

Cristiano Stumpf

**DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE  
MATERIAIS VISCOELÁSTICOS ATRAVÉS DE AJUSTE DE  
MODELO**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós Graduação da Universidade Federal  
de Santa Catarina para a obtenção do  
Grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica.

Orientador: Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D.

Coorientador: Júlio Apolinário Cordioli,  
Dr.Eng.

Florianópolis  
2013



Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Stumpf, Cristiano  
DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MATERIAIS  
VISCOELÁSTICOS ATRAVÉS DE AJUSTE DE MODELO / Cristiano  
Stumpf ; orientador, Arcanjo Lenzi ; coorientador, Júlio  
Apolinário Cordioli. - Florianópolis, SC, 2013.  
111 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Materiais Viscoelásticos. 3.  
Controle Passivo de Vibração. 4. Ajuste de Modelos. I.  
Lenzi, Arcanjo. II. Cordioli, Júlio Apolinário. III.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.



Cristiano Stumpf

**DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE  
MATERIAIS VISCOELÁSTICOS ATRAVÉS DE AJUSTE DE  
MODELO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 04 de dezembro de 2013.

---

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr.Eng.  
Coordenador do Curso

---

Prof. Arcanjo Lenzi, Ph.D.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Júlio Apolinário Cordioli, Dr.Eng.  
Coorientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Erasmo Felipe Vergara Miranda, Dr.Eng.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Fabio Fiates Dr.Eng.  
Universidade do Sul de Santa Catarina

---

Prof. Paulo Roberto de Oliveira Bonifácio Dr.Eng.  
Instituto Federal de Santa Catarina



## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, Asmir Stumpf e Loidi Stumpf (*in memoriam*) e às minhas irmãs, Rejane Stumpf Sberze e Eliane Stumpf, pelo esforço e apoio e, principalmente, pelo exemplo que são para mim. Dedico também ao meu cunhado, José Domingos Sberze, pelo incentivo e orientação.



## AGRADECIMENTOS

A jornada foi longa e proveitosa. Foi um período de muitos aprendizados e desafios. Mas a realização de tudo só foi possível devido ao esforço e ajuda de muitas pessoas:

- À minha família pelo intenso e incansável incentivo, pelo apoio à minha formação e compreensão de minha ausência;
- Ao professor e amigo Arcanjo Lenzi pela incansável orientação e apoio, como também pelos conselhos ao longo de vários anos. Também o agradeço pela oportunidade de ter realizado atividades no Laboratório de Vibrações e Acústica, onde iniciei meu desenvolvimento na área, desde a graduação;
- Ao colega Olavo Silva, pelos constantes ensinamentos e exemplo;
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), e à Embraer S.A., pelo suporte financeiro no primeiro ano de pesquisa;
- À Whirlpool S.A. Unidade Embraco, pela disponibilidade de uso de recursos e apoio à pesquisa;
- Ao professor Júlio Cordioli, pelo incentivo, orientação e auxílio, durante o período no LVA;
- Ao Giovanni Bratti e Augusto Amador, pela parceria no trabalho, auxílio e apoio;
- E a todos os companheiros de longos anos de LVA, que nunca deixaram as dificuldades prejudicarem a boa convivência, em especial aos amigos: Thiago Mannes, Thiago Fiorentin, Leonardo Lopes, Marcos Lenzi, Luiz Lenzi Neto, Leandro Porto, Ricardo Mikio Doi, Ilka Bringhenti, Diego Masotti, Leonardo Rippel e José Magri;
- E, enfim, aos colegas de Embraco, Carlos Vendrami, Marcos Hattore, Daniel Hofmann e especialmente ao Cláudio Pellegrini, pela compreensão, apoio e incentivo à realização deste trabalho.



Julgue seu sucesso pelas coisas que você teve que renunciar para conseguir.

(Dalai Lama)



## RESUMO

Dentre as várias formas de controle vibrações, os métodos passivos são largamente utilizados na indústria. Neste contexto, o uso de materiais viscoelásticos tornou-se uma prática comum devido à simplicidade de aplicação e aos bons resultados de atenuação obtidos. As propriedades dos materiais viscoelásticos têm características particulares, pois possuem comportamento elástico e viscoso simultaneamente, e suas propriedades variam com frequência e temperatura. Maiores dissipações de energia vibratória são obtidas com estes materiais quando usados em camadas constritas, conforme observadas em aplicações aeronáuticas e automotivas devido à boa relação entre massa adicionada e dissipação obtida. Este trabalho apresenta uma revisão detalhada da determinação experimental das propriedades dinâmicas de materiais viscoelásticos em função da frequência e da temperatura as quais são submetidos. As simulações numéricas dos corpos de prova tipo viga em configuração Oberst foram realizadas pelo método de elementos finitos. As propriedades foram obtidas através do ajuste dos resultados do modelo numérico aos resultados experimentais obtidos. Os resultados obtidos neste trabalho são comparados aos fornecidos por um fabricante.

**Palavras-chave:** Materiais Viscoelásticos; Controle Passivo de Vibração; Ajuste de Modelos.



## ABSTRACT

Among the various forms of vibration control, passive methods are widely applied in the industry. In this context, the use of viscoelastic materials has become a common practice because of the simplicity of application and the good damping attenuation achieved. The properties of the viscoelastic materials have particular characteristics because they have both viscous and elastic behavior and their properties are dependent of temperature and frequency. Higher dissipation levels of vibrational energy are obtained with these materials when it used with constrained layers, as observed in aeronautical and automotive applications, due to the good relationship between the added mass and dissipation obtained. This study presents a detailed review of the experimental determination of the dynamic properties of the viscoelastic materials as a function of frequency and temperature which are submitted. The numerical simulations of beam type specimens in Oberst configuration were performed by finite element method. The properties were obtained by fitting the results of the numerical model to the experimental results. The results of this study are compared to those provided by a manufacturer.

**Keywords:** Viscoelastic Materials; Passive Vibration Control; Model Updating.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelos clássicos de comportamento viscoelástico; a-Maxwell, b-Voigt, c-padrão, d-padrão múltiplo. <b>Fonte:</b> Viscoelastic Vibration Damping (JONES, 2001).....	7
Figura 2 - Espectro típico de resposta dinâmica de uma viga engastada livre em função da temperatura. <b>Fonte:</b> Vibration Damping (NASHIF; JONES; HENDERSON, 1985).....	8
Figura 3 - Variação do módulo de elasticidade e do Fator de Perda com a temperatura. <b>Fonte:</b> Vibration Damping (NASHIF; JONES; HENDERSON, 1985).....	9
Figura 4 - Variação da parte real do módulo e do fator de perda com a frequência. <b>Fonte:</b> Vibration Damping (NASHIF; JONES; HENDERSON, 1985).....	10
Figura 5 – Nomograma de frequência reduzida. <b>Fonte:</b> ASTM E-756/2005...	11
Figura 6 - Largura de banda de fração da potência máxima. <b>Fonte:</b> Vibration Damping (NASHIF; JONES; HENDERSON, 1985). ....	12
Figura 7 - Tipos de vigas para os ensaios pela norma ASTM E-756. ....	13
Figura 8 – Transdutor B&K modelo MM-0002.....	21
Figura 9 – Transdutor MOTION SENSORS modelo PC 55-18E.....	21
Figura 10 - Câmara térmica. ....	22
Figura 11 – Estabilização da temperatura da câmara de climatização até uma temperatura de -20°C. ....	24
Figura 12 – Medição de temperatura (Esquerda: Base viga, Direita: Interior da câmara). ....	24
Figura 13 – Vigas para ensaio Oberst. ....	25
Figura 14 – Vigas para ensaio sanduíche.....	26
Figura 15 - Sistema de engaste LVA. ....	27
Figura 16 - Curvas FRF obtidas com e sem reforço no engaste do dispositivo de fixação. ....	28
Figura 17 - Sistema sem reforço na placa em balanço (antes). ....	28
Figura 18 - Sistema com reforço na placa em balanço (depois).....	29
Figura 19 – Dispositivos de engaste para realização dos experimentos – Bruel and Kjaer (a); Sistema LVA (b).....	30
Figura 20 – Comparação entre sistemas de engaste. ....	31
Figura 21 - Detalhe do parafuso de fixação do sistema B&K 3930. ....	32
Figura 22 – Esquema de medição com excitação na extremidade da viga da norma ASTM E-756. ....	33
Figura 23 - Esquema de medição com excitação próxima ao engaste da norma ASTM E-756. ....	33
Figura 24 – Avaliação do melhor esquema de medição.....	34
Figura 25 - Material viscoelástico modelo SD 40 do fabricante 3M. ....	35
Figura 26 – Material ADC 006 (Configuração do material SD 40 com camada de alumínio de 0,1mm de espessura). ....	36

Figura 27 – Nomograma do SD 40 – Módulo de elasticidade ( $E$ ) e fator de perda ( $\eta$ ) VS. frequência e temperatura. ( <b>Fonte:</b> Site 3M/EAR. Disponível em: <a href="http://www.earsc.com/pdfs/engineering/nomograms/isodamsd.pdf">http://www.earsc.com/pdfs/engineering/nomograms/isodamsd.pdf</a> ). .....	36
Figura 28 - Viga de ensaio com SD 40. ....	37
Figura 29 – Comparação entre a resposta de uma viga com e sem viscoelástico no ensaio Oberst. ....	38
Figura 30 – Variação da resposta de uma viga com material viscoelástico com a mudança de temperatura no ensaio Oberst. ....	38
Figura 31 – Módulo de elasticidade ( $E$ ) em função da frequência.....	39
Figura 32 – Fator de perda em função da frequência.....	40
Figura 33 – Módulo de elasticidade: Fabricante vs. Experimental (0°C).....	40
Figura 34 – Módulo de elasticidade: Fabricante vs. Experimental (10°C).....	41
Figura 35 – Módulo de elasticidade: Fabricante vs. Experimental (20°C).....	41
Figura 36 – Módulo de elasticidade: Fabricante vs. Experimental (30°C).....	42
Figura 37 – Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (0°C).....	42
Figura 38 – Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (10°C).....	43
Figura 39 – Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (20°C).....	43
Figura 40– Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (30°C).....	44
Figura 41 - SMAC 1135-04.....	45
Figura 42 - Curva SMAC 1135-04 a 20°C. ( <b>Fonte:</b> Fabricante Smacsonic). ....	45
Figura 43 - Curva do material SMAC 1135-04 em -25°C e as faixas de utilização do método.....	46
Figura 44 - Variação da resposta de uma viga com material viscoelástico com a mudança de temperatura – ensaio sanduíche. ....	47
Figura 45 – Variação do módulo de cisalhamento com a frequência. ....	48
Figura 46 – Variação do fator de perda com a frequência. ....	48
Figura 47 – Módulo de cisalhamento: Fabricante vs. Experimental (-25°C). ....	49
Figura 48 - Módulo de cisalhamento: Fabricante vs. Experimental (-15°C).....	50
Figura 49 - Módulo de cisalhamento: Fabricante vs. Experimental (-5°C).....	50
Figura 50 - Módulo de cisalhamento: Fabricante vs. Experimental (5°C). ....	51
Figura 51 - Módulo de cisalhamento: Fabricante vs. Experimental (15°C). ....	51
Figura 52 – Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (-25°C). ....	52
Figura 53 – Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (-15°C). ....	52
Figura 54 – Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (-5°C). ....	53
Figura 55 – Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (5°C).....	53
Figura 56 – Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (15°C).....	54
Figura 57 – FRF e Coerência das repetições. ....	56
Figura 58 – Repetibilidade do módulo de elasticidade. ....	57
Figura 59 – Repetibilidade do fator de perda.....	57
Figura 60 – Curva FRF em 0°C. ....	58
Figura 61 - Curva FRF em 10°C.....	59
Figura 62 – Módulo de cisalhamento – 0°C e 10°C. ....	61
Figura 63 – Fator de perda – 0°C e 10°C. ....	62
Figura 64 - Aplicação do método SVD a uma curva. ....	66
Figura 65 - Fluxograma do processo de ajuste de modelos. ....	67

Figura 66 - Validação numérica da viga uniforme.....	68
Figura 67 - Modelo Numérico da Viga Uniforme (tamanho malha=2mm). ....	69
Figura 68 - Avaliação numérica da viga Oberst com SD40.....	70
Figura 69 - Fator de perda da viga composta em configuração Oberst com SD40.....	70
Figura 70 - Fluxograma de trabalho para o ajuste de modelos com o software <i>Mode Frontier v.4.3.0.</i> ....	71
Figura 71 - Resultados das simulações. ....	72
Figura 72 - Convergência das simulações. O ponto desejado é o cruzamento das curvas vermelhas. ....	73
Figura 73 - Na esquerda, a viga com ADC 006 e na direita estão indicados a viga, material viscoelástico e camada de constrição. ....	74
Figura 74 - FRF Viga Com SD40 x Viga com ADC006 (20°C).....	75
Figura 75 - Fator de perda SD40 obtido via ajuste de modelos (20°C).....	76
Figura 76 - Módulo de Elasticidade SD40 obtido via ajuste de modelos (20°C). ....	76
Figura 77 - Fator de perda SD40 obtido via ajuste de modelos (-20°C).....	77
Figura 78 - Módulo de Elasticidade SD40 obtido via ajuste de modelos (-20°C). ....	77
Figura 79 – Medição viga configuração Oberst com SMAC 1135-04.....	78
Figura 80 – Comparação entre FRF obtidas via métodos numérico e experimental de uma viga com material viscoelástico SMAC 1135-04. ....	80
Figura 81 – Comparação do fator de perda medido das FRF de uma viga com material viscoelástico SMAC 1135-04. ....	80
Figura 82 - Carta com especificações do transdutor B&K MM-0002. <b>Fonte:</b> <b>Site:</b> <a href="http://www.bksv.com/doc/bf0236.pdf">http://www.bksv.com/doc/bf0236.pdf</a> .....	84
Figura 83 - Carta com especificações do transdutor MOTION SENSORS PC 55- 18E. ....	85



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

A lista contempla os principais símbolos e abreviações utilizados neste trabalho. Alguns dos símbolos e abreviações, que podem ter significados locais ou em diferentes contextos, serão definidos quando utilizados.

### Símbolos Gerais

$C_n$	Coeficiente referente ao n-ésimo modo
$c_n$	Coeficiente de amortecimento da n-ésima mola
$D$	Razão de densidades
$E$	Módulo de elasticidade
$E_n^{(m.a.)}$	Módulo de elasticidade do n-ésimo modo do material de amortecimento
$E^{(v.b.)}$	Módulo de elasticidade da viga uniforme
$f_n^{(c)}$	Frequência natural do n-ésimo modo da viga composta
$f_n^{(m.a.)}$	Frequência natural do n-ésimo modo do material viscoelástico
$f_n^{(v.b.)}$	Frequência natural do n-ésimo modo da viga uniforme
$G$	Módulo de cisalhamento
$G_n^{(m.a.)}$	Módulo de cisalhamento do n-ésimo modo do material de amortecimento
$H$	Espessura da viga
$H^{(m.a.)}$	Espessura da do material de amortecimento
$H^{(v.b.)}$	Espessura da viga uniforme
$I$	Comprimento da viga
$k$	Rigidez da viga
$k_n$	Rigidez da n-ésima mola
$k^*$	Rigidez complexa
$L$	Comprimento da viga, [m]
$M_n$	Razão entre os módulos de elasticidade do n-ésimo modo
$n$	Índice dos modos
$r$	Denominador da fração de amplitude no cálculo do fator de perda pelo método da largura de banda
$T$	Razão de espessuras

## Abreviaturas

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CLD	<i>Constrained layer damping</i>
DOE	<i>Design of experiment</i>
FLD	<i>Free layer damping)</i>
FRF	Função Resposta em Frequência
ILD	<i>Integrated layer damping</i>
LVA	Laboratório de Vibrações e Acústica do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC
MAM	Método de Ajuste de Modelos
MEF	Métodos dos elementos finitos
NVH	<i>Noise, Vibration and Harshness</i>
SVD	<i>Singular Value Decomposition</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

## Símbolos Gregos

$\Delta f_n^{(c)}$	Largura de banda do n-ésimo modo da viga composta
$\Delta f_n^{(m.a.)}$	Largura de banda do n-ésimo modo do material de amortecimento
$\Delta\omega$	Largura de banda
$\eta$	Fator de perda
$\eta_n$	Fator de perda do n-ésimo modo do material de amortecimento
$\eta_n^{(c)}$	Fator de perda do n-ésimo modo da viga composta
$\eta_n^{(m.a.)}$	Fator de perda do n-ésimo modo do material de amortecimento
$\nu$	Coefficiente de Poisson do material da viga
$\rho^{(m.a.)}$	Densidade do material de amortecimento [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho^{(v.b.)}$	Densidade da viga uniforme
$\omega$	Frequência natural (rad/s)
$\omega_1$	Menor frequência utilizada para o cálculo do fator de perda pelo método da largura de banda
$\omega_2$	Maior frequência utilizada para o cálculo do fator de perda pelo método da largura de banda
$\omega_n$	Frequência central utilizada para o cálculo do fator de perda pelo método da largura de banda

# CONTEÚDO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS .....	3
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	3
<b>2</b>	<b>PROPRIEDADES DINÂMICAS DE MATERIAIS</b>	
<b>VISCOELÁSTICOS .....</b>	<b>4</b>	
2.1	TRATAMENTOS COM MATERIAIS VISCOELÁSTICOS .....	4
2.2	DEFINIÇÃO DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS .....	5
2.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS PROPRIEDADES DE MATERIAIS	
VISCOELÁSTICOS.....		5
2.4	CONFIGURAÇÕES DE TRATAMENTOS VISCOELÁSTICOS .....	5
2.5	REPRESENTAÇÃO ANALÍTICA DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS	
6		
2.6	EFEITOS DE FATORES AMBIENTAIS .....	7
2.6.1	<i>Efeitos da Temperatura .....</i>	7
2.6.2	<i>Efeitos da Frequência.....</i>	9
2.6.3	<i>Superposição Temperatura–Frequência .....</i>	10
2.7	NOMOGRAMA DE FREQUÊNCIA REDUZIDA .....	10
2.7.1	<i>Leituras de um nomograma de frequência reduzida .</i>	10
2.7.2	<i>Determinação do fator de perda através do método da</i>	
<i>largura de banda .....</i>		11
2.8	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE MATERIAIS	
VISCOELÁSTICOS PELO MÉTODO DA VIGA VIBRANTE DA NORMA ASTM E-		
756 (2005). 12		
2.8.1	<i>Configurações de Teste.....</i>	13
2.8.2	<i>Equações.....</i>	15
2.8.3	<i>Hipóteses e Orientações .....</i>	18
2.8.4	<i>Faixas de validade.....</i>	20
<b>3</b>	<b>AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE</b>	
<b>ACORDO COM AS RECOMENDAÇÕES DA NORMA ASTM E-756</b>		
<b>20</b>		
3.1	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS .....	20
3.1.1	<i>Transdutores.....</i>	20
3.2	CÂMARA DE CLIMATIZAÇÃO .....	21
3.2.1	<i>Estabilização da temperatura na câmara de</i>	
<i>climatização</i>		22
3.3	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE TEMPERATURAS .....	24

3.4	CORPOS DE PROVA .....	25
3.5	DISPOSITIVOS DE FIXAÇÃO .....	26
3.5.1	<i>Teste de rigidez do dispositivo de fixação.....</i>	26
3.5.2	<i>Escolha do dispositivo .....</i>	29
3.5.3	<i>Posicionamento dos transdutores de medição .....</i>	32
3.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	34
<b>4</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS DE AMORTECIMENTO.....</b>	<b>35</b>
4.1	VIGA NA CONFIGURAÇÃO OBERST .....	35
4.1.1	<i>Comparações com os dados fornecidos pelo fabricante</i> <i>40</i>	
4.2	VIGA NA CONFIGURAÇÃO SANDUÍCHE.....	44
4.2.1	<i>Comparação com os dados do fabricante.....</i>	49
4.3	TESTE DE REPETIBILIDADE.....	55
4.3.1	<i>Repetibilidade - Configuração Oberst.....</i>	55
4.3.2	<i>Teste de repetibilidade na configuração Sanduiche ..</i>	58
4.4	CONCLUSÕES SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS 62	
<b>5</b>	<b>MÉTODO DE AJUSTE DE MODELOS APLICADOS À DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS.....</b>	<b>63</b>
5.1	AJUSTE DE MODELOS - DEFINIÇÃO .....	63
5.2	MOTIVAÇÃO PARA A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE AJUSTE DE MODELOS NO AJUSTE DAS PROPRIEDADES .....	64
5.3	COMPARAÇÃO ENTRE DADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS 65	
5.3.1	<i>Decomposição em valores singulares.....</i>	65
5.3.2	<i>Metodologia utilizada para o ajuste de modelos .....</i>	66
5.4	VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO DA VIGA UNIFORME.....	68
5.5	VALIDAÇÃO NUMÉRICA DA VIGA OBERST.....	69
5.6	FLUXOGRAMA UTILIZADO PARA A SIMULAÇÃO.....	70
5.7	AJUSTE A - OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES DO SD40 ATRÁVÉS DO ENSAIO COM UMA VIGA COM ADC006.....	73
5.7.1	<i>Modelo Numérico.....</i>	74
5.8	AJUSTE B – MODELO DE VIGA NA CONFIGURAÇÃO OBERST COM MATERIAL SMAC 1135-04 (SEM CAMADA DE CONSTRUÇÃO) .....	77
5.9	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	79
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>





## 1 INTRODUÇÃO

O atual mercado industrial, competitivo e dinâmico, tem motivado um crescente emprego de materiais com alto desempenho nas mais diversas áreas. Concomitante a isto, há o advento de um novo pensamento mundial, de preservação e conservação dos recursos naturais do planeta.

