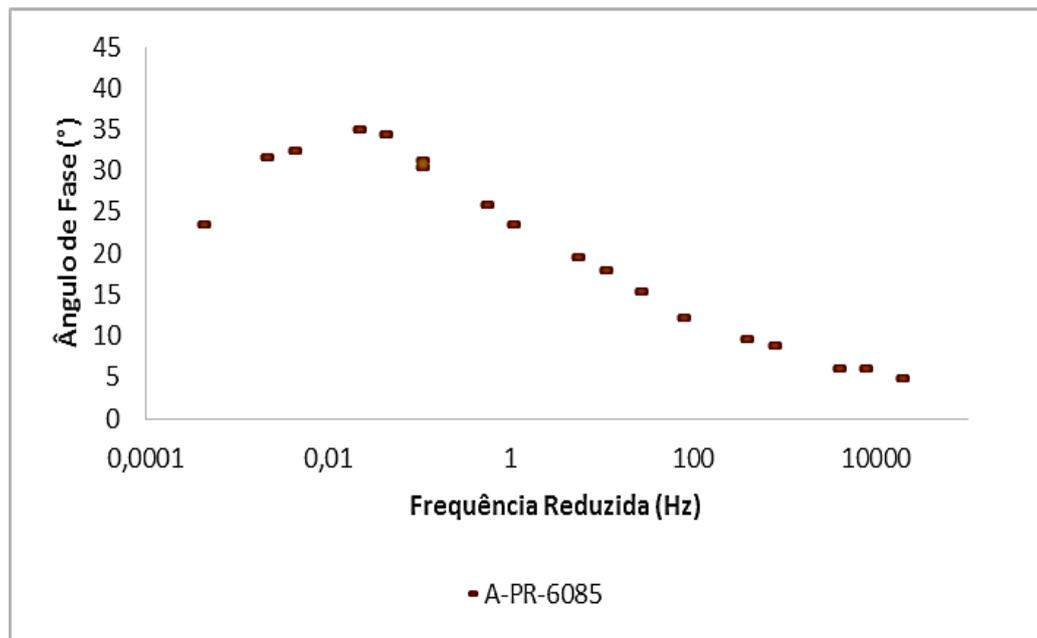


Figura 34 - Curva mestra de Ângulo de Fase em função da frequência reduzida para a temperatura de referência igual a 20°C da mistura dosada pelo método Marshall com CAP 60/85.

Tal como observado nas curvas mestras de módulo dinâmico, as misturas A-RJ-3045 e A-RJ-5070 também apresentaram uma discrepância em relação as suas respectivas misturas semelhantes nas curvas mestras de ângulo de fase. Além disso, observa-se que todas as curvas apresentaram um comportamento característico de misturas asfálticas, pois, decrescem com o aumento da frequência reduzida e possuem uma inversão em torno de 0,01-0,05 Hz, indicando a região de maior influência do agregado mineral devido a perda da elasticidade do ligante (região referente a altas temperaturas).

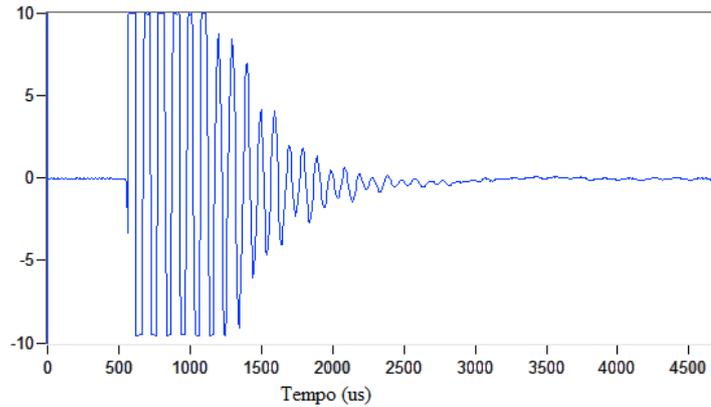
4.2 Módulo Dinâmico e do Ângulo de Fase pelo ensaio de Ressonância por Impacto

Com as 8 misturas dosadas pelo método SUPERPAVE e as 2 misturas dosadas pelo método Marshall, foram realizados ensaios de ressonância por impacto para 150 discos finos em 7 temperaturas diferentes (-5, 0, 10, 20, 30, 40 e 55°C) e com cinco repetições de ensaio para cada disco. Dessa forma, gerou-se um amplo banco de dados (10500 gráficos de análise), impossibilitando a apresentação de todos os resultados no corpo do texto. Assim, optou-se por apresentar os resultados em forma de gráficos de médias, pois, cada mistura resulta em 25 gráficos por temperatura e por modo de ensaio.

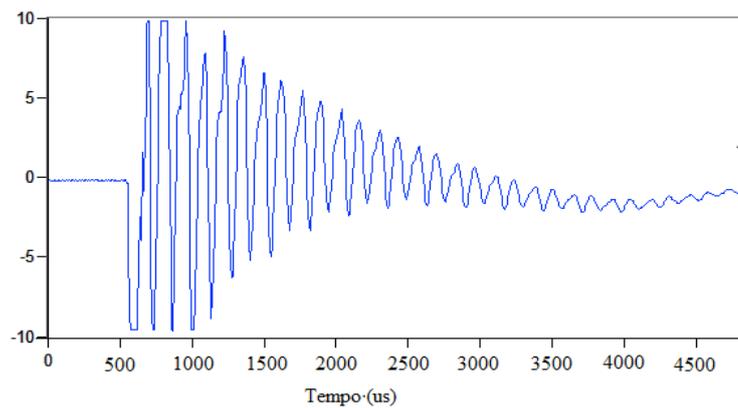
Ainda, o processamento dos dados é semelhante para todos os ensaios e todas as misturas, dessa forma, foi possível detalha-lo utilizando apenas um disco de modo a facilitar a compreensão do leitor a respeito de como se obtém o módulo dinâmico e o ângulo de fase por este método. O disco CP 05-1 referente à mistura A-CE-5070 foi escolhido para a apresentação do processamento de dados do ensaio.

4.2.1 Obtenção de frequência natural amortecida e fator de amortecimento

O ensaio de RI apresenta como resultado dois gráficos, um representa a amplitude do sinal em função do tempo (μ s) (Figura 35) e outro a amplitude do sinal em função da frequência (Hz) (Figura 36). Nas Figuras 35 e 36 são apresentados os resultados característicos para o CP 05-1 para um ensaio sob a temperatura de -5°C. Os resultados obtidos para os demais discos foram apresentados no Apêndice C deste trabalho em uma média aritmética dos ensaios.



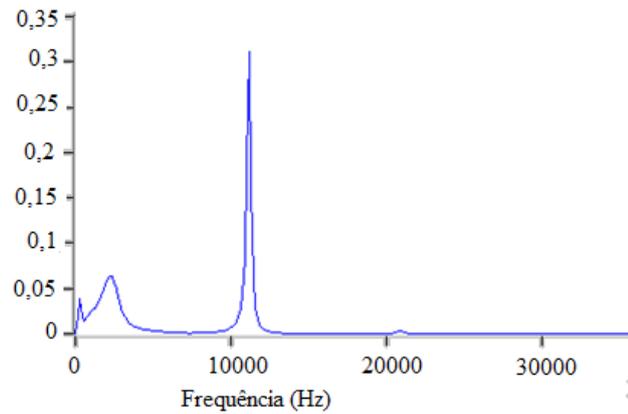
(a)



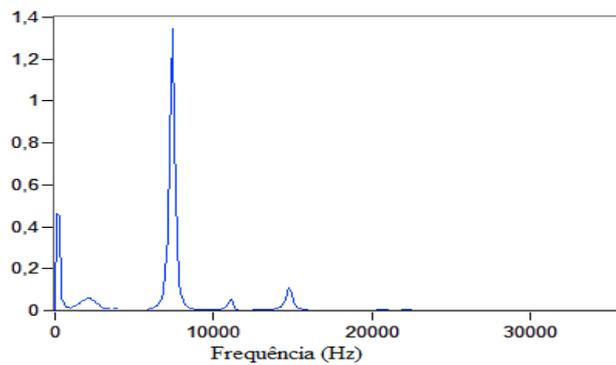
(b)

Figura 35 - Sinal medido no domínio do tempo para o disco fino do CP 05-1 a -5°C no modo 1 (a) e no modo 2 (b).

A frequência obtida na Figura 36 é a frequência natural amortecida do material. Para o disco CP 05-1, referente à mistura A-CE-5070, a frequência natural média amortecida no modo 1 (f_1) foi igual a 11161 Hz e no modo 2 (f_2) igual a 7394 Hz para a temperatura de -5°C . O ensaio possui uma repetitividade elevada e o coeficiente de variação (CV) foi menor que 5% pré-definidos pela norma ASTM C1259 (2008) em todas as temperaturas analisadas, mesmo nas mais altas (55°C). São apresentados nas Tabelas 5 e 6 as frequências naturais obtidas no disco CP05-1, com 5 repetições e entre as temperaturas -5°C e 55°C para os modos 1 e 2, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 36 - Sinal medido no domínio de frequência para o disco fino do CP 05-1 a -5°C no modo 1 (a) e no modo 2 (b).

Tabela 5 - Frequências naturais do ensaio de ressonância por impacto para o modo 1 para o disco fino CP 05-1.

Ensaio	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)						
	-5	0	10	20	30	40	55
1	11161	10882	10184	9486,6	8510	6417,4	4882,8
2	11161	10882	10184	9486,6	8370,5	6696,4	5022,3
3	11161	10882	10184	9626,1	8510	6556,9	5022,3
4	11161	10882	10184	9626,1	8510	6696,4	5161,8
5	11161	10882	10184	9598,6	8510	6556,4	5161,8
MÉDIA (Hz)	11161	10882	10184	9564,8	8482,1	6584,7	5050,2
Desvio Padrão (Hz)	0,00	0,00	0,00	72,26	62,39	116,74	116,71
CV (%)	0,00	0,00	0,00	0,76	0,74	1,77	2,31

Tabela 6 - Frequências naturais do ensaio de ressonância por impacto para o modo 2 para o disco fino CP 05-1.

Ensaio	Temperatura (°C)						
	-5	0	10	20	30	40	55
1	7394	7115	6556,9	6134,2	4898	3906,3	3104,1
2	7394	6835,9	6556,9	6134,2	4797,2	3906,3	3104,1
3	7394	6835,9	6517,6	6134,2	5079,4	3906,3	2963
4	7394	6975,4	6529,6	6262	5079,4	3906,3	2929,7
5	7394	6975,4	6469,6	6277,9	4938,3	3906,3	2963
MÉDIA (Hz)	7394,0	6947,5	6526,1	6188,5	4958,5	3906,3	3012,8
Desvio Padrão (Hz)	0,00	116,75	35,97	74,57	121,78	0,00	84,46
CV (%)	0,00	1,68	0,55	1,20	2,46	0,00	2,80

Para o cálculo do módulo de armazenamento (Equação 42) é necessário realizar a conversão da frequência natural amortecida para a frequência natural, por meio do fator de amortecimento (Equação 22).

O fator de amortecimento pode ser obtido pelos Métodos de Largura de Banda (Equação 26) e do Decremento Logarítmico (Equação 24), usando, respectivamente, os gráficos em função do tempo e da frequência. Assim, tem-se para o disco fino CP 05-1, no modo 1, sob a temperatura de -5°C, o seguinte cálculo para o fator de amortecimento:

a) Método de largura de banda:

Substituindo na Equação 26, tem-se que:

$$\zeta = \frac{\Delta f}{2f_R}$$

$$\zeta = \frac{240}{2 \times 11161}$$

$$\zeta = 0,011$$

b) Método do decremento logarítmico:

Substituindo na Equação 24, tem-se que:

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{k}\right)^2}}$$

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi}{0,094}\right)^2}}$$

$$\zeta = 0,123$$

Onde k é a relação logarítmica entre as amplitudes sucessivas, de modo que:

$$k = \frac{1}{n} \ln \left(\frac{A}{A_n} \right) = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{9,993}{8,273} \right) = 0,094$$

No item seguinte é realizado um comparativo entre os dois métodos de obtenção do fator de amortecimento.

4.2.1.1 Comparativo entre os métodos de largura de banda e decremento logarítmico

Para avaliar comparativamente os dois métodos de obtenção do fator de amortecimento, dois corpos de prova de duas misturas asfálticas diferentes (A-RJ-3045 e A-CE-5070) foram analisados (totalizando dez discos e 350 repetições de ensaio).

Foi possível perceber que o Método de Largura de Banda apresenta um menor coeficiente de variação. Também, foi possível observar que o comportamento do fator de amortecimento em função da temperatura é mais próximo do esperado pelo Método de Largura de Banda, pois, para misturas asfálticas, o fator de amortecimento aumenta à medida que se aumenta a temperatura, até que o ligante perca a sua capacidade elástica.

Além disso, o método do Decremento Logarítmico apresenta valores elevados de fator de amortecimento para baixas temperaturas, divergindo da pouca influência viscosa esperada para esses materiais nessas condições. Os resultados são apresentados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente, para as misturas asfálticas A-RJ-3045 e A-CE-5070.

Tabela 7 - Fator de amortecimento para a mistura A-RJ-3045 pelo Método de Largura de Banda (ζ_1) e pelo Método do Decremento Logarítmico (ζ_2).

Ensaio	Temperatura (°C)													
	-5		0		10		20		30		40		55	
	ζ_1	ζ_2	ζ_1	ζ_2	ζ_1	ζ_2	ζ_1	ζ_2	ζ_1	ζ_2	ζ_1	ζ_2	ζ_1	ζ_2
1	0,014	0,242	0,015	0,217	0,032	0,054	0,037	0,062	0,107	0,134	0,096	0,188	0,189	0,285
2	0,016	0,217	0,014	0,234	0,024	0,073	0,041	0,062	0,099	0,106	0,085	0,185	0,185	0,283
3	0,011	0,071	0,009	0,202	0,045	0,133	0,037	0,125	0,116	0,104	0,086	0,153	0,174	0,275
4	0,016	0,216	0,012	0,255	0,049	0,095	0,037	0,121	0,095	0,132	0,071	0,171	0,185	0,319
5	0,014	0,199	0,014	0,189	0,025	0,077	0,038	0,125	0,111	0,174	0,091	0,184	0,182	0,305
Média	0,014	0,189	0,013	0,219	0,035	0,086	0,038	0,099	0,105	0,130	0,086	0,176	0,183	0,293
Desvio Padrão	0,002	0,060	0,002	0,024	0,010	0,027	0,002	0,030	0,008	0,025	0,008	0,013	0,005	0,016
CV(%)	14,0	32,0	16,7	10,7	29,8	30,7	4,1	30,5	7,2	19,5	9,6	7,4	2,7	5,5

Tabela 8 - Fator de amortecimento para a mistura A-CE-5070 pelo Método de Largura de Banda (ζ_1) e pelo Método do Decremento Logarítmico (ζ_2).

Ensaio	Temperatura (°C)													
	-5		0		10		20		30		40		55	
	ζ_1	ζ_2	ζ_1	ζ_2	ζ_1	ζ_2	ζ_1	ζ_2	ζ_1	ζ_2	ζ_1	ζ_2	ζ_1	ζ_2
1	0,011	0,121	0,018	0,065	0,028	0,047	0,037	0,327	0,089	0,184	0,109	0,132	0,168	0,271
2	0,008	0,198	0,012	0,056	0,031	0,044	0,037	0,292	0,083	0,195	0,094	0,197	0,177	0,244
3	0,009	0,136	0,015	0,061	0,031	0,038	0,036	0,102	0,060	0,108	0,096	0,168	0,164	0,230
4	0,009	0,073	0,012	0,091	0,030	0,037	0,030	0,159	0,071	0,144	0,104	0,142	0,134	0,270
5	0,016	0,160	0,021	0,054	0,028	0,078	0,033	0,279	0,060	0,098	0,085	0,085	0,153	0,198
Média	0,010	0,138	0,015	0,065	0,030	0,049	0,035	0,232	0,073	0,146	0,098	0,145	0,159	0,243
Desvio Padrão	0,003	0,042	0,003	0,013	0,001	0,015	0,003	0,086	0,012	0,039	0,008	0,038	0,015	0,027
CV(%)	27,6	30,2	22,7	20,2	4,5	30,7	8,1	37,1	16,6	26,8	8,3	26,0	9,3	11,2

4.2.2 Obtenção de frequência natural e ângulo de fase

Para as demais misturas analisadas, o fator de amortecimento foi obtido apenas pelo Método de Largura de Banda. Após determinados os fatores de amortecimento, foi possível obter as frequências naturais e os ângulos de fase pelas Equações 22 e 42, respectivamente. Dessa forma, para o disco fino CP 05-1, a temperatura de -5°C , tem-se:

a) Frequência natural:

$$f_d = \sqrt{1 - \zeta^2} \cdot f_n$$

$$11161 = \sqrt{1 - (0,011)^2} \cdot f_n$$

$$f_n = 11161,65 \text{ Hz}$$

b) Ângulo de fase:

$$\phi = \tan^{-1}(2\zeta)$$

$$\phi = \tan^{-1}(2 \times 0,011)$$

$$\phi = 1,23^\circ$$

Os ângulos de fase para misturas dosadas com diferentes tipos de cimentos asfálticos de petróleo (CAPs) são apresentados nas Figuras 37, 38, 39, 40 e 41 enquanto que as frequências naturais para o modo 1 (f_{n1}) e o modo 2 (f_{n2}) para as misturas analisadas são apresentadas nas Figuras 42, 43, 44, 45 e 46, ambos em função da temperatura ($^\circ\text{C}$).

Percebe-se que o ângulo de fase é diretamente proporcional ao aumento de temperatura (Figuras 37 a 41), visto que este comportamento é o esperado para materiais viscoelásticos. Entretanto, a mistura A-PR-6085 apresentou uma inversão na temperatura igual a 55°C e nas misturas C-RJ-3045 E A-PE-6085, uma redução no incremento do ângulo de fase. Esses fenômenos podem ser admitidos como modificação das características do ligante, resultando na perda da fase elástica dessas misturas.

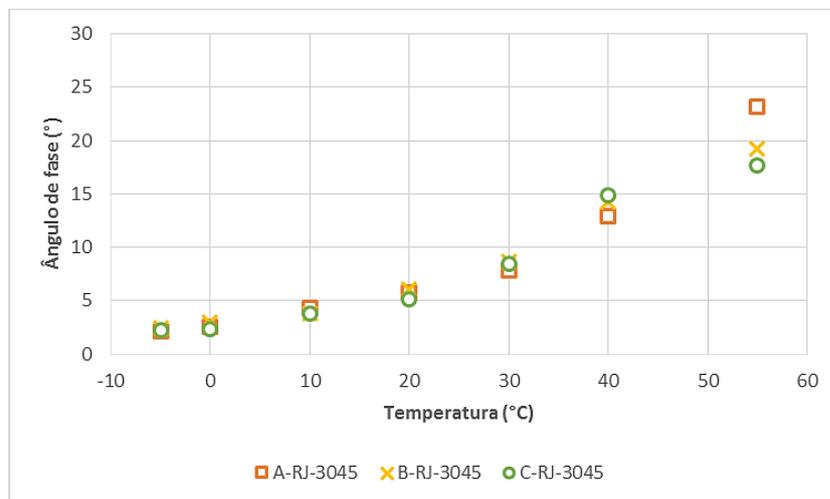


Figura 37 - Ângulo de Fase em função da temperatura para as misturas com CAP SUPERPAVE 30/45.

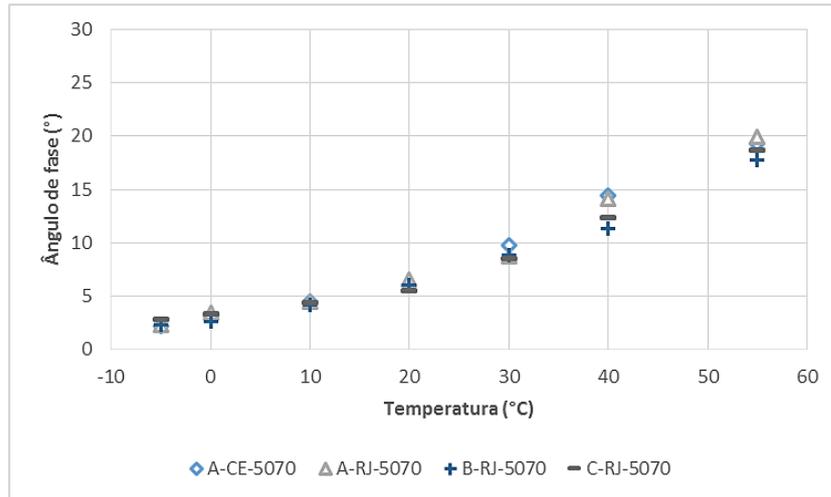


Figura 38 - Ângulo de Fase em função da temperatura para as misturas com CAP SUPERPAVE 50/70.

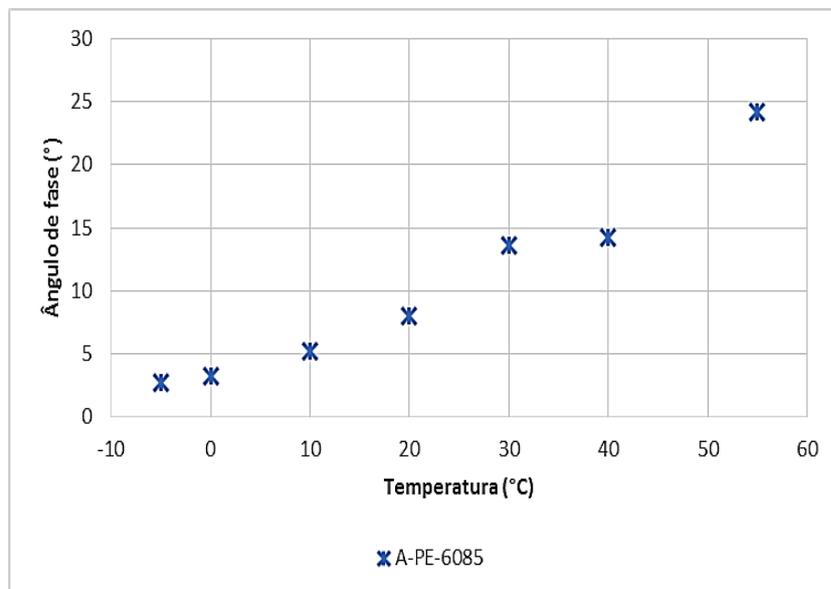


Figura 39 - Ângulo de Fase em função da temperatura para a mistura com CAP SUPERPAVE 60/85.

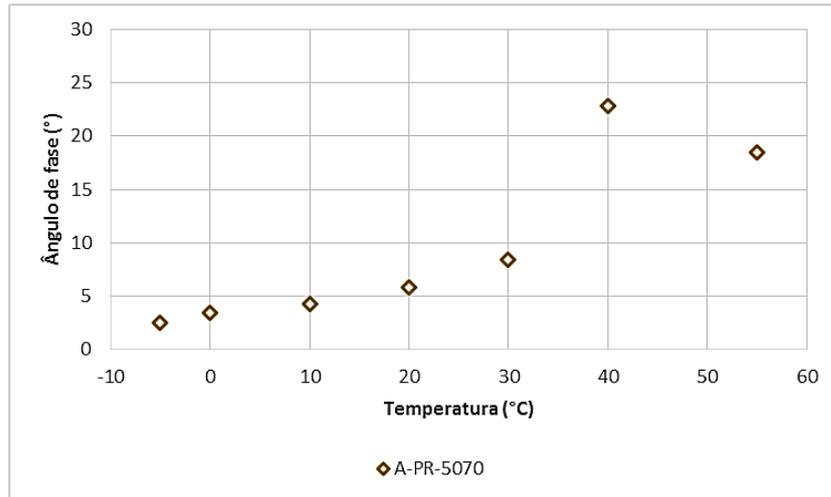


Figura 40 - Ângulo de Fase em função da temperatura para a mistura com CAP Marshall 50/70.

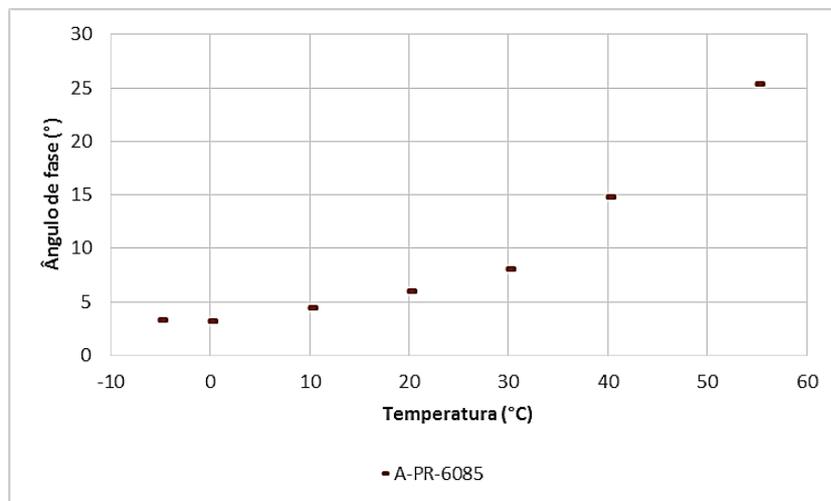


Figura 41 - Ângulo de Fase em função da temperatura para a mistura com CAP Marshall 60/85.

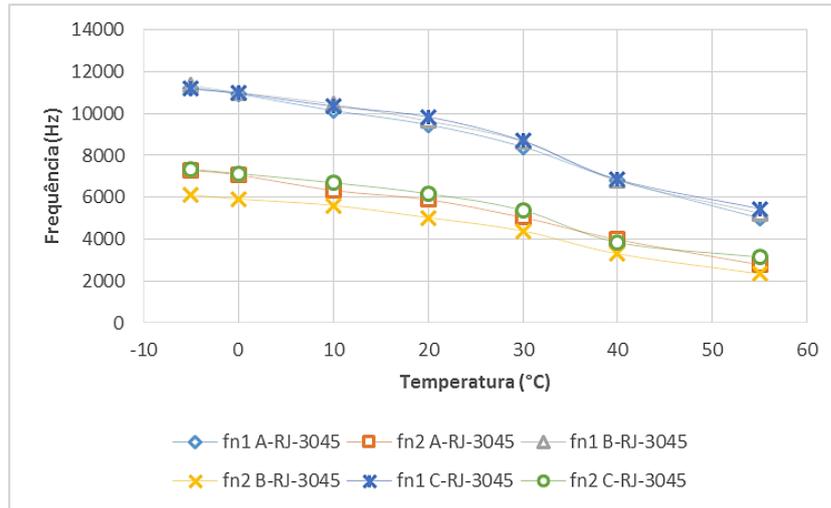


Figura 42 - Frequências Naturais em função da temperatura para as misturas com CAP SUPERPAVE 30/45.

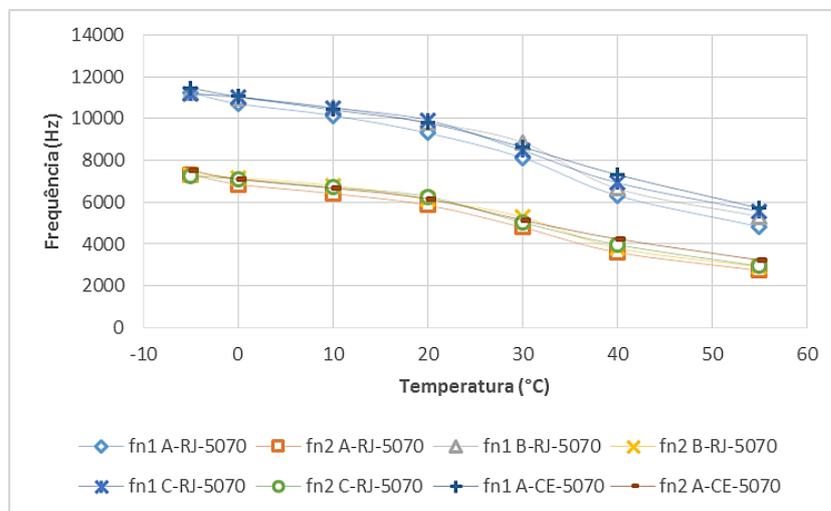


Figura 43 - Frequências Naturais em função da temperatura para as misturas com CAP SUPERPAVE 50/70.

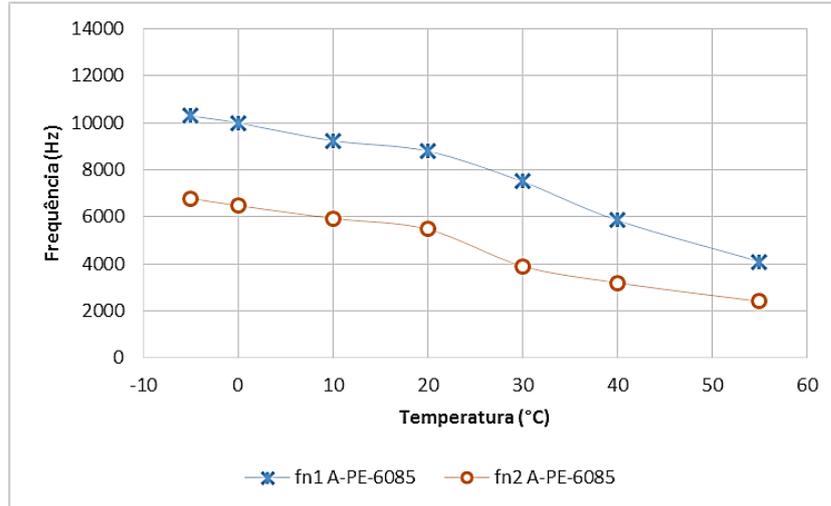


Figura 44 - Frequências Naturais em função da temperatura para as misturas com CAP SUPERPAVE 60/85.

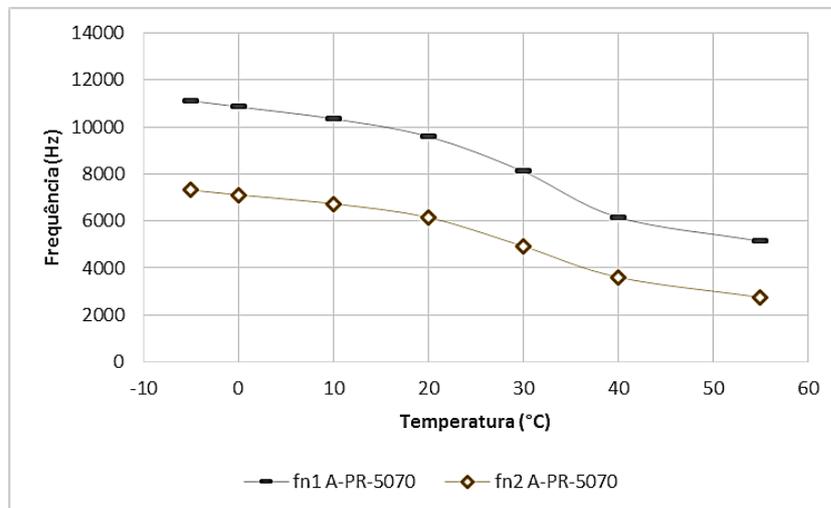


Figura 45 - Frequências Naturais em função da temperatura para as misturas com CAP Marshall 50/70.

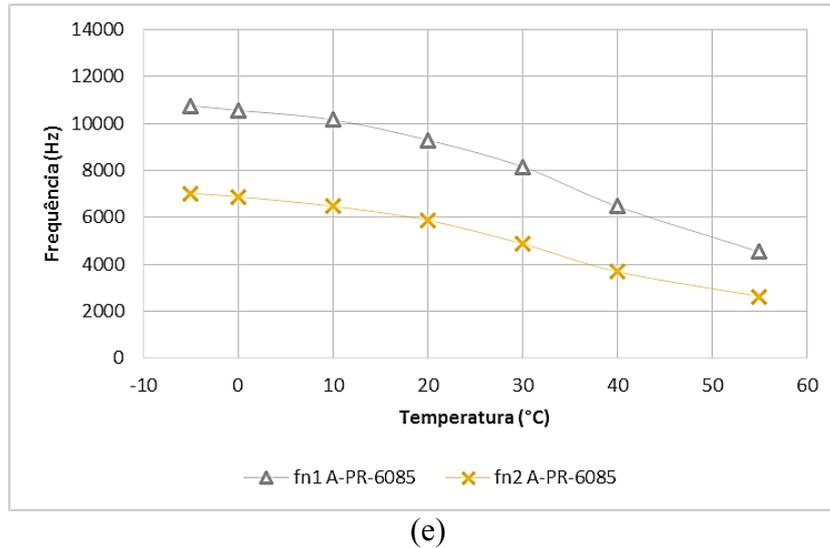


Figura 46 - Frequências Naturais em função da temperatura para as misturas com CAP Marshall 60/85.

As Figuras 42 a 46 apresentam a relação da frequência natural com a temperatura, caracterizando-se como inversamente proporcional. Porém, a relação entre as frequências naturais dos modos 1 e 2 não se mantém constante, possui um limite inferior igual a 1,3 (para baixas temperaturas) e ultrapassa 2,0 para as temperaturas mais altas (40 e 55°C). A redução da frequência natural com o aumento da temperatura é superior no modo 1 devido a maior influência do agregado mineral no primeiro modo de vibração.

A relação f_{n1}/f_{n2} e a relação geométrica (*raio (r)/altura (h)*) são dados de entrada para determinar o coeficiente de Poisson pela norma ASTM E1876 (2009). Quando essa relação é inferior a 1,3, não é possível determinar o coeficiente de Poisson, pois este se torna um valor negativo. Nesta pesquisa, os ensaios que resultaram em um coeficiente de Poisson negativo ou acima de 0,6 foram descartados.