Esta evolução da engenharia é acompanhada pela melhoria das formas geométricas de estruturas, aplicação de processos produtivos mais eficientes e, especialmente, pelo uso de novos materiais, mais resistentes e leves. Este avanço só foi possível graças à evolução de diversas áreas da engenharia, a exemplo da área de Vibrações e Acústica.

Neste âmbito, o controle de vibrações tem marcante presença em estudos e aplicações, sendo que as duas formas mais conhecidas são o controle ativo, no qual se atua dinamicamente, buscando neutralizar as vibrações da estrutura através de força em fase oposta às forças de vibração desta e o controle passivo, no qual um material de amortecimento dissipa energia devido à sua deformação gerada pela vibração da estrutura.

Considerando as classes de materiais utilizados para o controle passivo de vibrações, os materiais viscoelásticos são uma classe de destaque, com relevantes propriedades reológicas, já que possuem, concomitantemente, propriedades elásticas e viscosas. Esta classe de materiais possui um comportamento característico de variação de suas propriedades mecânicas com a variação de frequência e de temperatura, tendo, portanto, comportamento versátil de acordo com as circunstâncias em que são aplicados. Logo, a compreensão das propriedades destes é fator primordial para a escolha do material correto, dentro da faixa de temperaturas de interesse, local de aplicação, dentre outros fatores de emprego. Algumas áreas de destaque em que são aplicados, em larga escala são as indústrias automotiva e aeroespacial, visto a simplicidade de aplicação aliado aos bons níveis de atenuação.

Na indústria aeroespacial e militar, o uso de amortecimento passivo teve início desde o início da década de 1960. Os avanços na tecnologia de materiais, combinado com ferramentas analíticas e experimentais mais recentes e mais eficientes para modelar o comportamento dinâmico de materiais e estruturas, têm levado a muitas aplicações, tais como nas aletas de entrada em motores a jato, cabines de

helicópteros, dutos de escapamentos, estruturas de satélite, painéis de equipamentos, estruturas de antenas e estações espaciais, entre outras. Já a utilização de tratamentos de amortecimento em superfícies nas indústrias automotiva, aviação comercial, eletrodomésticos e outras indústrias têm acontecido mais recentemente, uma vez que o uso nestas áreas só foi possível depois de avanços nos processos de manufatura que favorecessem o custo benefício e alto volume de produção. (RAO, 2003).

Já na indústria automotiva, o principal objetivo da aplicação de controle passivo é a redução do ruído no interior dos veículos, principalmente de passageiros e caminhões.

As principais fontes de ruído em veículos são o motor, contato dos pneus com o solo, freios, vento, sistemas de ventilação, entre outros, que chegam ao interior por alguns caminhos principais, como coxins do motor, suspensão, lataria e assoalho. Estes caminhos são responsáveis por 90% da energia acústica percebida no interior de um veículo (RAO, 2003).

Além destas, outra indústria com larga utilização de materiais viscoelásticos é a de construção civil, em edifícios e pontes, possibilitando maior segurança para a construção em regiões suscetíveis à ação de forças da natureza, como ventos e abalos sísmicos.

A faixa de utilização de frequência destes materiais é extensa, sendo aplicada desde frações de ciclos por segundo (Hertz) até vários kHz. Temperaturas de aplicação variam  $-45^{\circ}\text{C}$  até  $150^{\circ}\text{C}$ , aproximadamente (JONES, 2001).

As propriedades do módulo dinâmico de cisalhamento e fator de perda dos materiais viscoelásticos apresentam variação considerável na frequência, sendo que o primeiro tende a crescer com a frequência para uma mesma temperatura e o segundo cresce com a variação da frequência até um ponto e depois tende a diminuir de valor. Mantendo a frequência constante e variando-se a temperatura, se percebe o decréscimo do módulo dinâmico de cisalhamento e novamente, o fator de perda possui um ponto de máximo.

Logo fica claro que o conhecimento mais apurado do comportamento de um determinado material viscoelástico é premissa fundamental para classificar sua aplicação. Um dos métodos existente para a determinação das propriedades desses materiais é o método da viga vibrante, normatizado pela ASTM E-756, que consiste em ensaios experimentais com vigas, seguido de cálculos analíticos que determinam os valores dos módulos de cisalhamento (ou elasticidade) e de fator de perda. Entretanto, o método possui limitações relacionadas às faixas de

validade das equações analíticas e também quanto à utilização de materiais viscoelásticos compostos, conhecidos por possuírem uma camada de constrictão.

Considerando tudo isso, a proposta deste trabalho é utilizar simulações numéricas de elementos finitos para aumentar a diversidade de aplicação e diminuir a limitação do método da viga vibrante da norma ASTM E-756, visto que simulações de modelos computacionais se tornaram uma forma precisa e rápida para a representação da realidade.

No tocante especificamente de materiais com camada de constrictão, irá se buscar determinar as propriedades de um material viscoelástico utilizando-se o método de ajuste de modelos numéricos, através do modelo de uma viga com material viscoelástico composto, para encontrar as mesmas propriedades determinadas pelo método da viga vibrante da norma ASTM E-756 ( $E$  ou  $G$  e  $\eta$ ) e, dessa forma, validar a determinação das propriedades dinâmicas do material viscoelástico baseado em ensaios de materiais compostos e diferentes geometrias.

## **1.1 Objetivos**

Este trabalho tem foco em dois objetivos principais: O primeiro é o estudo detalhado do procedimento experimental de determinação das propriedades dinâmicas de dois diferentes materiais, ambos de aplicação na indústria aeronáutica, através do método da viga vibrante descrito na norma ASTM E-756;

O segundo objetivo é a validação de um modelo de simulação numérica para a obtenção das propriedades dos materiais viscoelásticos compostos aplicados com camada de constrictão, considerando que são amplamente utilizados e que a norma ASTM E-756 não trata da obtenção das propriedades nesta configuração. Portanto, serão obtidas através do ajuste de modelos numéricos através do modelamento de uma viga engastada-livre contendo material viscoelástico com camada de constrictão.

## **1.2 Organização do trabalho**

No Capítulo 2 será apresentado um breve estudo da fundamentação teórica de materiais viscoelásticos, abordando como estes materiais sofrem variações nas propriedades ( $E$  ou  $G$  e  $\eta$ ) com

temperatura e frequência. O método da viga vibrante para determinação das propriedades da norma ASTM E-756 também será objeto de análise.

O Capítulo 3 tratará da validação do sistema de medição do método da viga vibrante da norma ASTM E-756, com avaliação do sistema de medição, como transdutores, dispositivos de fixação, corpos de prova e também da câmara de climatização, para que se auferam os melhores resultados a partir dos ensaios.

O Capítulo 4 abordará os ensaios mecânicos segundo o procedimento da norma ASTM E-756. Serão determinadas as propriedades de dois materiais aplicados comercialmente, um deles através do ensaio na configuração Oberst e outro através do ensaio na configuração sanduíche. Será feita uma avaliação da repetibilidade obtida nos testes, objetivando completar a análise do capítulo 3.

Por fim, o Capítulo 5 irá contemplar um breve estudo sobre ajuste de modelos para a obtenção das propriedades de materiais viscoelásticos. As propriedades do material serão determinadas através de ajuste de modelos usando como referência um ensaio com uma viga com material viscoelástico contendo camada de constricção, que não se enquadra em nenhuma das configurações apresentadas na norma ASTM E-756.

## **2 PROPRIEDADES DINÂMICAS DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS**

### **2.1 Tratamentos com materiais viscoelásticos**

Dentre as formas passivas de amortecimento, os tratamentos distribuídos e os amortecedores localizados baseados em materiais viscoelásticos assumem uma posição de relevo, uma vez que dispõem de uma elevada eficácia, oferecendo vantagens relativamente à simplicidade na sua aplicação, ao seu reduzido custo e à reduzida alteração estrutural introduzida pelos mesmos. (RAMOS, 2010).

Estruturalmente, os materiais viscoelásticos não apresentam propriedades satisfatórias, pois possuem resistência mecânica limitada. Entretanto, como dissipadores, apresentam resultados excelentes em dissipar energia em forma de calor.

Na prática, portanto, os materiais viscoelásticos precisam ser aplicados a alguma estrutura (geralmente de ligas metálicas ou materiais compósitos) para formar uma associação com características de rigidez e amortecimento adequadas.

## 2.2 Definição de materiais viscoelásticos

A viscoelasticidade é a propriedade de materiais que exibem, quando deformados, características viscosas e elásticas. Dentro desta classe de materiais, podem ser citados fluidos (como tintas, p.ex.) e também sólidos (borrachas, silicone, etc.), abrangendo uma variedade de aplicações e níveis de dissipação.

O comportamento exibido pelos materiais viscoelásticos pode ser definido como intermediário entre perfeitamente elástico e idealmente viscoso, e quando aplicada uma excitação harmônica, a deformação não se encontra em fase com a tensão, como para um material perfeitamente elástico e nem defasada de  $90^\circ$ , como para um líquido idealmente viscoso, mas sim entre esses valores (LOPES, 1989).

As propriedades viscoelásticas, como módulo de elasticidade (ou cisalhamento) e fator de perda, da maioria dos materiais dependem da frequência, temperatura e amplitude de deformação (ANSI S2.24-2001).

## 2.3 Considerações sobre as propriedades de materiais viscoelásticos

Uma informação importante sobre os materiais viscoelásticos é que estes apresentam alta capacidade em amortecer estruturas devido ao fator de perda considerável exibido, que por sua vez depende essencialmente da temperatura e da frequência de excitação. (RAMOS, 2010).

As áreas de aplicação destes materiais incluem amplas faixas de frequência e temperatura e costumam estar aplicados a estruturas com amortecimento desprezível, como chapas de alumínio ou aço. (RAMOS, 2010).

## 2.4 Configurações de tratamentos viscoelásticos

As configurações em que são empregados materiais viscoelásticos são essencialmente 3: i) sem restrição ou livre (FLD – *free layer damping*); ii) superficial com camada de construção (CLD – *constrained layer damping*) e iii) integrada (ILD – *integrated layer damping*) (JONES, 2001).

## 2.5 Representação analítica de materiais viscoelásticos

No passado, alguns modelos analíticos foram criados para tentar representar o comportamento de materiais viscoelásticos, formados por combinações de elementos discretos de molas e amortecedores (JONES, 2001). Estes modelos podem ser vistos na Figura 1, sendo que os dois modelos mais conhecidos são o de Maxwell e o de Voigt, e também o clássico, combinação destes dois.

As rigidezes complexas destes modelos são dadas na Tabela 1 (**Fonte:** Viscoelastic Vibration Damping (JONES, 2001)).

Tabela 1 - Modelos clássicos de representação analítica de materiais viscoelásticos.

Modelo	Rigidez complexa	Equação
Maxwell	$k^* = k(1 + i\eta) = \frac{i\omega k_1 c_1}{k_1 + i\omega c_1}$	(1)
Voigt	$k^* = k(1 + i\eta) = k_2 + i\omega c_2$	(2)
Modelo padrão	$k^* = k(1 + i\eta) = \frac{i\omega k_1 c_1}{k_1 + i\omega c_1} + k_2 + i\omega c_2$	(3)
Modelo padrão múltiplo	$k^* = k_0 + \frac{i\omega k_1 c_1}{k_1 + i\omega c_1} + \frac{i\omega k_2 c_2}{k_2 + i\omega c_2} + \dots$ onde $k_0 = k_1 + k_2 + \dots$ é a soma dos elementos de rigidez de Voigt.	(4)

Onde:

$k_n$  = Rigidez da n-ésima mola;

$k^*$  = Rigidez complexa;

$\omega$  = Frequência natural;

$\eta$  = Fator de perda;

$c_n$  = Coeficiente de amortecimento da n-ésima mola;

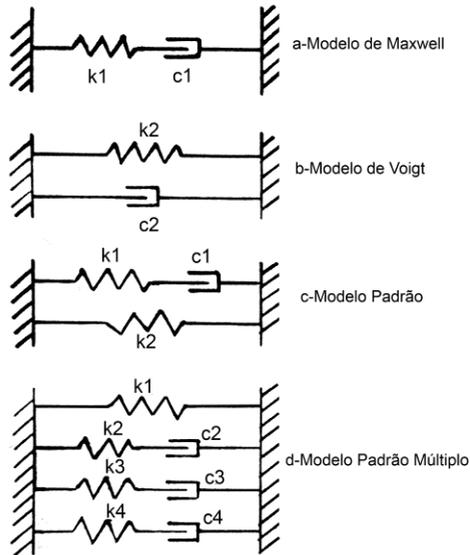


Figura 1 - Modelos clássicos de comportamento viscoelástico; a-Maxwell, b-Voigt, c-padrão, d-padrão múltiplo. **Fonte:** Viscoelastic Vibration Damping (JONES, 2001).

## 2.6 EFEITOS DE FATORES AMBIENTAIS

Existem diversos fatores que influenciam os valores das propriedades dinâmicas dos materiais viscoelásticos e o entendimento destes é fundamental para a correta utilização.

Neste trabalho será dada ênfase a dois efeitos principais, que são temperatura e frequência. Outros fatores que influenciam o comportamento do material são: i) carregamento cíclico; ii) pré-carga estática; iii) envelhecimento; iv) exposição a óleos; v) pressão ou vácuo.

Na Figura 2 podem ser vistos os fatores de temperatura e frequência em curvas Função Resposta em Frequência (FRF). Notam-se os efeitos de amortecimento (no aumento do ângulo das curvas nos picos nas frequências naturais) e mudança de rigidez (na variação dos valores das frequências naturais).

### 2.6.1 Efeitos da Temperatura

A temperatura é considerada o fator que mais afeta as propriedades de amortecimento de um material viscoelástico (NASHIF; JONES; HENDERSON, 1985). Este comportamento pode ser observado

gráficamente na Figura 3, onde são delimitadas quatro regiões características de materiais viscoelásticos: vítrea, de transição, elástica e de escoamento. Na região vítrea, o módulo de elasticidade tem seu valor máximo e varia pouco com a temperatura, enquanto que o fator de perda tem valores extremamente baixos e cresce significativamente com a temperatura. Na região de transição, o módulo de elasticidade decresce rapidamente com a temperatura ao passo que o fator de perda atinge seu valor máximo. Na terceira região, chamada de elástica, usualmente o módulo de elasticidade e o fator de perda possuem valores baixos e variam pouco com a temperatura. A última, chamada de região de escoamento, o material continua a ter o módulo de elasticidade diminuído até derreter, enquanto o fator de perda continua a crescer. Esta região é observada apenas em algumas classes de materiais viscoelásticos (NASHIF; JONES; HENDERSON, 1985).

Valores típicos do módulo de elasticidade ( $E$ ), são altos na região vítrea e baixos na região elástica. A largura da região de transição pode variar de um material para outro sendo que o fator de perda nesta região geralmente alcança valores máximos (NASHIF; JONES; HENDERSON, 1985).

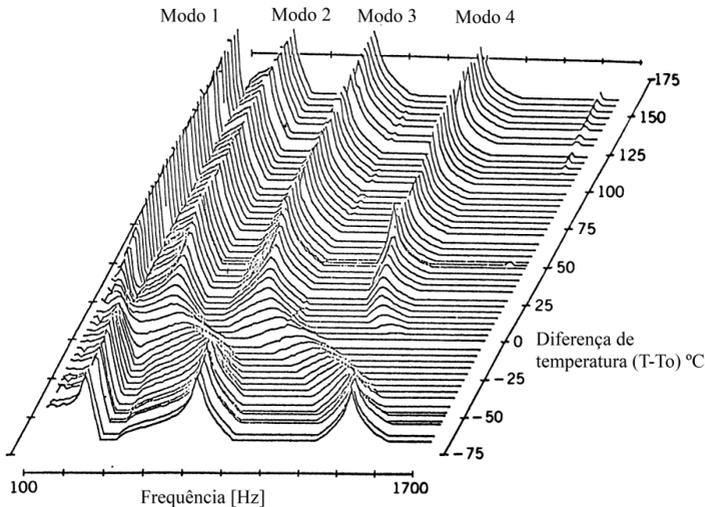


Figura 2 - Espectro típico de resposta dinâmica de uma viga engastada livre em função da temperatura. **Fonte:** Vibration Damping (NASHIF; JONES; HENDERSON, 1985).

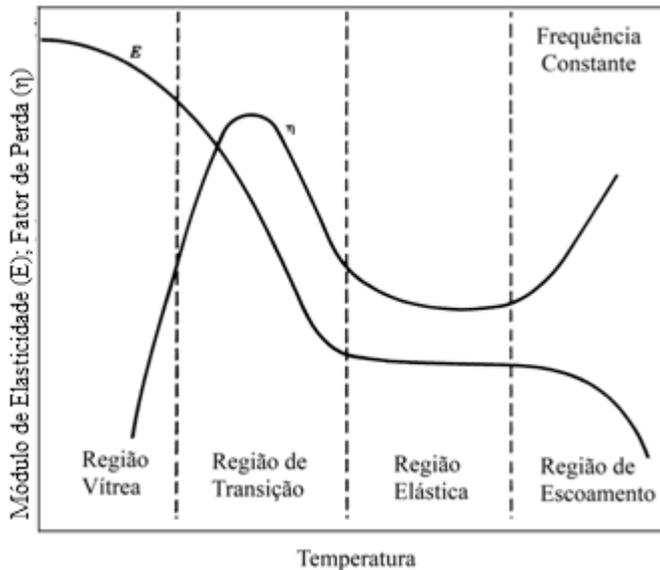


Figura 3 - Variação do módulo de elasticidade e do Fator de Perda com a temperatura. **Fonte:** Vibration Damping (NASHIF; JONES; HENDERSON, 1985).

### 2.6.2 Efeitos da Frequência

O comportamento do módulo de elasticidade e do fator de perda de um material viscoelástico em função da frequência pode ser visto na Figura 4. Observa-se que o módulo de elasticidade cresce com a frequência, enquanto que o fator de perda atinge em alguma região seu valor máximo e depois decresce.

Segundo Nashif, Jones e Henderson (1985) é importante observar que a alteração das propriedades ocorre com décadas de variação de frequência, enquanto que com a temperatura, isto ocorre com a variação de alguns poucos graus.

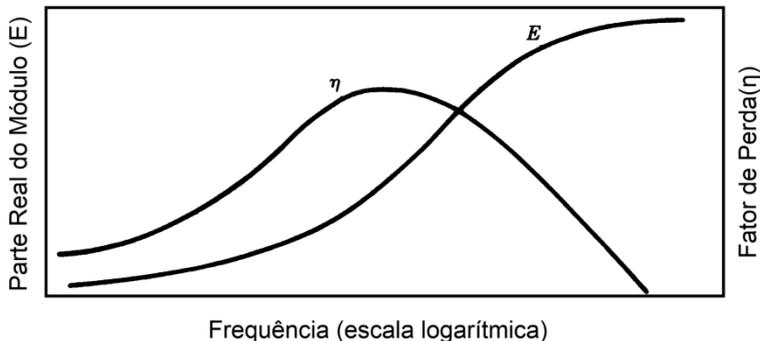


Figura 4 - Variação da parte real do módulo e do fator de perda com a frequência. **Fonte:** Vibration Damping (NASHIF; JONES; HENDERSON, 1985).

### 2.6.3 Superposição Temperatura–Frequência

Observando as curvas das Figuras 3 e 4, é possível perceber que o comportamento das propriedades de um material viscoelástico é inverso com frequência e temperatura, já que o módulo de elasticidade cresce com o aumento da frequência e decresce com o aumento da temperatura. Já o fator de perda tem seus menores valores para baixas temperaturas, enquanto isso acontece para altas frequências. Essa relação permitiu estabelecer o princípio da superposição frequência-temperatura, que permite representar graficamente em um único gráfico as propriedades em função da frequência para diversas temperaturas, conhecido com nomograma de frequência reduzida (NASHIF; JONES; HENDERSON, 1985).

## 2.7 Nomograma de Frequência Reduzida

Uma forma interessante de apresentar as propriedades de um material viscoelástico graficamente é através de um nomograma, no qual se apresentam conjuntamente os módulos de elasticidade, ou de cisalhamento, e o fator de perda em função da frequência e da temperatura.

### 2.7.1 Leituras de um nomograma de frequência reduzida

No gráfico da Figura 5 pode ser observado o procedimento para a leitura dos valores do módulo de elasticidade e fator de perda de um determinado material viscoelástico. Inicialmente deve ser selecionada a

frequência de interesse no eixo vertical direito. Em seguida deve-se traçar uma linha horizontal (A-B), da direita para a esquerda, até que toque a linha isotérmica diagonal da temperatura desejada. Neste ponto, deve-se traçar uma linha vertical (B-C). Por fim, nos pontos em que esta linha cortar as curvas de módulo de elasticidade e fator de perda, traçam-se linhas horizontais (D-F e C-E), até que toquem o eixo dos valores, no lado esquerdo do gráfico, onde são lidos os valores.

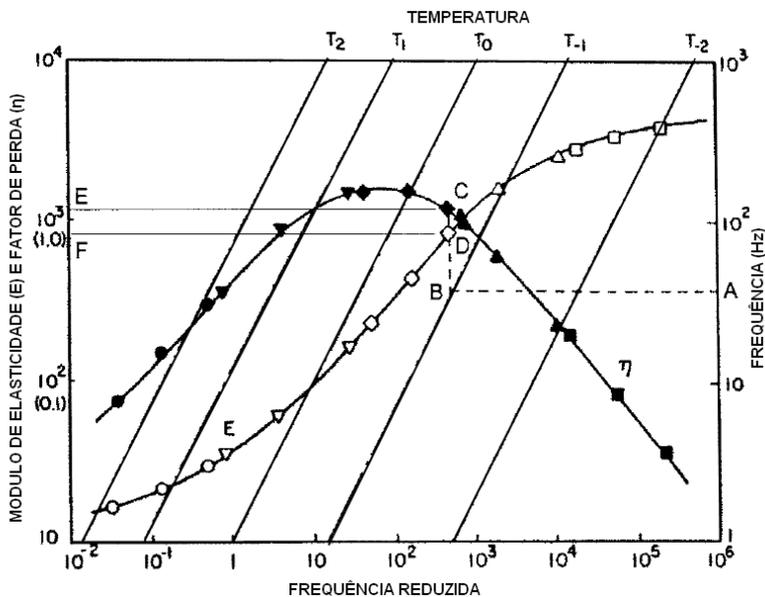


Figura 5 – Nomograma de frequência reduzida. **Fonte:** ASTM E-756/2005.

### 2.7.2 Determinação do fator de perda através do método da largura de banda

Uma forma comumente utilizada para quantificar o amortecimento de uma estrutura é através do método da banda de meia potencia. (NASHIF; JONES; HENDERSON, 1985).

Este é derivado do método da largura de banda, no qual se estima o amortecimento considerando a fração do pico máximo correspondente, representados pelos pontos A e B da Figura 6. Para tal, selecionam-se estes dois pontos associados a uma fração de amplitude igual a  $\frac{1}{r}$ , na qual  $r$  é maior que 1.

A meia potência corresponde a fração igual a  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ , que em decibéis, corresponde a 3.01dB.

Considerando que a largura de banda é dada por:

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 \quad (5)$$

e o fator de perda através deste método é dado por:

$$\eta = \frac{\Delta\omega}{\omega_n} \quad (6)$$

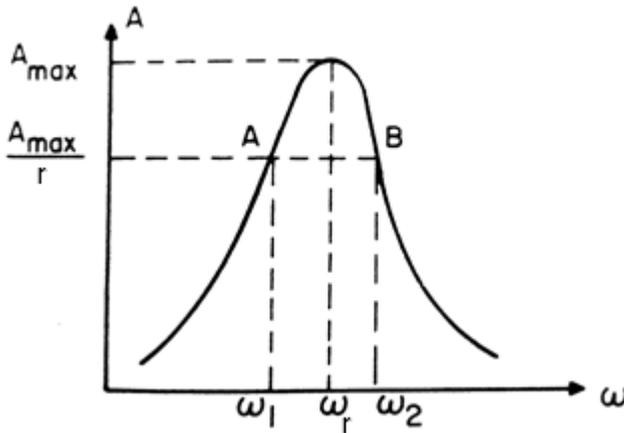


Figura 6 - Largura de banda de fração da potência máxima. **Fonte:** Vibration Damping (NASHIF; JONES; HENDERSON, 1985).

## 2.8 Determinação das propriedades de materiais viscoelásticos pelo método da viga vibrante da norma ASTM E-756 (2005).

O método da viga vibrante, apresentado na norma ASTM E-756 (2005), consiste em determinar as propriedades dos materiais viscoelásticos a partir da resposta dinâmica de uma viga na condição de contorno engastada-livre. Através da Função Resposta em Frequência (FRF) deste sistema, são obtidos os valores das frequências de ressonância e respectivos fatores de perda. Para aqueles materiais que podem ser moldados na forma de vigas, a aplicação é direta. Já para aqueles que dependem de uma viga de metal servindo de base, deve-se aplicar algumas equações de origem analítica, que dependem do tipo de configuração utilizada, apresentadas adiante.

Há garantia de precisão dos valores na faixa de frequência de 50 Hz a 5 kHz dentro da faixa de temperatura na qual o uso do material se aplica.

Dentre os materiais que podem ser testados estão metais, cerâmicas, borrachas, plásticos, entre outros, desde que possam ter o formato de algumas configurações de vigas ou que possam ser aderidos a vigas metálicas específicas.

### 2.8.1 Configurações de Teste

O tipo de configuração da viga para o ensaio é escolhido de acordo com as características do material de amortecimento utilizado. Os valores dos módulos de elasticidade e de cisalhamento e o amortecimento do material são fatores considerados nesta escolha. Outro fator a ser considerado é o tipo de deformação sofrida pelo material na sua aplicação real, de forma que o ensaio represente com a maior fidelidade possível o comportamento do material em sua aplicação.

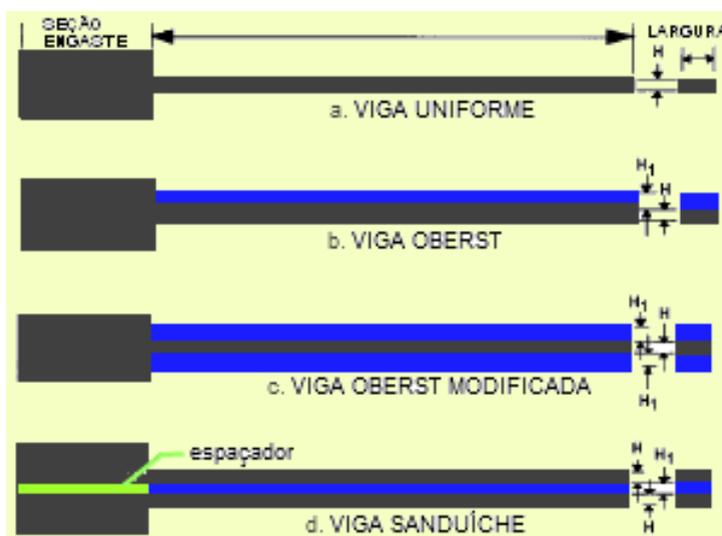


Figura 7 - Tipos de vigas para os ensaios pela norma ASTM E-756.

Na

Figura 7 estão apresentadas quatro configurações diferentes, utilizadas na investigação das propriedades do material viscoelástico sob esforços devidos a flexão da viga (

Figura 7b e 7c) e do material em cisalhamento (

Figura 7d). Deve-se observar que o espaçador (cor verde) da Figura 7d deve ter a mesma dimensão de espessura do material viscoelástico aplicado. O componente indicado com a cor azul representa o material viscoelástico.

#### 2.8.1.1 *Viga Uniforme ou Viga Base*

A configuração de viga uniforme, mostrada na

Figura 7a, pode ser empregada de duas formas diferentes, segundo a rigidez do material testado:

- Para materiais com rigidez suficientemente alta, pode-se construir a viga de teste do próprio material de amortecimento, desde que esta não se deforme sob a ação do seu próprio peso, podendo as propriedades do material serem obtidas diretamente do teste dinâmico;
- Para os materiais sem rigidez suficiente para tal, esta configuração é utilizada para o teste de referência da viga uniforme, requerida para os testes em configurações Oberst, Oberst modificada e sanduíche. Nestes casos, as propriedades devem ser determinadas em duas etapas. Inicialmente, faz-se o teste dinâmico da viga uniforme, de metal, para a determinação de suas frequências naturais. Em seguida, aplica-se o material de amortecimento a esta viga uniforme formando um sistema composto, podendo agora ser utilizadas as configurações Oberst ou Oberst Modificada. A utilização de cada uma das configurações será apresentada a seguir.

#### 2.8.1.2 *Viga Configuração Oberst*

A configuração Oberst (

Figura 7b) é utilizada para avaliar materiais que estejam aplicados a estruturas sujeitas à deformação de flexão.

#### 2.8.1.3 *Viga Configuração Oberst modificada*

A configuração Oberst modificada (

Figura 7c) é semelhante à Oberst, com a vantagem de ter equações simplificadas e, devido à geometria simétrica, sofrer menor deflexão com a mudança de temperatura. Obs: Esta configuração não foi utilizada neste trabalho, visto que a configuração Oberst (2.8.1.2)

apresentou curvas de resposta com menor ruído. Logo, a metodologia de obtenção com esta configuração será suprimida.

#### 2.8.1.4 *Viga Configuração Sanduíche*

A determinação das propriedades do material sob cisalhamento é realizada com a utilização da configuração sanduíche (

Figura 7d). Nesta configuração, o material é colado entre duas vigas de iguais dimensões e sua aplicação é voltada à caracterização de materiais de baixa rigidez e sujeitos à deformação cisalhante em sua aplicação. Bons resultados são conseguidos quando a diferença entre o comprimento das vigas não diferirem em mais de 0,5 mm, as espessuras não mais que 0,05 mm e que as frequências naturais sejam menores que 1% do menor valor. Observação: Para materiais viscoelásticos compostos por camadas de diferentes materiais, a obtenção dos valores das propriedades deve ser feita individualmente.

### 2.8.2 *Equações*

Após a obtenção da curva FRF referente à respectiva configuração de viga, deve-se extrair desta os valores de frequência natural e correspondentes fatores de perda, que nos casos Oberst, Oberst modificado e sanduíche dizem respeito à resposta dinâmica do composto viga e material viscoelástico.

Com os resultados medidos em alguma das configurações citadas de viga com material viscoelástico e também da viga uniforme, calculam-se os valores do módulo de elasticidade (ou cisalhamento, para a configuração sanduíche) e do fator de perda do material viscoelástico, através das equações apresentadas a seguir. Vale ressaltar que a formulação apresentada abaixo tem como fonte de referência a norma ASTM E-756.

#### 2.8.2.1 *Viga Uniforme ou Viga Base*

O módulo de elasticidade e o fator de perda do material da viga associados a cada modo são calculados através das expressões (ASTM E756 - 05, 2005).

$$E_n = \frac{(12\rho l^4 f_n^4)}{(H^2 C_n^2)} \quad (7)$$

e:

$$\eta_n = \frac{(\Delta f_n)}{(f_n)} \quad (8)$$

em que  $C_n$  é um coeficiente referente ao n-ésimo modo, de uma viga de seção uniforme, na condição de contorno engastada- livre, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Coeficientes.

$C_1=$	0,55959
$C_2=$	3,5069
$C_3=$	9,8194
$C_4=$	19,242
$C_5=$	31,809
$C_n=$	$(\pi / 2) (n-0,5)^2$ , para $n > 3$

Em que:  $E_n$  é o módulo de elasticidade do material da viga [ $Pa$ ];  $f_n$  é a frequência de ressonância do n-ésimo modo [ $Hz$ ];  $\Delta f_n$  é a largura da banda de meia potencia do n-ésimo modo [ $Hz$ ];  $H$  é a espessura da viga [ $m$ ];  $l$  é o comprimento da viga [ $m$ ];  $n$  é a ordem de modo: 1, 2, 3, . . . ;  $\eta_n$  é o fator de perda de material da viga, adimensional;  $\rho$  é a densidade da viga, [ $kg/m^3$ ].

### 2.8.2.2 Viga Oberst

O módulo de elasticidade e o fator de perda do material de amortecimento de cada modo são calculados através das expressões:

$$E_n^{(m.a.)} = \frac{E}{(2T^3)} [(\alpha - \beta) + \sqrt{(\alpha - \beta)^2 - 4T^2(1 - \alpha)}] \quad (9)$$

e:

$$\eta_n^{(m.a.)} = \eta_n^{(c)} \left[ \frac{(1 + MT)(1 + 4MT + 6MT^2 + 4MT^3 + M^2T^4)}{(MT)(3 + 6T + 4T^2 + 2MT^3 + M^2T^4)} \right] \quad (10)$$

Os fatores  $\alpha$  e  $\beta$  são calculados, respectivamente, por:

$$\alpha = \left( \frac{f_n^{(c)}}{f_n^{(v.b.)}} \right)^2 (1 + DT) \quad (11)$$

e:

$$\beta = 4 + 6T + 4T^2 \quad (12)$$

em que  $\rho^{(v.b.)}$  é a densidade do material da viga uniforme [ $kg/m^3$ ];  $\rho^{(m.a.)}$  é

a densidade do material de amortecimento [ $kg/m^3$ ];  $D = \frac{\rho^{(v.b.)}}{\rho^{(m.a.)}}$  é a razão entre densidades do material viscoelástico e do material da viga;  $E^{(v.b.)}$  é o módulo de elasticidade da viga uniforme [ $Pa$ ];  $E_n^{(m.a.)}$  é o módulo de elasticidade do n-ésimo modo do material de amortecimento [ $Pa$ ];  $f_n^{(v.b.)}$

é a frequência de ressonância do n-ésimo modo da viga uniforme [Hz];  $f_n^{(c)}$  é a frequência de ressonância do n-ésimo modo da viga coberta [Hz];  $\Delta f_n^{(c)}$  é a largura de banda do modo n-ésimo da viga coberta;  $H^{(v.b.)}$  é a espessura da viga de base [m];  $H^{(m.a.)}$  é a espessura do material de

amortecimento [m];  $M_n = \frac{E_n^{(m.a.)}}{E^{(v.b.)}}$  é a razão do módulo de elasticidade do n-ésimo modo;  $T = \frac{H^{(m.a.)}}{H^{(v.b.)}}$  é a razão de espessuras do material

viscoelástico e do material da viga;  $\eta_n^{(c)} = \frac{\Delta f_n^{(c)}}{f_n^{(c)}}$  é o fator de perda do n-ésimo modo da viga coberta, adimensional;  $\eta_n^{(m.a.)}$  é o fator de perda do n-ésimo modo do material de amortecimento, adimensional;

### 2.8.2.3 Viga Sanduíche

O módulo de cisalhamento e o fator de perda do material de amortecimento de cada modo são calculados através das expressões:

$$G_n^{(m.a.)} = [A_n - B - 2(A_n - B)^2 - 2(A_n \eta_n^{(c)})^2] \left[ \frac{2\pi C_n E_n^{(v.b.)} H H_1}{l^2 \{(1 - 2A_n + 2B)^2 + 4(A_n \eta_n^{(c)})^2\}} \right] \quad (13)$$

$$e: \quad \eta_n^{(m.a.)} = \frac{(A \eta_n^{(c)})}{[A - B - 2(A - B)^2 - 2(A \eta_n^{(c)})^2]} \quad (14)$$

E os fatores  $A$  e  $B$  são dados respectivamente por:

$$A_n = \left( \frac{f_n^{(c)}}{f_n^{(v.b.)}} \right)^2 (2 + DT) \left( \frac{B}{2} \right) \quad (15)$$

$$e: \quad B = \frac{1}{6(1+T)^2} \quad (16)$$

em que  $C_n$  é o coeficiente do n-ésimo modo, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes.

$C_1 =$	0,55959
$C_2 =$	3,5069
$C_3 =$	9,8194
$C_4 =$	19,242
$C_5 =$	31,809
$C_n =$	$(\pi/2) (n-0,5)^2$ , para $n > 3$

Em que:  $\rho^{(v.b.)}$  é a densidade do material da viga uniforme [ $kg/m^3$ ];  $\rho^{(m.a.)}$  a densidade do material de amortecimento [ $kg/m^3$ ];

$D = \frac{\rho^{(v.b.)}}{\rho^{(m.a.)}}$  é a razão entre densidades do material viscoelástico e do material da viga;  $E^{(v.b.)}$  é o módulo de elasticidade da viga uniforme [Pa];  $G_n^{(m.a.)}$  é o módulo de cisalhamento do n-ésimo modo do material de amortecimento [Pa];  $f_n^{(v.b.)}$  é a frequência de ressonância do n-ésimo modo da viga uniforme [Hz];  $f_n^{(c)}$  é a frequência de ressonância do n-ésimo modo da viga coberta [Hz];  $\Delta f_n^{(c)}$  é a largura de banda do n-ésimo modo da viga coberta;  $H^{(v.b.)}$  é a espessura da viga de base [m];  $H^{(m.a.)}$  é a

espessura do material de amortecimento [m];  $T = \frac{H^{(m.a.)}}{H^{(v.b.)}}$  é a razão de

espessuras;  $\eta_n^{(c)} = \frac{\Delta f_n^{(c)}}{f_n^{(c)}}$  é o fator de perda do n-ésimo modo da viga coberta, adimensional;  $\eta_n^{(m.a.)}$  é o fator de perda do n-ésimo modo do material de amortecimento, adimensional.