De maneira similar, os coeficientes geométricos (K_1 e K_2) também foram determinados pela norma ASTM E1876 (2009), utilizando, por sua vez, como dado de entrada o coeficiente de Poisson e a relação r/h . Os coeficientes de Poisson e os coeficientes geométricos das misturas analisadas forma anexados ao Apêndice D desse trabalho.

Após a determinação de todas as variáveis, o módulo de armazenamento pode ser obtido pela Equação 42. A partir da relação com o ângulo de fase, o módulo dinâmico foi obtido por meio do módulo de armazenamento (Equação 44), para cada modo de ensaio (Figuras 47 a 51). O resultado final do módulo dinâmico é a média entre os modos 1 e 2 (Figuras 52 a 56).

Desse modo, para o disco fino CP 05-1 sob a temperatura de -5°C tem-se:

a) Módulo de armazenamento:

a. Para o modo 1:

$$E_{s1} = \frac{48\rho f_{n1}^2 R^4 \pi^2 (1 - \nu^2)}{K_1^2 h^2}$$

$$E_{s1} = \frac{48 \times 0,0024 \times (11161,65)^2 \times (50,16)^4 \times \pi^2 \times (1 - 0,24^2)}{6,923^2 \times 24,92^2}$$

$$E_{s1} = 28391,59 \text{ MPa}$$

b. Para o modo 2:

$$E_{s2} = \frac{48\rho f_{n2}^2 R^4 \pi^2 (1 - \nu^2)}{K_2^2 h^2}$$

$$E_{s1} = \frac{48 \times 0,0024 \times (7395,10)^2 \times (50,16)^4 \times \pi^2 \times (1 - 0,24^2)}{4,564^2 \times 24,92^2}$$

$$E_{s2} = 28675,99 \text{ MPa}$$

b) Módulo dinâmico:

a. Para o modo 1:

$$|E^*|_1 = \frac{E_{s1}}{\cos(\phi_1)}$$

$$|E^*|_1 = \frac{28391,59}{\cos(1,23)}$$

$$|E^*|_1 = 28398,13 \text{ MPa}$$

b. Para o modo 2:

$$|E^*|_2 = \frac{E_{s2}}{\cos(\phi_2)}$$

$$|E^*|_2 = \frac{28675,99}{\cos(1,98)}$$

$$|E^*|_2 = 28693,12 \text{ MPa}$$

c. Módulo dinâmico:

$$|E^*| = \frac{|E^*|_1 + |E^*|_2}{2}$$

$$|E^*| = \frac{28693,12 + 28398,13}{2} = 28545,63 \text{ MPa}$$

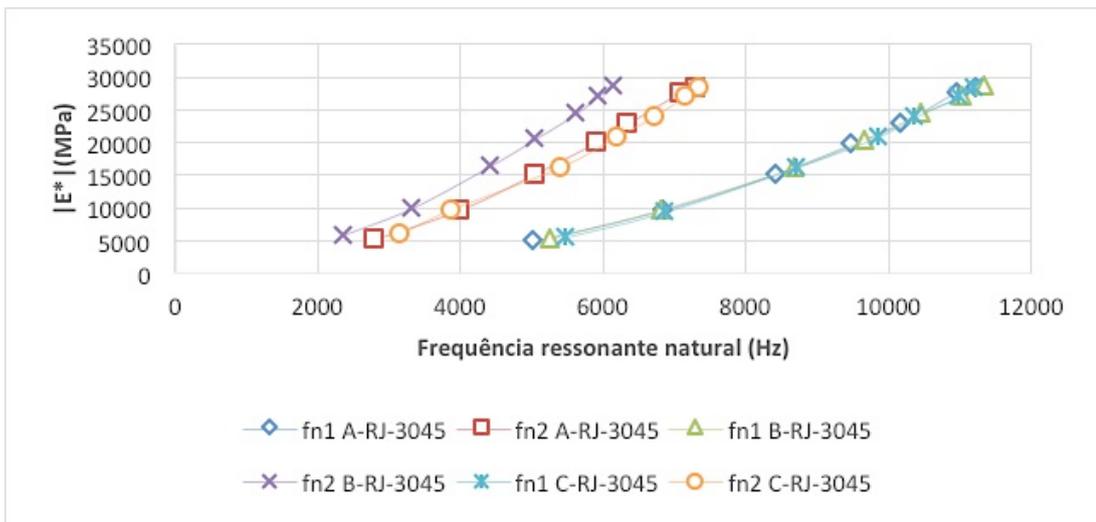


Figura 47 - Módulos dinâmicos para os modos 1 e 2 em função da frequência ressonante natural para as misturas com CAP SUPERPAVE 30/45.

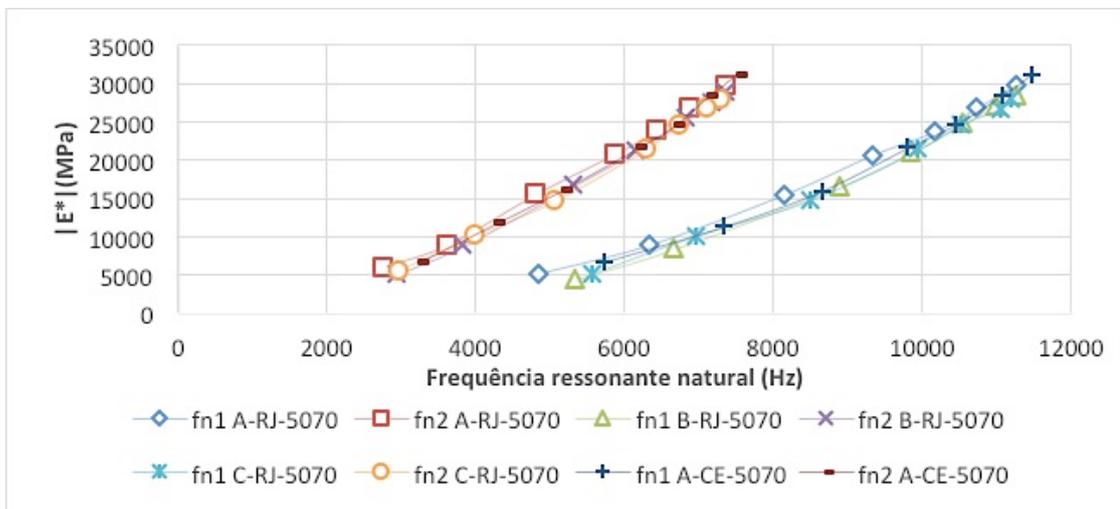


Figura 48 - Módulos dinâmicos para os modos 1 e 2 em função da frequência ressonante natural para as misturas com CAP SUPERPAVE 50/70.

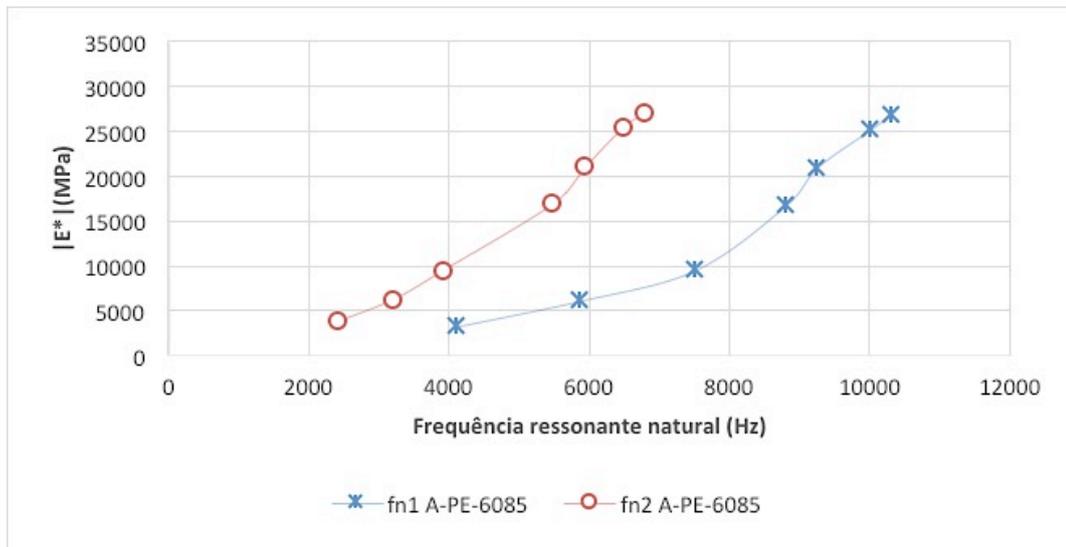


Figura 49 - Módulos dinâmicos para os modos 1 e 2 em função da frequência ressonante natural para as misturas com CAP SUPERPAVE 60/85

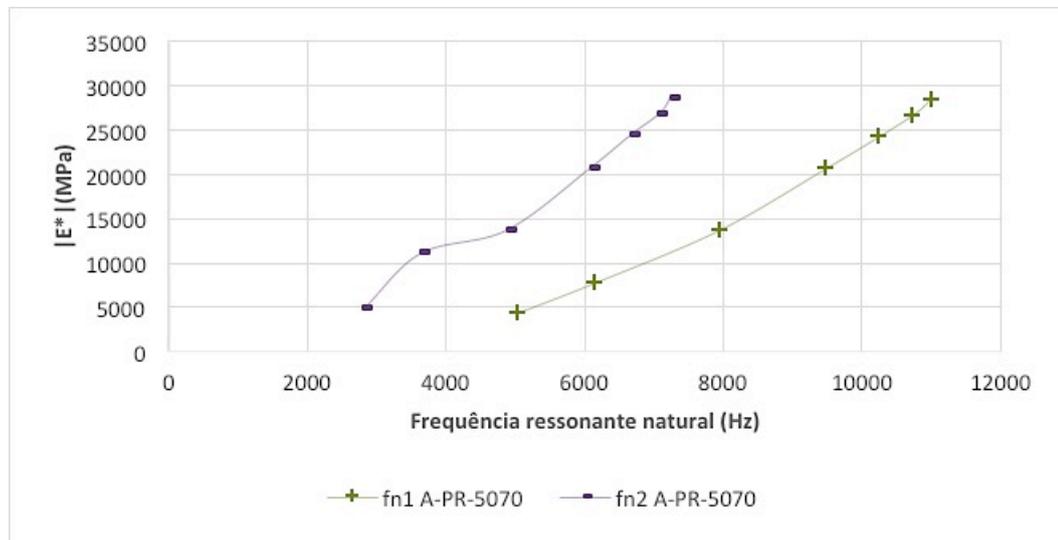


Figura 50 - Módulos dinâmicos para os modos 1 e 2 em função da frequência ressonante natural para as misturas com Marshall 50/70.

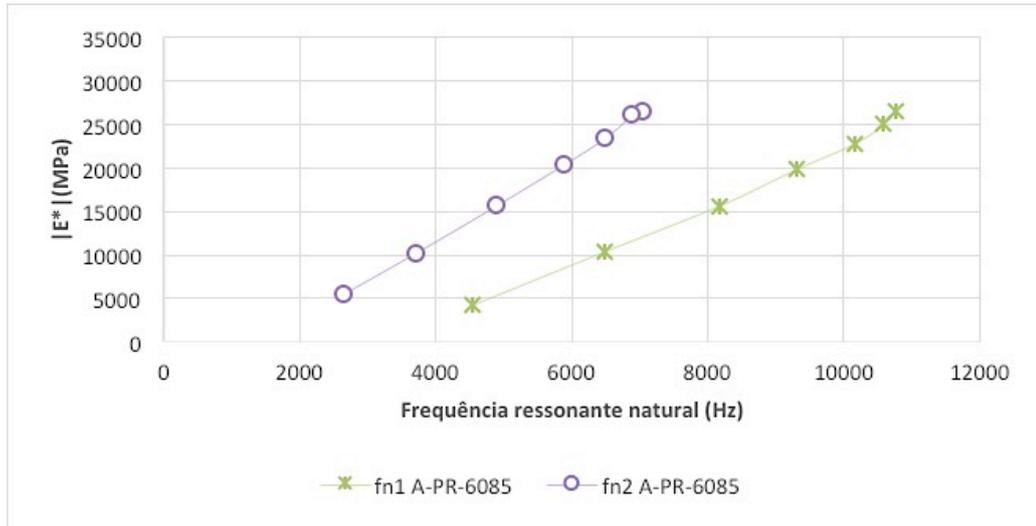


Figura 51 - Módulos dinâmicos para os modos 1 e 2 em função da frequência ressonante natural para as misturas com CAP Marshall 60/85.

Nas Figuras 47 a 51, percebe-se que o modo 1 de ensaio resulta em maiores valores de frequência ressonante natural em relação ao modo 2, já que as misturas asfálticas possuem maior capacidade de propagar a onda na direção de tração do que a de torção, entretanto, os resultados de Módulo Dinâmico foi praticamente igual nos dois modos.

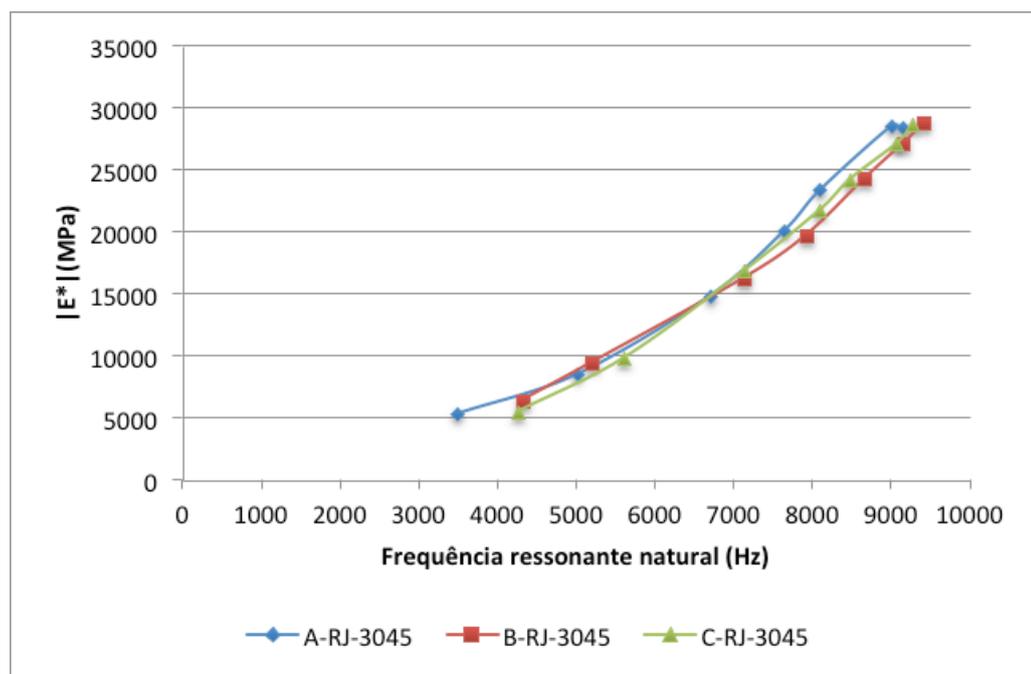


Figura 52 - Média dos Módulos dinâmicos em função da frequência ressonante natural para as misturas com CAP SUPERPAVE 30/45.

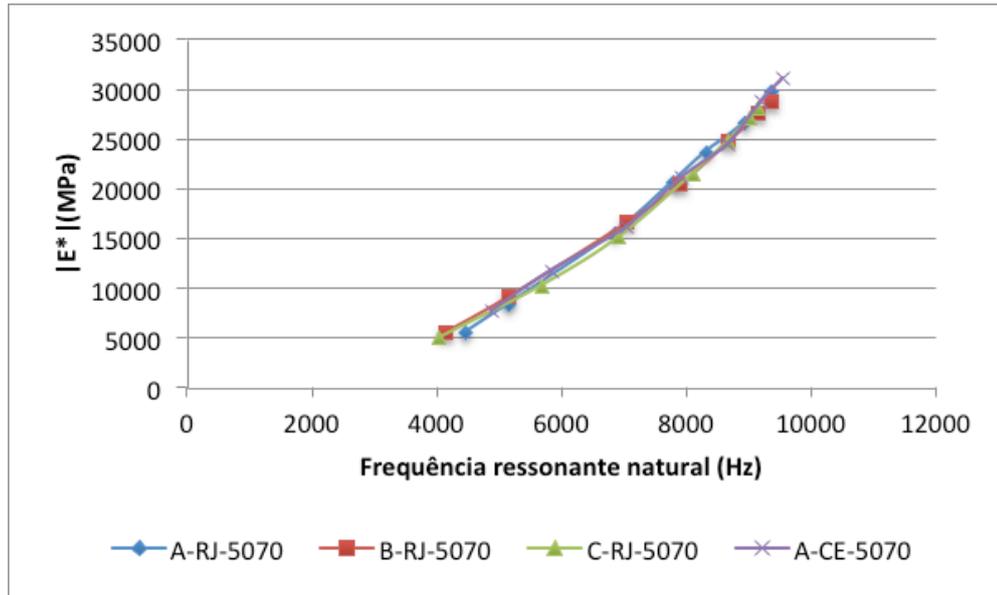


Figura 53 - Média dos Módulos dinâmicos em função da frequência ressonante natural para as misturas CAP SUPERPAVE 50/70.

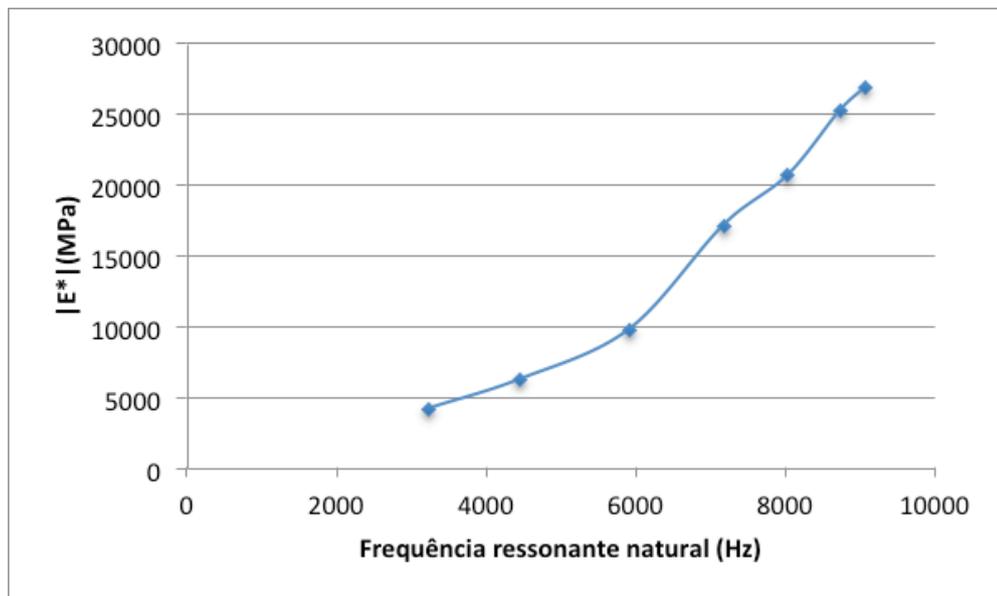


Figura 54 - Média dos Módulos dinâmicos em função da frequência ressonante natural para a mistura com CAP SUPERPAVE 60/85.

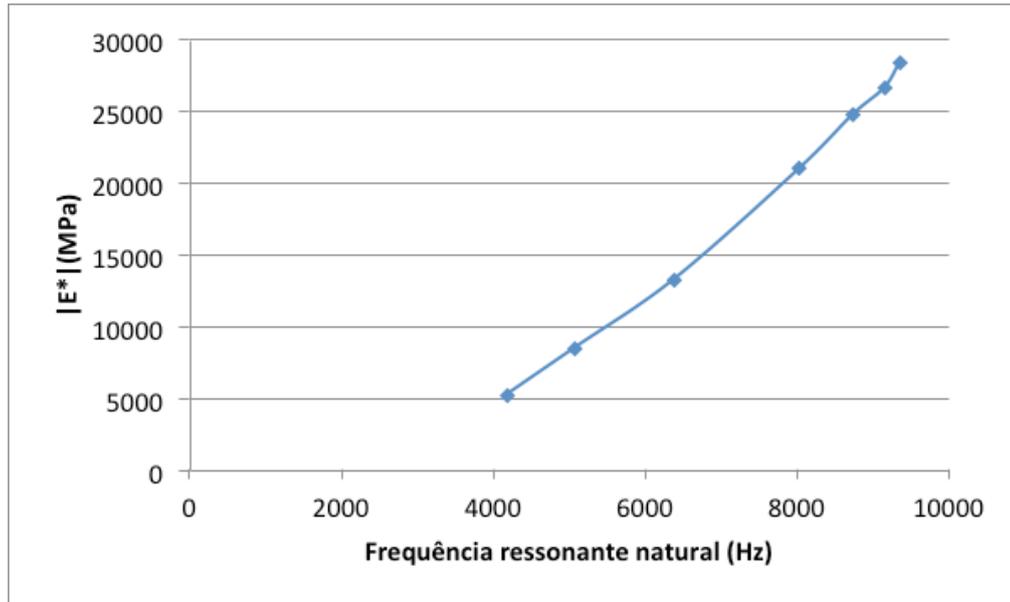


Figura 55 - Média dos Módulos dinâmicos em função da frequência ressonante natural para a mistura com CAP Marshall 50/70.

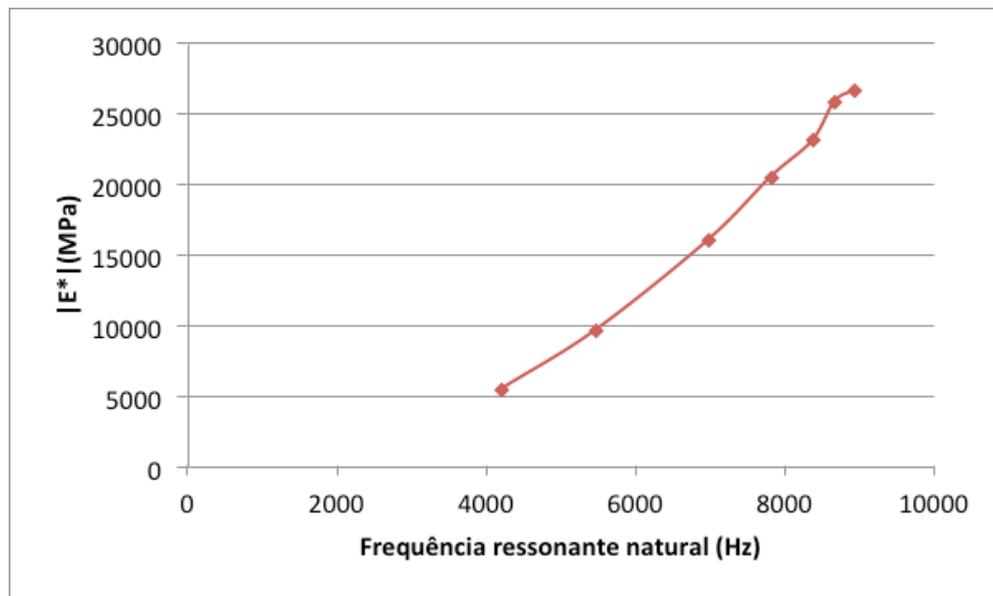


Figura 56 - Média dos Módulos dinâmicos em função da frequência ressonante natural para a mistura com CAP Marshall 60/85.

Observa-se nas Figuras 52 a 56 que os resultados de módulo dinâmico estão em uma faixa aceitável para as misturas asfálticas analisadas (entre 5000 e 40000MPa), porém estão em função de frequências naturais potencialmente superiores às solicitações sofridas no pavimento e, também, às frequências de carregamento impostas no ensaio mecânico (frequência máxima igual a 25Hz). A curva mestra foi de suma importância para a análise dos

resultados, pois, além de unificar as temperaturas de ensaio em uma temperatura de referência, permitiu que os métodos de ensaio fossem comparados em uma mesma frequência.

4.3 Curva Mestre de Módulo Dinâmico obtida pelo ensaio de Ressonância por Impacto

Os resultados obtidos no ensaio de módulo dinâmico de Ressonância por Impacto, apresentados na seção 4.2, são em função da frequência natural (f_n) do material, enquanto que no ensaio mecânico são em função da frequência de carregamento (seção 4.1).

Além disso, conforme já observado no item 4.1, as curvas de módulo dinâmico em uma mesma temperatura não têm comportamento linear com a variação da frequência de carregamento. Para frequências próximas, conforme se aplica no ensaio mecânico (0,1 a 25 Hz), a linearização é possível com o artifício de utilizar escala logarítmica, no qual um fator de deslocamento constante pode ser aplicado a cada temperatura. Contudo, para o caso do ensaio de ressonância por impacto, a frequência natural é sempre muito maior que as frequências aplicadas no ensaio mecânico, fazendo com que a não linearidade seja mais evidente e invalide as funções de fator de deslocamento obtidas naquele ensaio.

Dessa forma, o fator de deslocamento foi determinado por meio do ajuste manual dos resultados do ensaio de módulo dinâmico por compressão dinâmica axial e usado para as respectivas misturas nos resultados do ensaio por ressonância por impacto e nos modelos sigmoidal encontrados.

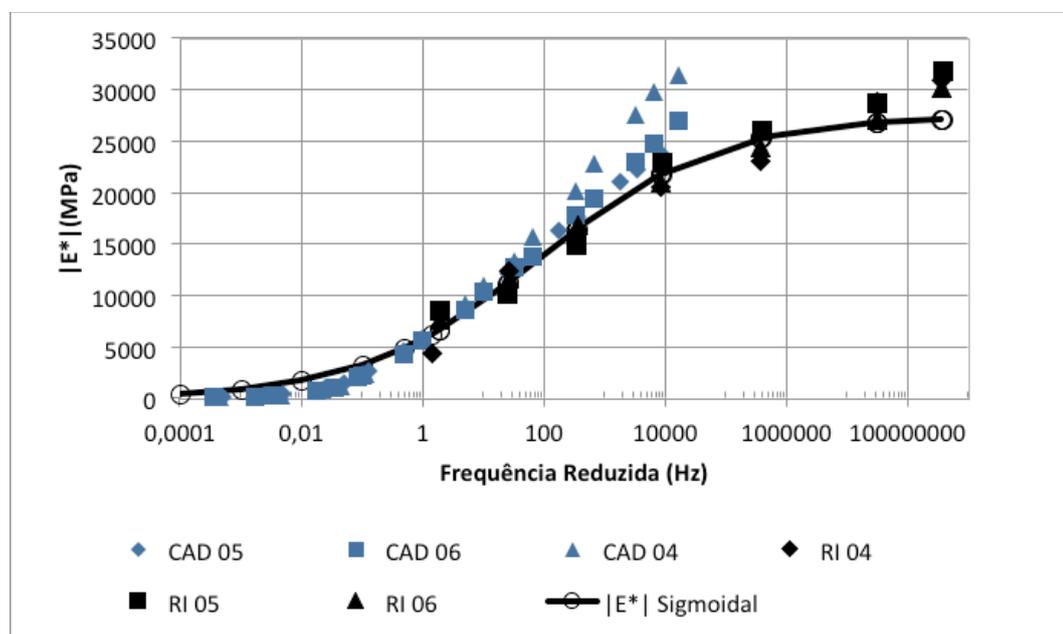


Figura 57 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura A-CE-5070.

Devido a necessidade de complementar a curva mestra na região de baixa frequência reduzida (geralmente menor que 1 Hz), como proposta deste trabalho, foram elaborados modelos de módulo dinâmico, já aplicados os fatores de deslocamentos, para os resultados do ensaio de ressonância por impacto de cada mistura asfáltica, a partir de uma função sigmoidal, $|E^*| = \frac{E_{MÁX} + E_{MÍN}}{(1 + e^{(b_1 + b_2 \log f)})}$, utilizando também o software Statistic 7 (Tabela 9).

Para a análise dos dados de ângulo de fase, elaborou-se outro modelo polinomial, $\phi = \beta_1 (\log f_R)^2 + \beta_2 \log f_R + \beta_3$, entretanto, apenas para uma frequência reduzida superior a 0,1Hz, pois, a faixa de frequência inferior a este valor resulta em uma inversão que não pode ser descrita pela equação polinomial (Tabela 10).

Tabela 9 - Coeficientes da função sigmoidal para o Módulo Dinâmico.

ID MISTURA	$E_{MÁX} + E_{MÍN}$	b_1	b_2
A-RJ-5070	24735,23	2,16336	-1,01370
B-RJ-5070	29064,36	1,58850	-0,66084
C-RJ-5070	28832,47	1,53086	-0,62591
A-CE-5070	26590,22	1,22529	-0,64290
A-RJ-3045	24618,95	1,17772	-0,77004
B-RJ-3045	23464,68	1,06226	-0,82065
C-RJ-3045	27523,43	1,31299	-0,67834
A-PE-6085	29080,00	1,69442	-0,56057
A-PR-6085	24568,39	1,48287	-0,81174
A-PR-5070	26848,21	1,62064	-0,71985

Tabela 10 - Coeficientes da função polinomial para o Ângulo de Fase.

ID MISTURA	β_1	β_2	β_3
A-RJ-5070	0,999716	-9,7392	29,9074
B-RJ-5070	0,71093	-7,5361	26,0829
C-RJ-5070	0,485619	-5,6261	21,9388
A-CE-5070	0,300996	-5,6294	25,9087
A-RJ-3045	0,517302	-6,1702	23,9408
B-RJ-3045	0,450313	-5,0303	20,2889
C-RJ-3045	0,053024	-3,2175	20,7829
A-PE-6085	0,206003	-3,9474	24,3952
A-PR-6085	0,484738	-6,0651	24,8682
A-PR-5070	1,09747	-9,5817	26,573

As Figuras de 58 a 67 apresentam as curvas mestras de módulo dinâmico em função da frequência reduzida pelo ensaio mecânico, pelo ensaio de ressonância por impacto e o modelo sigmoidal ajustado para cada mistura asfáltica.

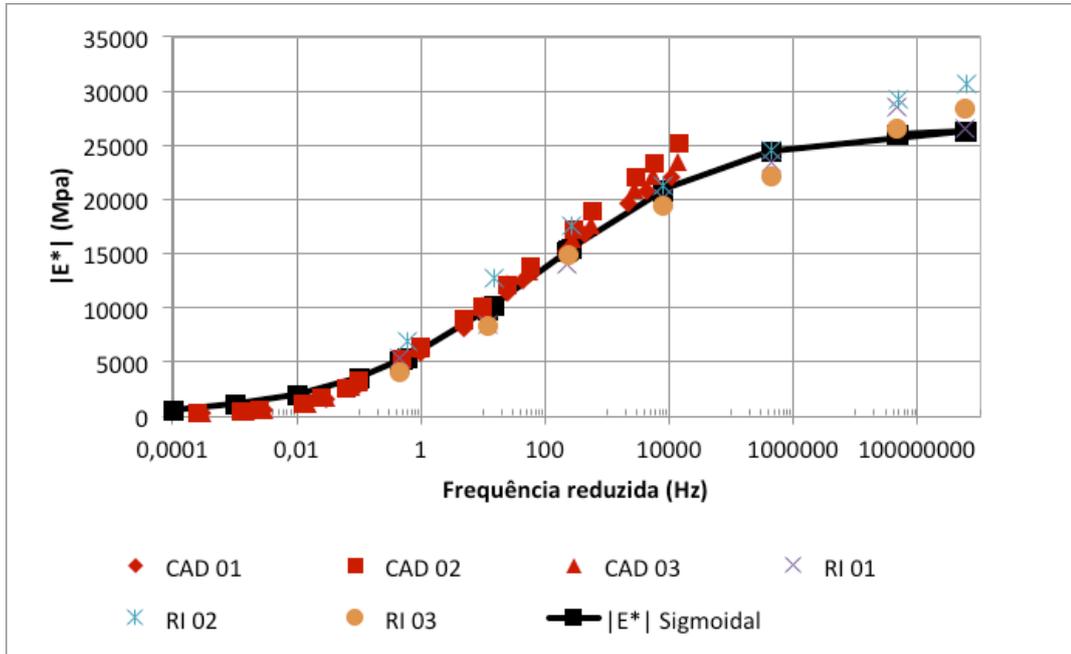


Figura 58 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura A-RJ-3045.

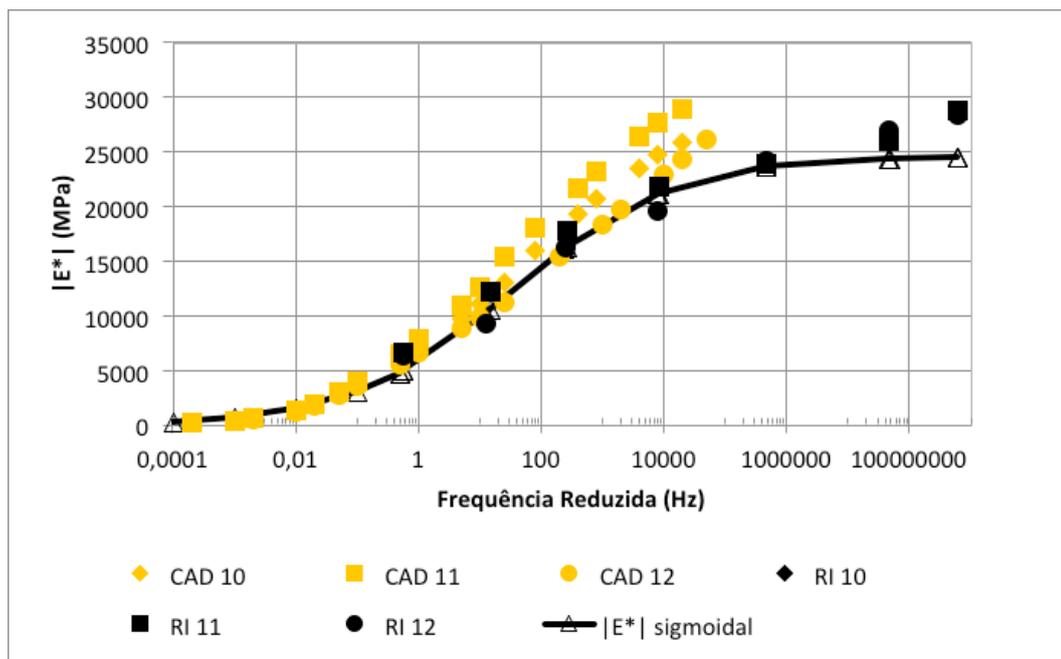


Figura 59 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura B-RJ-3045.

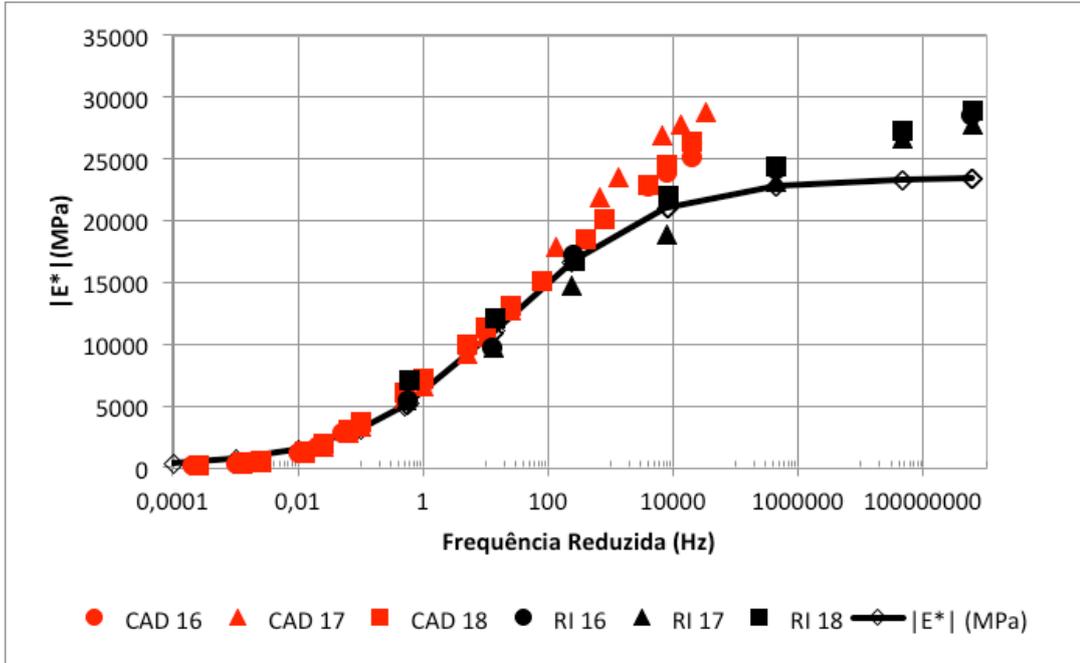


Figura 60 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura C-RJ-3045.

Nas misturas com mais de uma amostra (Rio de Janeiro 50/70 e 30/45), as discrepâncias entre as curvas foram visualmente superiores às das curvas com apenas uma amostra. Esse fenômeno pode ser atribuído ao fator de deslocamento usado para a construção dessas curvas, pois, a diferença de origem dos ligantes provocou uma diferença significativa no resultado das misturas, ainda que estas possuíssem mesma composição. Por outro lado, percebe-se que a sensibilidade do ensaio de ressonância por impacto foi suficiente para registrar essa discrepância.

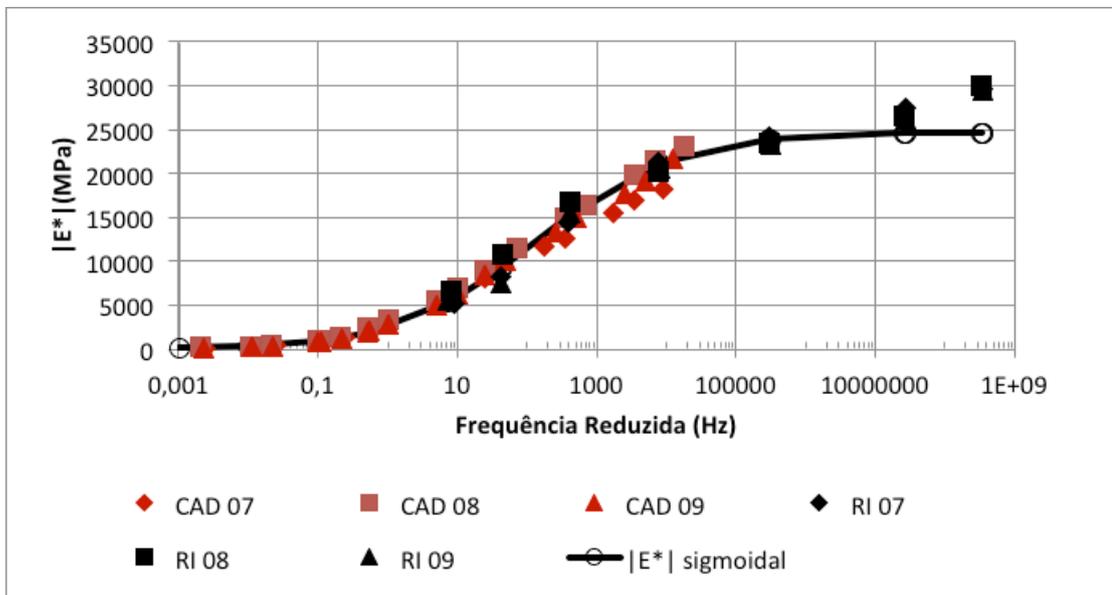


Figura 61 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura A-RJ-5070.

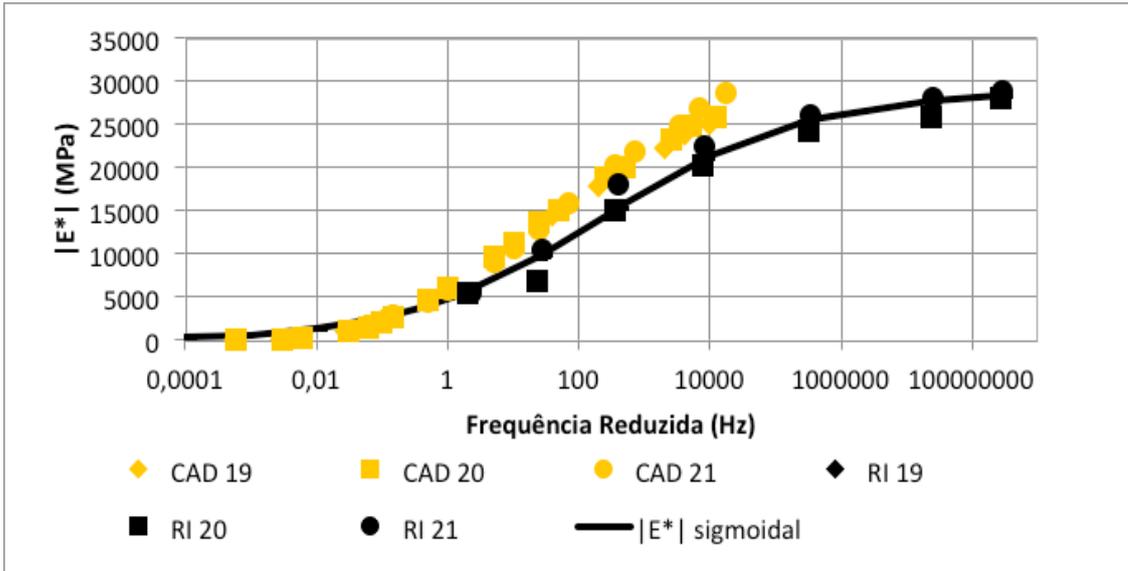


Figura 62 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura B-RJ-5070.

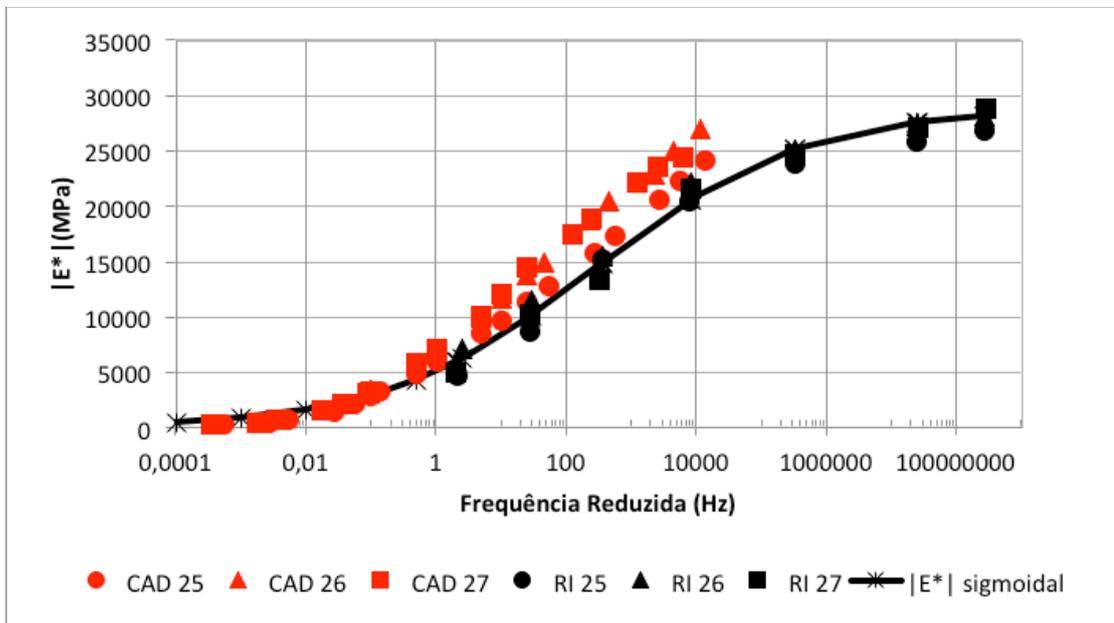


Figura 63 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura C-RJ-5070.

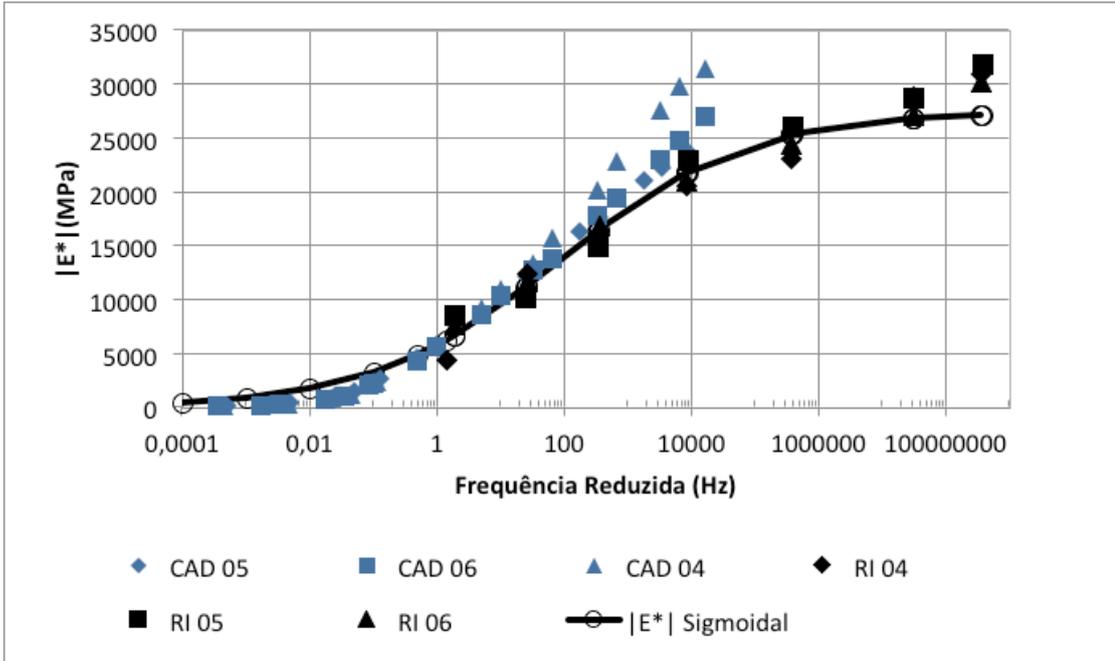


Figura 64 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura A-CE-5070.

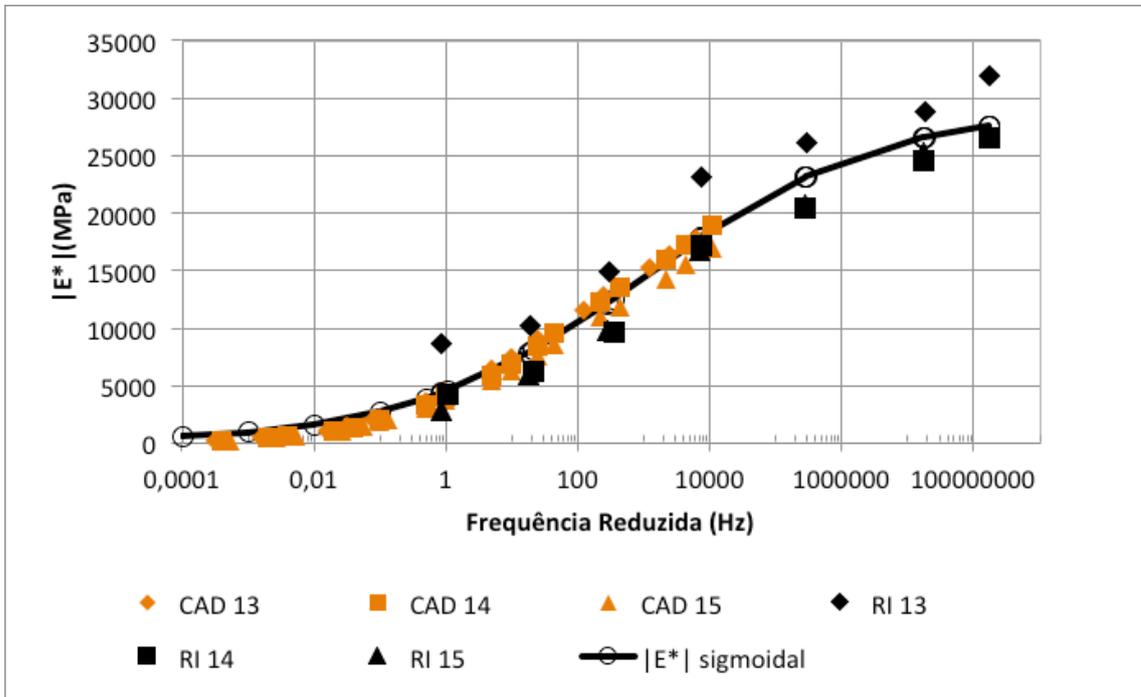


Figura 65 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura A-PE-6085.

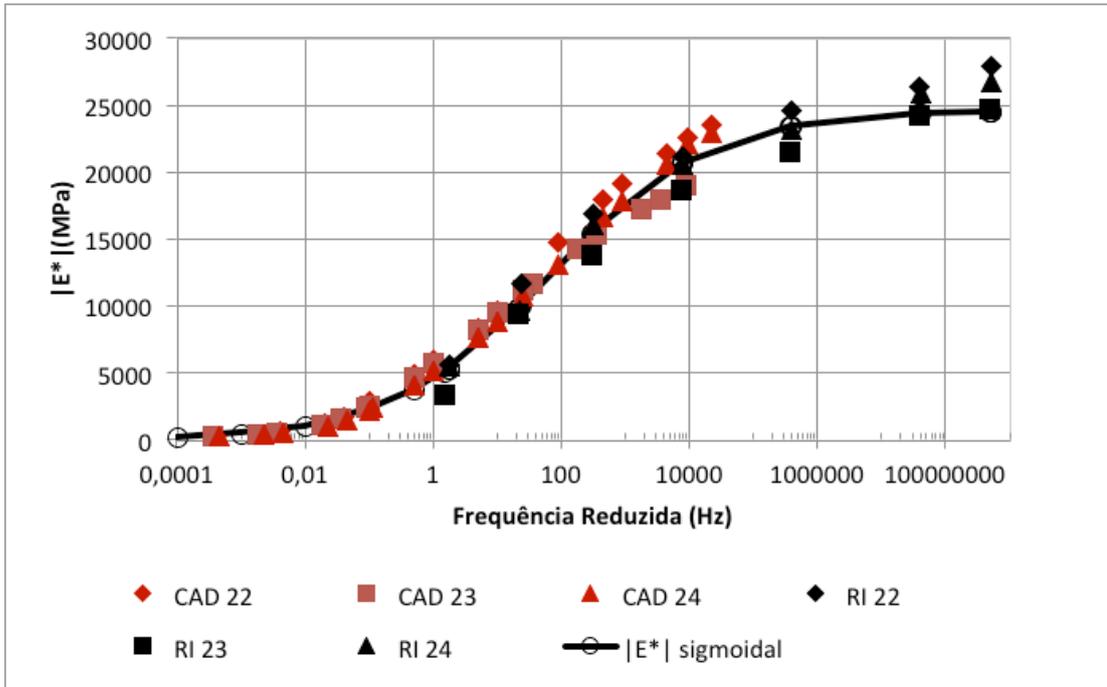


Figura 66 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura A-PR-6085.

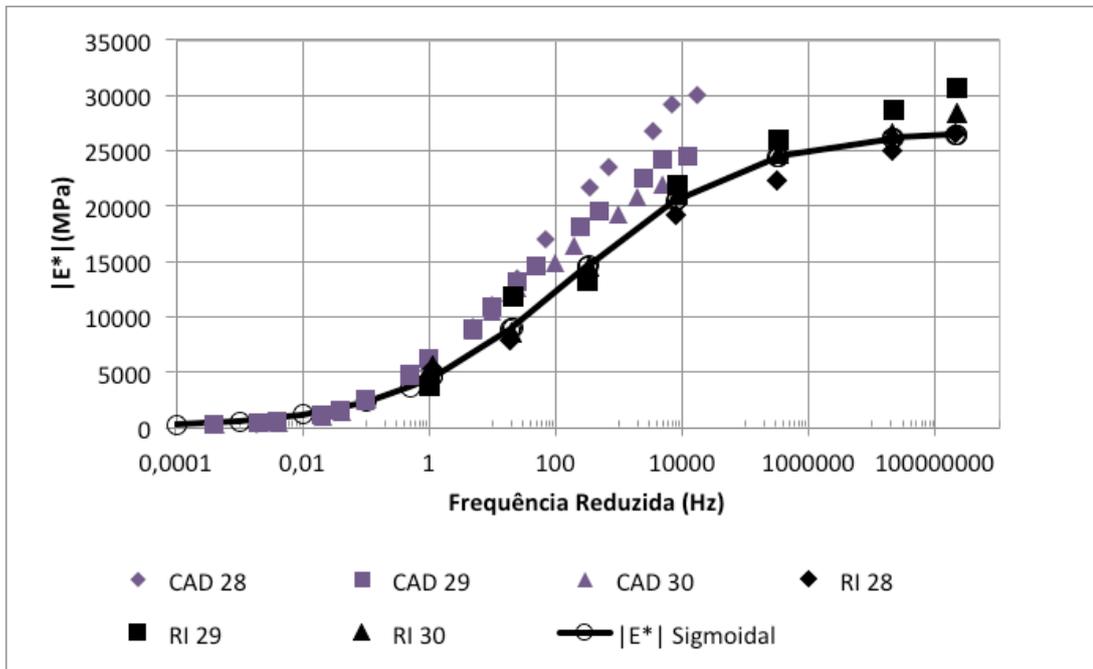


Figura 67 - Curvas mestras de módulo dinâmico para a mistura A-PR-5070.

As curvas mestras de módulo dinâmico para os ensaios mecânicos e por ressonância por impacto (Figuras 58 a 67) apresentaram graficamente o comportamento contínuo e sinuoso, esperado para misturas asfálticas. Além disso, na faixa de frequência reduzida entre 0,1Hz e 1000Hz, importante para os projetos mecânicos de pavimentos, a curva mestra do modelo

sigmoidal se sobrepôs a curva de referência. Dessa forma, pode-se perceber a validade do modelo apresentado por meio dos testes estatísticos que foram apresentados na seção 4.4.

A curva mestra para o ângulo de fase pode ser determinada utilizando o fator de deslocamento obtido na construção da curva mestra de módulo dinâmico. Desse modo, as Figuras 68 a 77 apresentam as curvas mestras de ângulo de fase a partir dos métodos de ensaio estudados e pelo modelo polinomial.

Observa-se que o modelo polinomial possui uma limitação a medida que a frequência reduzida se aproxima de 0,1 Hz, pois, não representa o pico de inversão que ocorre na curva mestra de ângulo de fase obtida no ensaio mecânico.

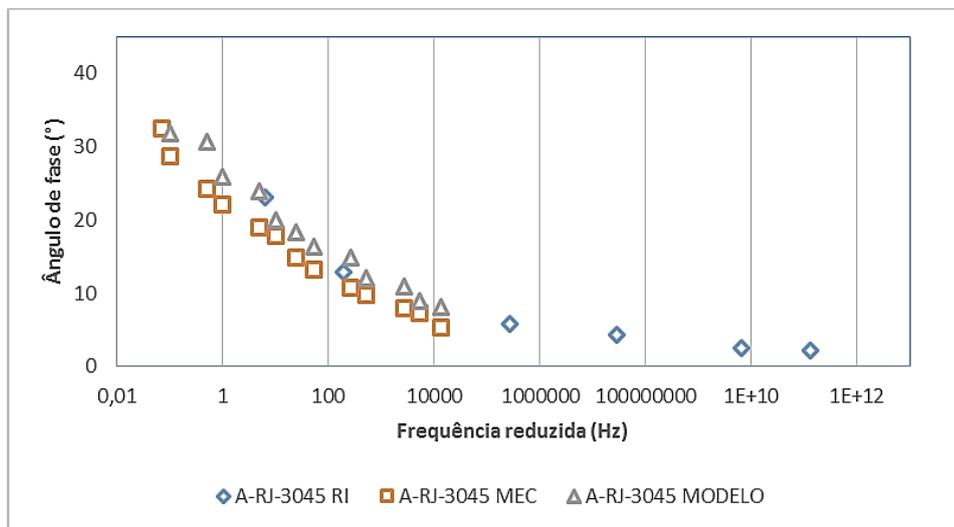


Figura 68 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura A-RJ-3045.

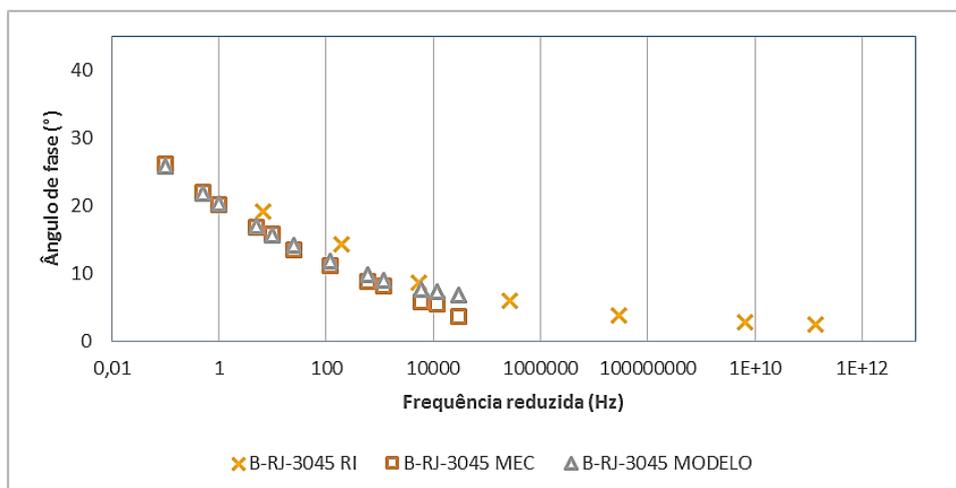


Figura 69 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura B-RJ-3045.

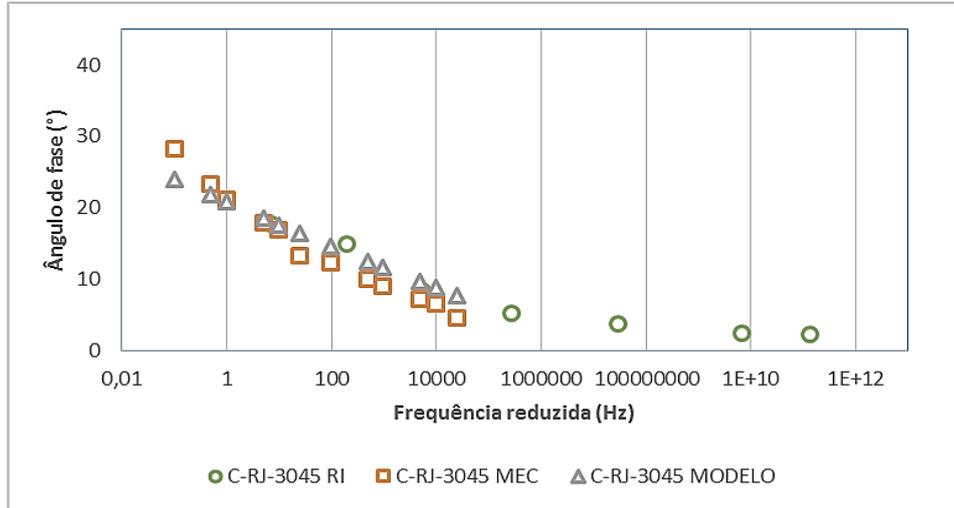


Figura 70 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura C-RJ-3045.

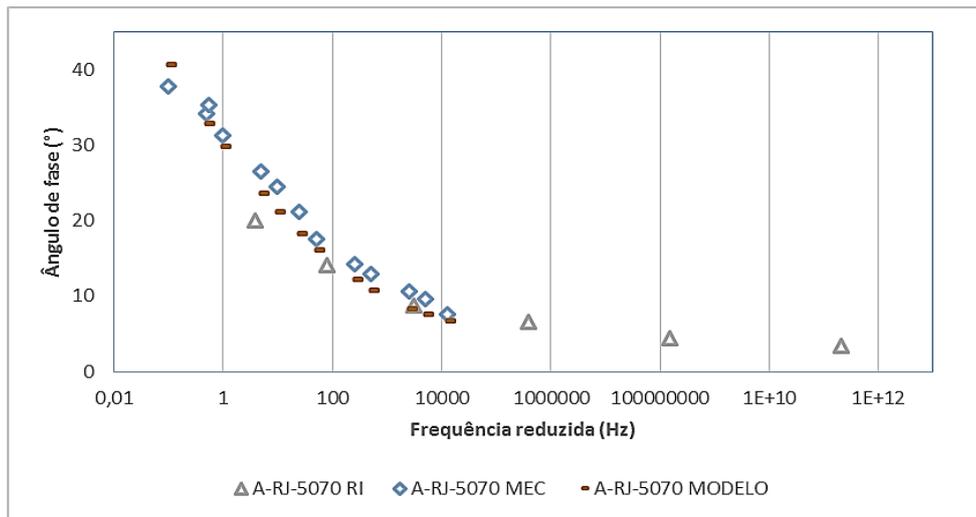


Figura 71 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura A-RJ-5070.

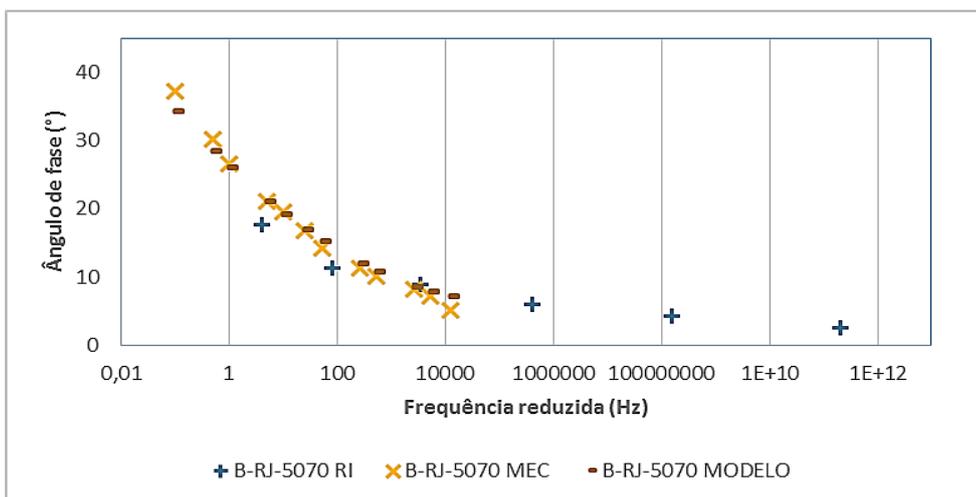


Figura 72 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura B-RJ-5070.

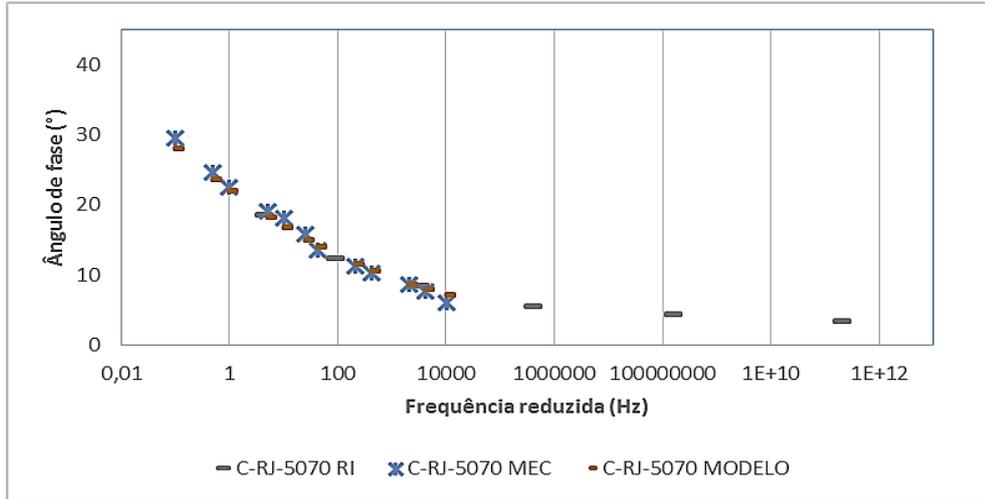


Figura 73 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura C-RJ-5070.

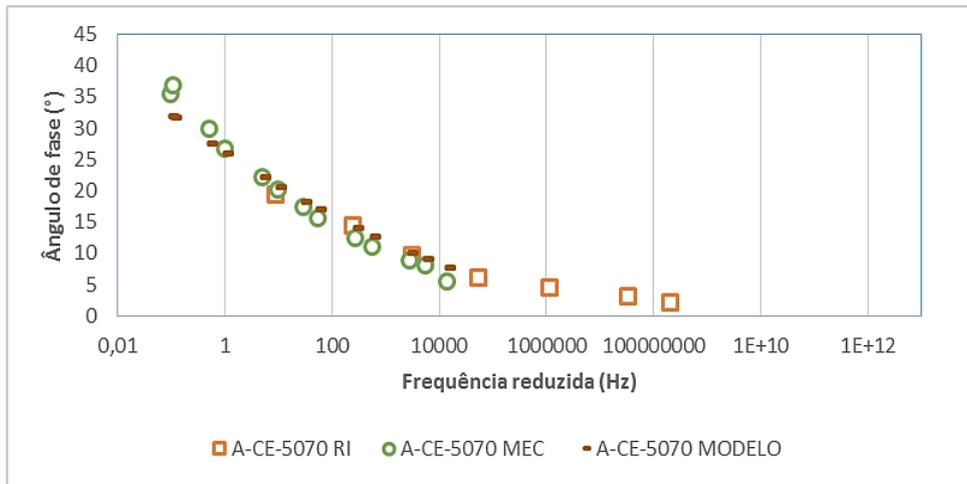


Figura 74 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura A-CE-5070.

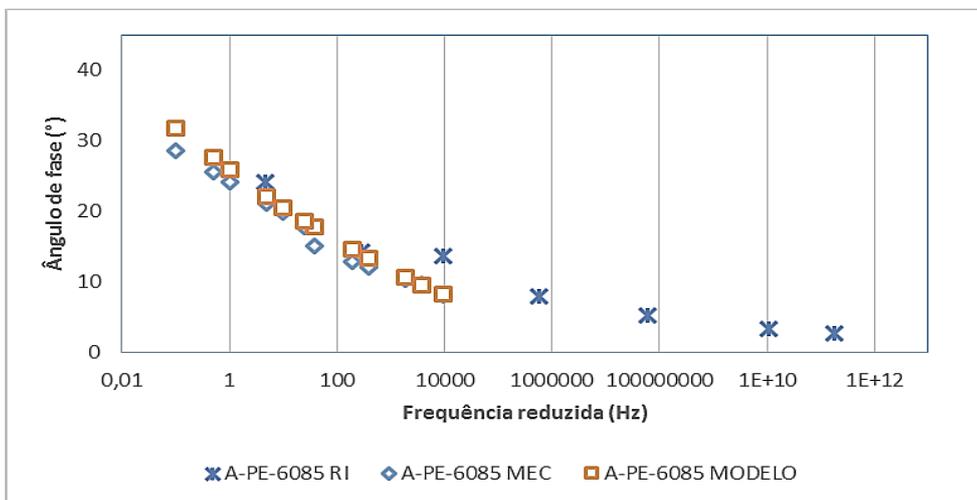


Figura 75 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura A-PE-6085.