### 2.8.3 Hipóteses e Orientações

A norma ASTM E-756 indica uma série de orientações e cuidados que devem ser observados durante a realização dos testes para evitar erros e resultados incorretos. Os mais importantes são:

- As medições de amortecimento devem ser feitas dentro da faixa linear, ou seja, os materiais de amortecimento devem estar de acordo com a teoria linear da viscoelasticidade. Se a força aplicada excitar a viga na região não-linear, os dados da análise não serão válidos;
- A amplitude do sinal da força aplicada no transdutor de excitação deve ser mantida constante com a frequência. Caso não a seja, a amplitude do sinal de resposta deve ser dividido pela amplitude do sinal da excitação e esta razão resposta/excitação deve ser utilizada na avaliação do amortecimento;
- A formulação utilizada para vigas Oberst utiliza a análise clássica de vigas, mas suprimem os efeitos dos termos envolvendo inércia de rotação e deformação por cisalhamento. A análise assume que as seções não mudam sua geometria depois de deformados. É indicado, então, que sejam utilizados materiais de amortecimento com espessura consideravelmente menor que a viga uniforme de metal (em torno de 4 vezes);
- As equações utilizadas para cálculo das propriedades de materiais de amortecimento na configuração sanduíche não contemplam os termos de flexão da camada de material de

amortecimento. Isto é aceitável quando o módulo de elasticidade da camada de amortecimento for consideravelmente menor (em torno de 10 vezes) que a do metal;

- As equações para cálculo das propriedades de vigas na configuração sanduíche foram desenvolvidas e solucionadas utilizando uma expansão senoidal para os modos de vibração. Esta aproximação é aceitável apenas para os modos de mais alta ordem e é comum ignorar os resultados do primeiro modo;
- O fator de perda ( $\eta$ ) da viga de metal é considerado igual à zero;
- As configurações de vigas Oberst e Oberst Modificada são usualmente utilizadas para materiais rígidos, com módulos de elasticidade maiores que 100 MPa, em que as propriedades são medidas na região vítrea e de transição destes. A configuração sanduíche é usualmente utilizada para caracterização de materiais viscoelásticos macios, com módulo de cisalhamento menor que 100 MPa;
- Este valor (100 MPa) é referência para uma viga com dimensões recomendadas pela norma (comprimento: 180 a 250 mm, largura: 10 mm, espessura: 1 a 3 mm). Este valor deve ser maior para vigas menores e vice-versa;
- Se um material viscoelástico com alto amortecimento for aplicado sobre uma viga, o resultado pode ser uma curva demasiadamente amortecida e um sinal de resposta fraco. Por isso, é importante selecionar uma espessura apropriada para o material de amortecimento, tornando o sistema mensurável. Recomenda-se utilizar uma relação inicial de 1:1 entre as espessuras do material viscoelástico e da viga para as vigas nas configurações Oberst e Oberst Modificada e 1:10 para as vigas na configuração sanduíche. Deve-se tomar cuidado para que o sistema não se torne pouco amortecido, pois diferenças demasiadamente pequenas nas respostas da viga com e sem material de amortecimento podem gerar resultados incorretos;
- Deve-se observar também a cola utilizada na aplicação do material. Suas propriedades e dimensões podem afetar o comportamento e ser uma fonte de incertezas. O mais indicado é consultar o fabricante a respeito da colagem do material.

### 2.8.4 Faixas de validade

O método é baseado nas diferenças entre as frequências naturais e amortecimento entre a mesma viga com adição de material viscoelástico (configurações Oberst ou sanduíche) e sem material (viga uniforme). Quando pequenas diferenças de números grandes estão envolvidas, as equações para o cálculo das propriedades se tornam inadequadas, podendo causar grandes diferenças nos resultados. Para não haver erros deste tipo, recomenda-se que:

Para a viga na configuração Oberst (

Figura 7b):

$$\left(\frac{f_c}{f_n}\right)^2 (1 + DT) \geq 1.01 \quad (17)$$

E para a viga na configuração *sanduíche* (Figura 7d):

$$\left(\frac{f_s}{f_n}\right)^2 (1 + 2DT) \geq 2.01 \quad (18)$$

sendo  $f_n^{(c)}$  a frequência natural do modo n da viga com material viscoelástico;  $f_n^{(v.b.)}$  a frequência natural do modo n da viga descoberta;  $D$  a razão entre densidades do material viscoelástico e do material da viga;  $T$  a razão entre espessuras do material viscoelástico e do material da viga.

## 3 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE ACORDO COM AS RECOMENDAÇÕES DA NORMA ASTM E-756

### 3.1 Equipamentos Utilizados

#### 3.1.1 Transdutores

Para as medições foram utilizados transdutores de vibração do tipo sem contato, para evitar a adição de massa à viga de teste. Foram selecionados dois tipos para a realização dos ensaios, um para impor excitação à viga e o outro para a medição da resposta do sistema.

Para medição da resposta do sistema, utilizou-se o transdutor marca Bruel and Kjaer modelo MM-0002, mostrado na Figura 8. O

transdutor utilizado para a excitação é do mesmo tipo, porém do fabricante MOTION SENSORS, modelo PC55-18E, que pode ser visto na Figura 9. Ambos os transdutores tem princípio de funcionamento por indução do tipo relutância variável e suas especificações podem ser vistas no ANEXO 1.

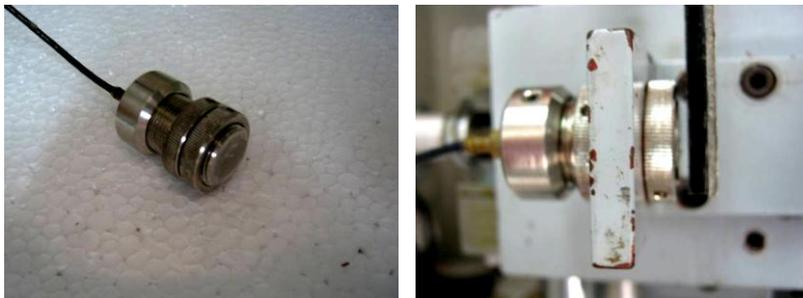


Figura 8 – Transdutor B&K modelo MM-0002.

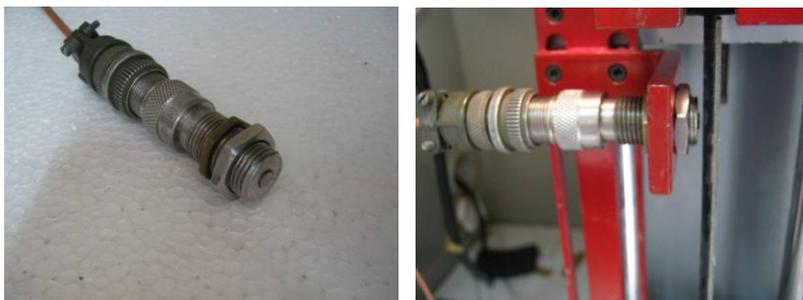


Figura 9 – Transdutor MOTION SENSORS modelo PC 55-18E.

### 3.2 Câmara de Climatização

Uma câmara de climatização é um sistema termicamente isolado, e com variação controlada da temperatura. No seu interior são inseridas amostras de testes e equipamentos de medição, possibilitando a avaliação do comportamento viscoelástico de materiais.

A câmara de climatização do LVA da UFSC possui gabinete construído em chapa de aço galvanizado de 0,5 mm de espessura, com dimensões externas de 1,2m X 1,0m X 1,0m e internas de 1,0m X 0,85m X 0,80m, com isolamento de placas de poliuretano coladas medindo 100 mm de espessura. A porta de acesso ao interior é quadrada com

dimensões de 0,7 m de lado, tendo fibra de vidro com isolamento e gaxeta aquecida (LOPES, 1989).

A base da câmara é constituída de tijolos refratários e seu interior possui isolamento com placas de poliuretano com 50 mm de espessura. A impermeabilização da base da câmara foi feita com asfalto, evitando assim a migração de água através desta. A base de montagem possui perfis tipo C, chumbados num bloco de concreto (LOPES, 1989).

O seletor/controlador digital da temperatura interna da câmara permite a escolha de valores entre  $-30^{\circ}\text{C}$  e  $60^{\circ}\text{C}$ , com precisão de décimo de grau (LOPES, 1989). Durante testes de limites da câmara, a temperatura mínima atingida foi de  $-28^{\circ}$ . O sistema de refrigeração da câmara utiliza o gás refrigerante R404A e o aquecimento é feito através de resistências elétricas. Dois ventiladores axiais garantem a circulação interna do ar.

Os sensores de temperatura e umidade ficam posicionados junto à lateral esquerda da câmara, a meia altura. Um sistema eletrônico faz a leitura e controla os sistemas de aquecimento e resfriamento para se alcançar a condição desejada no interior da câmara. Maiores detalhes podem ser observados na Figura 10.



Figura 10 - Câmara térmica.

### **3.2.1 Estabilização da temperatura na câmara de climatização**

As temperaturas atingidas no interior da câmara dependem da capacidade do sistema de refrigeração em retirar calor através de seu ciclo termodinâmico. Menores temperaturas no interior da câmara são obtidas se diminuídas as trocas de calor através das paredes da câmara e também a temperatura de operação do condensador do sistema. A menor temperatura atingida no interior da câmara foi de  $-28^{\circ}\text{C}$ , após cerca de 5 horas de operação.

Em busca de uma maior precisão e agilidade, foi escolhida a temperatura mínima de  $-25^{\circ}\text{C}$  para os ensaios, já que esta é conseguida em um tempo razoavelmente menor que a temperatura mínima alcançada no teste. O tempo aproximado entre o início de funcionamento do sistema e o início das aquisições de dados é de cerca de 5 horas, sendo 4 horas gastas para atingir a temperatura desejada e 1 hora para garantir a estabilização da temperatura da viga no interior da câmara.

Após a medição em determinada temperatura, são aguardados cerca de 90 minutos até uma nova medição, sendo que são esperados 30 minutos até ser atingido o valor de temperatura desejado e outros 60 minutos até haver a adequada estabilização da temperatura da viga com a temperatura da câmara. O critério indicado pela norma ASTM E-756 para a estabilização da temperatura nos ensaios é de que a diferença entre a temperatura desejada e a medida na viga seja inferior a  $0,6^{\circ}\text{C}$ .

Os valores de temperatura são monitorados e salvos durante os ensaios. São medidos com a utilização de termopares em alguns pontos: na base do engaste da viga, no cárter do compressor, no interior da câmara de climatização e na sala onde a câmara está instalada.

Para verificar o comportamento da câmara de climatização durante um ensaio, fez-se o monitoramento das temperaturas partindo da temperatura ambiente até uma temperatura de ensaio de  $-20^{\circ}\text{C}$ . Na Figura 11 pode-se observar o comportamento da temperatura nestes componentes em função do tempo quando selecionada a temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  na câmara. O tempo zero corresponde ao momento de partida do sistema de refrigeração. É importante salientar que a temperatura de referência utilizada como orientação para a estabilização é aquela medida na viga e não a lida no interior da câmara e que a temperatura ambiente foi controlada por um condicionador de ar. O início da estabilização da câmara aconteceu depois de cerca de 130 minutos.

### Estabilização da temperatura

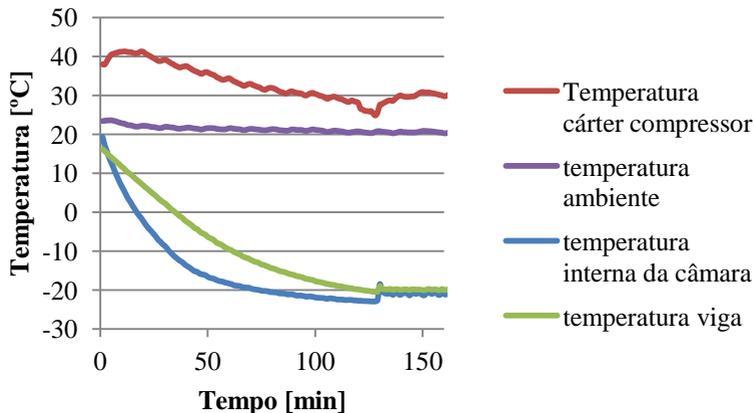


Figura 11 – Estabilização da temperatura da câmara de climatização até uma temperatura de -20°C.

### 3.3 Sistema de aquisição de temperaturas

A medição e controle de temperatura são fundamentais para a realização dos ensaios. O equipamento utilizado para estas funções foi o módulo de aquisição marca AGILENT, modelo 34970A, com 32 canais e termopares do tipo “T”.

A temperatura foi monitorada em quatro posições: na base da viga (Figura 12 - Esquerda), no interior (Figura 12 - Direita), exterior da câmara e no cárter do compressor. A temperatura oficial do ensaio é aquela medida na base da viga. Os outros pontos foram utilizados para um melhor controle dos ensaios.

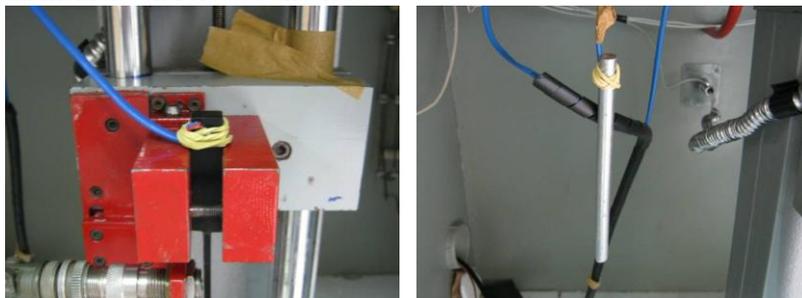


Figura 12 – Medição de temperatura (Esquerda: Base viga, Direita: Interior da câmara).

Foram utilizados termopares para o controle da temperatura devido à capacidade de medição em uma vasta gama de temperaturas e praticidade. A norma ASTM E230, que trata do assunto, especifica que o erro máximo permissível para termopares do tipo “T” é de +/- 1°C ou +/- 0,75% (o que for maior).

Através de uma verificação no ponto de fusão de gelo (zero °C ao nível do mar) com uma mistura de água e gelo, foram encontrados os valores apresentados na tabela abaixo:

Tabela 4 – Temperaturas medidas da mistura de água e gelo.

Objeto	Temperatura [°C]
Termopar viga	0,9
Termopar interior câmara	0,8

As quais atendem aos requisitos de tolerância de termopares, que para todos os efeitos devem ser levados em conta como sendo incertezas de medição.

### 3.4 Corpos de prova

Os corpos de prova utilizados nos ensaios foram os seguintes:

Para os ensaios Oberst, foram usadas vigas de aço (Figura 13) e, para evitar erros aleatórios, foi utilizado um único corpo de prova, com dimensões de 250,00 mm x 10,08 mm x 3,14 mm.



Figura 13 – Vigas para ensaio Oberst.

Para os ensaios sanduíche, foram utilizadas as vigas construídas em aço SAE1040 da Figura 14, com dimensões de 250,00 mm x 10,70 mm x 1,36 mm.



Figura 14 – Vigas para ensaio sanduíche.

### 3.5 Dispositivos de Fixação

A norma ASTM E-756 recomenda que o dispositivo de fixação tenha rigidez suficiente para a obtenção de uma Função Resposta em Frequência (FRF) da viga sem presença de ruído. Para isto, a estrutura deve ser sólida e possuir suportes apropriados para a fixação da viga e transdutores, como também não possuir ressonâncias internas que interfiram nos resultados dos ensaios.

#### 3.5.1 *Teste de rigidez do dispositivo de fixação*

A verificação da rigidez mínima necessária ao engaste para a obtenção de bons resultados foi realizada através da medição da viga uniforme e seguindo a formulação apresentada na seção 2.8.2.1 para obtenção do fator de perda e módulo de elasticidade. Segundo a norma ASTM E756, os valores necessários para a validação são: módulo de elasticidade maior que  $2,07E11 Pa$  e fator de perda de aproximadamente de 0,002 até 0,001 para os dois primeiros modos e 0,001 ou menos, para os demais modos. Caso não se alcancem estes valores, entende-se que o dispositivo de fixação não é adequado.

Neste teste, foi utilizado um sistema de engaste produzido para uso no LVA (Figura 15). Na próxima seção este sistema será comparado com outro, produzido pela Bruel and Kjaer (B&K), para avaliação final de qual dos dois produz melhores curvas de resposta em frequência.

Durante os primeiros testes, foi detectado um problema com as curvas de FRF apresentando ruído na região do quinto modo, como se pode notar na curva azul (Figura 16), especificamente na faixa entre 2

kHz e 2,5 kHz. A leitura da frequência natural e do respectivo fator de perda seria equivocada neste ponto.

Foi identificado que o problema estava na fixação das placas de engaste da viga. O dispositivo de engaste tem duas destas placas, entre as quais os corpos de prova são fixados, sendo que uma delas é presa ao restante do engaste e a outra é livre do engaste, estando apenas ligada à primeira placa por dois parafusos. A solução foi encontrada fixando-se uma pequena barra em formato “L”, ligando à placa livre ao engaste. Na Figura 17 está apresentado o aparato de engaste antes e na Figura 18 o aparato depois da modificação. Pode-se observar na Figura 16 uma comparação das curvas FRF de uma viga com material de amortecimento antes e depois da inserção do reforço em “L”.

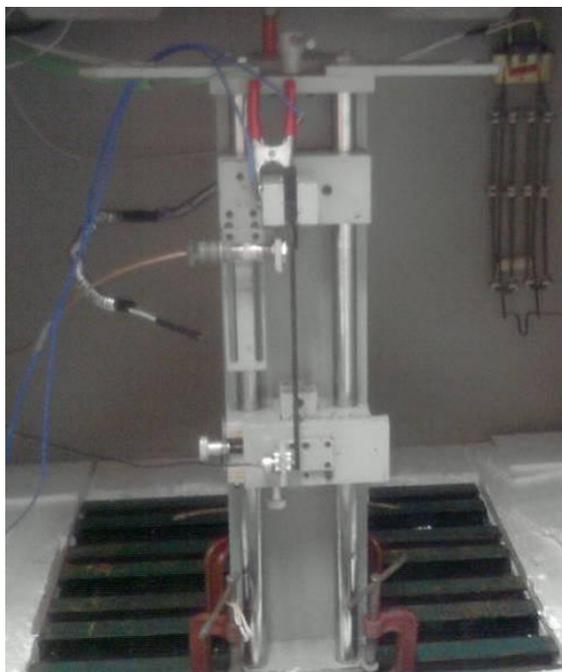


Figura 15 - Sistema de engaste LVA.