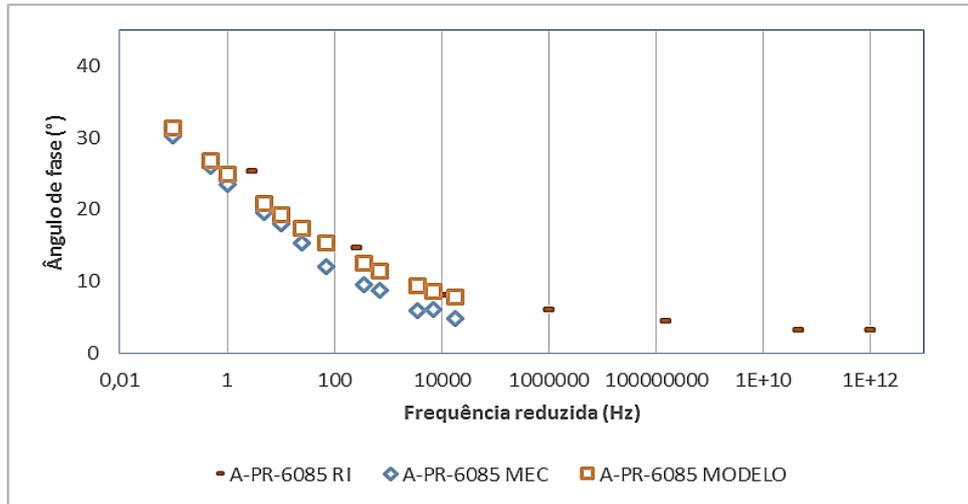


Figura 76 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura A-PR-6085.

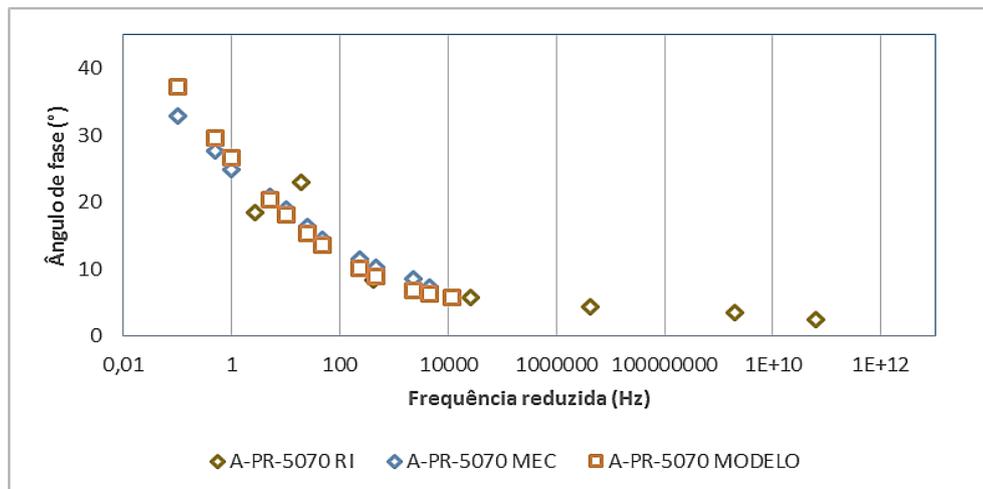


Figura 77 - Curvas mestras de ângulo de fase para a mistura A-PR-5070.

Pode-se observar, também, que os resultados obtidos no ensaio de ressonância por impacto se afastam da curva de referência à medida que a frequência reduzida diminui, apresentando erros elevados para o modelo. Assim, tornou-se necessário descartar dados espúrios do ensaio de ressonância por impacto na elaboração do modelo polinomial. Isso se deve a uma limitação do ensaio de ressonância por impacto na determinação do fator de amortecimento para temperaturas superiores a 30°C.

4.4 Análise Estatística

Primeiramente foi determinado o grau de correlação entre os resultados obtidos no ensaio mecânico e os modelos sigmoidal e polinomial, respectivamente, para o módulo dinâmico e para o ângulo de fase. O coeficiente de correlação linear das misturas estudadas foi apresentado na Tabela 11 e é superior, em todos os casos, a 0,95 para os modelos de módulo dinâmico e de ângulo de fase. Dessa forma, considera-se que os modelos possuem uma grande possibilidade de representar os resultados da curva mestra de módulo dinâmico conforme proposto pela AASHTO T 342-11 (2015) e ASTM D3497-79 (2003).

Tabela 11 - Coeficiente de correlação linear da curva mestra de referência e modelo sigmoidal para o módulo dinâmico e para o de ângulo de fase.

ID MISTURA	Correlação E* 	Correlação ϕ
A-RJ-5070	0,998	0,991
B-RJ-5070	0,996	0,999
C-RJ-5070	0,997	0,998
A-RJ-3045	1,000	0,998
B-RJ-3045	0,999	0,997
C-RJ-3045	0,997	0,987
A-CE-5070	0,999	0,997
A-PE-6085	0,999	0,995
A-PR-6085	0,998	0,999
A-PR-5070	0,997	0,996

Ainda, foi realizado o teste F para verificação dos modelos ajustados a partir dos dados do ensaio de ressonância por impacto (Tabela 12), considerando como hipótese nula a igualdade de variâncias.

Para os dados de módulo dinâmico, o $f_{\text{crítico}}$ foi obtido pela curva bicaudal para um nível de significância (α) igual a 0,05, e possui um intervalo com limite inferior igual a 0,373 e superior igual a 2,68. Para todas as misturas, não se pôde rejeitar a hipótese nula para o modelo sigmoidal de módulo dinâmico, ou seja, as variâncias podem ser iguais.

Para os dados de ângulo de fase, o $f_{\text{crítico}}$ inferior foi igual a 0,355 e o superior igual a 2,817 para $\alpha=0,05$. Para todas as misturas, não se pôde rejeitar a hipótese nula para o modelo polinomial de ângulo de fase.

Tabela 12 - Teste F para a comparação das variâncias de módulo dinâmico e ângulo de fase das curvas mestras de referência e modelo sigmoidal.

ID	F	
	IE*1	ϕ
MISTURA		
A-RJ-5070	1,308	1,159
B-RJ-5070	0,793	0,774
C-RJ-5070	1,083	1,173
A-RJ-3045	1,196	1,045
B-RJ-3045	0,997	0,774
C-RJ-3045	1,027	0,758
A-CE-5070	1,067	0,684
A-PE-6085	2,174	0,611
A-PR-6085	0,981	0,812
A-PR-5070	1,021	1,396

O teste t foi utilizado para análise de igualdade de médias. Em todos os casos, para o teste t, a hipótese nula não foi rejeitada, ou seja, os críticos foram superiores aos tcalculados (Tabela 13), pois, o crítico, uni-caudal com $\alpha=0,05$, foi igual a 1,691 e 1,714, respectivamente, para o módulo dinâmico e para o ângulo de fase, ou sejam, em ambos os casos, as médias podem ser iguais.

Tabela 13 - Teste t para a comparação das médias de módulo dinâmico e ângulo de fase das curvas mestras de referência e modelo sigmoidal.

ID	t	
	IE*1	ϕ
MISTURA		
A-RJ-5070	0,953	-0,409
B-RJ-5070	0,511	0,0005
C-RJ-5070	0,492	-0,101
A-RJ-3045	0,940	0,666
B-RJ-3045	0,627	0,280
C-RJ-3045	0,688	0,431
A-CE-5070	0,787	0,336
A-PE-6085	0,810	0,802
A-PR-6085	0,876	0,846
A-PR-5070	0,466	0,168

A raiz do erro médio quadrático percentual (REMQ%) foi calculada a partir da Equação 48. O REMQ% calculado foi inferior a 10%, dentro da faixa de frequência de carregamento até 3000 Hz, para 7 misturas estudadas para os modelos sigmoidais de módulo dinâmico. E, para o modelo polinomial de ângulo de fase, apenas a mistura C-RJ-3045 resultou em um

REMQ% superior a 10%. Os resultados para o REMQ% podem ser encontrados na Tabela 14.

A partir desses resultados, percebe-se que a curva mestra de módulo dinâmico pode ser obtida por meio de uma função sigmoïdal em função da frequência reduzida. E, a função polinomial pode representar o comportamento do ângulo de fase em função da frequência reduzida, entretanto, esta possui uma limitação quando se aproxima de 0,1Hz. Essa limitação é aceitável, visto que uma faixa de frequência de carregamento entre 0,1 a 100Hz é satisfatória para a análise de grandes rodovias.

Tabela 14 - Raiz do erro médio quadrático percentual (REMQ%) para os modelos de módulo dinâmico e para os de ângulo de fase.

ID MISTURA	REMQ% E* 	REMQ% φ
A-RJ-5070	11,352	9,653
B-RJ-5070	20,939	4,233
C-RJ-5070	22,385	4,826
A-RJ-3045	7,185	6,888
B-RJ-3045	16,868	2,081
C-RJ-3045	10,069	11,833
A-CE-5070	17,632	5,796
A-PE-6085	17,536	4,072
A-PR-6085	14,622	7,096
A-PR-5070	24,146	7,385

5 CONCLUSÃO

O trabalho apresentou uma metodologia baseada na Mecânica das Vibrações para a determinação do módulo dinâmico e do ângulo de fase como alternativa ao método mais complexo e dispendioso usado convencionalmente. O ensaio de módulo dinâmico de ressonância por impacto resulta no registro, por meio de um acelerômetro, da frequência natural amortecida de um disco fino após a aplicação de um impacto na sua superfície. Essa frequência natural amortecida foi obtida em dois modos de vibração para sete temperaturas diferentes e pôde ser convertida em frequência natural por meio do fator de amortecimento.

Foi determinado que o Método de Largura de Banda oferece melhores resultados de fator de amortecimento que o Método do Decremento Logarítmico. Espera-se, portanto, que as misturas asfálticas possuam baixa influência da viscosidade em baixas temperaturas, e tenham uma relação diretamente proporcional do fator de amortecimento com a temperatura até a perda de suas propriedades elásticas. Além de resultar em um comportamento de fator de amortecimento mais próximo do esperado, o Método de Largura de Banda possui menores valores de coeficiente de variação.

O ângulo de fase pôde ser obtido de forma indireta a partir da relação com o fator de amortecimento. O coeficiente de Poisson foi determinado a partir da relação entre as frequências naturais dos modos de ensaio e as dimensões geométricas dos discos por meio da norma ASTM E1876 (2009). A mesma norma estabelece a relação entre o coeficiente de Poisson e a relação entre as frequências naturais para determinar os coeficientes geométricos de cada disco. Os valores incoerentes, decorrentes de baixas relações f_{n1}/f_{n2} , foram sendo descartados, pois, podem ser resultados do registro de outro modo de vibração.

A curva mestra de módulo dinâmico para os dados obtidos no ensaio mecânico foi construída a partir da determinação manual do fator de deslocamento. Essas curvas serviram como referência para elaboração de modelos polinomiais de fator de deslocamento, a partir do ajuste com os dados do ensaio de ressonância por impacto. Desse modo, as curvas mestras de módulo dinâmico e ângulo de fase para o ensaio de ressonância por impacto puderam ser construídas, ajustando os dados do ensaio de ressonância por impacto de cada mistura analisada. Por sua vez, essas curvas apresentam uma limitação na região de baixa frequência. Tornou-se necessária a elaboração de modelos sigmoidais e polinomiais para os resultados do ensaio de ressonância por impacto de cada mistura, permitindo assim determinar os valores de

módulo dinâmico e de ângulo de fase, respectivamente, em frequências reduzidas inferiores, em geral, a 1 Hz.

Os modelos tiveram bom coeficiente de correlação linear com as curvas mestras de referência, obtidas no ensaio mecânico para os resultados de módulo dinâmico e de ângulo de fase.

Os testes estatísticos (F e t) não descartaram a hipótese nula de igualdade das variâncias e médias dos resultados de módulo dinâmico e de ângulo de fase, nas duas formas de ensaio, de todas as misturas analisadas. Observou-se também um erro aceitável, em termos de REMQ%, na comparação das curvas mestras de módulo dinâmico e de ângulo de fase obtidas nos dois modos de ensaio.

Os modelos de fator de deslocamento ajustados neste trabalho para o ensaio de ressonância por impacto servem como ponto de partida para aplicação, na prática, da engenharia rodoviária nacional, sobretudo como um método promissor em atividades de laboratórios de pesquisa e em obras de pavimentação.

Contudo, novos estudos, principalmente com ampliação do banco de dados e avaliação de misturas confeccionadas com os diversos cimentos asfálticos de petróleo nacionais, tornarão possível a calibração dos modelos sugeridos, ampliando o bom desempenho já observado e contribuindo para uma possível regulamentação nacional.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Os temas abaixo são sugeridos para continuidade desta pesquisa:

- Realização do ensaio de ressonância por impacto com misturas asfálticas de outras regiões do país para ampliação do banco de dados e calibração dos modelos sugeridos, modificando a curva granulométrica e o tipo do ligante asfáltico;
- Realizar o ensaio de RI para temperaturas superiores a 55°C, tornando possível obter a curva mestra na região de baixa frequência reduzida.
- Realizar o ensaio de RI com misturas asfálticas que possuam dados de módulo dinâmico obtido em ensaio de campo para verificar a representatividade do ensaio.

REFERÊNCIAS

- AASHTO T342 – *Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)*. 2011.
- AASHTO T315 – *Determining the Rheologica Binder Using a Dynamic Shear Rheometer (DSR)*. 2006.
- AASHTO T313 – *Determining The Flexural Creep Stiffness of Asphalt Binder Using The Bending Beam Rheometer (BBR)*. 2006.
- AASHTO T314- *Determining the Fracture Properties of Asphalt Binder in Direct Tension (DT)*. 2012.
- ABNT NBR 7809 – *Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio*. 2006.
- ABNT NBR 9935- *Agregados – Terminologia*. 1987.
- ABNT NBR 12052 – *Solo ou agregado miúdo – Determinação do equivalente de areia – Método de ensaio*. 1992.
- ABNT NBR 6576 – *Materiais asfálticos – Determinação de penetração*. 2007.
- ABNT NBR 15184 – *Materiais betuminosos – Determinação da viscosidade em temperaturas elevadas usando um viscosímetro rotacional*. 2004.
- ABNT NBR 6560 – *Materiais betuminosos – Determinação do ponto de amolecimento – Método do anel e bola*. 2008.
- ABNT NBR 6296 – *Produtos betuminosos semi-sólidos- Determinação da massa específica e densidade relativa*. 2004.
- ASTM C215 – *Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*. 2008.
- ASTM C1259 – *Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration*. 2008.
- ASTM D3497- *Dynamic Modulus of Asphalt Mixtures*. 2003.
- ASTM E1876 – *Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*. 2009.
- AKCELRUD, L. *Fundamentos das Ciência dos Polímeros*. Ed. Manole LTDA. 2007.
- AULD, B. A. *Acoustic Fields and Waves in Solids*. 2 edição. Volume 1 e 2. 1990.
- BALBO, J. T.. *Pavimentação Asfáltica: materiais, projeto e restauração*. Oficina de Textos. 588 pg. 2007.

- BARKSDALE, R. D., HICKS, R. G.. *Material characterization and layered theory for use in fatigue analyses*. Technical Report 140, Highway Research Board, Washington. 1973.
- BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G. da, CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B.. *Pavimentação Asfáltica, formação básica para Engenheiros*. Rio de Janeiro. 2008.
- BURGER, E.D., PERKINS, T.K., AND STRIEGLER, J.H.. *Studies of Wax Deposition in the Trans Alaska Pipeline*. Journal of Petroleum Technology. 1981.
- COSSOLINO, L.C., PEREIRA, A.H.A.. *Amortecimento: classificação e métodos de determinação*. ATCP Engenharia Física. São Carlos- Brasil. 2010.
- CERATTI, J. A., NUÑEZ, W. P.. *Estudo de Desempenho de Pavimentos Experimental com objetivo de validar método racional de dimensionamento de Pavimentos flexíveis*. Projeto de Pesquisa CONCEPA – LAPAV. Porto Alegre. 2011.
- CORREA, L. A.. *Estudo de Propagação de Ondas em Tubos Epóxi Reforçado com Fibra de Vidro*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2014.
- DNIT 031 - *Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço*. 2006
- DNIT 036 – *Pavimento rígido – Água para amassamento do concreto de cimento Portland – Ensaio químicos – Método de ensaio*. 2004.
- DNER. *Manual de implantação básica*. Ministério dos Transportes. Dep. Nacional de Estradas de Rodagem. 1966.
- DNER-ME 035 – *Agregados – Determinação de abrasão “Los Angeles”*. 1998.
- DNER-ME 089 – *Agregados – Avaliação de durabilidade pelo emprego de soluções de sulfato de sódio ou magnésio*. 1994.
- FAA. *Use of Nondestructive Testing in The Evaluation of Airport Pavements*. 2011.
- FERREIRA, F. A. *Análise do dimensionamento de pavimentos asfálticos utilizando o programa SISPAVBR*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2013.
- FERRY, J.D., LANDEL, R. F., WILLIAMS, M. L. *The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids*. 1955.
- FRANCO, F. A. C. de P. *Manual do Usuário: Programa EFin3D*. 1ª. ed. [S.l.], 2007.
- GRAÇA, D. C. S da, CAVALCANTE, E. H., CARDOSO, G.. *Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas de Ligante Modificado com Borra Oleosa de Petróleo*. Revista Educação Agrícola Superior Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior - ABEAS - v.29, n.2, p.127-130, 2014. ISSN - 0101-756X - DOI: <http://dx.doi.org/10.12722/0101-756X.v29n02a15>
- GOUVEIA, B. C. S., SOARES, J. B.. *Validação de Modelos de Previsão de Desempenho para Misturas Asfálticas Típicas de Rodovias Federais do Estado do Ceará*. ANPET XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte. Curitiba, Paraná. 2014

HUANG, Y. H.. *Pavement analysis and design*. 2ª edição. 775 pgs. Pearson Education inc. 2004.

KIM, D., KIM, Y. R. *Determination of Dynamic Modulus Values of Asphalt Mixtures Using Impact Resonance Testing of Thin Disk Specimens*. Journal of Testing Evaluation. 2016. DOI: 10.1520/JTE20150076.

KWEON, G., KIM, Y. R.. *Determination of Asphalt Concrete Complex Modulus with Impact Resonance Test*. Journal of The transportation Research Board. 2006.

LAGASSE, P. E. *Higher-order finite element analysis of topographic guides supporting elastic surface waves*. Journal of the Acoustic Society of America. 53 (4): 1116-1122. 1973.

LUCAS, E. F., SOARES, B. G., MONTEIRO, E. E.. *Determinação de Peso Molecular e Análise Térmica*. E-papers Serviços Editoriais. Rio de Janeiro-RJ. 2001.

LOPES, I., STROBBIA, C., SANTOS, J. e ALMEIDA, I.. *O Estudo das Ondas Sísmicas Superficiais como Método de Caracterização Dinâmica de Solos*. IV Congresso Nacional de Geologia. Lisboa.2003.

LUNDQVIST, P., RYDÉN, N.. *Acoustoelastic effects on the resonance frequencies of prestressed concrete beams – Short-term measurements*. NTD&E International. 2012. DOI: 10.1016/j.ndteint.2012.04.010

MARQUES, G. L. de O.. *Utilização de Módulo de Resiliência como Critério de Dosagem de Mistura Asfáltica; Efeito da Compactação por Impacto e Giratória*. Tese de Doutorado. Universidade Federa do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2004.

MCLEAN, D. B.. *Permanent deformation characteristics of asphalt concrete*. PhD thesis. University of California at Berkeley. Berkeley. 1974.

MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G. C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 6ª edição. Wiley. 2014.

NASCIMENTO, L. A. H. *Implementation and Validation of the Viscoelastic Continuum Damage Theory for Asphalt Mixture and Pavement Analysis in Brazil*. North Carolina State University. 2015.

NCHRP. *A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary*. Report 673. Washingto, DC. 2011.

NOGUEIRA, M. G. *Comparação do Comportamento em Campo de Concreto Asfáltico com CAP 30-45 e com CAP 50-70 para Revestimentos de Pavimentos*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.

NUNES, F. R. G, SILVA, C. L., FROTA, C. A. *Obtenção do módulo dinâmico de misturas asfálticas com agregados sintéticos da argila calcinada, utilizando o ensaio de compressão diametral*. TRANSPORTES, v. XII, n 1, p. 5-13. 2009.

OSLON Instruments. *NDE 30 Platform, Resonance Tester (RT) System Reference Manual*. Colorado. Estados Unidos. 2012.

PEREIRA, M. M. L.. *Estudo de Mistura Asfáltica de Módulo Elevado para Camadas de Base de Pavimentos*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Dissertação de mestrado. São Paulo. 2012.

PÉRES, Y. A. G., MOMM, L., GRABOWSKI, S. L. W., PADARATZ, I. J., BARRA, B. S.. *Aplicação do método do eco-impacto para estimative de espessura de concreto em pavimentos rígidos*. 9º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões. Brasília. 2015.

POPOVICS, J. S. and SUBRAMANIAM, K. V.. *Discussion of 'Free Vibrations of Thick Hollow Circular Cylinders from Three- Dimensional Analysis' by J. So and A. Leissa*. ASME Journal of Vibrations and Acoustics, Vol. 120, No. 2.1998.

PRODONOFF, V. *Vibrações mecânicas: simulação e análise*. Maity Comunicação e Editora. Rio de Janeiro. 1990

RAO, S.. *Vibrações Mecânicas*. Ed. Pearson. 4ª edição. 2009.

RYDÉN, N.. *Determining the asphalt mastercurve from free-free resonant testing on cylindrical samples*. NDTCE'09, Non-Destructive Testing in Civil Engineering. França. 2009.

RYDÉN, N. *Resonant Frequency testing of cylindrical asphalt samples*. European Journal of Environmental and Civil Engineering. Volume 15. 2011. DOI: 10.1080/19648189.2011.9693349

RYDÉN, N., LOWE, M. J. S.. *Guided wave propagation in three-layer pavement*. 2004. DOI: 10.1121/1.1808223

RYDÉN, N. *Surface Wave Testing of Pavements*. Doctoral Thesis. University of Kansas. Lund. 2004.

RYDÉN, N., ULRIKSEN, P., PARK, C., MILER, R.. *Portable Seismic Acquisition System (PSAS) for Pavement MASW*. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems. 2001. DOI: 10.4133/1.2927140.

SANSALONE, M., and STREETT, W. B.. *Impact-Echo: Nondestructive Testing of Concrete and Masonry*. Bullbrier Press. Jersey Shore. PA. 1997

SAKHAEI FAR, M. S. *Development of New Dynamic Modulus ($|E^*|$) Predictive Models for Hot Mix Asphalt Mixtures*. Tese de doutorado. North Carolina State University. Estados Unidos. 2011.

SCHRAMM, G.. *Reologia e reometria – Fundamentos práticos e teóricos*. Editora Artiller. 2006.

SHRP-A410 – *The Product of The SHRP Asphalt Research Program*. Washington, DC. 1994.

SIDES, A., UZAN, J., PERL, M. *A comprehensive viscoelastoplastic characterization of sand-asphalt compressive and tensile cyclic loading*. J. Test. Eval., 13, 49–59. 1985.

SILVA, C. W. *Vibration Damping Control and Design*. Vancouver, Canada. Taylor & Francis Group. 2007.

SO, J., LEISSA, A. W., *Three-dimensional Vibrations of Thick Circular and Annular Plates*. Journal of Sound and Vibration. 1998

SOLETO, J. Jr., FRANÇA, L. N. F.. *Introdução às vibrações mecânicas*. Ed. Edgar Blücher. 2006

SPECHT P.; LUCIANO. *Avaliação de Misturas Asfálticas com Incorporação de Borracha Reciclada de Pneus*. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

SUBRAMANIAM, K., POPOVICS, J., SHAH, S. P.. *Determining Elastic Properties of Concret Using Vibration Resonance Frequencies of Standard Test Cylinders*. Cement Concrete and Aggregates. 2000. DOI: 10.1520/CCA10467J.

TARECO, M. A. C. *Conceitos de viscoelasticidade em modelação da fluência em estruturas mistas aço-betão*. Universidade Nova de Lisboa. Portugal. 2014.

THEISEN, K. M. *Aplicação do Princípio da Correspondência elasto-viscoelástica para previsão de Deformabilidade de Misturas Asfálticas*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2006.

VASSOLER, G., WANG, C., SPECHT, P. *Comportamento Mecânico de Pavimentos Flexíveis submetidos a gradientes térmicos*. Rio Grande do Sul, Brasil. DOI: 10.4025/actascitechnol.v33i3.10848

WILLIAMS, M. L., LANDEL, R.F., FERRY, J. D. *The temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and Other Glass-forming Liquids*. University of Wisconsin. 1955.

WITZCAK, M. W., BARI, J.. *Development of a Mastercurve (E^*) database for lime modified asphalt mixture*. Arizona State University. 2004.

APÊNDICE A

- CP 01: A-RJ-3045

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	11659,24	6,24E-05	23729,85	5,50
10	4	11042,33	6,29E-05	22291,37	8,05
5	4	10227,15	6,16E-05	21073,99	8,92
1	4	8929,083	6,44E-05	17662,63	10,96
0,5	4	8103,407	6,32E-05	16333,06	12,18
0,1	4	6380,104	6,29E-05	12922,79	15,33
25	20	6071,049	6,3E-05	12236,41	17,50
10	20	5152,895	6,32E-05	10347,88	20,07
5	20	4311,616	6,24E-05	8770,425	21,58
1	20	2876,616	6,25E-05	5859,271	26,27
0,5	20	2248,6	6,15E-05	4653,044	29,20
0,1	20	1167,367	6,11E-05	2431,384	34,83
25	40	1372,866	6,29E-05	2771,954	36,12
10	40	759,1093	6,36E-05	1515,81	40,03
5	40	519,6682	6,55E-05	1007,325	41,21
1	40	220,8038	6,24E-05	450,5381	38,51
0,5	40	160,8318	6,17E-05	331,6348	36,41
0,1	40	91,36977	6,47E-05	179,7357	30,76

- CP 02: A-RJ-3045

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	12604,79	6,38E-05	25097	5,037548
10	4	11720,23	6,41E-05	23240,24	7,071808
5	4	11026,77	6,37E-05	21994,02	7,788686
1	4	8872,807	6E-05	18822,74	9,788214
0,5	4	8225,28	6,08E-05	17225,62	10,705
0,1	4	6940,928	6,44E-05	13712,47	13,15138
25	20	6119,024	6,42E-05	12118,48	14,1773
10	20	5157,021	6,47E-05	10129,76	17,42677
5	20	4457,734	6,39E-05	8862,517	18,98093
1	20	3122,716	6,24E-05	6375,716	21,83378
0,5	20	2730,258	6,62E-05	5248,829	23,80603
0,1	20	1689,741	6,62E-05	3249,157	28,03458
25	40	1228,213	6,02E-05	2590,623	32,32521
10	40	839,2626	6,34E-05	1681,658	34,67084
5	40	587,2887	6,41E-05	1163,622	36,6333
1	40	284,8674	6,55E-05	553,4393	34,28625
0,5	40	203,5465	6,67E-05	388,3161	33,8113
0,1	40	107,9977	6,92E-05	198,676	29,99145

- CP 03: A-RJ-3045

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	11661,47	6,3456E-05	23370,56	5,83712578
10	4	10934,33	6,2672E-05	22187,48	7,29115438
5	4	10447,86	6,3596E-05	20892,2	7,7673955
1	4	8845,013	6,4067E-05	17578,33	9,70471191
0,5	4	8215,964	6,4297E-05	16269,57	10,6805372
0,1	4	6488,184	6,1701E-05	13388,81	13,0861349
25	20	6107,315	6,3932E-05	12148,41	15,2202358
10	20	5139,716	6,3824E-05	10241,08	17,6767178
5	20	4431,161	6,3937E-05	8813,685	18,7006493
1	20	3041,474	6,2758E-05	6170,589	22,3522053
0,5	20	2573,406	6,3327E-05	5174,058	24,2606373
0,1	20	1563,535	6,4116E-05	3104,905	28,7044353
25	40	1312,681	6,1266E-05	2724,757	32,214077
10	40	850,7637	6,5625E-05	1648,651	35,8263054
5	40	592,6492	6,458E-05	1167,04	37,7614517
1	40	260,8843	6,1992E-05	535,8259	36,7148628
0,5	40	188,2263	6,5043E-05	368,4616	36,5061188
0,1	40	87,18665	5,9977E-05	185,0873	33,1623192

- CP 04: A-CE-5070

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	15056,51	6,08E-05	31459,74	4,5698476
10	4	14236,38	6,07E-05	29798,67	8,0833769
5	4	13300,37	6,13E-05	27594,46	8,9560966
1	4	10875,42	6,05E-05	22891,51	11,17353
0,5	4	9936,32	6,26E-05	20215,96	12,358826
0,1	4	7824,58	6,34E-05	15713,14	15,541397
25	20	6639,912	6,32E-05	13361,47	17,119261
10	20	5482,638	6,36E-05	10950,05	20,183674
5	20	4611,799	6,37E-05	9196,455	22,293417
1	20	2916,871	6,39E-05	5813,511	27,292753
0,5	20	2228,222	6,34E-05	4477,373	30,415619
0,1	20	1071,919	6,14E-05	2221,883	36,169067
25	40	1230,424	6,57E-05	2379,131	36,615986
10	40	682,7177	6,7E-05	1295,032	40,314346
5	40	465,5543	6,71E-05	881,5424	41,127132
1	40	202,8945	6,53E-05	395,7914	37,140308
0,5	40	149,4875	6,74E-05	282,4221	34,909939
0,1	40	87,34696	6,98E-05	159,437	29,079887

- CP 05: A-CE-5070

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	11659,24	6,24E-05	23729,85331	5,50
10	4	11042,33	6,29E-05	22291,37008	8,05
5	4	10227,15	6,16E-05	21073,98977	8,92
1	4	8929,083	6,44E-05	17662,62576	10,96
0,5	4	8103,407	6,32E-05	16333,06431	12,18
0,1	4	6380,104	6,29E-05	12922,78959	15,33
25	20	6071,049	6,3E-05	12236,41045	17,50
10	20	5152,895	6,32E-05	10347,87712	20,07
5	20	4311,616	6,24E-05	8770,42502	21,58
1	20	2876,616	6,25E-05	5859,271172	26,27
0,5	20	2248,6	6,15E-05	4653,04351	29,20
0,1	20	1167,367	6,11E-05	2431,384261	34,83
25	40	1372,866	6,29E-05	2771,954081	36,12
10	40	759,1093	6,36E-05	1515,81016	40,03
5	40	519,6682	6,55E-05	1007,325446	41,21
1	40	220,8038	6,24E-05	450,5380657	38,51
0,5	40	160,8318	6,17E-05	331,6348187	36,41
0,1	40	91,36977	6,47E-05	179,7356795	30,76

- CP 06: A-CE-5070

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	13139,87	6,18E-05	26968,08	6,5297813
10	4	12434,96	6,37E-05	24761,2	8,3615351
5	4	11611,54	6,4E-05	23036,8	8,9815845
1	4	9458,566	6,2E-05	19410,35	11,364299
0,5	4	8801,391	6,3E-05	17788,79	12,591639
0,1	4	6646,36	6,1E-05	13867,56	15,947011
25	20	6587,49	6,53E-05	12804,28	17,897308
10	20	5285,102	6,42E-05	10448,66	20,113428
5	20	4420,188	6,44E-05	8708,032	22,863264
1	20	2824,625	6,31E-05	5697,845	26,978958
0,5	20	2176,871	6,3E-05	4399,612	30,146454
0,1	20	1109,187	6,34E-05	2226,966	35,551754
25	40	1103,031	6,61E-05	2117,052	37,884254
10	40	591,5114	6,6E-05	1136,641	41,231327
5	40	393,4403	6,47E-05	771,6474	41,55167
1	40	178,8722	6,57E-05	346,5047	36,430222
0,5	40	125,0935	6,38E-05	249,8167	33,951176
0,1	40	75,5341	6,71E-05	143,3568	28,116982

- CP 07: A-RJ-5070

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	8510,362	5,95E-05	18188,5	7,9883752
10	4	8408,287	6,28E-05	17006,6	9,9391317
5	4	7747,564	6,31E-05	15607,33	10,921411
1	4	6256,59	6,26E-05	12726,54	13,173089
0,5	4	5834,74	6,31E-05	11774,81	14,417919
0,1	4	4400,811	6,25E-05	8961,721	17,683384
25	20	4039,838	6,28E-05	8178,237	20,82638
10	20	3172,715	6,42E-05	6282,43	24,361477
5	20	2552,019	6,45E-05	5023,944	26,878056
1	20	1443,638	6,38E-05	2879,94	31,358242
0,5	20	1060,803	6,49E-05	2080,016	34,32975
0,1	20	504,8528	7,06E-05	910,4366	38,214577
25	40	1083,715	6,26E-05	2198,276	35,238766
10	40	681,5338	6,39E-05	1354,984	38,37957
5	40	484,3399	6,42E-05	958,2001	39,907486
1	40	214,0048	6,39E-05	426,7465	37,27158
0,5	40	147,2717	6,44E-05	291,1652	36,128338
0,1	40	121,5246	6,82E-05	226,8637	24,185942

- CP 08: A-RJ-5070

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	11349,82	6,21E-05	23146,65	7,049487
10	4	10784,91	6,35E-05	21523,97	9,178364
5	4	9955,818	6,35E-05	19879,88	10,12186
1	4	7961,071	6,17E-05	16437,66	12,62807
0,5	4	7235,45	6,13E-05	15025,54	13,88365
0,1	4	5874,929	6,44E-05	11620,13	17,11875
25	20	4510,117	6,3E-05	9072,718	20,71831
10	20	3573,876	6,4E-05	7079,592	24,09265
5	20	2857,082	6,42E-05	5642,305	26,12559
1	20	1605,102	6,08E-05	3359,151	30,51737
0,5	20	1163,946	6,19E-05	2394,929	33,37062
0,1	20	506,908	5,96E-05	1083,714	37,55729
25	40	1209,381	5,97E-05	2566,756	34,52848
10	40	734,1588	6,18E-05	1504,466	38,58221
5	40	524,0203	6,64E-05	999,3157	39,842
1	40	225,869	6,1E-05	471,5612	37,49112
0,5	40	159,851	6,23E-05	326,9377	36,49402
0,1	40	124,2799	6,55E-05	241,5704	25,20904

- CP 09: A-RJ-5070

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	10268,62	5,98E-05	21784,59	7,929001
10	4	9746,807	6,43E-05	19236,9	9,861924
5	4	8899,627	6,4E-05	17646,58	10,92359
1	4	7273,032	6,15E-05	15068,06	13,05632
0,5	4	6577,772	6,26E-05	13386,09	14,43521
0,1	4	4913,982	6,14E-05	10184,34	17,74059
25	20	4211,685	6,36E-05	8403,667	21,89768
10	20	3143,266	6,24E-05	6394,835	24,88885
5	20	2363,422	5,87E-05	5106,282	26,74602
1	20	1294,024	5,89E-05	2799,559	32,13699
0,5	20	943,311	5,95E-05	2017,46	34,7495
0,1	20	438,6139	6,22E-05	897,9553	37,54149
25	40	1107,875	6,53E-05	2151,821	36,22721
10	40	630,0585	6,48E-05	1234,386	39,98479
5	40	430,7966	6,52E-05	837,7048	40,83444
1	40	195,8493	6,51E-05	382,8253	37,0751
0,5	40	139,2715	6,57E-05	270,0679	35,1556
0,1	40	115,6485	6,58E-05	223,7929	22,84941

- CP 10: B-RJ-3045

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	12891,24	6,319E-05	25954,11	4,8582559
10	4	12191,75	6,257E-05	24788,49	6,2090096
5	4	11639,17	6,297E-05	23515,86	6,9625216
1	4	10189,06	6,249E-05	20759,7	8,7468901
0,5	4	9495,245	6,251E-05	19338,97	9,5884333
0,1	4	7951,881	6,315E-05	16032,39	11,900088
25	20	6420,041	6,235E-05	13098,82	13,97983
10	20	5551,938	6,347E-05	11128,76	16,176455
5	20	4776,045	6,171E-05	9846,376	17,294844
1	20	3464,487	6,24E-05	7069,185	20,303034
0,5	20	2930,992	6,282E-05	5940,848	22,232645
0,1	20	1804,014	6,175E-05	3719,721	26,452223
25	40	1472,019	6,404E-05	2924,328	30,429861
10	40	932,1397	6,301E-05	1882,162	34,621044
5	40	709,1795	6,56E-05	1375,276	35,164906
1	40	313,6348	6,272E-05	636,7179	36,174301
0,5	40	214,2142	6,238E-05	437,2257	36,172997
0,1	40	151,479	6,631E-05	290,8513	27,110285

- CP 11: B-RJ-3045

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	14743,23	6,46E-05	28995,1	3,535912
10	4	13674,79	6,25E-05	27765,83	5,137028
5	4	13004,62	6,23E-05	26495,7	5,220818
1	4	11428,5	6,26E-05	23250,8	7,723801
0,5	4	10617,7	6,2E-05	21792,42	8,286341
0,1	4	8935,367	6,26E-05	18172,96	10,5779
25	20	7823,62	6,39E-05	15547,17	13,08165
10	20	6492,744	6,48E-05	12731,58	15,91569
5	20	5634,069	6,45E-05	11092,22	17,20258
1	20	3909,565	6,25E-05	7967,681	20,20738
0,5	20	3235,884	6,3E-05	6542,385	22,20596
0,1	20	2005,08	6,27E-05	4068,626	26,21988
25	40	1494,953	6,16E-05	3079,694	30,15102
10	40	1030,783	6,4E-05	2043,879	33,76064
5	40	735,6372	6,47E-05	1443,061	35,79364
1	40	341,0632	6,17E-05	703,5586	35,39202
0,5	40	237,5671	6,16E-05	490,6484	35,47722
0,1	40	156,6976	6,26E-05	318,7536	27,03137

- CP 12: B-RJ-3045

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	12936,84	6,29E-05	26171,69	2,814635
10	4	11946,91	6,24E-05	24354,48	5,247961
5	4	11400,93	6,31E-05	22977,86	5,530125
1	4	9831,307	6,32E-05	19806,55	7,943205
0,5	4	9129,042	6,29E-05	18467,12	8,845806
0,1	4	7561,952	6,2E-05	15533,96	11,1312
25	20	5517,519	6,2E-05	11324,69	13,46839
10	20	4892,428	6,24E-05	9973,426	15,45826
5	20	4438,108	6,32E-05	8930,723	16,20029
1	20	3320,991	6,32E-05	6692,874	19,77628
0,5	20	2772,717	6,23E-05	5670,028	21,67375
0,1	20	1796,541	6,28E-05	3643,372	25,64166
25	40	1452,368	6,46E-05	2861,398	30,85693
10	40	938,3128	6,46E-05	1847,228	34,49296
5	40	674,8579	6,31E-05	1360,032	34,68118
1	40	311,3028	6,17E-05	642,8797	35,36652
0,5	40	224,6755	6,41E-05	446,5479	35,41673
0,1	40	150,33	6,54E-05	292,6606	26,68272

- CP 13: A-PE-6085

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	63,626789	17752,67	8,419317
10	4	63,618445	16365,36	9,823224
5	4	63,56474	15203,35	10,39634
1	4	64,753192	12782,03	11,94849
0,5	4	65,738843	11553,93	12,81629
0,1	4	61,805067	9036,079	15,03791
25	20	64,541325	9019,047	17,80339
10	20	64,079026	7403,761	19,67873
5	20	61,840685	6386,738	21,22348
1	20	62,481235	4373,647	23,8306
0,5	20	63,586365	3541,481	25,3614
0,1	20	60,09635	2214,616	28,37024
25	40	60,340399	2056,462	30,7798
10	40	63,115289	1416,191	32,08829
5	40	62,846695	1035,643	33,28327
1	40	65,709483	561,5291	31,43206
0,5	40	65,307026	428,9221	30,75275
0,1	40	66,005196	245,1155	28,63717

- CP 14: A-PE-6085

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	64,7194218	18846,34	8,024261
10	4	63,5779276	17261,96	9,772812
5	4	63,5887682	15904,14	10,3701
1	4	61,1524051	13451,13	12,0356
0,5	4	61,6558595	12204,79	12,93675
0,1	4	61,1149566	9502,407	15,13949
25	20	62,1917099	8447,756	17,69255
10	20	61,4970271	6893,211	19,85231
5	20	63,4037936	5804,697	21,08023
1	20	63,7910375	3999,587	24,12222
0,5	20	60,1399085	3294,606	25,62989
0,1	20	63,1563319	2028,419	28,4681
25	40	61,0914407	2021,481	30,55637
10	40	63,7514982	1368,311	32,15959
5	40	65,0649006	1020,54	33,10639
1	40	64,7936435	547,6657	31,89151
0,5	40	63,4047762	422,8862	31,18386
0,1	40	65,8367481	243,7549	28,82586

- CP 15: A-PE-6085

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Deflexões (microns)	E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	61,330968	16948,1	8,10958
10	4	63,285134	15448,22	9,684359
5	4	63,298643	14274,25	10,41462
1	4	62,727355	11884,54	12,12054
0,5	4	61,863619	10943,78	13,01217
0,1	4	62,235687	8492,901	15,21035
25	20	63,02489	7505,421	17,75968
10	20	63,549629	6247,248	19,98745
5	20	62,598451	5399,572	21,24686
1	20	62,995171	3667,019	24,29608
0,5	20	62,726908	3067,513	25,91739
0,1	20	64,364141	1832,411	29,00517
25	40	61,072619	2080,803	31,08981
10	40	62,488886	1414,412	32,72058
5	40	63,489079	1021,271	33,99837
1	40	62,028896	567,6868	32,16244
0,5	40	61,454079	423,383	31,61097
0,1	40	64,713811	240,5692	29,06343

- CP 16: C-RJ-3045

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	12243,02	6,19E-05	25127,71	3,718045
10	4	11581,42	6,15E-05	23902,89	6,563138
5	4	11059,94	6,16E-05	22781,92	7,207953
1	4	9824,736	6,25E-05	20025,21	8,982895
0,5	4	9058,771	6,24E-05	18492,32	9,867222
0,1	4	7356,33	6,17E-05	15184,32	12,05499
25	20	6733,31	6,61E-05	12928,14	13,47065
10	20	5577,188	6,44E-05	10986,99	16,62296
5	20	4782,597	6,35E-05	9562,288	17,94621
1	20	3355,23	6,21E-05	6880,199	21,22066
0,5	20	2829,724	6,24E-05	5770,485	23,41485
0,1	20	1726,972	6,28E-05	3501,643	28,48219
25	40	1334,389	6,1E-05	2777,679	32,89714
10	40	877,9122	6,43E-05	1732,569	36,35938
5	40	598,3423	6,34E-05	1198,474	38,32186
1	40	267,8957	6,41E-05	531,8923	37,25035
0,5	40	169,6576	5,98E-05	361,3638	37,47913
0,1	40	96,53283	6,74E-05	182,2556	33,14778

- CP 17: C-RJ-3045

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	12243,02	6,19E-05	25127,71	3,718045
10	4	11581,42	6,15E-05	23902,89	6,563138
5	4	11059,94	6,16E-05	22781,92	7,207953
1	4	9824,736	6,25E-05	20025,21	8,982895
0,5	4	9058,771	6,24E-05	18492,32	9,867222
0,1	4	7356,33	6,17E-05	15184,32	12,05499
25	20	6733,31	6,61E-05	12928,14	13,47065
10	20	5577,188	6,44E-05	10986,99	16,62296
5	20	4782,597	6,35E-05	9562,288	17,94621
1	20	3355,23	6,21E-05	6880,199	21,22066
0,5	20	2829,724	6,24E-05	5770,485	23,41485
0,1	20	1726,972	6,28E-05	3501,643	28,48219
25	40	1334,389	6,1E-05	2777,679	32,89714
10	40	877,9122	6,43E-05	1732,569	36,35938
5	40	598,3423	6,34E-05	1198,474	38,32186
1	40	267,8957	6,41E-05	531,8923	37,25035
0,5	40	169,6576	5,98E-05	361,3638	37,47913
0,1	40	96,53283	6,74E-05	182,2556	33,14778

- CP 18: C-RJ-3045

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	12869,96	6,199E-05	26412,06	4,712733
10	4	12215,12	6,337E-05	24521,49	6,729256
5	4	11461,12	6,348E-05	22970,04	7,441597
1	4	9903,196	6,262E-05	20134,6	8,913698
0,5	4	9194,835	6,338E-05	18472,45	9,835931
0,1	4	7502,788	6,317E-05	15121,52	12,12426
25	20	6735,742	6,559E-05	13065,41	12,82971
10	20	5659,331	6,366E-05	11309,96	16,59169
5	20	4958,867	6,308E-05	10001,47	17,67679
1	20	3568,745	6,316E-05	7194,714	20,8389
0,5	20	2932,109	6,176E-05	6044,625	22,99541
0,1	20	1869,534	6,447E-05	3692,371	27,8621
25	40	1446,196	6,065E-05	3033,603	32,41278
10	40	997,1904	6,618E-05	1917,109	35,55958
5	40	660,5524	6,254E-05	1343,644	37,89034
1	40	306,6344	6,243E-05	625,3231	36,5799
0,5	40	218,3243	6,399E-05	434,3888	36,14236
0,1	40	110,3765	6,45E-05	217,8692	32,24293

- CP 19: B-RJ-5070

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	12292,13	6,218E-05	25146,55	5,794457
10	4	11765,54	6,231E-05	24016,14	7,197628
5	4	11047,4	6,255E-05	22463,69	8,216255
1	4	9275,854	6,106E-05	19342,67	10,101
0,5	4	8695,061	6,171E-05	17941,44	11,2348
0,1	4	6903,06	6,013E-05	14618,18	14,29432
25	20	6882,573	6,541E-05	13384,09	16,6219
10	20	5553,29	6,359E-05	11108,27	19,94582
5	20	4819,51	6,496E-05	9436,673	21,25808
1	20	3118,554	6,328E-05	6274,522	26,10706
0,5	20	2424,547	6,323E-05	4882,289	29,58113
0,1	20	1214,423	6,347E-05	2436,36	36,00201
25	40	1433,531	6,202E-05	2940,048	36,44306
10	40	907,0496	6,553E-05	1760,542	40,33471
5	40	603,424	6,596E-05	1163,612	42,45612
1	40	243,2339	6,377E-05	485,6223	40,35645
0,5	40	170,8455	6,816E-05	319,1597	39,09297
0,1	40	128,2505	7,528E-05	216,9021	26,26022

- CP 20: B-RJ-5070

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	12196,9	5,97E-05	26018,2	5,140388
10	4	11743,63	5,98E-05	24987	7,568846
5	4	11100,26	6,05E-05	23347,25	8,326574
1	4	10041,52	6,3E-05	20296,68	10,1672
0,5	4	9320,96	6,21E-05	19118,44	11,28132
0,1	4	7386,015	6,14E-05	15326,26	14,38732
25	20	6607,419	6,08E-05	13839,71	17,00692
10	20	5633,554	6,24E-05	11487,75	18,62583
5	20	4763,405	6,22E-05	9742,232	20,72566
1	20	3065,678	6,25E-05	6246,693	27,06937
0,5	20	2402,328	6,45E-05	4742,703	30,59055
0,1	20	1132,54	6,34E-05	2274,274	38,29401
25	40	1419,036	6,38E-05	2831,194	36,65822
10	40	863,0887	6,37E-05	1723,971	40,69296
5	40	581,0739	6,42E-05	1152,115	42,44394
1	40	242,1376	6,39E-05	482,5574	39,96547
0,5	40	156,9349	6,53E-05	306,2191	39,32284
0,1	40	155,1822	9,64E-05	204,9643	25,51188

- CP 21: B-RJ-5070

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	13810,94	6,1E-05	28790,1	4,555206
10	4	13366,33	6,3E-05	27011,98	6,987323
5	4	12740,08	6,47E-05	25033,18	7,9187
1	4	10646,79	6,14E-05	22070,07	10,1147
0,5	4	10076,55	6,26E-05	20491,18	11,19404
0,1	4	8013,052	6,34E-05	16092,25	14,11433
25	20	6498,595	6,32E-05	13080,33	16,55719
10	20	5309,712	6,19E-05	10908,2	20,24445
5	20	4616,838	6,31E-05	9306,111	21,20871
1	20	2959,727	6,15E-05	6123,736	26,80739
0,5	20	2288,019	6,25E-05	4664,583	30,60905
0,1	20	1144,312	6,27E-05	2324,52	37,39876
25	40	1553,9	6,69E-05	2954,915	35,95208
10	40	952,1293	6,82E-05	1776,919	40,00724
5	40	616,0034	6,55E-05	1196,588	41,95966
1	40	253,3631	6,72E-05	480,0439	40,03936
0,5	40	168,1078	6,57E-05	325,6578	39,68996
0,1	40	86,04389	4,93E-05	222,0389	26,87323

- CP 22: A-PR-6085

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	11271,96	6,08E-05	23557,41	4,769523
10	4	11196,63	6,28E-05	22654,01	5,636543
5	4	10321,92	6,13E-05	21393,98	5,262036
1	4	9156,824	6,09E-05	19136,57	8,014974
0,5	4	8538,317	6,06E-05	17927,28	8,74472
0,1	4	7054,614	6,08E-05	14781,42	11,10183
25	20	5586,996	6,26E-05	11341,12	14,19705
10	20	4714,989	6,16E-05	9725,499	17,17935
5	20	4037,115	6,13E-05	8362,544	18,78017
1	20	2985,163	6,31E-05	6024,417	22,20081
0,5	20	2417,008	6,17E-05	4991,209	24,53247
0,1	20	1429,256	6,33E-05	2874,17	28,86861
25	40	1386,383	6,18E-05	2848,647	29,36393
10	40	885,2262	6,34E-05	1773,98	33,76591
5	40	647,691	6,56E-05	1255,558	34,17627
1	40	312,8781	5,99E-05	665,2671	32,65573
0,5	40	237,0541	6,16E-05	490,196	32,07626
0,1	40	178,6115	6,51E-05	349,2196	24,41058

- CP 23: A-PR-6085

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	9418,262	6,284E-05	19036,88	4,730037
10	4	9102,008	6,432E-05	17973,97	6,414198
5	4	8750,314	6,446E-05	17242,73	6,506449
1	4	7441,223	6,173E-05	15347,18	9,463592
0,5	4	6958,795	6,214E-05	14258,52	10,26222
0,1	4	5440,795	5,938E-05	11666,78	12,80487
25	20	5447,229	6,184E-05	11187,93	15,81404
10	20	4594,912	6,08E-05	9599,505	17,76147
5	20	4105,195	6,355E-05	8205,797	19,97911
1	20	2832,597	6,271E-05	5751,011	23,62113
0,5	20	2290,656	6,251E-05	4665,788	26,10239
0,1	20	1293,247	6,316E-05	2607,104	30,55361
25	40	1218,536	6,234E-05	2482,93	31,80946
10	40	800,1698	6,508E-05	1561,83	34,44989
5	40	553,0519	6,231E-05	1127,474	35,61887
1	40	287,7613	6,409E-05	571,6537	32,8363
0,5	40	212,857	6,348E-05	426,9372	32,17709
0,1	40	158,5923	6,454E-05	312,8794	23,93587

- CP 24: A-PR-6085

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	10748,79	5,96E-05	22947,77	5,106547
10	4	11061,21	6,37E-05	22092,82	6,35961
5	4	10156,9	6,27E-05	20610,83	6,080226
1	4	8781,649	6,25E-05	17878,93	8,842237
0,5	4	8235,908	6,31E-05	16631,43	9,779267
0,1	4	6581,51	6,38E-05	13127,88	12,48839
25	20	5108,314	6,07E-05	10715,59	16,28378
10	20	4345,404	6,21E-05	8904,045	19,0239
5	20	3671,122	6,09E-05	7664,824	20,00029
1	20	2506,668	6,21E-05	5136,647	24,69838
0,5	20	1981,227	6,12E-05	4123,434	27,28098
0,1	20	1072,242	6,07E-05	2249,708	31,60359
25	40	1196,53	6,23E-05	2442,052	32,61808
10	40	741,1874	6,26E-05	1506,419	35,09977
5	40	537,7292	6,47E-05	1058,212	35,40325
1	40	265,8159	6,21E-05	545,0092	31,59211
0,5	40	199,7976	6,27E-05	405,4399	30,43148
0,1	40	155,1973	6,28E-05	314,8778	22,08859

- CP 25: C-RJ-5070

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	11827,01	6,2403E-05	24121,66	6,341063
10	4	11063,86	6,3003E-05	22350,33	7,920403
5	4	10239,13	6,3229E-05	20610,38	9,18777
1	4	8402,469	6,1661E-05	17350,22	10,82721
0,5	4	7895,632	6,3505E-05	15830,38	11,74443
0,1	4	6248,379	6,1703E-05	12893,44	14,05166
25	20	5636,989	6,3183E-05	11354,82	16,79778
10	20	4971,709	6,503E-05	9730,351	18,35827
5	20	4407,375	6,5828E-05	8521,333	19,71159
1	20	2832,396	6,0406E-05	5970,105	23,12325
0,5	20	2370,115	6,1211E-05	4930,053	25,31307
0,1	20	1373,766	6,1002E-05	2867,321	30,3542
25	40	1648,203	6,3354E-05	3304,517	30,80763
10	40	1100,311	6,47E-05	2160,124	34,03776
5	40	795,1758	6,55E-05	1542,023	36,0699
1	40	375,2787	6,497E-05	735,4505	35,12923
0,5	40	265,9969	6,5169E-05	519,6948	35,42306
0,1	40	183,9852	7,0962E-05	330,1149	27,23815

- CP 26: C-RJ-5070

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	13695,51	6,44E-05	27000,68	6,037669
10	4	12378,15	6,27E-05	25071,94	7,920222
5	4	11294,53	6,26E-05	22904,87	8,829129
1	4	9683,601	6,03E-05	20449,32	10,30512
0,5	4	9142,229	6,21E-05	18731,72	11,20364
0,1	4	7372,984	6,28E-05	14940,42	13,68334
25	20	6880,902	6,33E-05	13804,38	15,14611
10	20	5892,344	6,4E-05	11700,91	17,82113
5	20	4980,864	6,3E-05	10047,26	18,96316
1	20	3475,235	6,16E-05	7183,412	22,02909
0,5	20	2875,14	6,2E-05	5907,851	24,13129
0,1	20	1706,72	6,28E-05	3461,001	28,98895
25	40	1761,171	6,44E-05	3471,913	29,62578
10	40	1133,102	6,55E-05	2197,033	34,43158
5	40	814,2689	6,51E-05	1588,763	36,46136
1	40	388,9355	6,28E-05	787,9938	35,64318
0,5	40	278,4885	6,36E-05	557,4331	35,74347
0,1	40	189,8861	6,82E-05	354,5666	27,92436

- CP 27: C-RJ-5070

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	12171,18	6,333E-05	24464,69	5,837502
10	4	11478,58	6,207E-05	23542,72	7,332487
5	4	10563,65	6,065E-05	22173,68	7,979689
1	4	9820,041	6,62E-05	18886,13	9,778542
0,5	4	8938,849	6,498E-05	17516,09	10,70979
0,1	4	7294,031	6,411E-05	14485,16	12,90171
25	20	7096,105	6,2E-05	14569,52	15,30742
10	20	6013,85	6,343E-05	12068,47	18,20464
5	20	5102,169	6,365E-05	10203,98	18,71024
1	20	3488,234	6,222E-05	7137,953	22,09998
0,5	20	2851,764	6,232E-05	5826,33	24,36746
0,1	20	1584,579	6,117E-05	3298,354	29,18589
25	40	1659,188	6,725E-05	3140,768	31,56381
10	40	1131,393	6,487E-05	2220,166	33,72065
5	40	809,9355	6,498E-05	1586,69	36,01259
1	40	368,4141	6,063E-05	773,7051	35,71006
0,5	40	263,1267	6,173E-05	542,7091	35,13329
0,1	40	171,2129	6,114E-05	356,5517	26,73657

- CP 28: A-PR-5070

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	14716,58	6,21E-05	29988,01	5,639781
10	4	14668,52	6,36E-05	29170,12	7,162917
5	4	13705,54	6,48E-05	26738,98	8,545867
1	4	12021,48	6,5E-05	23550,49	10,6311
0,5	4	11131,73	6,56E-05	21593,36	11,85195
0,1	4	8941,613	6,68E-05	17032,55	15,31838
25	20	6852,857	6,48E-05	13372,64	16,89999
10	20	5369,047	6,16E-05	11030,4	19,1476
5	20	4503,999	6,26E-05	9102,139	21,22472
1	20	3033,158	6,19E-05	6243,045	25,54558
0,5	20	2321,077	6,24E-05	4735,753	28,65968
0,1	20	1160,333	6,03E-05	2450,335	34,05829
25	40	1119,351	6,02E-05	2350,657	36,64401
10	40	688,5035	6,48E-05	1342,989	39,76441
5	40	469,6334	6,51E-05	912,6974	40,01388
1	40	200,7641	6,39E-05	400,0662	36,69274
0,5	40	145,672	6,62E-05	280,0811	34,71704
0,1	40	125,3738	6,96E-05	229,4636	22,46307

- CP 29: A-PR-5070

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	11788,88	6,1E-05	24511,44	6,1695
10	4	11463,78	6E-05	24235,18	7,171671
5	4	10708,06	6,02E-05	22559,23	7,9769
1	4	9081,483	5,91E-05	19568,6	9,721039
0,5	4	8492,163	5,99E-05	18056,52	10,86852
0,1	4	6850,823	6E-05	14536,94	13,67223
25	20	6590,444	6,39E-05	13078,72	16,22188
10	20	5422,356	6,28E-05	10946,1	18,72601
5	20	4523,115	6,45E-05	8892,444	20,56668
1	20	3003,519	6,17E-05	6200,376	23,88555
0,5	20	2319,311	6,11E-05	4833,933	26,5709
0,1	20	1264,917	6,22E-05	2589,743	31,48978
25	40	1281,696	6,33E-05	2568,69	33,73265
10	40	764,3818	6,37E-05	1522,269	36,83629
5	40	498,6598	6,06E-05	1042,699	37,38862
1	40	242,6309	6,57E-05	470,5587	35,54428
0,5	40	174,887	6,48E-05	343,8412	34,1648
0,1	40	155,7738	7,71E-05	257,2507	22,44047

- CP 30: A-PR-5070

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	Carga (N)	Deflexões (microns)	 E* (Mpa)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	10334,82	5,971E-05	21912,99	5,70971
10	4	10342,86	6,298E-05	20794,27	7,460129
5	4	9563,923	6,316E-05	19171,33	8,924681
1	4	8118,078	6,291E-05	16430,56	10,42898
0,5	4	7485,233	6,411E-05	14866,82	11,55629
0,1	4	6001,266	6,323E-05	12085,36	14,39806
25	20	6237,577	6,268E-05	12599,76	15,97402
10	20	5212,074	6,297E-05	10479,16	18,81101
5	20	4463,855	6,445E-05	8769,603	20,71043
1	20	2945,738	6,348E-05	5907,97	25,12412
0,5	20	2251,505	6,232E-05	4600,285	27,84554
0,1	20	1198,633	6,235E-05	2447,524	33,28409
25	40	1332,096	6,685E-05	2522,849	34,19502
10	40	816,5203	7,12E-05	1452,045	36,7787
5	40	544,2466	7,131E-05	966,2995	36,7136
1	40	232,1574	6,415E-05	460,7498	32,09834
0,5	40	168,5315	6,404E-05	335,0941	29,42133
0,1	40	128,9847	5,832E-05	281,6227	18,02521

APÊNDICE B

- CP 01

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	 E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	23729,85	350	8750	5,01
10	4	22291,37	350	3500	7,41
5	4	21073,99	350	1750	8,11
1	4	17662,63	350	350	9,92
0,5	4	16333,06	350	175	10,87
0,1	4	12922,79	350	35	13,20
25	20	12236,41	1	25	15,38
10	20	10347,88	1	10	18,10
5	20	8770,425	1	5	19,17
1	20	5859,271	1	1	22,28
0,5	20	4653,044	1	0,5	24,46
0,1	20	2431,384	1	0,1	29,05
25	40	2771,954	0,005	0,125	32,84
10	40	1515,81	0,005	0,05	35,66
5	40	1007,325	0,005	0,025	37,09
1	40	450,5381	0,005	0,005	35,21
0,5	40	331,6348	0,005	0,0025	34,30
0,1	40	179,7357	0,005	0,0005	30,32

- CP 02

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	 E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	25097	600	15000	5,037548
10	4	23240,24	600	6000	7,071808
5	4	21994,02	600	3000	7,788686
1	4	18822,74	600	600	9,788214
0,5	4	17225,62	600	300	10,705
0,1	4	13712,47	600	60	13,15138
25	20	12118,48	1	25	14,1773
10	20	10129,76	1	10	17,42677
5	20	8862,517	1	5	18,98093
1	20	6375,716	1	1	21,83378
0,5	20	5248,829	1	0,5	23,80603
0,1	20	3249,157	1	0,1	28,03458
25	40	2590,623	0,0025	0,0625	32,32521
10	40	1681,658	0,0025	0,025	34,67084
5	40	1163,622	0,0025	0,0125	36,6333
1	40	553,4393	0,0025	0,0025	34,28625
0,5	40	388,3161	0,0025	0,00125	33,8113
0,1	40	198,676	0,0025	0,00025	29,99145

- CP 03

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	23370,56	550	13750	5,84
10	4	22187,48	550	5500	7,29
5	4	20892,2	550	2750	7,77
1	4	17578,33	550	550	9,70
0,5	4	16269,57	550	275	10,68
0,1	4	13388,81	550	55	13,09
25	20	12148,41	1	25	15,22
10	20	10241,08	1	10	17,68
5	20	8813,685	1	5	18,70
1	20	6170,589	1	1	22,35
0,5	20	5174,058	1	0,5	24,26
0,1	20	3104,905	1	0,1	28,70
25	40	2724,757	0,003	0,075	32,21
10	40	1648,651	0,003	0,03	35,83
5	40	1167,04	0,003	0,015	37,76
1	40	535,8259	0,003	0,003	36,71
0,5	40	368,4616	0,003	0,0015	36,51
0,1	40	185,0873	0,003	0,0003	33,16

- CP 04

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	31459,74	650	16250	4,57
10	4	29798,67	650	6500	8,08
5	4	27594,46	650	3250	8,96
1	4	22891,51	650	650	11,17
0,5	4	20215,96	650	325	12,36
0,1	4	15713,14	650	65	15,54
25	20	13361,47	1,3	32,5	17,12
10	20	10950,05	1	10	20,18
5	20	9196,455	1	5	22,29
1	20	5813,511	1	1	27,29
0,5	20	4477,373	1	0,5	30,42
0,1	20	2221,883	1	0,1	36,17
25	40	2379,131	0,0045	0,1125	36,62
10	40	1295,032	0,0045	0,045	40,31
5	40	881,5424	0,0045	0,0225	41,13
1	40	395,7914	0,0045	0,0045	37,14
0,5	40	282,4221	0,0045	0,00225	34,91
0,1	40	159,437	0,0045	0,00045	29,08

- CP 05

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	23729,85	350	8750	5,50
10	4	22291,37	350	3500	8,05
5	4	21073,99	350	1750	8,92
1	4	17662,63	350	350	10,96
0,5	4	16333,06	350	175	12,18
0,1	4	12922,79	350	35	15,33
25	20	12236,41	1	25	17,50
10	20	10347,88	1	10	20,07
5	20	8770,425	1	5	21,58
1	20	5859,271	1	1	26,27
0,5	20	4653,044	1	0,5	29,20
0,1	20	2431,384	1	0,1	34,83
25	40	2771,954	0,005	0,125	36,12
10	40	1515,81	0,005	0,05	40,03
5	40	1007,325	0,005	0,025	41,21
1	40	450,5381	0,005	0,005	38,51
0,5	40	331,6348	0,005	0,0025	36,41
0,1	40	179,7357	0,005	0,0005	30,76

- CP 06

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	26968,08	650	16250	6,53
10	4	24761,2	650	6500	8,36
5	4	23036,8	650	3250	8,98
1	4	19410,35	650	650	11,36
0,5	4	17788,79	650	325	12,59
0,1	4	13867,56	650	65	15,95
25	20	12804,28	1,3	32,5	17,90
10	20	10448,66	1	10	20,11
5	20	8708,032	1	5	22,86
1	20	5697,845	1	1	26,98
0,5	20	4399,612	1	0,5	30,15
0,1	20	2226,966	1	0,1	35,55
25	40	2117,052	0,0035	0,0875	37,88
10	40	1136,641	0,0035	0,035	41,23
5	40	771,6474	0,0035	0,0175	41,55
1	40	346,5047	0,0035	0,0035	36,43
0,5	40	249,8167	0,0035	0,00175	33,95
0,1	40	143,3568	0,0035	0,00035	28,12

- CP 07

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	 E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	18188,5	350	8750	7,9883752
10	4	17006,6	350	3500	9,9391317
5	4	15607,33	350	1750	10,921411
1	4	12726,54	350	350	13,173089
0,5	4	11774,81	350	175	14,417919
0,1	4	8961,721	350	35	17,683384
25	20	8178,237	1	25	20,82638
10	20	6282,43	1	10	24,361477
5	20	5023,944	1	5	26,878056
1	20	2879,94	1	1	31,358242
0,5	20	2080,016	1	0,5	34,32975
0,1	20	910,4366	1	0,1	38,214577
25	40	2198,276	0,024	0,6	35,238766
10	40	1354,984	0,024	0,24	38,37957
5	40	958,2001	0,024	0,12	39,907486
1	40	426,7465	0,024	0,024	37,27158
0,5	40	291,1652	0,024	0,012	36,128338
0,1	40	226,8637	0,024	0,0024	24,185942

- CP 08

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	 E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	23146,65	700	17500	7,05
10	4	21523,97	700	7000	9,18
5	4	19879,88	700	3500	10,12
1	4	16437,66	700	700	12,63
0,5	4	15025,54	700	350	13,88
0,1	4	11620,13	700	70	17,12
25	20	9072,718	1	25	20,72
10	20	7079,592	1	10	24,09
5	20	5642,305	1	5	26,13
1	20	3359,151	1	1	30,52
0,5	20	2394,929	1	0,5	33,37
0,1	20	1083,714	1	0,1	37,56
25	40	2566,756	0,0205	0,5125	34,53
10	40	1504,466	0,0205	0,205	38,58
5	40	999,3157	0,0205	0,1025	39,84
1	40	471,5612	0,0205	0,0205	37,49
0,5	40	326,9377	0,0205	0,01025	36,49
0,1	40	241,5704	0,0205	0,00205	25,21