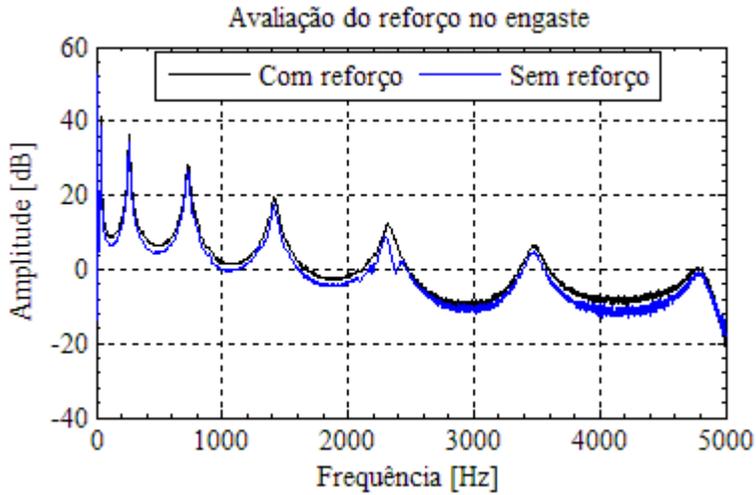


Figura 16 - Curvas FRF obtidas com e sem reforço no engaste do dispositivo de fixação.

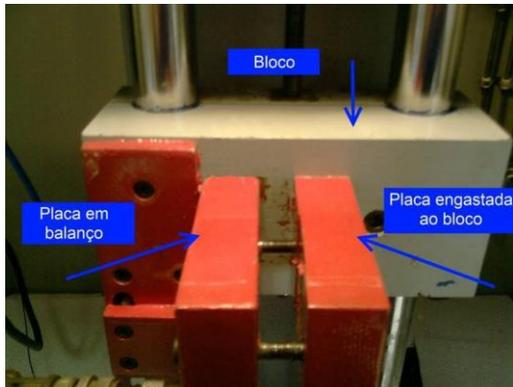


Figura 17 - Sistema sem reforço na placa em balanço (antes).

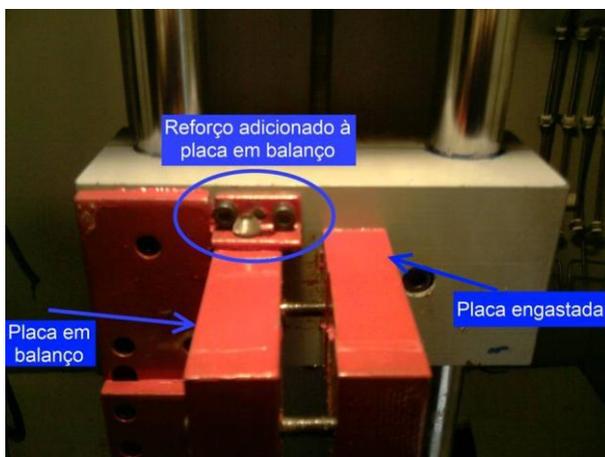


Figura 18 - Sistema com reforço na placa em balanço (depois).

Depois de resolvido o problema, foi executado o ensaio da rigidez do engaste. Os valores obtidos para o módulo de elasticidade e fator de perda atenderam os critérios.

### 3.5.2 Escolha do dispositivo

O LVA dispunha de dois sistemas de engaste para ensaios através do método da viga vibrante, remanescentes de pesquisas realizadas no passado.

O primeiro deles é o modelo B&K 3930, do fabricante Bruel and Kjaer (Figura 19 a), medindo aproximadamente 330 mm de altura, com suportes adequados para fixação da viga e dos transdutores de excitação e resposta. Possui ajustes finos para a regulagem da posição da distância dos transdutores até a viga. O tamanho máximo dos corpos de prova que podem ser utilizados com o sistema é de 280 mm. O aperto de engaste da viga é dado através de um parafuso de aperto manual.

O segundo sistema de engaste foi apresentado na seção 3.5.1 (Figura 19 - b). Este permite a medição de corpos de prova maiores, como vigas com até 550 mm de comprimento. A viga é engastada pelo aperto dado entre duas placas através de dois parafusos. Também possui mecanismos de ajuste fino de posicionamento dos transdutores.

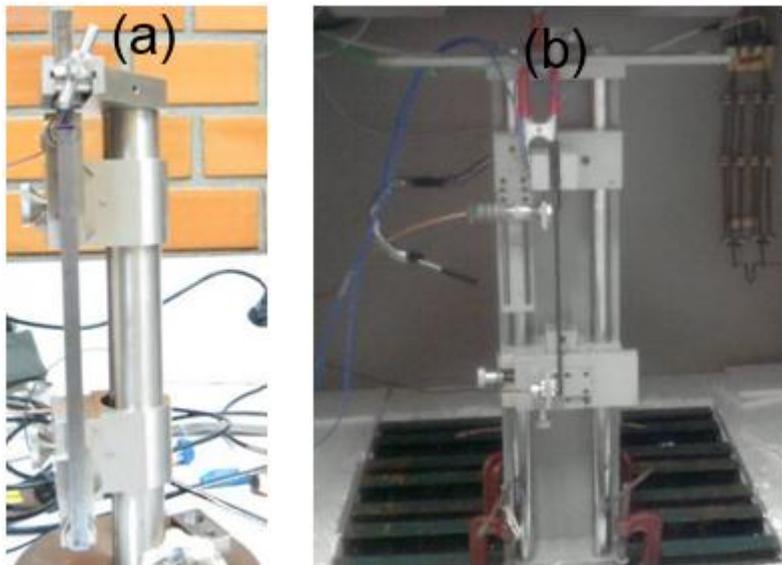


Figura 19 – Dispositivos de engaste para realização dos experimentos – Bruel and Kjaer (a); Sistema LVA (b).

O requisito é que o dispositivo de engaste forneça rigidez suficiente à obtenção de curvas FRF sem interferência de vibração que não seja a flexão da viga e também que tenha a menor inércia térmica possível, diminuindo o tempo de estabilização da câmara.

Comparando os dois dispositivos, percebe-se que o dispositivo B&K 3930 possui menor inércia térmica (devido à menor massa), é de mais simples manuseio e possui ajustes mais precisos da posição dos transdutores. Já o dispositivo LVA, possui maior massa, rigidez e permite a utilização de vigas de maiores dimensões.

Buscando saber qual seria o mais adequado à realização dos ensaios, foi feita uma comparação. A qualidade da curva FRF foi avaliada através de um experimento. Para tal, uma mesma viga foi ensaiada com os dois dispositivos de engaste. O gráfico com os resultados está apresentado na Figura 20.

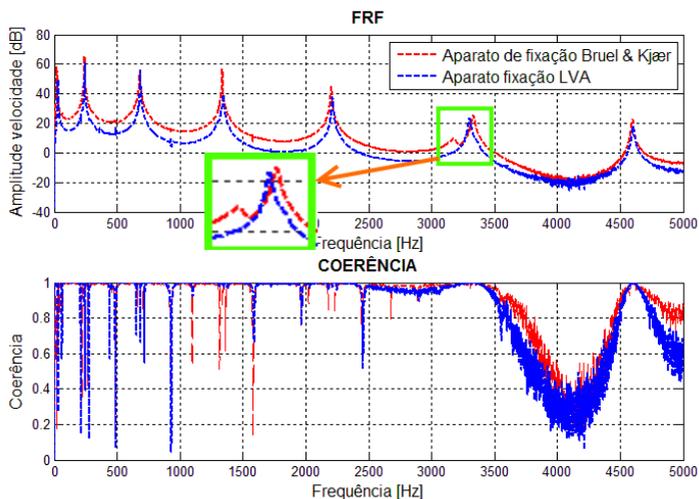


Figura 20 – Comparação entre sistemas de engaste.

Como se pode observar na Figura 20, a curva com melhor qualidade foi obtida utilizando o dispositivo LVA (azul), já que na curva obtida com a utilização do sistema B&K 3930, há um pico de ressonância em 3,2 kHz, que não é coerente com as frequências naturais de flexão da viga. Através da análise modal foi detectada a origem deste pico sendo de um parafuso de fixação da viga (Figura 21). Baseado nisto, o dispositivo LVA de fixação das vigas foi julgado mais adequado para os ensaios.



Figura 21 - Detalhe do parafuso de fixação do sistema B&K 3930.

### 3.5.3 *Posicionamento dos transdutores de medição*

Há duas configurações diferentes nos quais os transdutores podem ser posicionados para realização dos ensaios. Na primeira (Figura 22), o transdutor de excitação fica posicionado próximo à extremidade livre da viga, enquanto o transdutor de resposta próximo ao engaste. Na segunda configuração (Figura 23), a posição é inversa. As duas posições foram testadas para ser avaliado qual a mais adequada para a caracterização de materiais.

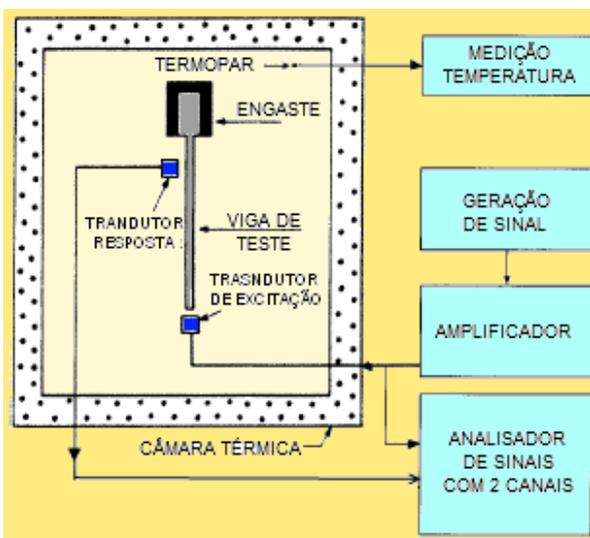


Figura 22 – Esquema de medição com excitação na extremidade da viga da norma ASTM E-756.

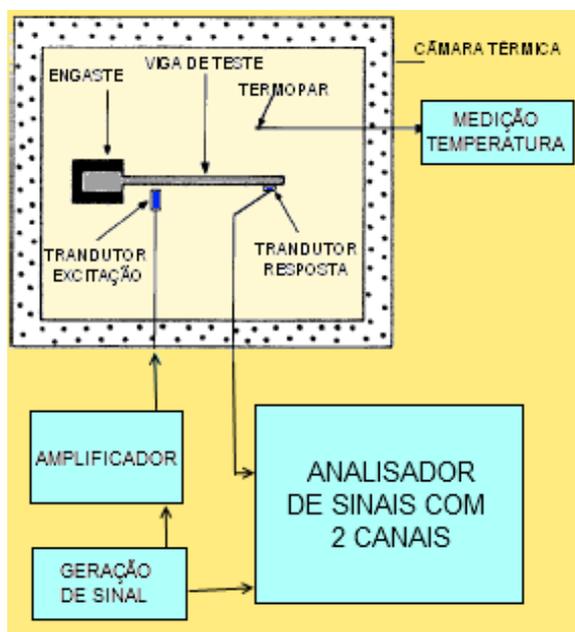


Figura 23 - Esquema de medição com excitação próxima ao engaste da norma ASTM E-756.

No teste foi utilizado o sinal de excitação tipo ruído branco, que possui potência distribuída uniformemente no espectro de frequência e também pelos resultados obtidos. O nível do sinal de excitação foi mantido o mesmo, bem como a distância dos transdutores à viga.

Os resultados obtidos dos ensaios nas duas configurações estão apresentados na Figura 24, na qual pode se vê que a configuração com o transdutor de excitação próxima ao engaste apresentou menor nível de ruído na curva FRF.

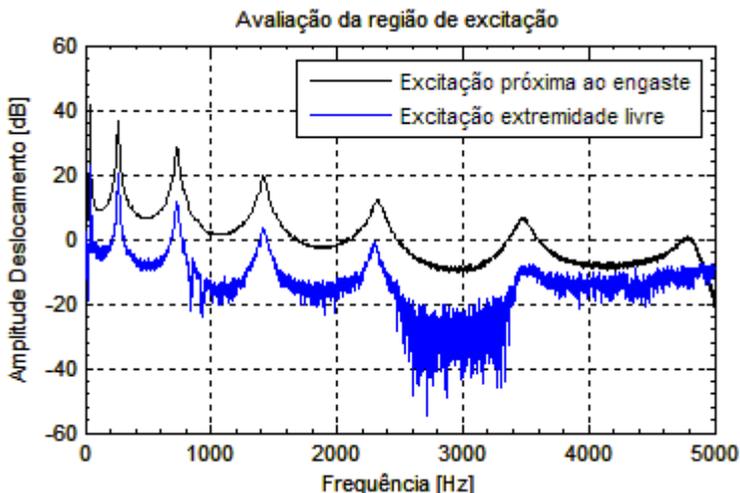


Figura 24 – Avaliação do melhor esquema de medição.

### 3.6 Considerações finais sobre o sistema de medição

A obtenção de resultados confiáveis na aplicação do método da viga vibrante da norma ASTM E-756 é fortemente vinculada ao cuidado com que se tratam as incertezas presentes, sejam as da cadeia de medição, da aplicação das condições de contorno, do controle de temperatura.

A avaliação do sistema de medição do LVA mostrou que a infraestrutura instalada bem como os equipamentos, sistemas de controle e aquisição de sinais são adequados para a aplicação do método e obtenção de resultados consistentes.

## 4 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS DE AMORTECIMENTO

Ensaio com o material disponibilizados por dois fabricantes foram realizados utilizando a metodologia apresentada na norma ASTM E 756 e os resultados comparados com aqueles fornecidos por estes fabricantes.

A configuração Oberst foi utilizada para obtenção das propriedades de um material de amortecimento com maior rigidez. Já a configuração sanduíche foi utilizada para obtenção das propriedades de um material de amortecimento com menor rigidez. Ambos foram realizados conforme o procedimento descrito na seção 2.8 e serão apresentados a seguir.

### 4.1 Viga Na Configuração Oberst

A configuração Oberst (

Figura 7 - b) é utilizada na caracterização de materiais cujo módulo de elasticidade seja maior que 100 MPa, quando sujeitos à deformação flexional. Um material que atende este requisito, conforme informações de sua carta é o SD 40 (Figura 25), do fabricante EAR/3M. Este, juntamente com uma camada de alumínio de 0,1 mm compõe o material ADC 006 (Figura 26). Já o nomograma de frequência reduzida do SD 40 pode ser visto na Figura 27.



Figura 25 - Material viscoelástico modelo SD 40 do fabricante 3M.



Figura 26 – Material ADC 006 (Configuração do material SD 40 com camada de alumínio de 0,1mm de espessura).

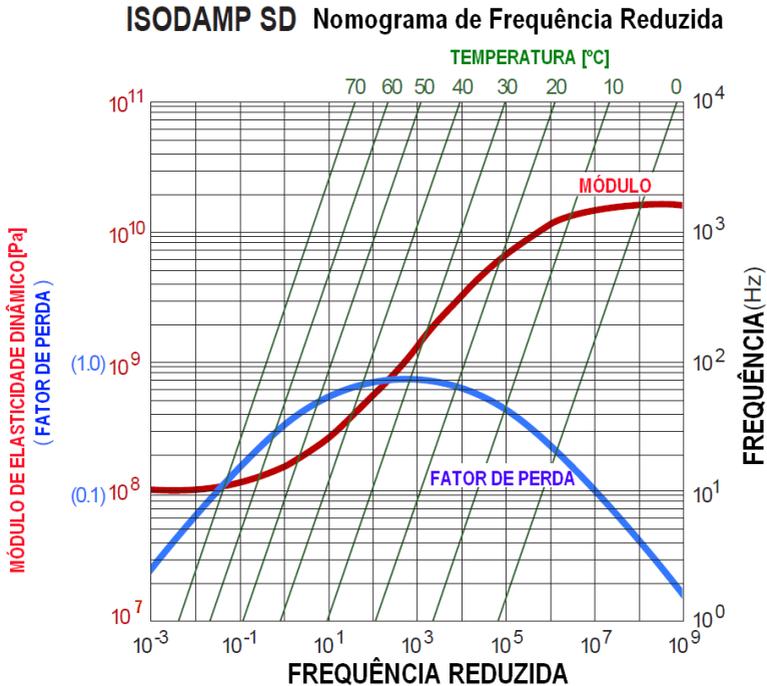


Figura 27 – Nomograma do SD 40 – Módulo de elasticidade ( $E$ ) e fator de perda ( $\eta$ ) VS. frequência e temperatura. (Fonte: Site 3M/EAR. Disponível em: <http://www.ears.com/pdfs/engineering/nomograms/isodamsd.pdf>).

No nomograma da Figura 27 podem ser vistos os valores máximo e mínimo do módulo de elasticidade e o valor máximo do fator de perda. O módulo de elasticidade está entre 100 MPa e 20 GPa, que

corresponde a uma variação 200 vezes. O pico máximo do fator de perda é de aproximadamente 0,75, ou 75%.

Para os ensaios, foram feitas medições entre  $-25^{\circ}\text{C}$  e  $35^{\circ}\text{C}$ , com passos de  $5^{\circ}\text{C}$  (13 diferentes temperaturas). Na Figura 28 está apresentada uma representação do ensaio.

Para que possa ser notado o efeito de amortecimento da adição do SD 40 à viga de ensaio, estão na Figura 29 as curvas com e sem material. Percebe-se que houve atenuação e redução dos valores de frequência dos respectivos picos. A Figura 30 apresenta o comportamento das FRF com a variação da temperatura da viga com material de amortecimento em ensaio na configuração Oberst.

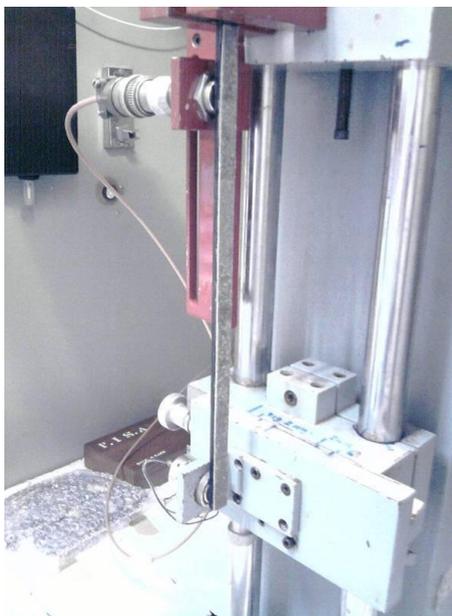


Figura 28 - Viga de ensaio com SD 40.

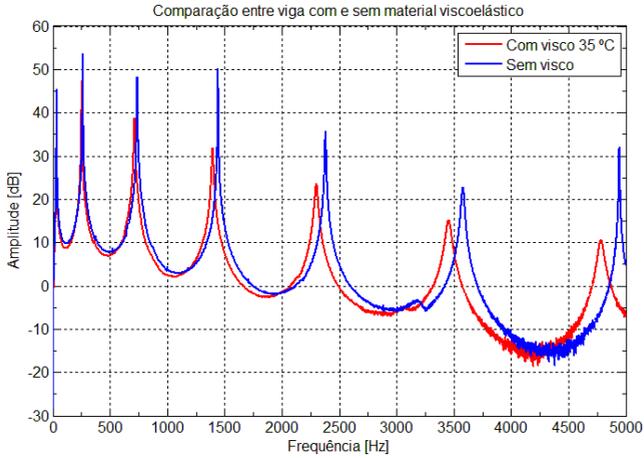


Figura 29 – Comparação entre a resposta de uma viga com e sem viscoelástico no ensaio Oberst.