- CP 09

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	 E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	21784,59	500	12500	7,93
10	4	19236,9	500	5000	9,86
5	4	17646,58	500	2500	10,92
1	4	15068,06	500	500	13,06
0,5	4	13386,09	500	250	14,44
0,1	4	10184,34	500	50	17,74
25	20	8403,667	1	25	21,90
10	20	6394,835	1	10	24,89
5	20	5106,282	1	5	26,75
1	20	2799,559	1	1	32,14
0,5	20	2017,46	1	0,5	34,75
0,1	20	897,9553	1	0,1	37,54
25	40	2151,821	0,022	0,55	36,23
10	40	1234,386	0,022	0,22	39,98
5	40	837,7048	0,022	0,11	40,83
1	40	382,8253	0,022	0,022	37,08
0,5	40	270,0679	0,022	0,011	35,16
0,1	40	223,7929	0,022	0,0022	22,85

- CP 10

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	 E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	25954,11	800	20000	4,86
10	4	24788,49	800	8000	6,21
5	4	23515,86	800	4000	6,96
1	4	20759,7	800	800	8,75
0,5	4	19338,97	800	400	9,59
0,1	4	16032,39	800	80	11,90
25	20	13098,82	1	25	13,98
10	20	11128,76	1	10	16,18
5	20	9846,376	1	5	17,29
1	20	7069,185	1	1	20,30
0,5	20	5940,848	1	0,5	22,23
0,1	20	3719,721	1	0,1	26,45
25	40	2924,328	0,002	0,05	30,43
10	40	1882,162	0,002	0,02	34,62
5	40	1375,276	0,002	0,01	35,16
1	40	636,7179	0,002	0,002	36,17
0,5	40	437,2257	0,002	0,001	36,17
0,1	40	290,8513	0,002	0,0002	27,11

- CP 11

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	$ E^* $ (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	28995,1	800	20000	3,54
10	4	27765,83	800	8000	5,14
5	4	26495,7	800	4000	5,22
1	4	23250,8	800	800	7,72
0,5	4	21792,42	800	400	8,29
0,1	4	18172,96	800	80	10,58
25	20	15547,17	1	25	13,08
10	20	12731,58	1	10	15,92
5	20	11092,22	1	5	17,20
1	20	7967,681	1	1	20,21
0,5	20	6542,385	1	0,5	22,21
0,1	20	4068,626	1	0,1	26,22
25	40	3079,694	0,002	0,05	30,15
10	40	2043,879	0,002	0,02	33,76
5	40	1443,061	0,002	0,01	35,79
1	40	703,5586	0,002	0,002	35,39
0,5	40	490,6484	0,002	0,001	35,48
0,1	40	318,7536	0,002	0,0002	27,03

- CP 12

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	$ E^* $ (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	26171,69	2000	50000	2,81
10	4	24354,48	2000	20000	5,25
5	4	22977,86	2000	10000	5,53
1	4	19806,55	2000	2000	7,94
0,5	4	18467,12	2000	1000	8,85
0,1	4	15533,96	2000	200	11,13
25	20	11324,69	1	25	13,47
10	20	9973,426	1	10	15,46
5	20	8930,723	1	5	16,20
1	20	6692,874	1	1	19,78
0,5	20	5670,028	1	0,5	21,67
0,1	20	3643,372	1	0,1	25,64
25	40	2861,398	0,002	0,05	30,86
10	40	1847,228	0,002	0,02	34,49
5	40	1360,032	0,002	0,01	34,68
1	40	642,8797	0,002	0,002	35,37
0,5	40	446,5479	0,002	0,001	35,42
0,1	40	292,6606	0,002	0,0002	26,68

- CP 13

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	17752,67	250	6250	8,419317
10	4	16365,36	250	2500	9,823224
5	4	15203,35	250	1250	10,39634
1	4	12782,03	250	250	11,94849
0,5	4	11553,93	250	125	12,81629
0,1	4	9036,079	250	25	15,03791
25	20	9019,047	1	25	17,80339
10	20	7403,761	1	10	19,67873
5	20	6386,738	1	5	21,22348
1	20	4373,647	1	1	23,8306
0,5	20	3541,481	1	0,5	25,3614
0,1	20	2214,616	1	0,1	28,37024
25	40	2056,462	0,0032	0,08	30,7798
10	40	1416,191	0,0032	0,032	32,08829
5	40	1035,643	0,0032	0,016	33,28327
1	40	561,5291	0,0032	0,0032	31,43206
0,5	40	428,9221	0,0032	0,0016	30,75275
0,1	40	245,1155	0,0032	0,00032	28,63717

- CP 14

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	18846,34	450	11250	8,02
10	4	17261,96	450	4500	9,77
5	4	15904,14	450	2250	10,37
1	4	13451,13	450	450	12,04
0,5	4	12204,79	450	225	12,94
0,1	4	9502,407	450	45	15,14
25	20	8447,756	1	25	17,69
10	20	6893,211	1	10	19,85
5	20	5804,697	1	5	21,08
1	20	3999,587	1	1	24,12
0,5	20	3294,606	1	0,5	25,63
0,1	20	2028,419	1	0,1	28,47
25	40	2021,481	0,004	0,1	30,56
10	40	1368,311	0,004	0,04	32,16
5	40	1020,54	0,004	0,02	33,11
1	40	547,6657	0,004	0,004	31,89
0,5	40	422,8862	0,004	0,002	31,18
0,1	40	243,7549	0,004	0,0004	28,83

- CP 15

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	16948,1	450	11250	8,11
10	4	15448,22	450	4500	9,68
5	4	14274,25	450	2250	10,41
1	4	11884,54	450	450	12,12
0,5	4	10943,78	450	225	13,01
0,1	4	8492,901	450	45	15,21
25	20	7505,421	1	25	17,76
10	20	6247,248	1	10	19,99
5	20	5399,572	1	5	21,25
1	20	3667,019	1	1	24,30
0,5	20	3067,513	1	0,5	25,92
0,1	20	1832,411	1	0,1	29,01
25	40	2080,803	0,0055	0,1375	31,09
10	40	1414,412	0,0055	0,055	32,72
5	40	1021,271	0,0055	0,0275	34,00
1	40	567,6868	0,0055	0,0055	32,16
0,5	40	423,383	0,0055	0,00275	31,61
0,1	40	240,5692	0,0055	0,00055	29,06

- CP 16

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	25127,71	800	20000	3,72
10	4	23902,89	800	8000	6,56
5	4	22781,92	800	4000	7,21
1	4	20025,21	800	800	8,98
0,5	4	18492,32	800	400	9,87
0,1	4	15184,32	800	80	12,05
25	20	12928,14	1	25	13,47
10	20	10986,99	1	10	16,62
5	20	9562,288	1	5	17,95
1	20	6880,199	1	1	21,22
0,5	20	5770,485	1	0,5	23,41
0,1	20	3501,643	1	0,1	28,48
25	40	2777,679	0,002	0,05	32,90
10	40	1732,569	0,002	0,02	36,36
5	40	1198,474	0,002	0,01	38,32
1	40	531,8923	0,002	0,002	37,25
0,5	40	361,3638	0,002	0,001	37,48
0,1	40	182,2556	0,002	0,0002	33,15

- CP 17

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	 E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	28822,05	1300	32500	3,72
10	4	27797,64	1300	13000	6,56
5	4	26933,49	1300	6500	7,21
1	4	23476,04	1300	1300	8,98
0,5	4	21858,01	1300	650	9,87
0,1	4	17872,39	1300	130	12,05
25	20	12685,53	1	25	13,47
10	20	10622,07	1	10	16,62
5	20	9204,284	1	5	17,95
1	20	6589,808	1	1	21,22
0,5	20	5576,555	1	0,5	23,41
0,1	20	3387,429	1	0,1	28,48
25	40	2781,336	0,0025	0,0625	32,90
10	40	1649,232	0,0025	0,025	36,36
5	40	1140,009	0,0025	0,0125	38,32
1	40	492,8511	0,0025	0,0025	37,25
0,5	40	326,5092	0,0025	0,00125	37,48
0,1	40	163,1275	0,0025	0,00025	33,15

- CP 18

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	 E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	26412,06	800	20000	4,71
10	4	24521,49	800	8000	6,73
5	4	22970,04	800	4000	7,44
1	4	20134,6	800	800	8,91
0,5	4	18472,45	800	400	9,84
0,1	4	15121,52	800	80	12,12
25	20	13065,41	1	25	12,83
10	20	11309,96	1	10	16,59
5	20	10001,47	1	5	17,68
1	20	7194,714	1	1	20,84
0,5	20	6044,625	1	0,5	23,00
0,1	20	3692,371	1	0,1	27,86
25	40	3033,603	0,0025	0,0625	32,41
10	40	1917,109	0,0025	0,025	35,56
5	40	1343,644	0,0025	0,0125	37,89
1	40	625,3231	0,0025	0,0025	36,58
0,5	40	434,3888	0,0025	0,00125	36,14
0,1	40	217,8692	0,0025	0,00025	32,24

- CP 19

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	25146,55	400	8979,24	5,79
10	4	24016,14	400	4000	7,20
5	4	22463,69	400	2000	8,22
1	4	19342,67	400	400	10,10
0,5	4	17941,44	400	200	11,23
0,1	4	14618,18	400	40	14,29
25	20	13384,09	1	25	16,62
10	20	11108,27	1	10	19,95
5	20	9436,673	1	5	21,26
1	20	6274,522	1	1	26,11
0,5	20	4882,289	1	0,5	29,58
0,1	20	2436,36	1	0,1	36,00
25	40	2940,048	0,0055	0,1375	36,44
10	40	1760,542	0,0055	0,055	40,33
5	40	1163,612	0,0055	0,0275	42,46
1	40	485,6223	0,0055	0,0055	40,36
0,5	40	319,1597	0,0055	0,00275	39,09
0,1	40	216,9021	0,0055	0,00055	26,26

- CP 20

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	26018,2	500	12500	5,14
10	4	24987	500	5000	7,57
5	4	23347,25	500	2500	8,33
1	4	20296,68	500	500	10,17
0,5	4	19118,44	500	250	11,28
0,1	4	15326,26	500	50	14,39
25	20	13839,71	1	25	17,01
10	20	11487,75	1	10	18,63
5	20	9742,232	1	5	20,73
1	20	6246,693	1	1	27,07
0,5	20	4742,703	1	0,5	30,59
0,1	20	2274,274	1	0,1	38,29
25	40	2831,194	0,006	0,15	36,66
10	40	1723,971	0,006	0,06	40,69
5	40	1152,115	0,006	0,03	42,44
1	40	482,5574	0,006	0,006	39,97
0,5	40	306,2191	0,006	0,003	39,32
0,1	40	204,9643	0,006	0,0006	25,51

- CP 21

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	28790,1	700	17500	4,56
10	4	27011,98	700	7000	6,99
5	4	25033,18	700	3500	7,92
1	4	22070,07	700	700	10,11
0,5	4	20491,18	700	350	11,19
0,1	4	16092,25	700	70	14,11
25	20	13080,33	1	25	16,56
10	20	10908,2	1	10	20,24
5	20	9306,111	1	5	21,21
1	20	6123,736	1	1	26,81
0,5	20	4664,583	1	0,5	30,61
0,1	20	2324,52	1	0,1	37,40
25	40	2954,915	0,006	0,15	35,95
10	40	1776,919	0,006	0,06	40,01
5	40	1196,588	0,006	0,03	41,96
1	40	480,0439	0,006	0,006	40,04
0,5	40	325,6578	0,006	0,003	39,69
0,1	40	222,0389	0,006	0,0006	26,87

- CP 22

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	23557,41	900	22500	4,77
10	4	22654,01	900	9000	5,64
5	4	21393,98	900	4500	5,26
1	4	19136,57	900	900	8,01
0,5	4	17927,28	900	450	8,74
0,1	4	14781,42	900	90	11,10
25	20	11341,12	1	25	14,20
10	20	9725,499	1	10	17,18
5	20	8362,544	1	5	18,78
1	20	6024,417	1	1	22,20
0,5	20	4991,209	1	0,5	24,53
0,1	20	2874,17	1	0,1	28,87
25	40	2848,647	0,004	0,1	29,36
10	40	1773,98	0,004	0,04	33,77
5	40	1255,558	0,004	0,02	34,18
1	40	665,2671	0,004	0,004	32,66
0,5	40	490,196	0,004	0,002	32,08
0,1	40	349,2196	0,004	0,0004	24,41

- CP 23

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	19036,88	350	8750	4,73
10	4	17973,97	350	3500	6,41
5	4	17242,73	350	1750	6,51
1	4	15347,18	350	350	9,46
0,5	4	14258,52	350	175	10,26
0,1	4	11666,78	350	35	12,80
25	20	11187,93	1	25	15,81
10	20	9599,505	1	10	17,76
5	20	8205,797	1	5	19,98
1	20	5751,011	1	1	23,62
0,5	20	4665,788	1	0,5	26,10
0,1	20	2607,104	1	0,1	30,55
25	40	2482,93	0,0035	0,0875	31,81
10	40	1561,83	0,0035	0,035	34,45
5	40	1127,474	0,0035	0,0175	35,62
1	40	571,6537	0,0035	0,0035	32,84
0,5	40	426,9372	0,0035	0,00175	32,18
0,1	40	312,8794	0,0035	0,00035	23,94

- CP 24

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	22947,77	900	22500	5,11
10	4	22092,82	900	9000	6,36
5	4	20610,83	900	4500	6,08
1	4	17878,93	900	900	8,84
0,5	4	16631,43	900	450	9,78
0,1	4	13127,88	900	90	12,49
25	20	10715,59	1	25	16,28
10	20	8904,045	1	10	19,02
5	20	7664,824	1	5	20,00
1	20	5136,647	1	1	24,70
0,5	20	4123,434	1	0,5	27,28
0,1	20	2249,708	1	0,1	31,60
25	40	2442,052	0,0045	0,1125	32,62
10	40	1506,419	0,0045	0,045	35,10
5	40	1058,212	0,0045	0,0225	35,40
1	40	545,0092	0,0045	0,0045	31,59
0,5	40	405,4399	0,0045	0,00225	30,43
0,1	40	314,8778	0,0045	0,00045	22,09

- CP 25

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	24121,66	550	13750	6,34
10	4	22350,33	550	5500	7,92
5	4	20610,38	550	2750	9,19
1	4	17350,22	550	550	10,83
0,5	4	15830,38	550	275	11,74
0,1	4	12893,44	550	55	14,05
25	20	11354,82	1	25	16,80
10	20	9730,351	1	10	18,36
5	20	8521,333	1	5	19,71
1	20	5970,105	1	1	23,12
0,5	20	4930,053	1	0,5	25,31
0,1	20	2867,321	1	0,1	30,35
25	40	3304,517	0,0055	0,1375	30,81
10	40	2160,124	0,0055	0,055	34,04
5	40	1542,023	0,0055	0,0275	36,07
1	40	735,4505	0,0055	0,0055	35,13
0,5	40	519,6948	0,0055	0,00275	35,42
0,1	40	330,1149	0,0055	0,00055	27,24

- CP 26

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	27000,68	450	11250	6,04
10	4	25071,94	450	4500	7,92
5	4	22904,87	450	2250	8,83
1	4	20449,32	450	450	10,31
0,5	4	18731,72	450	225	11,20
0,1	4	14940,42	450	45	13,68
25	20	13804,38	1	25	15,15
10	20	11700,91	1	10	17,82
5	20	10047,26	1	5	18,96
1	20	7183,412	1	1	22,03
0,5	20	5907,851	1	0,5	24,13
0,1	20	3461,001	1	0,1	28,99
25	40	3471,913	0,004	0,1	29,63
10	40	2197,033	0,004	0,04	34,43
5	40	1588,763	0,004	0,02	36,46
1	40	787,9938	0,004	0,004	35,64
0,5	40	557,4331	0,004	0,002	35,74
0,1	40	354,5666	0,004	0,0004	27,92

- CP 27

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	24464,69	250	6250	5,84
10	4	23542,72	250	2500	7,33
5	4	22173,68	250	1250	7,98
1	4	18886,13	250	250	9,78
0,5	4	17516,09	250	125	10,71
0,1	4	14485,16	250	25	12,90
25	20	14569,52	1	25	15,31
10	20	12068,47	1	10	18,20
5	20	10203,98	1	5	18,71
1	20	7137,953	1	1	22,10
0,5	20	5826,33	1	0,5	24,37
0,1	20	3298,354	1	0,1	29,19
25	40	3140,768	0,0035	0,0875	31,56
10	40	2220,166	0,0035	0,035	33,72
5	40	1586,69	0,0035	0,0175	36,01
1	40	773,7051	0,0035	0,0035	35,71
0,5	40	542,7091	0,0035	0,00175	35,13
0,1	40	356,5517	0,0035	0,00035	26,74

- CP 28

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	29988,01	700	17500	5,64
10	4	29170,12	700	7000	7,16
5	4	26738,98	700	3500	8,55
1	4	23550,49	700	700	10,63
0,5	4	21593,36	700	350	11,85
0,1	4	17032,55	700	70	15,32
25	20	13372,64	1	25	16,90
10	20	11030,4	1	10	19,15
5	20	9102,139	1	5	21,22
1	20	6243,045	1	1	25,55
0,5	20	4735,753	1	0,5	28,66
0,1	20	2450,335	1	0,1	34,06
25	40	2350,657	0,0038	0,095	36,64
10	40	1342,989	0,0038	0,038	39,76
5	40	912,6974	0,0038	0,019	40,01
1	40	400,0662	0,0038	0,0038	36,69
0,5	40	280,0811	0,0038	0,0019	34,72
0,1	40	229,4636	0,0038	0,00038	22,46

- CP 29

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	24511,44	500	12500	6,17
10	4	24235,18	500	5000	7,17
5	4	22559,23	500	2500	7,98
1	4	19568,6	500	500	9,72
0,5	4	18056,52	500	250	10,87
0,1	4	14536,94	500	50	13,67
25	20	13078,72	1	25	16,22
10	20	10946,1	1	10	18,73
5	20	8892,444	1	5	20,57
1	20	6200,376	1	1	23,89
0,5	20	4833,933	1	0,5	26,57
0,1	20	2589,743	1	0,1	31,49
25	40	2568,69	0,004	0,1	33,73
10	40	1522,269	0,004	0,04	36,84
5	40	1042,699	0,004	0,02	37,39
1	40	470,5587	0,004	0,004	35,54
0,5	40	343,8412	0,004	0,002	34,16
0,1	40	257,2507	0,004	0,0004	22,44

- CP 30

Frequência (Hz)	Temperatura (°C)	E* (Mpa)	Fator de deslocamento	Frequência reduzida (Hz)	Ângulo de Fase (graus)
25	4	21912,99	195	4875	5,71
10	4	20794,27	195	1950	7,46
5	4	19171,33	195	975	8,92
1	4	16430,56	195	195	10,43
0,5	4	14866,82	195	97,5	11,56
0,1	4	12085,36	195	19,5	14,40
25	20	12599,76	1	25	15,97
10	20	10479,16	1	10	18,81
5	20	8769,603	1	5	20,71
1	20	5907,97	1	1	25,12
0,5	20	4600,285	1	0,5	27,85
0,1	20	2447,524	1	0,1	33,28
25	40	2522,849	0,0042	0,105	34,20
10	40	1452,045	0,0042	0,042	36,78
5	40	966,2995	0,0042	0,021	36,71
1	40	460,7498	0,0042	0,0042	32,10
0,5	40	335,0941	0,0042	0,0021	29,42
0,1	40	281,6227	0,0042	0,00042	18,03

APÊNDICE C

• CP 01-1

T	F1	F2
-5	11021	7254,5
0	10882	7115
10	10072,62	6138,4
20	9486,6	6097,74
30	7673	4413,76
40	6277,9	3506,26
55	3906,3	2058,16

• CP 01-5

T	F1	F2
-5	10463	6696,4
0	11300	7090,88
10	10407,4	6347,32
20	9626,1	5841,24
30	8649,6	5161,8
40	7310,3	4352,7
55	5189,7	2984,56

• CP 02-4

T	F1	F2
-5	11858	7673
0	11467,8	7394
10	10742	6670,72
20	10045	6165,94
30	9263,4	5440,8
40	7840,4	4575,9
55	5859,4	3292,4

• CP 01-2

T	F1	F2
-5	11579	7533,5
0	11440	7366,1
10	10603	6780,94
20	9905,1	6277,9
30	8119,4	4603,8
40	6138,4	3683
55	4715,4	2426,82

• CP 02-1

T	F1	F2
-5	11161	7310,3
0	10882	7115
10	10045	6556,9
20	9347,1	5998,9
30	8510	5273,4
40	7338,2	4324,8
55	4799,16	3047,96

• CP 02-5

T	F1	F2
-5	11300	7254,5
0	11021	7115
10	10184	6556,9
20	9626,1	6278,82
30	8928,6	5440,82
40	7840,4	4603,8
55	5943,1	3348,2

• CP 01-3

T	F1	F2
-5	11579	7477,7
0	9765,6	6166,3
10	8956,5	5385
20	8370,5	5140,58
30	7115	4073,7
40	5468,72	2865,26
55	4017,9	2003,52

• CP 02-2

T	F1	F2
-5	11802,4	7673
0	11440	7394
10	10603	6529
20	9877,2	6151,66
30	9179,7	5580,4
40	7784,6	4614,26
55	5859,4	3250,86

• CP 03-1

T	F1	F2
-5	10993,2	7115
0	10603	6975,4
10	9905,1	6277,9
20	9207,6	5440,8
30	8147,3	4882,8
40	6333,7	3611,96
55	4185,3	2229,28

• CP 01-4

T	F1	F2
-5	9905,1	6473,2
0	10463	6696,4
10	9626,1	5859,4
20	8789,1	5440,84
30	7924,1	4603,8
40	5775,7	3607,22
55	3878,36	2313,94

• CP 02-3

T	F1	F2
-5	11579	7505,6
0	11216,6	7254,5
10	10463	6698,06
20	9626,1	6038,78
30	8928,6	5440,8
40	7617,2	4464,3
55	5747,8	3110,42

• CP 03-2

T	F1	F2
-5	11440	7394
0	11161	7115
10	10379,6	6362,86
20	9626,1	5657,4
30	8314,7	5022,3
40	5915,2	3906,3
55	3906,3	2201,06

• CP 03-3

T	F1	F2
-5	11579	7533,5
0	11161	7320,42
10	10463	6391,06
20	9765,6	6123,44
30	8565,84	5133,9
40	6973,42	4054,98
55	4296,9	2370,38

• CP 04-2

T	F1	F2
-5	11998	7840,4
0	11579	7673
10	10882	6869,52
20	10045	6123,44
30	9060,1	5301,3
40	7505,6	4786,42
55	3738,82	2229,28

• CP 05-1

T	F1	F2
-5	11161	7394
0	10882	6947,52
10	10184	6526,12
20	9564,8	6188,5
30	8482,1	4958,46
40	6584,7	3906,3
55	5050,2	3012,78

• CP 03-4

T	F1	F2
-5	11021	7059,16
0	10603	6835,9
10	9933,08	5998,9
20	9319,2	5912,6
30	8175,2	5022,3
40	6054,7	3571,4
55	5580,4	2650,7

• CP 04-3

T	F1	F2
-5	11858	7812,5
0	11440	7533,5
10	10630,8	6603,18
20	9877,2	6151,66
30	8928,6	5078,1
40	7421,88	4548
55	4687,5	2257,5

• CP 05-2

T	F1	F2
-5	11858	7673
0	11300	7272,98
10	10882	6755,44
20	10184	6329,08
30	8286,8	4771,2
40	7561,4	4045,78
55	5971	3679,5

• CP 03-5

T	F1	F2
-5	10882	7142,9
0	10603	6975,4
10	9905,1	6305,8
20	9347,1	6082,6
30	8398,4	5161,8
40	6780,1	3527,3
55	5719,9	2873,9

• CP 04-4

T	F1	F2
-5	11440	7421,9
0	11161	7254,5
10	10351,8	6584,8
20	9765,6	6095,22
30	8761,2	5305,1
40	7952	4603,8
55	5050,2	2680,8

• CP 05-3

T	F1	F2
-5	11998	7893,8
0	11160,6	7284,12
10	10882	7059,16
20	10296	6568,72
30	8063,6	4860,3
40	6780,1	4008,04
55	6501,1	3809,5

• CP 04-1

T	F1	F2
-5	11021	7254,5
0	10603	7115
10	9905,1	6529
20	9207,6	6053,38
30	8091,5	5106
40	6863,8	3442,64
55	4185,3	1975,3

• CP 04-5

T	F1	F2
-5	11300	7394
0	11021	7254,5
10	10184	6503,62
20	9654	6221,76
30	8789,1	5248,72
40	7617,2	4548
55	5496,66	2963

• CP 05-4

T	F1	F2
-5	11719	7673
0	11328,4	7031,24
10	10742	6947,5
20	10184	6373,84
30	8649,6	4854,9
40	7198,7	3527,3
55	6808	3710,9

• CP 05-5

T	F1	F2
-5	11579	7673
0	11021	7254,5
10	10603	6891,7
20	10072,8	6374,12
30	8761,2	5055,92
40	7533,5	4631,7
55	5859,4	3766,7

• CP 06-4

T	F1	F2
-5	11579	7549,98
0	11161	7073,32
10	10455	6672,62
20	9877,2	6222,1
30	8984,6	5440,8
40	7226,58	4520,1
55	6194,2	3539,04

• CP 07-3

T	F1	F2
-5	11384	7394
0	10603	6780,1
10	10045	6249,96
20	9068,1	5673,4
30	7440,5	4696,8
40	5952,4	3301,7
55	3766,7	1813,6

• CP 06-1

T	F1	F2
-5	10045	6696,4
0	9793,5	5998,9
10	9207,6	6026,8
20	8649,6	5349,82
30	7394	4548
40	6110,5	3209,64
55	4352,7	2873,9

• CP 06-5

T	F1	F2
-5	11998	7812,5
0	11467,8	7421,9
10	10882	6811,34
20	10463	6416,28
30	9626,1	5998,9
40	8510	5022,3
55	7784,6	4361,24

• CP 07-4

T	F1	F2
-5	11161	7254,5
0	10742	7003,32
10	10184	6460,82
20	8928,6	5567,2
30	7626,5	4371,3
40	5440,833	3255,2
55	3534,2	1906,633

• CP 06-2

T	F1	F2
-5	11579	7533,5
0	11161	6966,24
10	10630,8	6780,1
20	9793,5	6095,22
30	8972,3	5301,3
40	7561,4	4289,24
55	5440,82	3357,98

• CP 07-1

T	F1	F2
-5	10463	6835,9
0	10045	6556,9
10	9347,1	5998,9
20	8370,5	5301,3
30	6138,4	3348,2
40	5440,833	3069,2
55	3534,2	2046,1

• CP 07-5

T	F1	F2
-5	11161	7254,5
0	10742	6975,4
10	10184	6392,18
20	9068,1	5719,9
30	7394	3766,7
40	5440,833	3184,067
55	3009,233	2051,3

• CP 06-3

T	F1	F2
-5	10937,6	7142,9
0	10463	6433,86
10	9905,1	6296,4
20	9151,8	5632,12
30	8426,3	5050,2
40	6640,6	4045,78
55	6556,9	3499,08

• CP 07-2

T	F1	F2
-5	11719	7533,5
0	11161	7214,86
10	10603	6486,74
20	9207,6	5487,333
30	7394	3627,2
40	5905,9	3208,7
55	3441,167	2325,133

• CP 08-1

T	F1	F2
-5	11021	7254,5
0	10463	6696,4
10	9905,1	6165,96
20	9151,8	5732,88
30	8342,6	4992,46
40	6696,4	3822,54
55	5747,8	3161,22

• CP 08-2

T	F1	F2
-5	11161	7254,5
0	10603	6627,92
10	10045	6292,76
20	9179,7	5700,14
30	8537,92	5133,9
40	6891,76	4060,9
55	5719,9	3069,2

• CP 09-1

T	F1	F2
-5	11300	7394
0	10882	7003,32
10	10156,2	6389,5
20	9402,9	6017,4
30	8510	5133,9
40	6473,2	3724,84
55	4910,7	2680,8

• CP 10-1

T	F1	F2
-5	10882	7115
0	10435,2	6612,7
10	9905,1	6417,4
20	9207,6	5831,5
30	8231	5022,3
40	6138,4	3543,5
55	5440,82	2906,56

• CP 08-3

T	F1	F2
-5	11021	7254,5
0	10463	6863,8
10	9905,1	6449,44
20	9207,6	5928,96
30	8426,3	5189,7
40	6780,1	3950,6
55	5803,6	3104,06

• CP 09-2

T	F1	F2
-5	11802,4	7673
0	11161	7254,5
10	10603	6835,9
20	9793,5	6277,9
30	8398,4	5050,2
40	6333,7	3208,7
55	4827	2724,56

• CP 10-2

T	F1	F2
-5	11998	7673
0	11440	7366,1
10	11021	7010,32
20	10296	6292,46
30	9626,1	5927,86
40	7868,3	4603,8
55	6417,4	3515,6

• CP 08-4

T	F1	F2
-5	11300	7254,5
0	10742	6808
10	10184	6584,8
20	9486,6	6129
30	8789,1	5378,1
40	6529	4222,7
55	5775,7	3188,7

• CP 09-4

T	F1	F2
-5	11440	7460,82
0	11021	6767,1
10	10463	6586,06
20	9845,7	5873,46
30	8342,6	5035,54
40	5775,7	3286,34
55	4854,9	2680,8

• CP 10-3

T	F1	F2
-5	11440	7282,4
0	10882	6696,4
10	10324	6724,3
20	9737,7	5969,7
30	8928,6	5468,72
40	7561,4	4520,1
55	5245,5	2862,5

• CP 08-5

T	F1	F2
-5	11021	7214,54
0	10463	6752,2
10	9989,04	6384,24
20	9347,1	5692,22
30	8761,2	5273,4
40	7421,9	4163,44
55	5837,6	3549,02

• CP 09-5

T	F1	F2
-5	11300	7394
0	10742	6556,9
10	10324	6467,94
20	9793,5	6156,9
30	8733,3	5329,2
40	6445,3	3543,5
55	5580,4	2765,46

• CP 10-4

T	F1	F2
-5	11328	7394
0	11021	6891,7
10	10463	6656,62
20	9905,1	6236,02
30	9068,1	5412,9
40	7310,3	4418
55	5412,9	3097,1

• CP 10-5

T	F1	F2
-5	11440	7421,9
0	11021	7050,6
10	10603	6696,4
20	10045	6404,06
30	9235,5	5775,68
40	7840,4	4606,96
55	5775,7	3575,82

• CP 11-4

T	F1	F2
-5	11830	7533,5
0	11579	7394
10	10993,2	6975,4
20	9905,1	6179,88
30	8649,58	5189,7
40	6389,5	4045,8
55	5022,32	2398,6

• CP 12-3

T	F1	F2
-5	10742	7115
0	10463	6835,9
10	9905,1	6417,4
20	9207,6	5747,8
30	8286,8	5061,94
40	6082,6	3858,72
55	4659,6	2934,78

• CP 11-1

T	F1	F2
-5	11161	7254,5
0	10882	7115
10	10184	6612,7
20	8984,4	5545,54
30	8119,4	4548,22
40	5719,9	3325,08
55	3766,72	2172,84

• CP 11-5

T	F1	F2
-5	11440	7394
0	11161	7366,1
10	10686,4	6975,4
20	9737,7	6152,34
30	8733,3	5180,54
40	6808	3906,3
55	5217,6	2765,46

• CP 12-4

T	F1	F2
-5	11440	7394
0	11216,6	7254,5
10	10603	6835,9
20	9905,1	6278,2
30	8900,7	5417,98
40	7254,5	4306,4
55	5971	3245,14

• CP 11-2

T	F1	F2
-5	11579	7533,5
0	11300	7394
10	10603	6835,9
20	9486,6	5954,12
30	8295,66	4994,74
40	5998,9	3515,6
55	4741,9	2487,4

• CP 12-1

T	F1	F2
-5	11161	7254,5
0	10882	7115
10	10184	6696,4
20	9381,96	6067
30	8398,4	5333,38
40	6250	3766,7
55	4882,8	2477,56

• CP 12-5

T	F1	F2
-5	11300	7394
0	11021	7254,5
10	10463	6835,9
20	9905,1	6417,4
30	8733,3	5462,04
40	6501,14	3979,82
55	5496,64	3499,08

• CP 11-3

T	F1	F2
-5	10882	7115
0	10742	6975,4
10	10045	6460,5
20	9207,6	5661,52
30	7840,4	4853,64
40	6333,7	3376,1
55	4548	2069,14

• CP 12-2

T	F1	F2
-5	11440	7533,5
0	11161	7254,5
10	10603	6835,9
20	9793,5	5998,9
30	8844,9	5521,36
40	7226,6	4484,58
55	5273,42	3152,9

• CP 13-1

T	F1	F2
-5	10742	7231,02
0	10463	6975,4
10	9765,6	6361,9
20	8417	5208,3
30	7487	4371,3
40	6324,4	3394,7
55	3394,700	2511,200

• CP 13-2

T	F1	F2
-5	11272,2	7394
0	10993,2	7115
10	10184	6571,48
20	8975,1	5440,833
30	7952	4929,3
40	5812,9	3441,2
55	3069,200	2092,600

• CP 14-1

T	F1	F2
-5	10882	7254,5
0	10463	6975,4
10	9626,1	6417,4
20	8789,1	5756,58
30	7226,6	3679,5
40	5775,7	2780,68
55	4548,00	2370,38

• CP 14-5

T	F1	F2
-5	11021	7254,5
0	10603	6075,4
10	9905,1	6054,7
20	9068,1	5705,3
30	7338,2	3839,96
40	5775,7	3487,7
55	4213,18	2313,94

• CP 13-3

T	F1	F2
-5	11021	7254,5
0	10742	7090,88
10	9905,1	6349,2
20	8649,6	5208,3
30	7998,5	3441,2
40	5998,9	3394,7
55	4159,400	2139,100

• CP 14-2

T	F1	F2
-5	10882	7115
0	10463	6835,9
10	9697,42	6151,66
20	8928,6	5301,32
30	7394	4288,96
40	6222,1	2914,8
55	4436,40	2370,38

• CP 15-1

T	F1	F2
-5	10882	7254,5
0	10491	6975,4
10	9626,1	6277,9
20	8649,6	5587,26
30	7003,38	3454,7
40	5915,2	2977,26
55	3599,3	2236,88

• CP 13-4

T	F1	F2
-5	11021	7254,5
0	10742	7018,88
10	10045	6349,2
20	8928,6	5440,867
30	7952	4185,3
40	6277,9	3441,2
55	3813,200	2093,633

• CP 14-3

T	F1	F2
-5	10463	6947,5
0	9977,6	6405,64
10	9347,1	6010,56
20	8621,68	5530,82
30	6975,4	3543,5
40	5552,48	3125
55	4296,90	2415,74

• CP 15-2

T	F1	F2
-5	11300	7331,52
0	11021	7254,5
10	10045	6417,4
20	9068,1	5552,46
30	7533,5	4768,98
40	5385,02	2893,24
55	3187,78	2252,42

• CP 13-5

T	F1	F2
-5	10798	6894,24
0	10603	6975,4
10	9849,3	6236,32
20	8556,533	5301,3
30	7766	3162,2
40	5998,9	3255,2
55	3859,733	2464,700

• CP 14-4

T	F1	F2
-5	11161	7254,5
0	10742	7003,32
10	9905,1	6292,76
20	9263,4	5549,28
30	7673	3555,54
40	6018,9	3215,68
55	4659,60	2539,70

• CP 15-3

T	F1	F2
-5	10742	7059,16
0	10463	6828,94
10	9626,1	6222,06
20	8510	5333,36
30	6863,82	3378,28
40	5440,82	2991,22
55	3655,1	1942,84

• CP 15-4

T	F1	F2
-5	10742	6978,9
0	10454,2	6744,28
10	9681,9	6277,9
20	8789,1	5321,32
30	6919,62	4129,78
40	5089,52	3139,56
55	3292,4	2148,4

• CP 16-3

T	F1	F2
-5	10882	7115
0	10742	6975,4
10	10184	6556,9
20	9626,1	6166,3
30	8510	5301,3
40	6640,6	4091,7
55	5621,280	2348,860

• CP 17-2

T	F1	F2
-5	11719	7673
0	11579	7533,5
10	10882	6975,4
20	10184	6417,4
30	8984,4	5256,92
40	6919,64	4176,08
55	5022,300	3543,500

• CP 15-5

T	F1	F2
-5	10603	6975,4
0	10324	6670,4
10	9570,3	6221,76
20	8705,4	5293,1
30	7115	3727,7
40	5385,02	3251,16
55	4185,3	2612,64

• CP 16-4

T	F1	F2
-5	11300	7366,1
0	11021	7115
10	10603	6767,1
20	10045	6333,7
30	8928,6	5564,84
40	6891,7	3747,04
55	5357,100	3208,700

• CP 17-3

T	F1	F2
-5	11188,8	7394
0	11021	7254,5
10	10324	6696,4
20	9626,1	5859,4
30	8370,5	5168,8
40	6835,94	4232,8
55	3859,980	3125,000

• CP 16-1

T	F1	F2
-5	10742	7115
0	10463	6835,9
10	9877,2	6305,8
20	9347,1	6152,34
30	8231	5276,94
40	6194,2	3523,18
55	5747,800	2624,360

• CP 16-5

T	F1	F2
-5	11579	7673
0	11440	7394
10	10882	7115
20	10435,2	6495,36
30	9263,4	5580,4
40	7359,72	3904,96
55	5440,800	4352,700

• CP 17-4

T	F1	F2
-5	11300	7338,2
0	11161	7142,9
10	10463	6683,4
20	9765,6	6236,04
30	8510	4825,42
40	7170,8	3766,7
55	5608,120	2640,860

• CP 16-2

T	F1	F2
-5	11161	7282,4
0	10882	7115
10	10324	6556,9
20	9905,1	6333,7
30	8733,28	5506,28
40	7029,38	3005,16
55	5273,420	1953,100

• CP 17-1

T	F1	F2
-5	11021	7170,8
0	10742	6975,4
10	10045	6556,9
20	9430,8	5573,46
30	8370,5	4948,08
40	5691,94	3679,5
55	5859,400	2815,560

• CP 17-5

T	F1	F2
-5	10463	6835,9
0	10324	6683,4
10	9626,1	6277,9
20	8984,4	5468,72
30	7784,6	4994,74
40	6079,7	3828,56
55	5245,500	2737,240

• CP 18-1

T	F1	F2
-5	11300	7394
0	11021	7115
10	10324	6696,4
20	9905,1	6417,4
30	8844,9	5506,1
40	7617,2	3061,9
55	5496,6	3097,1

• CP 18-5

T	F1	F2
-5	10324	6835,9
0	10184	6696,4
10	9542,4	6277,9
20	9207,6	5719,9
30	8231	5273,4
40	6528,98	4185,3
55	5943,1	3348,2

• CP 19-4

T	F1	F2
-5	11440	7394
0	11161	7115
10	10435,2	6835,9
20	10045	6042,54
30	8872,8	5333,32
40	5869,3	3347,5
55	5636,200	2893,640

• CP 18-2

T	F1	F2
-5	11858	7812,5
0	11579	7533,5
10	10937,6	7115
20	10603	6935,9
30	9514,5	5715,7
40	8314,7	5039,76
55	5775,7	3599,3

• CP 19-1

T	F1	F2
-5	11161	7254,5
0	10603	6934,82
10	9765,6	6156,3
20	9598,2	6095,22
30	8482,1	5051,18
40	5079,38	3334,88
55	4045,800	2793,680

• CP 19-5

T	F1	F2
-5	11021	7254,5
0	10742	7115
10	10463	6835,9
20	9765,6	6362,84
30	8593,76	5405,96
40	6640,6	3132,3
55	4659,600	3391,300

• CP 18-3

T	F1	F2
-5	11021	7115
0	10742	7003,32
10	10184	6556,9
20	9765,6	5719,9
30	8649,6	5140,58
40	7254,48	3431,96
55	5189,7	3180,8

• CP 19-2

T	F1	F2
-5	10603	6835,9
0	10184	6556,9
10	10184	6612,7
20	9068,1	5321,62
30	8035,7	4394,14
40	6054,7	2837,24
55	4352,680	2354,600

• CP 20-1

T	F1	F2
-5	11161	7254,5
0	10882	7115
10	10184	6696,4
20	9376,72	5940,26
30	8398,4	5283,58
40	6250	3766,7
55	4882,800	2472,400

• CP 18-4

T	F1	F2
-5	12025,8	7812,5
0	11746,8	7673
10	11161	7254,5
20	10742	6863,8
30	9486,6	5998,9
40	3320,3	3202,34
55	5608,3	3738,8

• CP 19-3

T	F1	F2
-5	11021	7226,6
0	10603	6975,4
10	10742	6802,06
20	9430,8	5824,82
30	8286,8	3732,04
40	6018,88	2770,32
55	5412,940	2310,260

• CP 20-2

T	F1	F2
-5	11440	7533,5
0	11161	7254,5
10	10603	6835,9
20	9793,5	5998,9
30	8844,9	5499,42
40	7226,6	4499,48
55	5217,600	3152,900

• CP 20-3

T	F1	F2
-5	10742	7115
0	10463	6935,9
10	9905,1	6417,4
20	9207,6	5747,8
30	8286,8	5022,3
40	6082,6	3901,16
55	4659,600	2985,080

• CP 21-2

T	F1	F2
-5	11719	7673
0	11579	7533,5
10	11216,6	7254,5
20	10463	6696,4
30	9709,8	6003,76
40	6891,72	3878,34
55	5468,780	2000,040

• CP 22-1

T	F1	F2
-5	11300	7477,7
0	11021	7254,5
10	10742	6835,9
20	9626,1	6091,9
30	8649,6	5208,3
40	5905,9	3069,2
55	3439,2	2292,6

• CP 20-4

T	F1	F2
-5	11440	7394
0	11216,6	7254,5
10	10603	6835,9
20	9905,1	6274,22
30	8900,7	5223,9
40	7254,5	4324,8
55	5971,000	3014,940

• CP 21-3

T	F1	F2
-5	11579	7533,5
0	11440	7394
10	11021	7198,7
20	10324	6563,16
30	9402,9	5718,82
40	6556,9	4004,44
55	5189,700	2358,220

• CP 22-2

T	F1	F2
-5	10742	7115
0	10463	6907,5
10	10296	6361,6
20	8928,6	5766,4
30	7952	3580,7
40	6417,4	3301,7
55	3487,7	2325,133

• CP 20-5

T	F1	F2
-5	11300	7394
0	11021	7254,5
10	10463	6835,9
20	9905,1	6417,4
30	8733,3	5416,5
40	6501,14	3951,82
55	5496,640	3492,520

• CP 21-4

T	F1	F2
-5	11774,6	7645,1
0	11579	7533,5
10	11300	7338,2
20	10519	6389,5
30	9765,6	5981,3
40	7338,18	4524,44
55	5692,000	2990,680

• CP 22-3

T	F1	F2
-5	10463	6556,9
0	10324	6696,4
10	9905,1	6277,9
20	8649,6	5394,3
30	7394	4185,3
40	5998,9	3208,7
55	3208,7	2232,1

• CP 21-1

T	F1	F2
-5	11300	7533,5
0	11161	7394
10	10771,2	7041,08
20	10045	6331,86
30	9347,1	5880,58
40	7087,04	4520,1
55	5664,080	4631,700

• CP 21-5

T	F1	F2
-5	11021	6975,4
0	10882	7115
10	10491	6475,7
20	9765,6	5859,4
30	9012,3	5512,34
40	7087,08	4277,56
55	5943,100	2512,160

• CP 22-4

T	F1	F2
-5	11579	7673
0	11440	7394
10	11021	7226,6
20	9765,6	5812,9
30	8231	4882,8
40	6045,4	2929,7
55	2743,7	2185,633

• CP 22-5

T	F1	F2
-5	9905,1	6529
0	9626,1	6417,4
10	9486,6	6250
20	8231	5022,3
30	6928,9	3930,367
40	5440,8	3115,7
55	3208,7	2510,8

• CP 23-4

T	F1	F2
-5	10463	6529
0	10324	6529
10	9765,6	5998,9
20	9151,8	5580,4
30	8231	4882,8
40	6724,3	3794,62
55	4492,200	2059,720

• CP 24-3

T	F1	F2
-5	10742	7115
0	10603	7003,32
10	10184	6333,7
20	9458,7	6138,4
30	8398,4	5133,9
40	6696,4	4185,3
55	5329,200	2951,840

• CP 23-1

T	F1	F2
-5	10882	6835,9
0	10742	7115
10	10184	6501,1
20	9458,7	6138,4
30	7979,9	5106
40	6026,8	3766,78
55	4296,900	2516,420

• CP 23-5

T	F1	F2
-5	10184	6668,5
0	10100,6	6417,4
10	9626,1	6110,5
20	8928,6	5831,5
30	7868,3	5050,2
40	7198,64	4045,8
55	4687,500	2059,740

• CP 24-4

T	F1	F2
-5	11300	7394
0	11188,8	7115
10	10742	6975,4
20	10045	6558,96
30	8956,5	5385,02
40	7394	4492,2
55	5831,500	2886,400

• CP 23-2

T	F1	F2
-5	10993,2	7136,6
0	10742	7115
10	10324	6361,6
20	9486,6	6048,94
30	8286,8	5174,22
40	6082,6	3641,78
55	5412,960	2417,920

• CP 24-1

T	F1	F2
-5	10184	6780,1
0	10045	6696,4
10	9570,3	6333,7
20	8928,6	5821,84
30	7784,6	4882,8
40	6752,2	3906,3
55	5078,100	2686,580

• CP 24-5

T	F1	F2
-5	11021	7170,8
0	10882	7115
10	10351,8	6640,6
20	9765,6	6277,9
30	8705,4	5440,8
40	7254,5	4492,2
55	5468,740	3065,400

• CP 23-3

T	F1	F2
-5	10463	6752,2
0	10296	6194,2
10	9765,6	6078,8
20	9068,1	5471,52
30	7952	4882,8
40	5831,5	3510,58
55	4296,900	2119,440

• CP 24-2

T	F1	F2
-5	11021	7254,5
0	10770	7115
10	10435,2	6389,5
20	9765,6	6248,16
30	8565,84	5329,2
40	6082,6	3990
55	5496,660	2537,320

• CP 25-1

T	F1	F2
-5	11161	7115
0	10882	7115
10	10463	6835,9
20	9765,6	6250
30	8454,2	5245,5
40	7059,14	4238,82
55	5022,340	3014,920

• CP 25-2

T	F1	F2
-5	10882	7394
0	11300	7226,6
10	10854	6562,96
20	10184	6445,3
30	8956,5	5412,9
40	7031,22	3492,54
55	5189,720	2059,720

• CP 26-1

T	F1	F2
-5	11021,0	7254,5
0	10882,0	7115,0
10	10463,0	6835,9
20	9765,6	6417,4
30	8649,6	5301,3
40	7394,0	4603,8
55	6110,5	2622,8

• CP 26-5

T	F1	F2
-5	10742,0	6724,3
0	10463,0	6696,4
10	10045,0	6529,0
20	9486,6	5998,9
30	8342,6	5022,3
40	7198,7	4327,7
55	5943,1	3906,3

• CP 25-3

T	F1	F2
-5	10882	7115
0	10603	6835,9
10	10184	6216,46
20	9598,2	5859,4
30	8258,9	5106
40	6417,4	3348,2
55	5233,920	2637,040

• CP 26-2

T	F1	F2
-5	11579,0	7394,0
0	11300,0	7282,4
10	10882,0	6975,4
20	10324,0	6501,3
30	8984,4	5468,7
40	6975,5	4352,7
55	5385,0	3552,2

• CP 27-1

T	F1	F2
-5	11021,00	7254,50
0	10603,00	6975,40
10	10156,20	6138,40
20	9626,10	6100,94
30	7952,00	4413,84
40	6668,52	3014,94
55	4722,60	3492,54

• CP 25-4

T	F1	F2
-5	11440	7394
0	11300	7254,5
10	10742	6975,4
20	10212	6186,7
30	8928,6	5301,3
40	4017,9	3989,96
55	5608,300	2208,980

• CP 26-3

T	F1	F2
-5	11021,0	7087,1
0	10742,0	7115,0
10	10324,0	6808,0
20	9765,6	6276,1
30	8537,9	5301,3
40	7449,8	4324,8
55	5747,8	3403,0

• CP 27-2

T	F1	F2
-5	11858,00	7533,50
0	11300,00	7254,50
10	10882,00	6835,90
20	10296,00	6529,00
30	8007,80	4686,56
40	6863,80	4157,40
55	4743,30	2358,24

• CP 25-5

T	F1	F2
-5	10603	6975,4
0	10463	6752,2
10	9905,1	6417,4
20	9347,1	6138,4
30	8175,2	5128,88
40	6863,8	4324,8
55	4854,900	2539,100

• CP 26-4

T	F1	F2
-5	11523,4	7394,0
0	11300,0	7254,5
10	10882,0	6975,4
20	10296,0	6445,3
30	8928,6	4749,9
40	7310,3	4575,9
55	6835,9	3343,3

• CP 27-3

T	F1	F2
-5	11161,00	7254,50
0	10882,00	6947,50
10	10324,00	6529,00
20	9684,14	6277,90
30	7617,20	4185,30
40	6361,62	2567,00
55	4938,60	2238,82

• CP 27-4

T	F1	F2
-5	11579,00	7533,50
0	11300,00	7254,50
10	10742,00	6879,72
20	10184,00	6447,36
30	8231,00	4746,28
40	7115,00	4185,30
55	5496,64	2656,74

• CP 28-3

T	F1	F2
-5	9933,08	6529,00
0	9765,60	6389,50
10	9207,60	5981,64
20	8510,00	5568,80
30	7031,26	4324,80
40	5636,20	2985,10
55	4827,00	2865,66

• CP 29-2

T	F1	F2
-5	11858	7533,5
0	11440	7533,5
10	10882	7142,9
20	10128,4	6304,06
30	8007,800	4603,800
40	6194,2	3552,24
55	4659,600	2149,280

• CP 27-5

T	F1	F2
-5	11440,00	7533,50
0	11161,00	7254,50
10	10658,60	6975,40
20	10100,80	6333,90
30	8482,10	5161,80
40	7394,00	4216,16
55	5580,36	2968,68

• CP 28-4

T	F1	F2
-5	11579,00	7533,50
0	11300,00	7407,74
10	10742,00	6975,40
20	10045,00	6361,60
30	8761,20	5189,70
40	5943,10	3761,18
55	5943,08	2328,38

• CP 29-3

T	F1	F2
-5	11161	7394
0	10882	6975,4
10	10324	6696,4
20	9486,6	6138,4
30	7868,300	4715,400
40	5357,1	3598,16
55	3869,340	2179,120

• CP 28-1

T	F1	F2
-5	10882,00	7254,50
0	10547,00	6975,40
10	10045,00	6612,70
20	9247,10	6138,40
30	7840,40	4603,80
40	5267,40	3611,94
55	5217,62	3048,58

• CP 28-5

T	F1	F2
-5	10324,00	6975,40
0	10184,00	6835,90
10	9626,10	6138,40
20	9096,00	5831,50
30	7645,10	4855,70
40	5831,48	3305,42
55	4687,50	3082,34

• CP 29-4

T	F1	F2
-5	11858	7673
0	11551,2	7421,9
10	11021	7115
20	10240	6417,4
30	8398,400	5189,760
40	7561,4	4089,58
55	5245,500	2358,240

• CP 28-2

T	F1	F2
-5	11161,00	7198,70
0	10742,00	7115,00
10	10324,00	6696,40
20	9626,10	5971,00
30	8231,00	5033,16
40	5468,72	3522,36
55	5412,94	2716,42

• CP 29-1

T	F1	F2
-5	11858	7784,6
0	11579	7394
10	10882	7115
20	10147,2	6447,76
30	8649,580	5189,700
40	5775,7	3641,78
55	3487,700	3093,400

• CP 29-5

T	F1	F2
-5	10630,8	6863,82
0	10463	6863,8
10	9933,08	6556,9
20	9207,6	5955,68
30	8035,700	4799,400
40	6194,2	3373,12
55	5245,520	2626,880

• CP 30-1

T	F1	F2
-5	10603	6835,9
0	10324	6724,3
10	9821,4	6277,9
20	9068,1	5719,9
30	7812,5	4715,4
40	6445,3	3627,2
55	5524,560	2238,820

• CP 30-5

T	F1	F2
-5	11719	7784,6
0	11579	7645,1
10	11161	7394
20	10324	6808
30	8984,4	5608,3
40	6947,52	3761,18
55	5831,500	3074,640

• CP 30-2

T	F1	F2
-5	11300	7533,5
0	11021	7282,4
10	10603	6975,4
20	9765,6	6361,6
30	8537,92	5078,64
40	5022,3	3571,4
55	5385,000	2865,680

• CP 30-3

T	F1	F2
-5	10742	7115
0	10463	6975,4
10	10045	6668,5
20	9207,6	5963,3
30	7756,7	4882,8
40	6250	3501,56
55	5050,200	3074,620

• CP 30-4

T	F1	F2
-5	11300	7394
0	11021	7254,5
10	10603	6808
20	9765,6	6240,68
30	8426,3	5161,8
40	6668,5	3561,26
55	5440,820	2776,120

APÊNDICE D

- CP 01-1

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,564	6,923
1,529	0,25	4,537	6,931
1,636	0,34	4,265	6,975
1,561	0,28	4,449	6,948
1,726	0,40	4,070	6,991
1,775	0,43	3,967	6,997
1,918	0,53	3,613	7,015

- CP 01-2

f1/f2	v	K2	K1
1,537	0,26	4,564	7,041
1,547	0,26	4,564	7,041
1,583	0,29	4,473	7,060
1,578	0,29	4,473	7,060
1,758	0,42	4,048	7,110
1,692	0,37	4,217	7,095
1,978	0,57	3,522	7,149

- CP 01-3

f1/f2	v	K2	K1
1,537	0,25	4,591	8,461
1,591	0,29	4,500	8,234
1,684	0,35	4,357	7,881
1,622	0,31	4,453	8,118
1,759	0,40	4,236	7,581
1,950	0,56	3,863	6,649
2,048	0,68	3,587	5,956

- CP 01-4

f1/f2	v	K2	K1
1,543	0,26	4,649	7,198
1,562	0,27	4,618	7,205
1,643	0,33	4,424	7,242
1,658	0,34	4,391	7,248
1,727	0,39	4,220	7,271
1,661	0,34	4,391	7,248
1,730	0,39	4,220	7,271

- CP 01-5

f1/f2	v	K2	K1
1,562	0,27	4,618	7,100
1,588	0,29	4,555	7,113
1,630	0,33	4,424	7,134
1,664	0,35	4,358	7,143
1,676	0,36	4,324	7,147
1,710	0,39	4,220	7,158
1,742	0,40	4,186	7,162

- CP 02-1

f1/f2	v	K2	K1
1,509	0,24	4,564	6,923
1,529	0,25	4,537	6,931
1,532	0,26	4,508	6,937
1,558	0,28	4,449	6,948
1,605	0,31	4,359	6,964
1,710	0,39	4,103	6,989
1,619	0,32	4,328	6,968

- CP 02-2

f1/f2	v	K2	K1
1,545	0,26	4,536	6,989
1,547	0,26	4,536	6,989
1,617	0,32	4,344	7,021
1,633	0,33	4,307	7,026
1,650	0,34	4,271	7,030
1,697	0,37	4,193	7,039
1,806	0,45	3,922	7,060

- CP 02-3

f1/f2	v	K2	K1
1,537	0,26	4,508	6,937
1,558	0,28	4,449	6,948
1,562	0,28	4,449	6,948
1,587	0,30	4,390	6,960
1,641	0,34	4,265	6,975
1,719	0,39	4,103	6,989
1,826	0,46	3,863	7,003

- CP 02-4

f1/f2	v	K2	K1
1,545	0,27	4,478	6,943
1,547	0,27	4,478	6,943
1,620	0,32	4,328	6,968
1,636	0,34	4,265	6,975
1,692	0,37	4,168	6,984
1,697	0,38	4,136	6,986
1,750	0,41	4,036	6,993

- CP 02-5

f1/f2	v	K2	K1
1,558	0,27	4,562	7,100
1,549	0,26	4,593	7,094
1,553	0,27	4,562	7,100
1,551	0,27	4,562	7,100
1,641	0,33	4,328	7,134
1,697	0,37	4,241	7,151
1,792	0,44	4,002	7,174

- CP 03-1

f1/f2	v	K2	K1
1,549	0,27	4,478	6,943
1,520	0,25	4,537	6,931
1,578	0,29	4,419	6,954
1,692	0,37	4,168	6,984
1,686	0,37	4,168	6,984
1,711	0,39	4,103	6,989
1,854	0,48	3,792	7,006

- CP 03-2

f1/f2	v	K2	K1
1,547	0,27	4,478	6,943
1,569	0,28	4,449	6,948
1,591	0,30	4,390	6,960
1,706	0,38	4,136	6,986
1,667	0,36	4,201	6,981
1,536	0,26	4,508	6,937
1,846	0,48	3,792	7,006

• CP 03-3

f1/f2	v	K2	K1
1,537	0,26	4,508	6,937
1,521	0,25	4,537	6,931
1,648	0,34	4,265	6,975
1,610	0,32	4,328	6,968
1,649	0,35	4,234	6,979
1,724	0,40	4,070	6,991
1,803	0,45	3,899	7,001

• CP 04-2

f1/f2	v	K2	K1
1,536	0,26	4,508	6,937
1,509	0,24	4,564	6,923
1,574	0,29	4,419	6,954
1,656	0,35	4,234	6,979
1,709	0,39	4,103	6,989
1,570	0,29	4,419	6,954
1,669	0,36	4,201	6,981

• CP 05-1

f1/f2	v	K2	K1
1,509	0,24	4,564	6,923
1,529	0,25	4,537	6,931
1,560	0,28	4,449	6,948
1,565	0,29	4,419	6,954
1,723	0,40	4,070	6,991
1,679	0,37	4,168	6,984
1,618	0,32	4,328	6,968

• CP 03-4

f1/f2	v	K2	K1
1,549	0,26	4,595	7,094
1,551	0,27	4,567	7,100
1,651	0,34	4,281	7,139
1,577	0,29	4,501	7,113
1,639	0,33	4,328	7,134
1,654	0,34	4,281	7,139
2,105	0,66	3,233	7,238

• CP 04-3

f1/f2	v	K2	K1
1,518	0,24	4,564	6,923
1,519	0,24	4,564	6,923
1,634	0,33	4,296	6,971
1,596	0,30	4,390	6,960
1,778	0,43	3,967	6,997
1,606	0,31	4,359	6,964
2,039	0,63	3,255	7,033

• CP 05-2

f1/f2	v	K2	K1
1,545	0,26	4,621	7,146
1,558	0,27	4,590	7,153
1,608	0,31	4,444	7,178
1,594	0,30	4,496	7,173
1,735	0,40	4,163	7,219
1,929	0,54	3,678	7,265
1,635	0,33	4,339	7,188

• CP 03-5

f1/f2	v	K2	K1
1,529	0,25	4,537	6,931
1,520	0,25	4,537	6,931
1,578	0,29	4,419	6,954
1,558	0,28	4,449	6,948
1,622	0,32	4,328	6,968
1,938	0,55	3,541	7,019
1,952	0,56	3,505	7,021

• CP 04-4

f1/f2	v	K2	K1
1,547	0,26	4,593	7,094
1,538	0,26	4,593	7,094
1,596	0,30	4,470	7,120
1,610	0,31	4,423	7,124
1,639	0,33	4,328	7,134
1,727	0,39	4,173	7,158
1,978	0,57	3,548	7,212

• CP 05-3

f1/f2	v	K2	K1
1,509	0,25	4,537	6,931
1,577	0,29	4,419	6,954
1,529	0,25	4,537	6,931
1,569	0,28	4,449	6,948
1,706	0,38	4,136	6,986
1,655	0,35	4,234	6,979
1,721	0,39	4,103	6,989

• CP 04-1

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,564	6,923
1,490	0,22	4,619	6,906
1,511	0,24	4,564	6,923
1,518	0,24	4,564	6,923
1,568	0,28	4,449	6,948
2,019	0,67	3,111	7,041
2,119	0,70	3,004	7,046

• CP 04-5

f1/f2	v	K2	K1
1,528	0,25	4,537	6,931
1,519	0,24	4,564	6,923
1,569	0,28	4,449	6,948
1,551	0,27	4,478	6,943
1,684	0,37	4,168	6,984
1,667	0,36	4,201	6,981
1,836	0,47	3,827	7,005

• CP 05-4

f1/f2	v	K2	K1
1,527	0,25	4,595	7,035
1,608	0,31	4,401	7,071
1,540	0,26	4,564	7,041
1,597	0,30	4,443	7,066
1,771	0,42	4,048	7,110
2,017	0,58	3,486	7,151
1,815	0,45	3,945	7,119

• CP 05-5

f1/f2	v	K2	K1
1,509	0,23	4,650	7,017
1,519	0,24	4,623	7,026
1,551	0,27	4,534	7,048
1,582	0,29	4,473	7,060
1,730	0,40	4,116	7,105
1,636	0,33	4,318	7,080
1,556	0,27	4,534	7,048

• CP 06-4

f1/f2	v	K2	K1
1,537	0,26	4,508	6,937
1,569	0,28	4,449	6,948
1,562	0,28	4,449	6,948
1,578	0,29	4,419	6,954
1,641	0,34	4,265	6,975
1,625	0,33	4,296	6,971
1,740	0,41	4,036	6,993

• CP 07-3

f1/f2	v	K2	K1
1,547	0,27	4,478	6,943
1,551	0,27	4,478	6,943
1,618	0,32	4,328	6,968
1,585	0,30	4,390	6,960
1,588	0,30	4,390	6,960
1,792	0,44	3,933	6,999
2,077	0,66	3,147	7,039

• CP 06-1

f1/f2	v	K2	K1
1,500	0,22	4,738	7,110
1,628	0,32	4,391	7,183
1,535	0,25	4,652	7,139
1,613	0,31	4,444	7,178
1,606	0,31	4,444	7,178
1,913	0,52	3,747	7,259
1,550	0,27	4,590	7,153

• CP 06-5

f1/f2	v	K2	K1
1,536	0,26	4,508	6,937
1,547	0,27	4,478	6,943
1,576	0,29	4,419	6,954
1,610	0,32	4,328	6,968
1,605	0,31	4,359	6,964
1,694	0,38	4,136	6,986
1,750	0,41	4,036	6,993

• CP 07-4

f1/f2	v	K2	K1
1,538	0,26	4,564	7,041
1,540	0,26	4,564	7,041
1,569	0,28	4,504	7,054
1,600	0,30	4,443	7,066
1,774	0,42	4,048	7,110
1,696	0,37	4,217	7,095
2,083	0,63	3,310	7,164

• CP 06-2

f1/f2	v	K2	K1
1,537	0,26	4,538	6,989
1,614	0,31	4,380	7,017
1,551	0,27	4,511	6,995
1,610	0,31	4,380	7,017
1,711	0,38	4,159	7,042
1,813	0,45	3,922	7,060
1,607	0,31	4,380	7,017

• CP 07-1

f1/f2	v	K2	K1
1,531	0,25	4,595	7,035
1,532	0,25	4,595	7,035
1,558	0,27	4,534	7,048
1,579	0,29	4,473	7,060
1,833	0,46	3,909	7,121
1,773	0,42	4,048	7,110
1,667	0,35	4,360	7,089

• CP 07-5

f1/f2	v	K2	K1
1,538	0,26	4,621	7,146
1,540	0,26	4,621	7,146
1,622	0,32	4,391	7,183
1,585	0,29	4,528	7,166
1,963	0,56	3,609	7,272
1,736	0,40	4,163	7,219
1,571	0,28	4,559	7,159

• CP 06-3

f1/f2	v	K2	K1
1,529	0,25	4,623	7,087
1,648	0,34	4,281	7,139
1,578	0,29	4,501	7,113
1,620	0,32	4,375	7,129
1,667	0,35	4,234	7,143
1,655	0,34	4,281	7,139
1,859	0,48	3,863	7,186

• CP 07-2

f1/f2	v	K2	K1
1,556	0,27	4,562	7,100
1,538	0,26	4,593	7,094
1,652	0,34	4,281	7,139
1,692	0,37	4,241	7,151
2,038	0,61	3,408	7,223
1,826	0,46	3,932	7,180
1,786	0,43	4,036	7,171

• CP 08-1

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,623	7,026
1,562	0,28	4,504	7,054
1,596	0,30	4,443	7,066
1,610	0,31	4,401	7,071
1,667	0,35	4,234	7,089
1,815	0,45	3,945	7,119
1,843	0,47	3,874	7,124

• CP 08-2

f1/f2	v	K2	K1
1,538	0,26	4,593	7,094
1,583	0,29	4,501	7,113
1,618	0,32	4,375	7,129
1,592	0,30	4,470	7,120
1,649	0,34	4,281	7,139
1,752	0,41	4,105	7,165
1,864	0,48	3,863	7,186

• CP 08-3

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,564	6,923
1,531	0,25	4,537	6,931
1,543	0,26	4,508	6,937
1,512	0,24	4,564	6,923
1,649	0,35	4,234	6,979
1,695	0,38	4,136	6,986
1,888	0,51	3,684	7,012

• CP 08-4

f1/f2	v	K2	K1
1,558	0,27	4,534	7,048
1,571	0,28	4,504	7,054
1,553	0,27	4,534	7,048
1,545	0,26	4,564	7,041
1,658	0,35	4,234	7,089
1,582	0,29	4,473	7,060
1,843	0,47	3,874	7,124

• CP 08-5

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,681	7,129
1,562	0,27	4,590	7,153
1,543	0,26	4,621	7,146
1,644	0,34	4,286	7,193
1,658	0,34	4,286	7,193
1,767	0,42	4,094	7,226
1,615	0,31	4,444	7,178

• CP 09-1

f1/f2	v	K2	K1
1,528	0,25	4,566	6,983
1,560	0,27	4,506	6,995
1,587	0,29	4,446	7,007
1,558	0,27	4,506	6,995
1,649	0,34	4,271	7,030
1,685	0,37	4,193	7,039
1,873	0,49	3,780	7,068

• CP 09-2

f1/f2	v	K2	K1
1,545	0,27	4,478	6,943
1,538	0,26	4,508	6,937
1,551	0,27	4,478	6,943
1,556	0,27	4,478	6,943
1,667	0,36	4,201	6,981
2,000	0,60	3,362	7,028
1,750	0,41	4,036	6,993

• CP 09-4

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,593	6,974
1,612	0,31	4,380	7,017
1,596	0,30	4,417	7,013
1,651	0,34	4,271	7,030
1,586	0,29	4,446	7,007
1,763	0,42	4,025	7,053
1,821	0,46	3,886	7,062