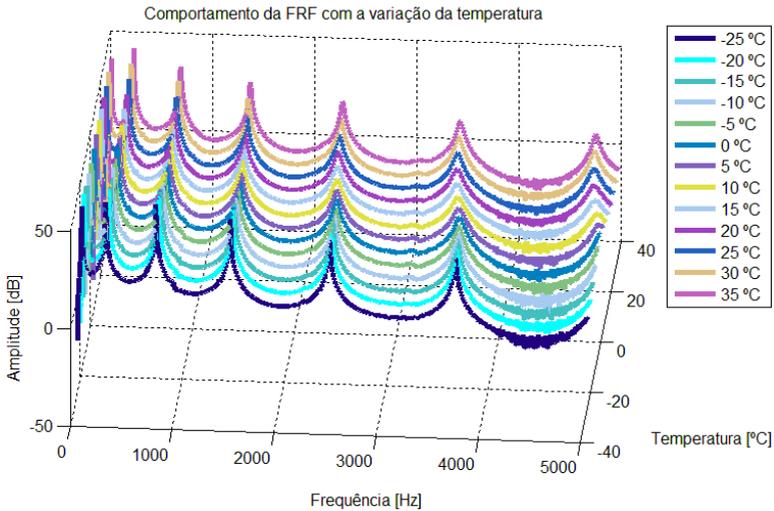


Figura 30 – Variação da resposta de uma viga com material viscoelástico com a mudança de temperatura no ensaio Oberst.

A partir das FRF obtidas, foram lidas as frequências naturais e respectivos fatores de perda para cada temperatura de ensaio. Em seguida, as propriedades obtidas do material foram calculadas com as equações apresentadas na seção 2.8.2. Os gráficos com as comparações

do módulo de elasticidade e do fator de perda em função da frequência referentes ao material SD 40 estão apresentados nas Figuras 31 e 32, respectivamente. Por recomendação da norma ASTM E-756, os resultados do primeiro modo foram omitidos.

Nos gráficos das Figuras 29 e 30, notam-se pequenas variações do módulo de elasticidade e do fator de perda com a variação da frequência mesmo considerando várias décadas, com curvas praticamente horizontais. A variação destas propriedades com a temperatura é bem mais pronunciada, principalmente a partir de  $-5^{\circ}\text{C}$ .

Para verificar os resultados obtidos, os mesmos foram comparados com os fornecidos pelo fabricante e estão apresentados a seguir.

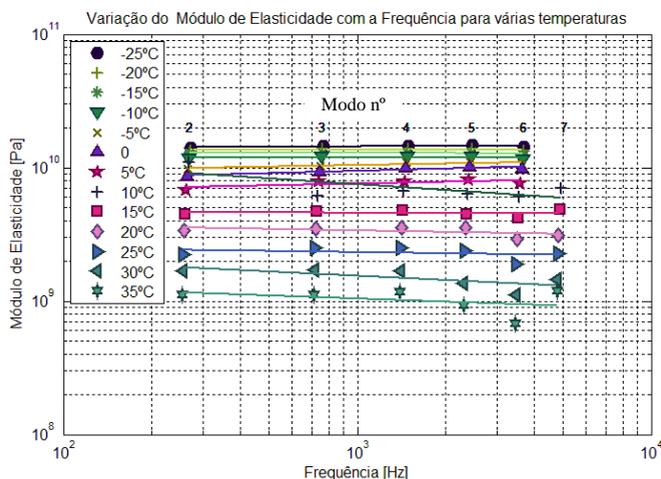


Figura 31 – Módulo de elasticidade ( $E$ ) em função da frequência.

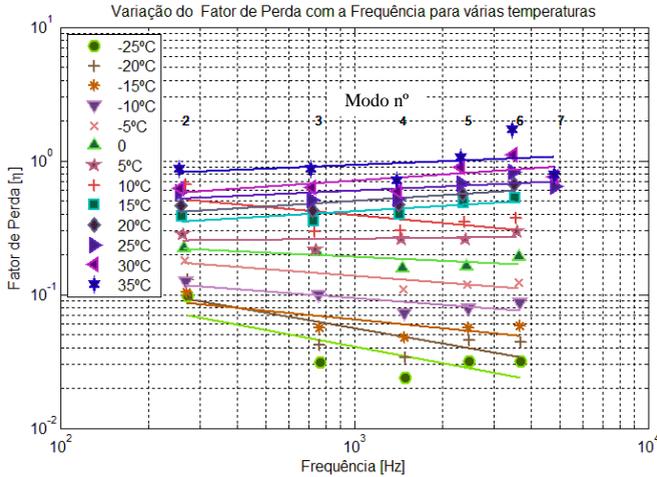


Figura 32 – Fator de perda em função da frequência.

#### 4.1.1 Comparações com os dados fornecidos pelo fabricante

A seguir serão apresentadas as comparações entre os dados do fabricante e os obtidos através dos ensaios realizados no LVA. A comparação entre os módulos de elasticidade estão nas Figuras 33 a 36 e fatores de perda nas Figuras 37 até 40.

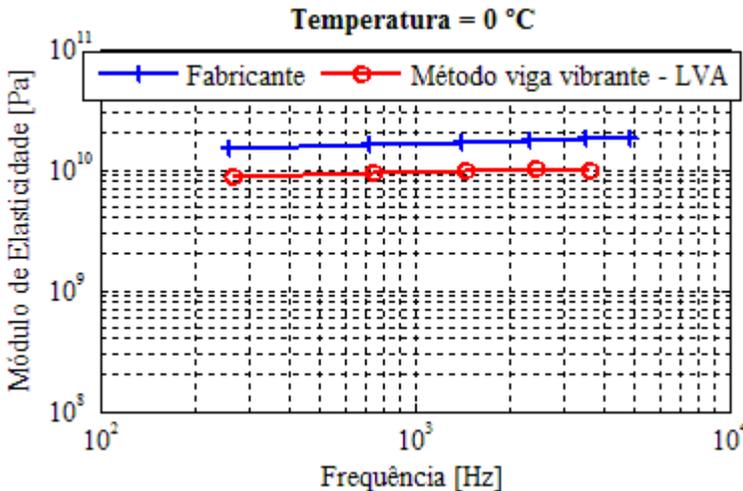


Figura 33 – Módulo de elasticidade: Fabricante vs. Experimental (0°C).

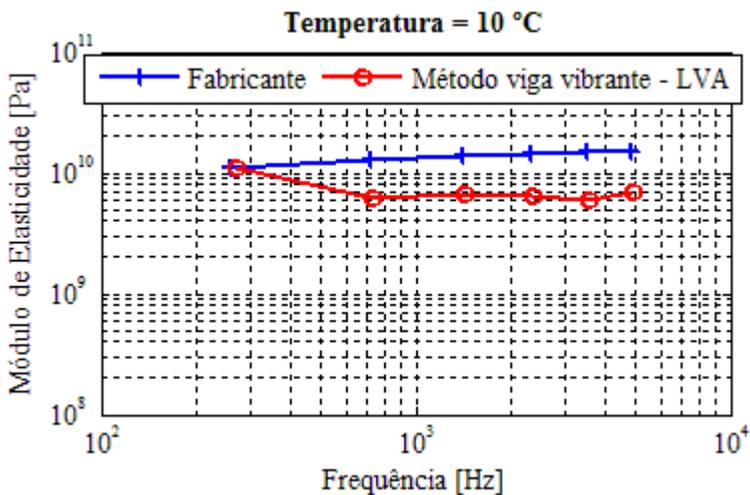


Figura 34 – Módulo de elasticidade: Fabricante vs. Experimental (10°C).

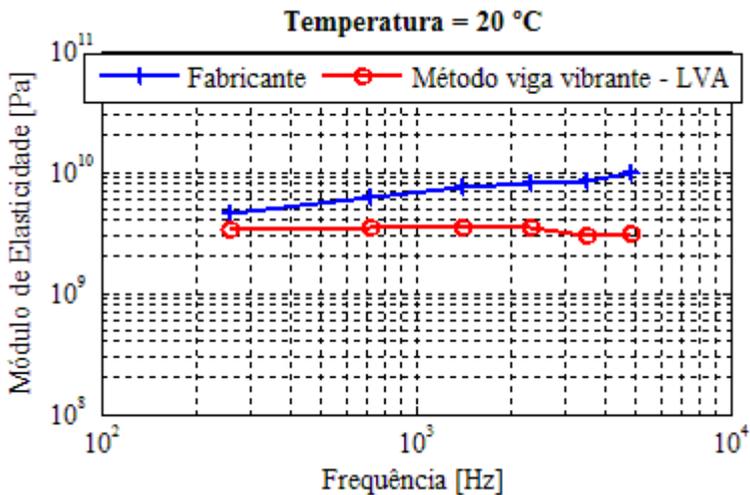


Figura 35 – Módulo de elasticidade: Fabricante vs. Experimental (20°C).

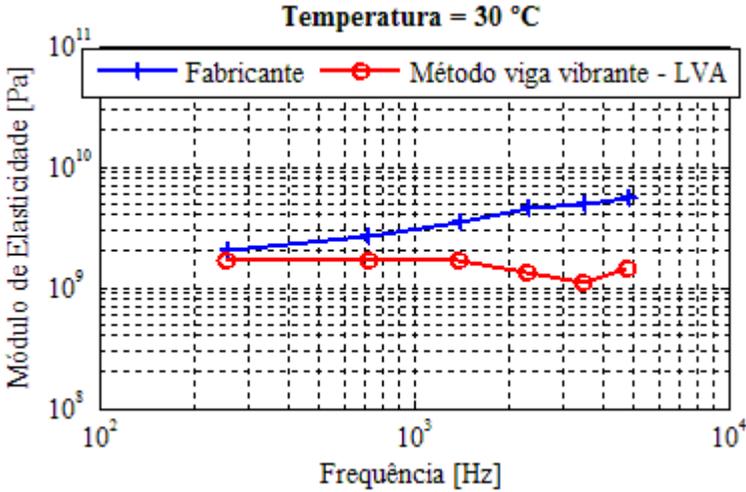


Figura 36 – Módulo de elasticidade: Fabricante vs. Experimental (30°C).

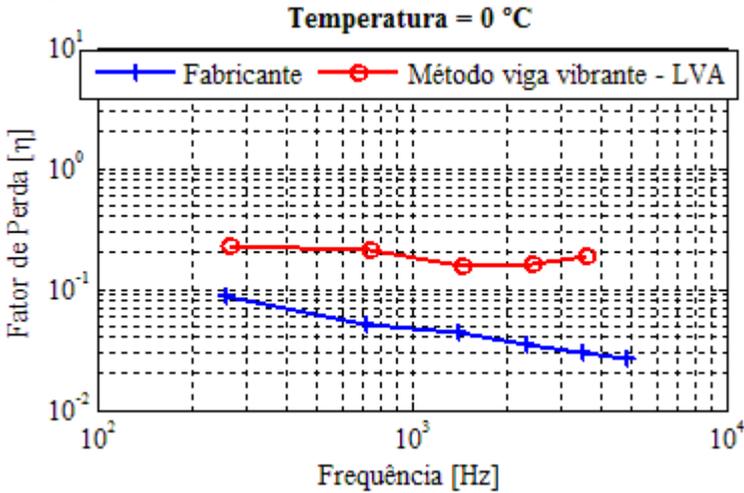


Figura 37 – Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (0°C).

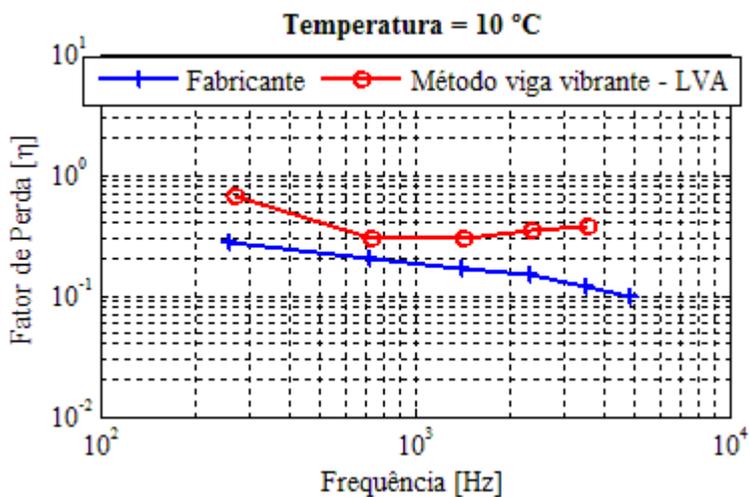


Figura 38 – Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (10°C).

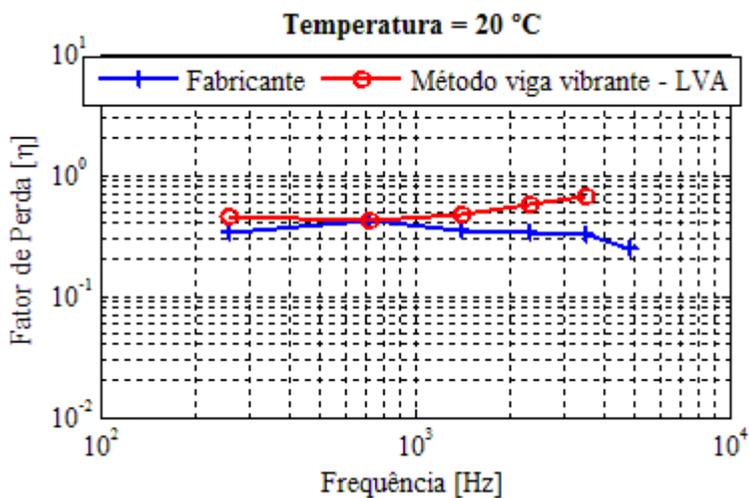


Figura 39 – Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (20°C).

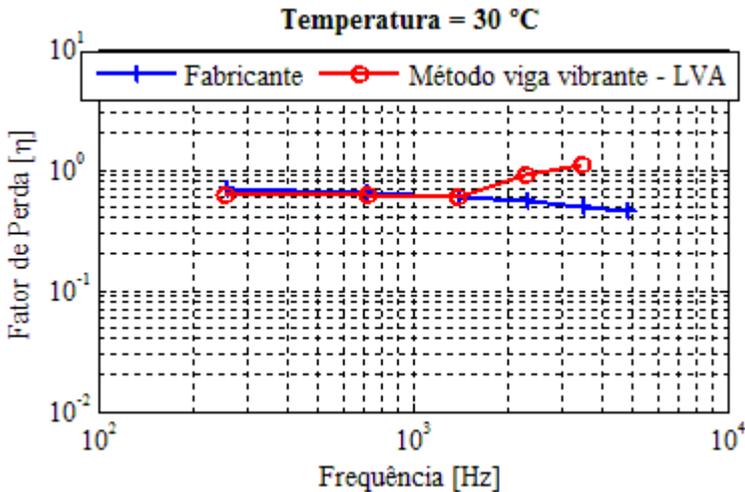


Figura 40– Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (30°C).

As comparações apresentadas nas figuras anteriores indicam algumas diferenças entre os dados do fabricante e os dados obtidos neste trabalho. Em parte, estas diferenças podem ser explicadas devido ao envelhecimento do material, confirmado pelo fabricante como provável. Outra hipótese diz respeito ao método de determinação das propriedades utilizado pelo fabricante, que não se tem conhecimento.

Para temperaturas mais altas, região de maior atenuação do material, como se pode ver no nomograma da Figura 27, os resultados apresentaram maior concordância com os dados do fabricante.

Apesar dessas diferenças, pode-se concluir que os resultados são confiáveis, já que houve conformidade em relação ao procedimento, equipamentos e execução do método e os resultados obtidos dos ensaios podem ser utilizados para a validação dos métodos numéricos.

## 4.2 Viga na Configuração Sanduíche

A configuração sanduíche (

Figura 7 - d) é utilizada para caracterizar materiais cujo módulo de cisalhamento seja menor que 100 MPa. Para este ensaio, foi utilizado o material de aplicação aeronáutica SMACTANE 1135-04 (Figura 41), do fabricante SMACSONIC.



Figura 41 - SMAC 1135-04.

A espessura deste material é de 1 mm e é utilizado na composição de materiais fabricados pela Smacsonic, formando materiais de amortecimento com camada de constricção. Os dados fornecidos pelo fabricante para este material mostram valores de temperatura variando de  $-100^{\circ}\text{C}$  até aproximadamente  $20^{\circ}\text{C}$ . As curvas do fabricante, mostrando a variação do módulo de elasticidade e do fator de perda com a frequência para uma temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$  podem ser vistas na Figura 42.

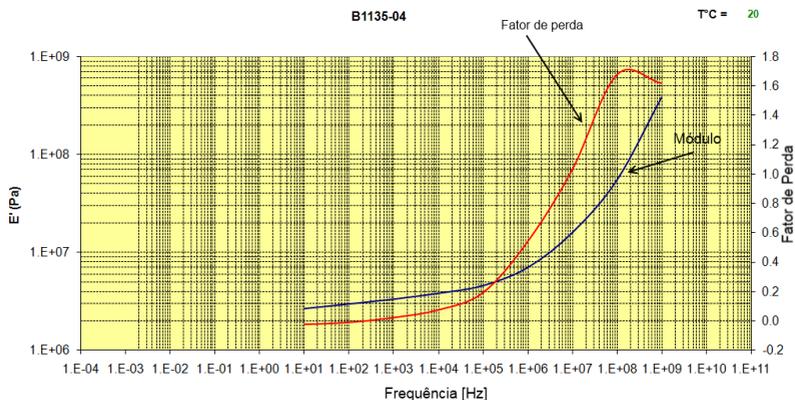


Figura 42 - Curva SMAC 1135-04 a  $20^{\circ}\text{C}$ . (Fonte: Fabricante Smacsonic).

A região de transição deste material ocorre em baixas temperaturas, mais especificamente próximo a  $-40^{\circ}\text{C}$ , sendo que nesta

região o material possui seu melhor desempenho de atenuação de vibrações.

Lembrando que a rigidez dos materiais viscoelásticos aumenta com a redução da temperatura, e que o menor valor de temperatura da câmara de testes é de  $-25^{\circ}\text{C}$  conclui-se que os maiores valores de rigidez nos ensaios deste trabalho serão vistos nesta temperatura. Como o ensaio na configuração sanduíche é válido para materiais com módulo de elasticidade menor que 100 MPa, foi mapeado na curva de propriedades do material SMAC 1135-04 (Figura 43), à  $-25^{\circ}\text{C}$ , a faixa de validade do método, limitado pela rigidez e faixa de frequência.

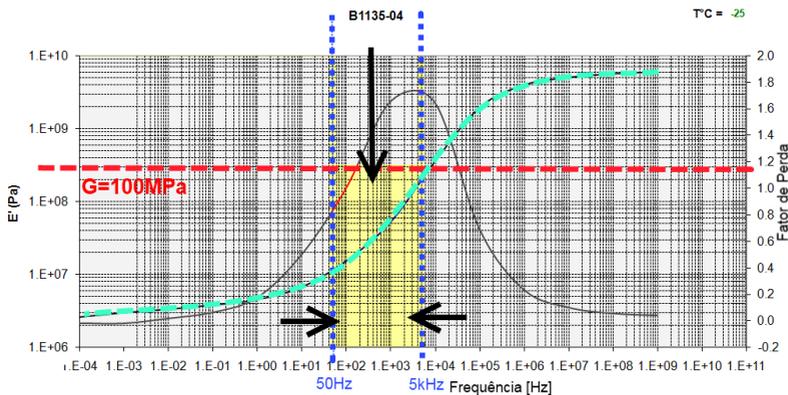


Figura 43 - Curva do material SMAC 1135-04 em  $-25^{\circ}\text{C}$  e as faixas de utilização do método.