• CP 09-5

f1/f2	v	K2	K1
1,528	0,25	4,537	6,931
1,638	0,34	4,265	6,975
1,589	0,30	4,390	6,960
1,591	0,30	4,390	6,960
1,658	0,35	4,234	6,979
1,769	0,43	3,967	6,997
1,978	0,58	3,434	7,024

• CP 10-1

f1/f2	v	K2	K1
1,529	0,25	4,595	7,035
1,562	0,28	4,504	7,054
1,543	0,26	4,564	7,041
1,571	0,28	4,504	7,054
1,639	0,33	4,318	7,080
1,760	0,42	4,048	7,110
1,836	0,47	3,874	7,124

• CP 10-2

f1/f2	v	K2	K1
1,564	0,28	4,449	6,948
1,547	0,27	4,478	6,943
1,562	0,28	4,449	6,948
1,644	0,34	4,265	6,975
1,605	0,31	4,359	6,964
1,697	0,38	4,136	6,986
1,840	0,47	3,827	7,005

• CP 10-3

f1/f2	v	K2	K1
1,577	0,29	4,419	6,954
1,625	0,33	4,296	6,971
1,542	0,26	4,508	6,937
1,628	0,33	4,296	6,971
1,641	0,34	4,265	6,975
1,636	0,34	4,265	6,975
1,865	0,49	3,756	7,008

• CP 10-4

f1/f2	v	K2	K1
1,528	0,25	4,595	7,035
1,612	0,31	4,401	7,071
1,562	0,28	4,504	7,054
1,596	0,30	4,443	7,066
1,667	0,35	4,234	7,089
1,625	0,32	4,360	7,075
1,773	0,42	4,048	7,110

• CP 10-5

f1/f2	v	K2	K1
1,547	0,27	4,478	6,943
1,562	0,28	4,449	6,948
1,583	0,29	4,419	6,954
1,548	0,27	4,478	6,943
1,571	0,29	4,419	6,954
1,697	0,38	4,136	6,986
1,622	0,32	4,328	6,968

• CP 11-1

f1/f2	v	K2	K1
1,538	0,26	4,536	6,989
1,529	0,25	4,566	6,983
1,553	0,27	4,506	6,995
1,600	0,30	4,417	7,013
1,811	0,45	3,922	7,060
1,761	0,42	4,025	7,053
1,780	0,43	3,990	7,055

• CP 11-2

f1/f2	v	K2	K1
1,537	0,26	4,536	6,989
1,528	0,25	4,566	6,983
1,551	0,27	4,506	6,995
1,601	0,31	4,380	7,017
1,695	0,37	4,193	7,039
1,792	0,44	3,956	7,057
1,868	0,49	3,780	7,068

• CP 11-3

f1/f2	v	K2	K1
1,529	0,25	4,566	6,983
1,540	0,26	4,536	6,989
1,548	0,26	4,536	6,989
1,650	0,34	4,271	7,030
1,678	0,36	4,226	7,037
1,875	0,49	3,780	7,068
2,200	0,66	3,176	7,105

• CP 11-4

f1/f2	v	K2	K1
1,574	0,29	4,419	6,954
1,566	0,28	4,449	6,948
1,580	0,29	4,419	6,954
1,633	0,33	4,296	6,971
1,676	0,36	4,201	6,981
1,655	0,35	4,234	6,979
2,036	0,63	3,255	7,033

• CP 11-5

f1/f2	v	K2	K1
1,547	0,27	4,478	6,943
1,509	0,24	4,564	6,923
1,540	0,26	4,508	6,937
1,591	0,30	4,390	6,960
1,684	0,37	4,168	6,984
1,750	0,41	4,036	6,993
1,829	0,47	3,827	7,005

• CP 12-1

f1/f2	v	K2	K1
1,538	0,26	4,508	6,937
1,529	0,25	4,537	6,931
1,521	0,25	4,537	6,931
1,535	0,26	4,508	6,937
1,561	0,28	4,449	6,948
1,667	0,36	4,201	6,983
2,000	0,60	3,362	7,028

• CP 12-2

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,564	6,923
1,538	0,26	4,508	6,937
1,551	0,27	4,478	6,943
1,628	0,33	4,296	6,971
1,597	0,30	4,390	6,960
1,625	0,33	4,296	6,971
1,652	0,35	4,234	6,979

• CP 12-3

f1/f2	v	K2	K1
1,510	0,24	4,564	6,923
1,531	0,25	4,537	6,931
1,543	0,26	4,508	6,937
1,610	0,32	4,328	6,968
1,639	0,34	4,265	6,975
1,607	0,31	4,359	6,964
1,554	0,27	4,478	6,943

• CP 12-4

f1/f2	v	K2	K1
1,547	0,27	4,478	6,943
1,538	0,26	4,508	6,937
1,551	0,27	4,478	6,943
1,578	0,29	4,419	6,954
1,623	0,33	4,296	6,971
1,677	0,36	4,201	6,983
1,849	0,48	3,792	7,007

• CP 12-5

f1/f2	v	K2	K1
1,528	0,25	4,537	6,931
1,519	0,24	4,564	6,923
1,531	0,25	4,537	6,931
1,543	0,26	4,508	6,937
1,615	0,32	4,328	6,968
1,536	0,26	4,508	6,937
1,542	0,26	4,508	6,937

• CP 13-1

f1/f2	v	K2	K1
1,481	0,21	4,646	6,897
1,500	0,23	4,591	6,914
1,538	0,26	4,508	6,937
1,622	0,32	4,328	6,968
1,687	0,37	4,168	6,984
1,875	0,50	3,720	7,010
1,412	0,14	4,823	6,814

• CP 13-2

f1/f2	v	K2	K1
1,528	0,25	4,566	6,983
1,549	0,27	4,506	6,995
1,553	0,27	4,506	6,995
1,641	0,34	4,271	7,030
1,629	0,33	4,307	7,026
1,680	0,36	4,226	7,037
1,643	0,34	4,271	7,030

• CP 14-1

f1/f2	v	K2	K1
1,500	0,23	4,591	6,914
1,500	0,23	4,591	6,914
1,500	0,23	4,591	6,914
1,519	0,24	4,564	6,923
2,057	0,65	3,183	7,037
2,050	0,64	3,219	7,035
2,163	0,73	2,897	7,051

• CP 14-5

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,564	6,923
1,745	0,41	4,036	6,993
1,614	0,32	4,328	6,968
1,625	0,33	4,296	6,971
1,941	0,55	3,541	7,019
1,680	0,37	4,168	6,984
1,745	0,41	4,036	6,993

• CP 13-3

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,623	7,026
1,510	0,23	4,650	7,017
1,560	0,27	4,534	7,048
1,676	0,36	4,250	7,092
2,280	0,75	2,887	7,194
1,792	0,44	3,979	7,116
1,867	0,49	3,804	7,129

• CP 14-2

f1/f2	v	K2	K1
1,529	0,25	4,623	7,087
1,531	0,25	4,623	7,087
1,581	0,29	4,501	7,113
1,684	0,36	4,275	7,147
1,767	0,42	4,071	7,168
2,143	0,69	3,141	7,247
1,978	0,57	3,548	7,212

• CP 15-1

f1/f2	v	K2	K1
1,500	0,23	4,591	6,914
1,520	0,25	4,537	6,931
1,533	0,26	4,508	6,937
1,533	0,26	4,508	6,937
2,080	0,66	3,147	7,039
1,955	0,56	3,505	7,021
1,688	0,37	4,168	6,984

• CP 13-4

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,564	6,923
1,510	0,24	4,564	6,923
1,582	0,29	4,419	6,954
1,600	0,31	4,359	6,964
1,965	0,57	3,469	7,023
1,875	0,50	3,720	7,010
1,867	0,49	3,756	7,008

• CP 14-3

f1/f2	v	K2	K1
1,500	0,22	4,678	7,008
1,582	0,29	4,473	7,060
1,541	0,26	4,564	7,041
1,572	0,28	4,504	7,054
2,000	0,57	3,522	7,149
1,818	0,45	3,945	7,119
1,803	0,45	3,945	7,119

• CP 15-2

f1/f2	v	K2	K1
1,540	0,26	4,508	6,937
1,519	0,24	4,564	6,923
1,565	0,28	4,449	6,948
1,625	0,33	4,296	6,971
1,780	0,43	3,967	6,997
1,810	0,45	3,899	7,001
1,500	0,23	4,591	6,914

• CP 13-5

f1/f2	v	K2	K1
1,540	0,26	4,508	6,937
1,520	0,25	4,537	6,931
1,596	0,30	4,390	6,960
1,605	0,31	4,359	6,964
2,435	0,95	2,109	7,091
1,870	0,50	3,720	7,010
1,944	0,56	3,505	7,021

• CP 14-4

f1/f2	v	K2	K1
1,538	0,26	4,508	6,937
1,540	0,26	4,508	6,937
1,596	0,30	4,390	6,960
1,650	0,35	4,234	6,979
1,942	0,55	3,541	7,019
1,826	0,46	3,863	7,003
1,868	0,49	3,756	7,008

• CP 15-3

f1/f2	v	K2	K1
1,510	0,24	4,564	6,923
1,545	0,27	4,478	6,943
1,551	0,27	4,478	6,943
1,587	0,30	4,390	6,960
2,019	0,62	3,290	7,032
1,928	0,54	3,577	7,017
1,929	0,54	3,577	7,017

• CP 15-4

f1/f2	v	K2	K1
1,540	0,26	4,593	7,094
1,542	0,26	4,593	7,094
1,533	0,25	4,623	7,087
1,639	0,33	4,328	7,134
1,724	0,39	4,173	7,158
1,655	0,34	4,281	7,139
1,600	0,30	4,470	7,120

• CP 16-3

f1/f2	v	K2	K1
1,529	0,25	4,595	7,035
1,540	0,26	4,564	7,041
1,553	0,27	4,534	7,048
1,568	0,28	4,504	7,054
1,605	0,31	4,401	7,071
1,637	0,33	4,318	7,080
2,353	0,80	2,711	7,207

• CP 17-2

f1/f2	v	K2	K1
1,527	0,25	4,537	6,931
1,537	0,26	4,508	6,937
1,560	0,28	4,449	6,948
1,587	0,30	4,390	6,960
1,684	0,37	4,168	6,984
1,767	0,43	3,967	6,997
1,440	0,17	4,749	6,854

• CP 15-5

f1/f2	v	K2	K1
1,520	0,25	4,537	6,931
1,542	0,26	4,508	6,937
1,551	0,27	4,478	6,943
1,632	0,33	4,296	6,971
1,889	0,51	3,684	7,012
1,739	0,41	4,036	6,993
1,667	0,36	4,201	6,981

• CP 16-4

f1/f2	v	K2	K1
1,528	0,25	4,537	6,931
1,549	0,27	4,478	6,943
1,551	0,27	4,478	6,943
1,600	0,31	4,359	6,964
1,600	0,31	4,359	6,964
1,815	0,46	3,863	7,003
1,652	0,35	4,234	6,979

• CP 17-3

f1/f2	v	K2	K1
1,509	0,24	4,564	6,923
1,519	0,24	4,564	6,923
1,542	0,26	4,508	6,937
1,643	0,34	4,265	6,975
1,648	0,34	4,265	6,975
1,681	0,37	4,168	6,984
1,517	0,24	4,564	6,923

• CP 16-1

f1/f2	v	K2	K1
1,510	0,23	4,621	6,966
1,531	0,25	4,566	6,983
1,578	0,29	4,446	7,007
1,523	0,24	4,593	6,974
1,577	0,29	4,446	7,007
1,731	0,40	4,093	7,048
2,134	0,63	3,282	7,099

• CP 16-5

f1/f2	v	K2	K1
1,509	0,24	4,564	6,923
1,547	0,27	4,478	6,943
1,529	0,25	4,537	6,931
1,596	0,30	4,390	6,960
1,650	0,35	4,234	6,979
1,836	0,47	3,827	7,005
1,258	0,00	0,000	0,000

• CP 17-4

f1/f2	v	K2	K1
1,528	0,25	4,566	6,983
1,569	0,28	4,476	7,001
1,578	0,29	4,446	7,007
1,591	0,30	4,417	7,013
1,630	0,33	4,307	7,026
1,889	0,50	3,744	7,071
2,105	0,61	3,353	7,094

• CP 16-2

f1/f2	v	K2	K1
1,538	0,26	4,564	7,041
1,529	0,25	4,595	7,035
1,575	0,28	4,504	7,054
1,578	0,29	4,473	7,060
1,615	0,31	4,401	7,071
2,381	0,81	2,676	7,209
2,714	1,02	1,936	7,262

• CP 17-1

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,593	6,974
1,540	0,26	4,536	6,989
1,532	0,25	4,566	6,983
1,700	0,37	4,193	7,039
1,714	0,39	4,126	7,045
1,787	0,43	3,990	7,055
2,100	0,61	3,353	7,094

• CP 17-5

f1/f2	v	K2	K1
1,531	0,25	4,652	7,139
1,542	0,26	4,621	7,146
1,533	0,25	4,652	7,139
1,641	0,33	4,339	7,188
1,582	0,29	4,528	7,166
1,518	0,24	4,681	7,129
1,925	0,53	3,713	7,262

• CP 18-1

f1/f2	v	K2	K1
1,528	0,25	4,537	6,931
1,549	0,27	4,478	6,943
1,542	0,26	4,508	6,937
1,543	0,26	4,508	6,937
1,597	0,30	4,390	6,960
2,500	1,00	1,930	7,100
1,773	0,43	3,967	6,997

• CP 18-5

f1/f2	v	K2	K1
1,510	0,24	4,564	6,923
1,521	0,25	4,537	6,931
1,511	0,24	4,564	6,923
1,610	0,32	4,328	6,968
1,553	0,27	4,478	6,943
1,533	0,26	4,508	6,937
1,792	0,44	3,933	6,999

• CP 19-4

f1/f2	v	K2	K1
1,547	0,26	4,536	6,989
1,569	0,28	4,476	7,001
1,531	0,25	4,566	6,983
1,647	0,34	4,271	7,030
1,656	0,35	4,234	7,034
1,967	0,54	3,602	7,079
1,967	0,54	3,602	7,079

• CP 18-2

f1/f2	v	K2	K1
1,518	0,24	4,564	6,923
1,537	0,26	4,508	6,937
1,529	0,25	4,537	6,931
1,529	0,25	4,537	6,931
1,640	0,34	4,265	6,975
1,667	0,36	4,201	6,981
1,577	0,29	4,419	6,954

• CP 19-1

f1/f2	v	K2	K1
1,538	0,26	4,508	6,937
1,520	0,25	4,537	6,931
1,591	0,30	4,390	6,960
1,587	0,30	4,390	6,960
1,675	0,36	4,201	6,981
1,517	0,24	4,564	6,923
1,509	0,24	4,564	6,923

• CP 19-5

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,564	6,923
1,510	0,24	4,564	6,923
1,531	0,25	4,537	6,931
1,538	0,26	4,508	6,937
1,605	0,31	4,359	6,964
2,157	0,73	2,897	7,051
1,401	0,13	4,846	6,798

• CP 18-3

f1/f2	v	K2	K1
1,549	0,26	4,593	7,094
1,540	0,26	4,593	7,094
1,553	0,27	4,562	7,100
1,707	0,38	4,207	7,155
1,676	0,36	4,275	7,147
2,080	0,65	3,268	7,235
1,609	0,31	4,423	7,124

• CP 19-2

f1/f2	v	K2	K1
1,551	0,26	4,492	8,429
1,553	0,26	4,492	8,429
1,553	0,26	4,492	8,429
1,691	0,36	4,261	7,836
1,871	0,48	3,979	7,116
2,115	0,72	3,430	5,713
2,164	0,77	3,315	5,421

• CP 20-1

f1/f2	v	K2	K1
1,538	0,26	4,508	6,937
1,529	0,25	4,537	6,931
1,521	0,25	4,537	6,931
1,589	0,30	4,390	6,960
1,602	0,31	4,359	6,964
1,667	0,36	4,201	6,981
2,103	0,68	3,076	7,042

• CP 18-4

f1/f2	v	K2	K1
1,536	0,26	4,508	6,937
1,527	0,25	4,537	6,931
1,538	0,26	4,508	6,937
1,571	0,29	4,419	6,954
1,581	0,29	4,419	6,954
1,213	0,00	0,000	0,000
1,482	0,21	4,646	6,897

• CP 19-3

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,593	6,974
1,520	0,24	4,593	6,974
1,571	0,28	4,476	7,001
1,631	0,33	4,307	7,026
2,185	0,66	3,176	7,105
2,199	0,66	3,176	7,105
2,294	0,71	2,998	7,116

• CP 20-2

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,564	6,923
1,538	0,26	4,508	6,937
1,551	0,27	4,478	6,943
1,628	0,33	4,296	6,971
1,615	0,32	4,328	6,968
1,620	0,32	4,328	6,968
1,609	0,31	4,359	6,964

• CP 20-3

f1/f2	v	K2	K1
1,510	0,24	4,593	6,974
1,509	0,23	4,621	6,966
1,543	0,26	4,536	6,989
1,610	0,31	4,380	7,017
1,639	0,34	4,271	7,030
1,607	0,31	4,380	7,017
1,542	0,26	4,536	6,989

• CP 21-2

f1/f2	v	K2	K1
1,527	0,25	4,537	6,931
1,537	0,26	4,508	6,937
1,538	0,26	4,508	6,937
1,562	0,28	4,449	6,948
1,636	0,34	4,265	6,975
1,690	0,37	4,168	6,984
2,876	1,30	0,856	7,154

• CP 22-1

f1/f2	v	K2	K1
1,500	0,23	4,591	6,914
1,519	0,24	4,564	6,923
1,571	0,29	4,419	6,954
1,568	0,28	4,449	6,948
1,676	0,36	4,201	6,981
1,909	0,53	3,613	7,015
1,521	0,25	4,537	6,931

• CP 20-4

f1/f2	v	K2	K1
1,547	0,27	4,534	7,048
1,558	0,27	4,534	7,048
1,551	0,27	4,534	7,048
1,578	0,29	4,473	7,060
1,709	0,38	4,183	7,098
1,710	0,38	4,183	7,098
2,010	0,62	3,346	7,161

• CP 21-3

f1/f2	v	K2	K1
1,537	0,26	4,508	6,937
1,547	0,27	4,478	6,943
1,549	0,27	4,478	6,943
1,572	0,29	4,419	6,954
1,659	0,35	4,234	6,979
1,690	0,37	4,168	6,984
2,161	0,73	2,897	7,051

• CP 22-2

f1/f2	v	K2	K1
1,510	0,23	4,650	7,017
1,522	0,25	4,595	7,035
1,575	0,29	4,473	7,060
1,561	0,28	4,504	7,054
2,192	0,78	2,782	7,202
2,000	0,61	3,381	7,159
1,563	0,28	4,504	7,054

• CP 20-5

f1/f2	v	K2	K1
1,528	0,25	4,566	6,983
1,519	0,24	4,593	6,974
1,531	0,25	4,566	6,983
1,543	0,26	4,536	6,989
1,615	0,32	4,344	7,021
1,536	0,26	4,536	6,989
1,585	0,29	4,446	7,007

• CP 21-4

f1/f2	v	K2	K1
1,545	0,27	4,478	6,943
1,537	0,26	4,508	6,937
1,558	0,28	4,449	6,948
1,630	0,33	4,296	6,971
1,633	0,33	4,296	6,971
1,750	0,41	4,036	6,993
1,913	0,53	3,613	7,015

• CP 22-3

f1/f2	v	K2	K1
1,596	0,30	4,417	7,013
1,542	0,26	4,536	6,989
1,578	0,29	4,446	7,007
1,590	0,30	4,417	7,013
1,767	0,42	4,025	7,053
1,870	0,49	3,780	7,068
1,438	0,17	4,781	6,903

• CP 21-1

f1/f2	v	K2	K1
1,500	0,23	4,591	6,914
1,509	0,24	4,564	6,923
1,510	0,24	4,564	6,923
1,600	0,31	4,359	6,964
1,606	0,31	4,359	6,964
1,625	0,33	4,296	6,971
1,242	0,00	0,000	0,000

• CP 21-5

f1/f2	v	K2	K1
1,580	0,29	4,419	6,954
1,529	0,25	4,537	6,931
1,627	0,33	4,296	6,971
1,667	0,36	4,201	6,981
1,685	0,37	4,168	6,984
1,700	0,38	4,136	6,986
2,360	0,89	2,324	7,109

• CP 22-4

f1/f2	v	K2	K1
1,509	0,24	4,564	6,923
1,547	0,27	4,478	6,943
1,549	0,27	4,478	6,943
1,667	0,36	4,201	6,981
1,686	0,37	4,168	6,984
2,095	0,68	3,076	7,042
1,400	0,13	4,846	6,798

• CP 22-5

f1/f2	v	K2	K1
1,511	0,24	4,623	7,026
1,500	0,23	4,650	7,017
1,511	0,24	4,623	7,026
1,639	0,34	4,276	7,084
1,731	0,40	4,116	7,105
1,773	0,43	4,013	7,055
1,412	0,14	4,888	6,911

• CP 23-4

f1/f2	v	K2	K1
1,596	0,30	4,402	8,198
1,575	0,28	4,447	8,313
1,628	0,32	4,355	8,077
1,650	0,34	4,308	7,957
1,686	0,36	4,261	7,836
1,778	0,42	4,119	7,472
2,136	0,74	3,384	5,596

• CP 24-3

f1/f2	v	K2	K1
1,510	0,24	4,564	6,925
1,520	0,25	4,537	6,931
1,587	0,30	4,390	6,960
1,545	0,27	4,478	6,943
1,622	0,32	4,328	6,968
1,600	0,31	4,359	6,964
1,810	0,45	3,899	7,001

• CP 23-1

f1/f2	v	K2	K1
1,592	0,30	4,390	6,960
1,510	0,24	4,564	6,923
1,553	0,27	4,478	6,943
1,545	0,27	4,478	6,943
1,583	0,29	4,419	6,954
1,870	0,50	3,720	7,010
1,833	0,47	3,827	7,005

• CP 23-5

f1/f2	v	K2	K1
1,553	0,27	4,478	6,943
1,565	0,28	4,449	6,948
1,568	0,28	4,449	6,948
1,561	0,28	4,449	6,948
1,583	0,29	4,419	6,954
1,724	0,40	4,070	6,991
2,270	0,82	2,574	7,068

• CP 24-4

f1/f2	v	K2	K1
1,528	0,25	4,537	6,931
1,569	0,28	4,449	6,948
1,540	0,26	4,508	6,937
1,532	0,26	4,508	6,937
1,684	0,37	4,168	6,984
1,656	0,35	4,234	6,979
2,066	0,65	3,183	7,037

• CP 23-2

f1/f2	v	K2	K1
1,507	0,23	4,650	7,017
1,510	0,23	4,650	7,017
1,609	0,31	4,401	7,071
1,619	0,32	4,360	7,075
1,622	0,32	4,360	7,075
1,869	0,49	3,804	7,129
2,278	0,86	2,500	7,222

• CP 24-1

f1/f2	v	K2	K1
1,490	0,22	4,619	6,906
1,500	0,23	4,591	6,914
1,533	0,26	4,508	6,937
1,524	0,25	4,537	6,931
1,600	0,31	4,359	6,964
1,714	0,39	4,103	6,989
1,869	0,50	3,720	7,010

• CP 24-5

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,564	6,925
1,529	0,25	4,537	6,931
1,542	0,26	4,508	6,937
1,556	0,27	4,478	6,943
1,615	0,32	4,328	6,968
1,625	0,33	4,296	6,971
1,773	0,43	3,967	6,997

• CP 23-3

f1/f2	v	K2	K1
1,562	0,28	4,476	7,001
1,644	0,34	4,271	7,030
1,628	0,33	4,307	7,026
1,642	0,34	4,271	7,030
1,629	0,33	4,307	7,026
1,636	0,33	4,307	7,026
2,003	0,60	3,389	7,092

• CP 24-2

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,593	6,974
1,510	0,24	4,593	6,974
1,609	0,31	4,380	7,017
1,591	0,30	4,417	7,013
1,632	0,33	4,307	7,026
1,607	0,31	4,380	7,017
2,144	0,71	2,998	7,116

• CP 25-1

f1/f2	v	K2	K1
1,569	0,28	4,449	6,948
1,529	0,25	4,537	6,931
1,531	0,25	4,537	6,931
1,556	0,27	4,478	6,943
1,605	0,31	4,359	6,964
1,669	0,36	4,201	6,981
1,823	0,46	3,863	7,003

• CP 25-2

f1/f2	v	K2	K1
1,472	0,20	4,673	6,889
1,558	0,28	4,449	6,948
1,657	0,35	4,234	6,979
1,587	0,30	4,390	6,960
1,667	0,36	4,201	6,981
2,032	0,63	3,255	7,033
2,403	0,92	2,216	7,086

• CP 26-1

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,593	6,974
1,529	0,25	4,566	6,983
1,531	0,25	4,566	6,983
1,522	0,25	4,566	6,983
1,632	0,33	4,307	7,026
1,606	0,31	4,380	7,017
2,500	0,99	2,004	7,176

• CP 26-5

f1/f2	v	K2	K1
1,571	0,28	4,504	7,054
1,562	0,28	4,504	7,054
1,532	0,25	4,595	7,035
1,581	0,29	4,473	7,060
1,667	0,36	4,250	7,092
1,676	0,36	4,250	7,092
1,536	0,26	4,564	7,041

• CP 25-3

f1/f2	v	K2	K1
1,529	0,25	4,566	6,983
1,551	0,27	4,506	6,995
1,625	0,33	4,307	7,026
1,667	0,36	4,197	7,037
1,667	0,36	4,197	7,037
1,917	0,53	3,638	7,077
1,973	0,57	3,496	7,086

• CP 26-2

f1/f2	v	K2	K1
1,566	0,28	4,449	6,948
1,558	0,28	4,449	6,948
1,560	0,28	4,449	6,948
1,575	0,29	4,419	6,954
1,641	0,34	4,265	6,975
1,742	0,41	4,036	6,993
1,519	0,24	4,564	6,923

• CP 27-1

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,623	7,026
1,520	0,24	4,623	7,026
1,659	0,35	4,234	7,089
1,612	0,31	4,401	7,071
1,781	0,43	4,013	7,113
2,136	0,73	2,958	7,189
1,504	0,23	4,650	7,017

• CP 25-4

f1/f2	v	K2	K1
1,547	0,27	4,478	6,943
1,558	0,28	4,449	6,948
1,540	0,26	4,508	6,937
1,659	0,35	4,234	6,979
1,684	0,37	4,168	6,984
1,036	0,00	0,000	0,000
2,671	1,14	1,429	7,125

• CP 26-3

f1/f2	v	K2	K1
1,549	0,27	4,478	6,943
1,510	0,24	4,564	6,923
1,510	0,24	4,564	6,923
1,556	0,27	4,478	6,943
1,605	0,31	4,359	6,964
1,710	0,39	4,103	6,989
1,707	0,38	4,136	6,986

• CP 27-2

f1/f2	v	K2	K1
1,574	0,29	4,446	7,007
1,558	0,27	4,506	6,995
1,592	0,30	4,417	7,013
1,609	0,31	4,380	7,017
1,749	0,41	4,059	7,050
1,750	0,41	4,059	7,050
1,986	0,58	3,460	7,088

• CP 25-5

f1/f2	v	K2	K1
1,520	0,25	4,537	6,931
1,531	0,25	4,537	6,931
1,543	0,26	4,508	6,937
1,523	0,25	4,537	6,931
1,595	0,30	4,390	6,960
1,613	0,32	4,328	6,968
1,944	0,56	3,505	7,021

• CP 26-4

f1/f2	v	K2	K1
1,547	0,27	4,478	6,943
1,558	0,28	4,449	6,948
1,560	0,28	4,449	6,948
1,609	0,31	4,359	6,964
1,882	0,51	3,684	7,012
1,656	0,35	4,234	6,979
1,991	0,59	3,398	7,026

• CP 27-3

f1/f2	v	K2	K1
1,538	0,26	4,536	6,989
1,560	0,28	4,476	7,001
1,575	0,29	4,446	7,007
1,569	0,28	4,476	7,001
1,833	0,47	3,851	7,064
2,833	1,25	1,080	7,233
2,181	0,74	2,892	7,122

• CP 27-4

f1/f2	v	K2	K1
1,537	0,26	4,508	6,937
1,558	0,28	4,449	6,948
1,565	0,28	4,449	6,948
1,587	0,30	4,390	6,960
1,723	0,40	4,070	6,991
1,700	0,38	4,136	6,986
2,025	0,62	3,290	7,032

• CP 27-5

f1/f2	v	K2	K1
1,519	0,24	4,564	6,923
1,538	0,26	4,508	6,937
1,540	0,26	4,508	6,937
1,600	0,31	4,359	6,964
1,649	0,35	4,234	6,979
1,762	0,42	4,002	6,995
1,869	0,50	3,720	7,010

• CP 28-1

f1/f2	v	K2	K1
1,500	0,23	4,591	6,914
1,520	0,25	4,537	6,931
1,532	0,26	4,508	6,937
1,506	0,23	4,591	6,914
1,697	0,38	4,136	6,986
1,480	0,21	4,646	6,897
1,869	0,50	3,720	7,010

• CP 28-2

f1/f2	v	K2	K1
1,538	0,26	4,536	6,989
1,510	0,24	4,593	6,974
1,542	0,26	4,536	6,989
1,605	0,31	4,380	7,017
1,639	0,34	4,271	7,030
1,707	0,38	4,159	7,042
1,973	0,59	3,425	7,090

• CP 28-3

f1/f2	v	K2	K1
1,511	0,23	4,739	7,171
1,522	0,24	4,710	7,181
1,535	0,25	4,681	7,191
1,541	0,26	4,649	7,198
1,645	0,33	4,424	7,242
1,916	0,51	3,807	7,317
1,869	0,48	3,910	7,306

• CP 28-4

f1/f2	v	K2	K1
1,537	0,26	4,536	6,989
1,528	0,25	4,566	6,983
1,540	0,26	4,536	6,989
1,600	0,31	4,380	7,017
1,703	0,38	4,159	7,042
1,675	0,36	4,226	7,037
2,337	0,92	2,252	7,161

• CP 28-5

f1/f2	v	K2	K1
1,480	0,21	4,676	6,948
1,490	0,22	4,648	6,957
1,568	0,28	4,476	7,001
1,571	0,29	4,446	7,007
1,571	0,29	4,446	7,007
1,750	0,41	4,059	7,050
1,667	0,36	4,226	7,037

• CP 29-1

f1/f2	v	K2	K1
1,518	0,24	4,564	6,923
1,566	0,28	4,449	6,948
1,529	0,25	4,537	6,931
1,587	0,30	4,390	6,960
1,676	0,36	4,201	6,981
1,714	0,39	4,103	6,989
1,113	0,00	0,000	0,000

• CP 29-2

f1/f2	v	K2	K1
1,574	0,29	4,419	6,954
1,519	0,24	4,564	6,923
1,529	0,25	4,537	6,931
1,622	0,32	4,328	6,968
1,727	0,40	4,070	6,991
1,788	0,44	3,933	6,999
2,270	0,82	2,574	7,068

• CP 29-3

f1/f2	v	K2	K1
1,509	0,24	4,564	6,923
1,560	0,28	4,449	6,948
1,542	0,26	4,508	6,937
1,545	0,27	4,478	6,943
1,647	0,34	4,265	6,975
1,544	0,27	4,478	6,943
1,745	0,41	4,036	6,993

• CP 29-4

f1/f2	v	K2	K1
1,545	0,27	4,478	6,943
1,566	0,28	4,449	6,948
1,549	0,27	4,478	6,943
1,587	0,30	4,390	6,960
1,622	0,32	4,328	6,968
1,869	0,50	3,720	7,010
2,220	0,78	2,718	7,060

• CP 29-5

f1/f2	v	K2	K1
1,490	0,22	4,648	6,957
1,531	0,25	4,566	6,983
1,532	0,25	4,566	6,983
1,542	0,26	4,536	6,989
1,665	0,35	4,234	7,034
1,788	0,44	3,956	7,057
2,025	0,61	3,353	7,094

• CP 30-1

f1/f2	v	K2	K1
1,551	0,27	4,534	7,048
1,542	0,26	4,564	7,041
1,556	0,27	4,534	7,048
1,585	0,29	4,473	7,060
1,647	0,34	4,276	7,084
1,769	0,42	4,048	7,110
2,493	1,05	1,830	7,270

• CP 30-5

f1/f2	v	K2	K1
1,500	0,23	4,591	6,914
1,509	0,24	4,564	6,923
1,509	0,24	4,564	6,923
1,510	0,24	4,564	6,923
1,600	0,31	4,359	6,964
1,869	0,50	3,720	7,010
1,916	0,53	3,613	7,015

• CP 30-2

f1/f2	v	K2	K1
1,500	0,23	4,591	6,914
1,519	0,24	4,564	6,923
1,520	0,25	4,537	6,931
1,522	0,25	4,537	6,931
1,677	0,36	4,201	6,981
1,680	0,37	4,168	6,984
1,919	0,54	3,577	7,017

• CP 30-3

f1/f2	v	K2	K1
1,510	0,24	4,564	6,923
1,500	0,23	4,591	6,914
1,532	0,26	4,508	6,937
1,535	0,26	4,508	6,937
1,571	0,29	4,419	6,954
1,753	0,42	4,002	6,995
1,771	0,43	3,967	6,997

• CP 30-4

f1/f2	v	K1	K2
1,528	0,25	4,566	6,983
1,519	0,24	4,593	6,974
1,551	0,27	4,506	6,995
1,558	0,27	4,506	6,995
1,622	0,32	4,344	7,021
1,830	0,46	3,886	7,062
1,919	0,53	3,638	7,077