A linha vermelha tracejada na Figura 43 corresponde ao valor de  $G=100\text{ MPa}$  ( $E=298\text{ MPa}$  com coeficiente de Poisson=0,49). As linhas verticais azuis representam a faixa de validade recomendada pela norma ASTM E-756. A região amarela no gráfico, portanto, representa a faixa na qual o método será aplicado, considerando a limitação do módulo de cisalhamento.

Deve-se observar que a curva verde, que representa o módulo de elasticidade variando com a frequência, não ultrapassa o limite de rigidez, confirmando a validade de utilização da viga sanduíche para este material.

O ensaio com a configuração sanduíche foi realizado seguindo as recomendações da norma. O fabricante sugere a utilização de cola do tipo epóxi para a adesão do material às vigas. Para tal, foi então utilizada a cola epóxi ARALDITE de secagem rápida.

Seguindo o procedimento apresentado, foram obtidos valores de fator de perda e módulo de cisalhamento para o material SMAC 1135-

04. Os dados estão apresentados nas Figuras 45 e 46. Os resultados de alguns modos não estão presentes nos gráficos devido à impossibilidade de medir o amortecimento da curva do conjunto viga sanduíche. É interessante notar um aumento progressivo do amortecimento com o decréscimo da temperatura, conforme esperado.

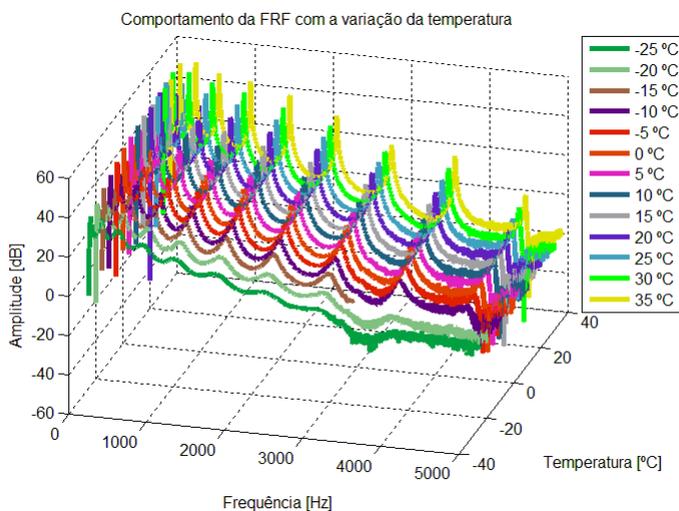


Figura 44 - Variação da resposta de uma viga com material viscoelástico com a mudança de temperatura – ensaio sanduíche.

Variação do Módulo de Cisalhamento com a Frequência e Temperatura

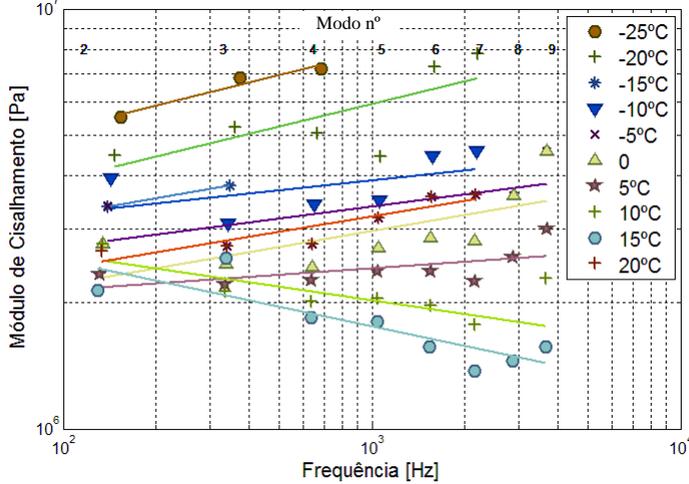


Figura 45 – Variação do módulo de cisalhamento com a frequência.

Variação do Fator de Perda com a Frequência e Temperatura

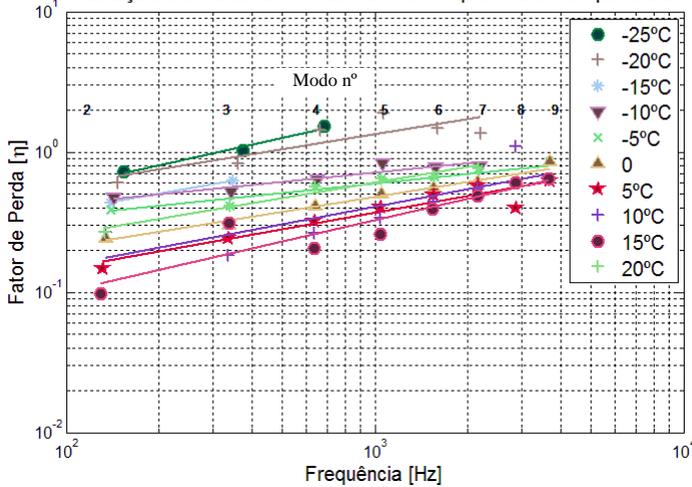


Figura 46 – Variação do fator de perda com a frequência.

É importante observar o comportamento das propriedades do material com a variação da temperatura. No gráfico da Figura 45 nota-se a tendência geral do material em ser mais rígido com o aumento da frequência e diminuição da temperatura. Na Figura 46 se vê o aumento do fator de perda com a frequência e com a diminuição da temperatura.

#### 4.2.1 Comparação com os dados do fabricante

A seguir, são apresentadas as comparações das propriedades de módulo de cisalhamento e fator de perda, obtidos através do método da viga vibrante, com os dados fornecidos pelo fabricante, dentro da faixa de temperatura de  $-25^{\circ}\text{C}$  a  $15^{\circ}\text{C}$ .

Os primeiros cinco gráficos apresentam a comparação dos módulos de cisalhamento e os seguintes, a comparação dos fatores de perda.

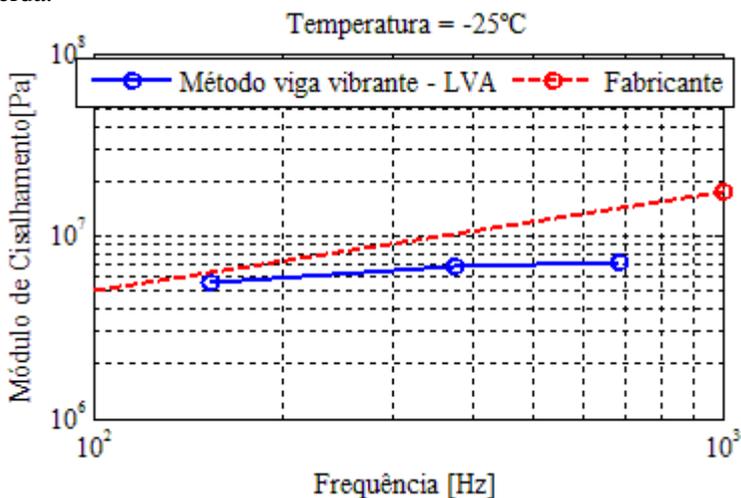


Figura 47 – Módulo de cisalhamento: Fabricante vs. Experimental ( $-25^{\circ}\text{C}$ ).

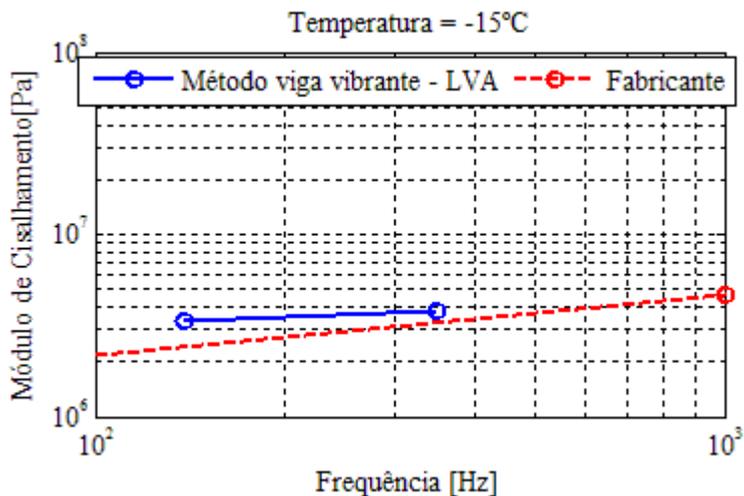


Figura 48 - Módulo de cisalhamento: Fabricante vs. Experimental (-15°C).

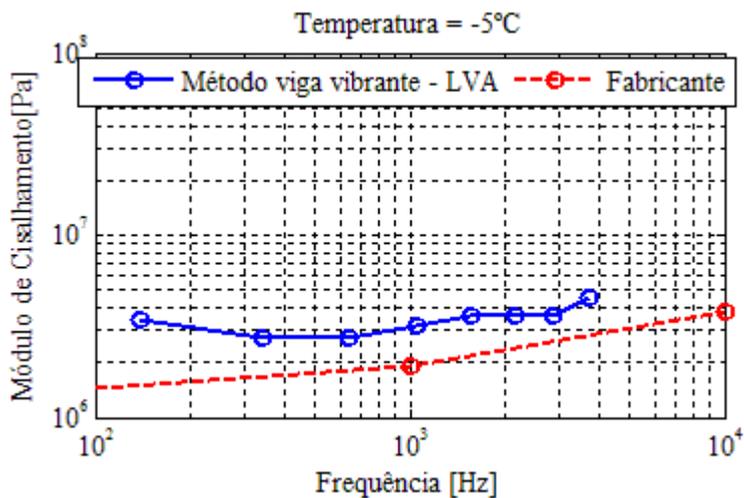


Figura 49 - Módulo de cisalhamento: Fabricante vs. Experimental (-5°C).

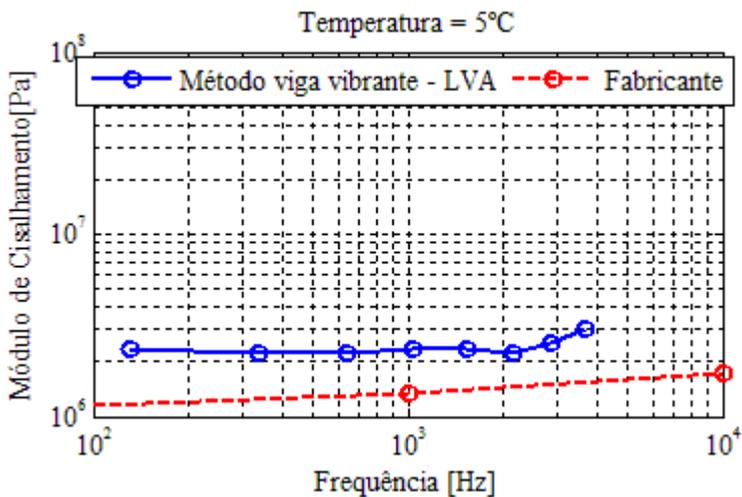


Figura 50 - Módulo de cisalhamento: Fabricante vs. Experimental (5°C).

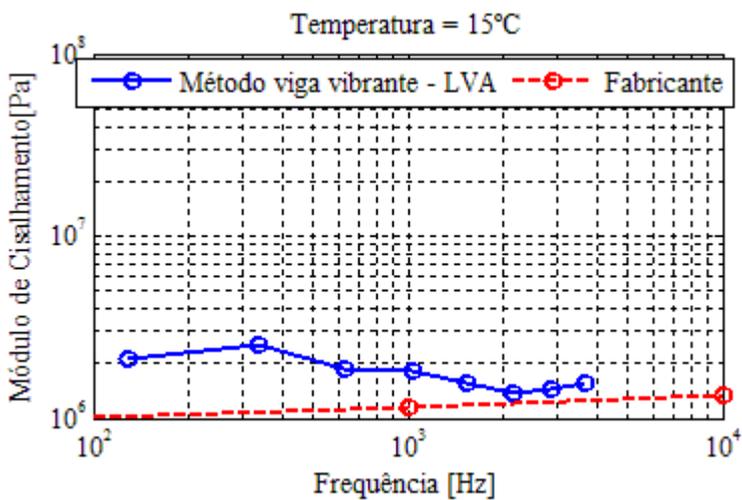


Figura 51 - Módulo de cisalhamento: Fabricante vs. Experimental (15°C).

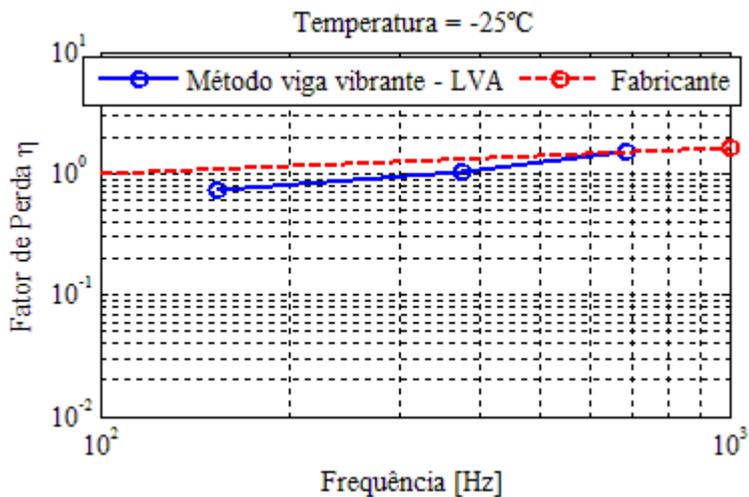


Figura 52 – Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (-25°C).

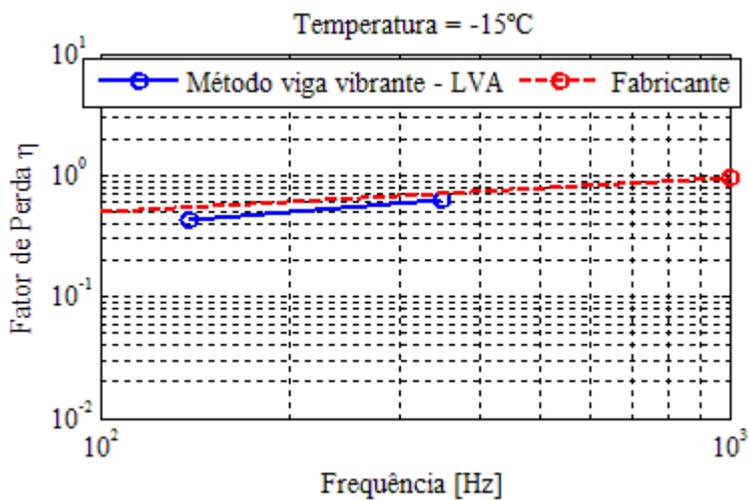


Figura 53 – Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (-15°C).

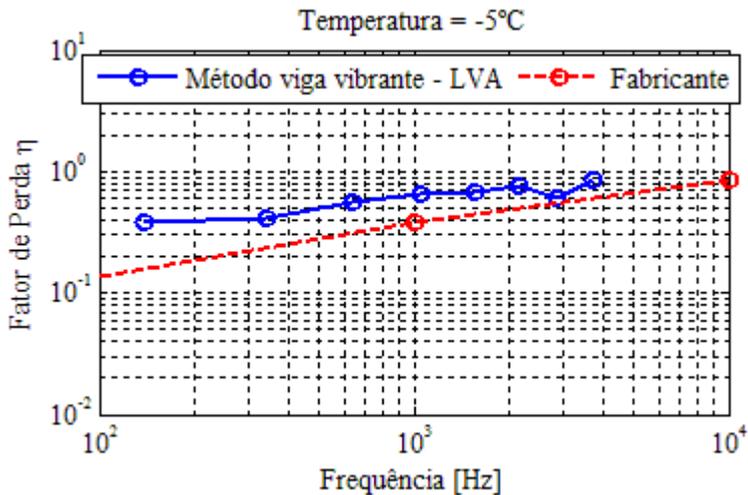


Figura 54 – Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (-5°C).

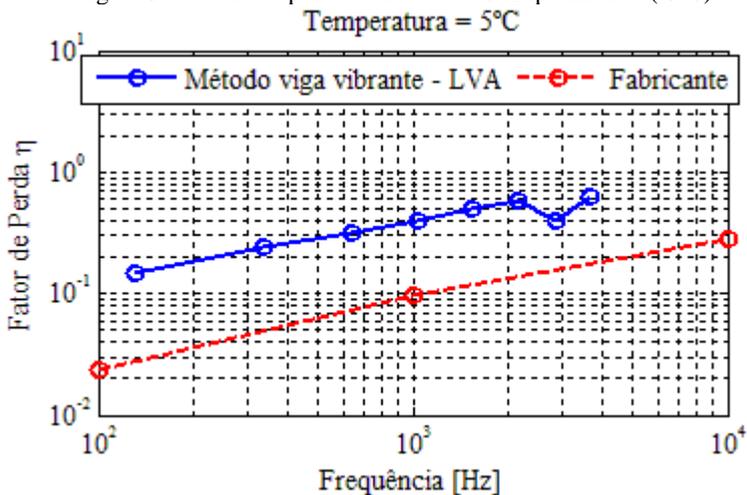


Figura 55 – Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (5°C).

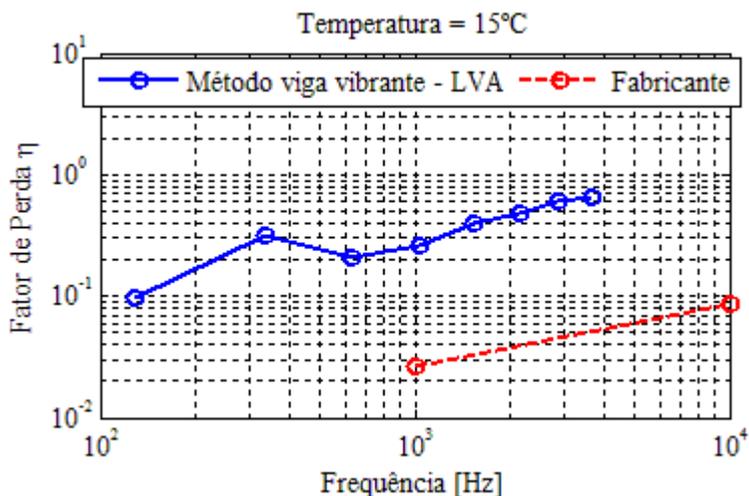


Figura 56 – Fator de perda: Fabricante vs. Experimental (15°C).

As comparações apresentadas nos gráficos anteriores apontam algumas diferenças entre os dados medidos e fornecidos pelo fabricante, principalmente para as temperaturas acima de 5°C. Nessas temperaturas, o material está acima da região de trabalho (alto amortecimento) e os valores de fator de perda e módulo de cisalhamento apresentam valores baixos, ficando mais susceptíveis às variáveis do sistema de medição (colagem, fixação, p.ex.).

O fabricante utiliza uma metodologia diferente da norma ASTM E-756, que pode indicar as causas das diferenças. Entretanto, percebe-se que em temperaturas menores, ou seja, onde o material tem maior atenuação, os valores são mais próximos.

Corroborando com o comentado no ensaio com a Viga Oberst com o material SD40, mesmo com diferenças com os dados do fabricante, há o entendimento de que os resultados são confiáveis, já que houve conformidade em relação ao procedimento, equipamentos e execução do método, logo os resultados obtidos dos ensaios podem ser utilizados para a validação dos métodos numéricos, a exceção dos dados obtidos para temperaturas acima de 5°C, considerada uma faixa menos importante para este material, cuja aplicação se dá a temperaturas na faixa dos -40°C.

### **4.3 Teste de Repetibilidade**

O ensaio de repetibilidade foi realizado visando o conhecimento das incertezas relacionadas à reprodução do método. Para isso, testes foram repetidos quatro vezes para uma viga na configuração Oberst com o material EAR/3M SD 40 e o sanduíche duas vezes com o material SMAC 1135-04 em duas temperaturas. Em cada repetição, a viga foi retirada do engaste e uma nova amostra de material foi colada, a viga e os transdutores reposicionados. O operador e as vigas sempre foram as mesmas.

#### ***4.3.1 Repetibilidade - Configuração Oberst***

Os ensaios na configuração Oberst foram realizados para a temperatura de 20°C. As curvas FRF e coerência das quatro repetições podem ser vistas na Figura 57. Tabelas com valores médios das propriedades obtidas e desvio padrão dos resultados podem ser vistos nas Tabelas 5 e 6. A comparação gráfica dos resultados obtidos pode ser vista nas Figuras 58 e 59.

No gráfico da Figura 57 a coerência das curvas é bastante congruente até 3500 Hz, havendo uma piora a partir desta região de frequência, devido à faixa de precisão dos transdutores sem contato, que é de aproximadamente 2000 Hz, como pode ser observado no ANEXO 1.

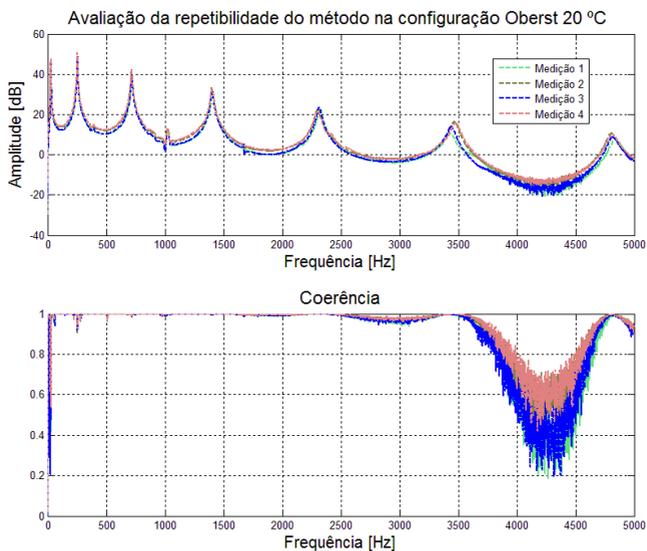


Figura 57 – FRF e Coerência das repetições.

Tabela 5 – Resultados obtidos para o fator de perda.

Modo n°	Freqüência	Fator de perda médio	Desvio padrão percentual
2	257	4,43E-01	10,7
3	724,2	3,93E-01	5,8
4	1416	4,50E-01	5,8
5	2339	5,74E-01	17,6
6	3501	5,35E-01	15,6
7	4834	5,03E-01	18,3

Tabela 6 – Resultados obtidos para o módulo de elasticidade.

Modo n°	Freqüência	Módulo de elasticidade médio	Desvio padrão percentual
2	257	3,36E+09	13,3
3	724,2	3,60E+09	5,4
4	1416	3,65E+09	6,6
5	2339	4,14E+09	10,9
6	3501	3,47E+09	13,3
7	4834	3,32E+09	12,4

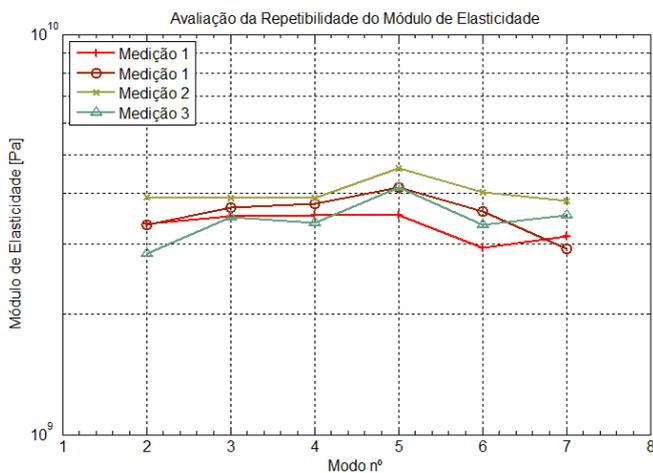


Figura 58 – Repetibilidade do módulo de elasticidade.

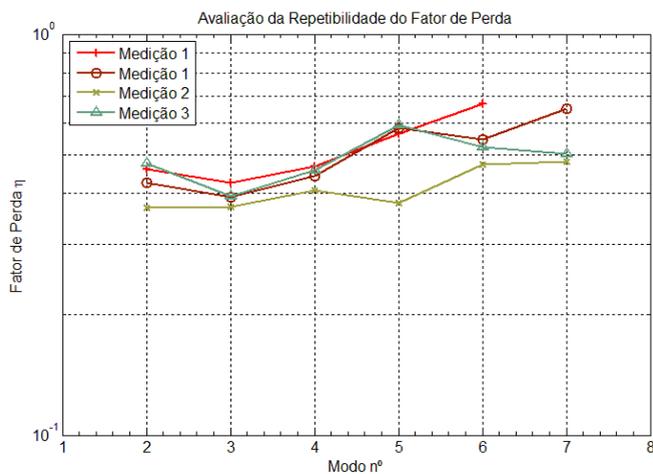


Figura 59 – Repetibilidade do fator de perda.

Observando os gráficos acima, percebe-se a existência de variação nos valores do módulo de elasticidade e fator de perda nas repetições do método da viga vibrante com um mesmo material na configuração Oberst. Portanto, são observadas incertezas de até 14% para o módulo de elasticidade e de até 20% para o fator de perda.

Estes resultados apontam que a variabilidade do teste é significativa, já que foram utilizados para os ensaios os mesmos equipamentos, cortadas amostras do mesma peça de material e o mesmo operador.

Espera-se, dessa forma, que haja maiores diferenças entre os resultados obtidos em diferentes laboratórios, incluindo os dados do fabricante.

#### 4.3.2 Teste de repetibilidade na configuração Sanduiche

Os ensaios na configuração sanduíche foram realizados para a temperatura de 0°C e 10°C com o SMAC 1135-04. Valores médios das propriedades obtidas e desvio padrão dos resultados da análise de repetibilidade na configuração sanduíche podem ser vistos da Tabela 7 até a Tabela 10. As comparações das curvas FRF podem ser observadas nas Figuras 60 e 61. Já a comparação gráfica da repetibilidade do ensaio sanduíche com o material SMAC 1135-04 está nas Figuras 62 e 63.

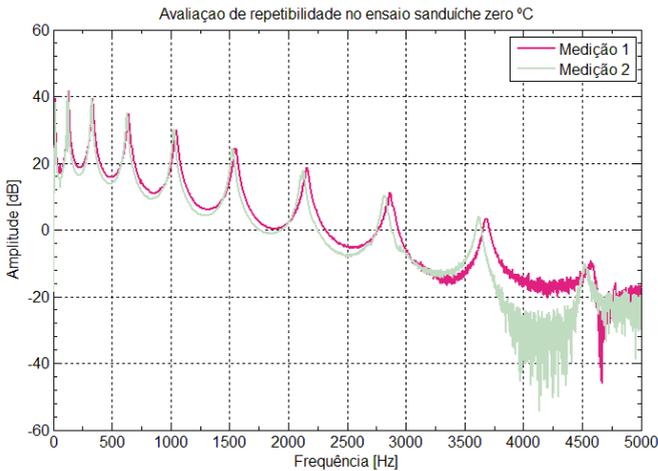


Figura 60 – Curva FRF em 0°C.

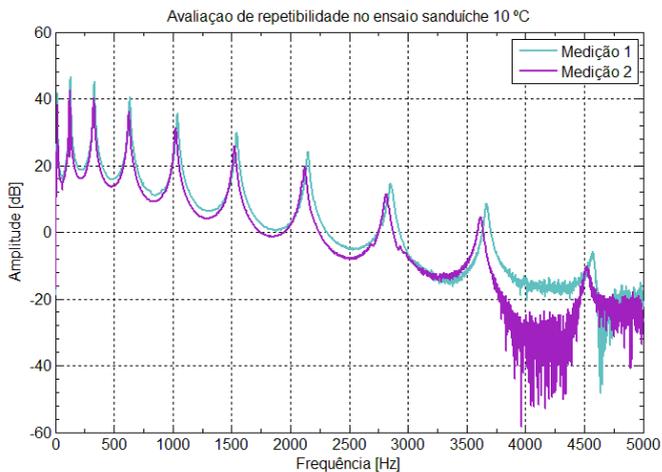


Figura 61 - Curva FRF em 10°C.

Tabela 7 – Resultados obtidos para o módulo de elasticidade para 0°C.

0°C			
Modo n°	Frequência média	Módulo de elasticidade médio	Desvio padrão percentual
2	130,5	2,25E+06	32,0
3	333,2	2,26E+06	13,4
4	633,2	2,13E+06	19,2
5	1037,1	2,41E+06	16,9
6	1540,2	2,56E+06	16,3
8	2843,8	4,86E+07	130,9
9	3657,0	5,46E+07	129,6

Tabela 8 - Resultados obtidos para o fator de perda para 0°C.

0°C			
Modo n°	Frequência média	Fator de perda médio	Desvio padrão percentual
2	130,5	0,21	25,5
3	333,2	0,29	3,3
4	633,2	0,44	8,9
5	1037,1	0,49	2,5
6	1540,2	0,58	5,7
8	2843,8	0,32	125,5
9	3657,0	0,44	132,4

Tabela 9 - Resultados obtidos para o módulo de elasticidade para 10°C.

10°C			
Modo n°	Frequência média	Módulo de elasticidade médio	Desvio padrão percentual
2	130,47	2,24E+06	32,0
3	331,25	2,04E+06	5,8
4	631,64	1,97E+06	2,9
5	1033,20	2,00E+06	3,3
6	1535,55	2,07E+06	7,2
8	2833,59	1,81E+06	28,0

Tabela 10 - Resultados obtidos para o fator de perda para 10°C.

10°C			
Modo n°	Frequência média	Fator de perda médio	Desvio padrão percentual
2	130,47	0,21	40,9
3	331,25	0,22	24,0
4	631,64	0,31	19,8
5	1033,20	0,40	22,1
6	1535,55	0,47	9,2
7	2135,94	0,49	14,3
8	2833,59	0,91	28,1

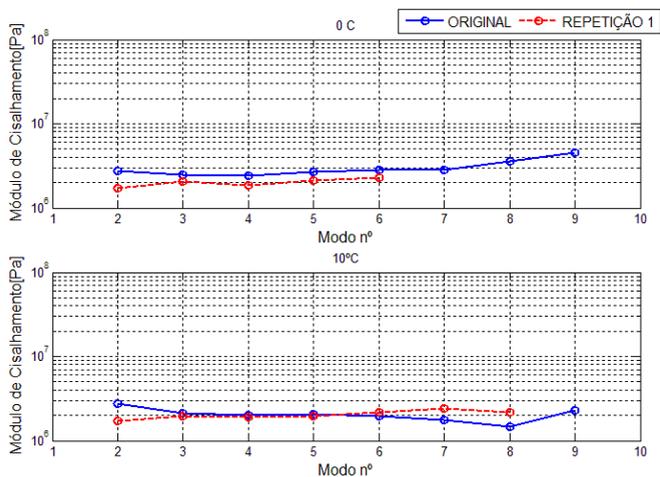


Figura 62 – Módulo de cisalhamento – 0°C e 10°C.

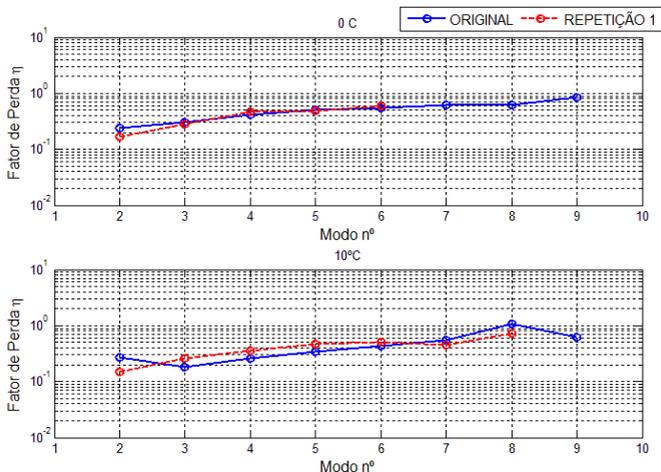


Figura 63 – Fator de perda – 0°C e 10°C.

Os valores das propriedades de correspondentes a alguns modos não estão presentes nos gráficos por não apresentarem um pico de ressonância adequado para medição do fator de perda ou por resultarem em valores negativos nos cálculos.

A repetição dos ensaios evidencia diferenças nos valores das propriedades do SMAC 1135-04, observadas também na repetição do ensaio Oberst. Isto mostra o quanto o método é sensível ao procedimento de execução, já que os testes foram realizados pelo mesmo usuário, seguindo o mesmo procedimento de corte, colagem e medição.

#### 4.4 Conclusões sobre os resultados obtidos dos ensaios

A comparação das propriedades com os dados do fabricante não resultou nos resultados pretendidos, considerando que se deseja a menor variação possível. Entretanto, alguns pontos importantes podem ser observados, como: i) As propriedades do SD40 foram lidas a partir de um nomograma de frequência reduzida, que pode incorrer em grandes diferenças devido às escalas; ii) O material SD40 foi fabricado há alguns anos e há informações do fabricante alertando sobre mudanças nas propriedades devido ao envelhecimento; iii) O método de obtenção das propriedades do fabricante SMAC 1135-05 não é o mesmo utilizado neste trabalho, logo podem haver diferenças.

De forma geral, foi percebida uma considerável variabilidade nos testes de repetibilidade, mostrando que o teste é sensível a pequenas alterações, bem como é sabido que os materiais viscoelásticos sofrem grandes variações das propriedades com pequenas variações das condições a que estão expostos.

Portanto, apesar destes pontos, entende-se que os resultados podem ser entendidos como verdadeiros e são adequados para a continuação do trabalho.

## **5 MÉTODO DE AJUSTE DE MODELOS APLICADOS À DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE MATERIAIS VISCOELÁSTICOS**

### **5.1 Ajuste de Modelos - Definição**

O aumento cada vez maior da capacidade de processamento computacional tem possibilitado a utilização de modelos numéricos cada vez mais complexos e mais representativos da realidade. Atualmente, o comportamento dinâmico de estruturas tem sido estudado com maior frequência experimentalmente por testes modais e numericamente, principalmente pelo MEF (Doi, 2011).

Os resultados dos modelos numéricos, geralmente, não têm capacidade de representar a realidade com precisão, havendo mais diferenças conforme aumentam as incertezas, usualmente provenientes das condições de contorno do sistema, das propriedades mecânicas dos materiais, da geometria e do processamento de sinais de medição. Podem ainda, haver diferenças devido à imprecisão do modelo numérico, seja na discretização do modelo, solução numérica utilizada e erros do próprio usuário dos códigos.

Estas incertezas combinadas podem ocasionar resultados discrepantes com a realidade, situação na qual a utilização de ferramentas como o Método de Ajuste de Modelo (MAM), que buscam aprimorar os modelos numéricos utilizando como base nos dados medidos experimentalmente.

A partir da década de 1970 foram propostos vários métodos para ajustar os modelos dinâmicos gerados por MEF. Heylen e Sas (1987), Natke (1988) e Mottershead e Friswell (1993) apresentaram extensos estudos de literatura, oferecendo informações relevantes sobre os principais MAM (Doi, 2011).

No MAM, são utilizados os dados experimentais como referência, por se tratarem de informações mais confiáveis do comportamento da estrutura real. Inicialmente, são comparados resultados obtidos experimentalmente com aqueles obtidos numericamente, extraíndo-se daí, uma correlação entre ambos. O passo seguinte é a realização do ajuste de modelo em si, que é a minimização das diferenças encontradas.

Alguns critérios que um bom modelo deve reproduzir (ARAÚJO, 2007) são:

- As propriedades modais;
- As Funções de Resposta em Frequência (FRF);
- As corretas conectividades;

## **5.2 Motivação para a utilização do método de ajuste de modelos no ajuste das propriedades**

Pode-se considerar que o uso do MAM na determinação de propriedades mecânicas de materiais viscoelásticos pode ser considerado atraente, visto que:

- Como já comentado na seção 3.8, o método descrito na norma ASTM E-756 possui diversas orientações e restrições, no sentido de se conseguir determinar resultados com certo nível de precisão das propriedades dos materiais viscoelásticos. Estas limitações englobam as dimensões das geometrias dos corpos de prova, relações entre dimensões do material de amortecimento e viga uniforme, condições de contorno, etc.
- Através do uso de MAM, haveria a possibilidade de teste em corpos de prova de base com diferentes geometrias, diminuindo as restrições do método.
- Os tratamentos com materiais viscoelásticos com camada de constrição são, em muitos casos, mais eficientes que os tratamentos simples, entretanto, a obtenção destes resultados gera custo devido às dificuldades de aplicação e grande dificuldades analíticas, especialmente em estruturas complexas (JONES, 2001).
- O uso de MAM possibilita a determinação de propriedades através dos dados obtidos do ensaio com material viscoelástico contendo a camada de constrição. Além disso, possibilita realizar simulações com outras geometrias e materiais de cobertura, buscando melhores resultados de dissipação.

- Além do que, a utilização de MEF possibilita considerar uma infinidade de formas de aplicações, que na prática podem ser de difícil avaliação.

### 5.3 Comparação entre dados numéricos e experimentais

Um requisito importante para um bom uso do MAM é a utilização de um critério de comparação entre os dados medidos com aqueles simulados. Em dinâmica estrutural, alguns parâmetros considerados representativos do comportamento da estrutura são os valores de frequência natural e respectivos fatores de amortecimento, como também o comportamento da vibração, seja com a análise velocidade, aceleração ou deslocamento.

Como já comentado, a caracterização das propriedades variantes na frequência de um material viscoelástico são as frequências naturais, respectivos fatores de amortecimento e módulos de elasticidade. As FRF são curvas que possuem alto conteúdo de informações relacionadas ao comportamento dinâmico da estrutura, já que delas se podem extrair os valores das frequências naturais e respectivos fatores de amortecimento. Como o módulo de elasticidade pode ser calculado em função de características geométricas, densidade e valor da frequência natural (Equação 7), tem-se na FRF o resto da informação necessária para a caracterização um material viscoelástico.

#### 5.3.1 *Decomposição em valores singulares*

É inevitável haver ruído em sinais obtidos de medições experimentais, sendo que uma curva FRF obtida a partir de uma análise estrutural dinâmica pode conter ruído, devido a diversos motivos possíveis, como interferência indesejada de equipamentos eletrônicos ligados à rede elétrica, bem como do próprio sistema de medição (Friswell; Mottershead, 1995).

Com o objetivo de ajustar uma curva FRF obtida através de experimentos com outra FRF, obtida de simulações numéricas, percebe-se o inconveniente do ruído no sinal, já que na resposta dinâmica da estrutura simulada pelo MEF não teremos este inconveniente.

Para haver a comparação adequada das FRF, foi utilizada a metodologia apresentada por Sanliturk e Cakar (2005) para melhorar a qualidade de curvas FRF, baseada no método da decomposição em valores singulares (Em inglês *Singular Value Decomposition*, ou SVD),

sendo que o resultado de sua aplicação é a reconstrução da curva FRF, isenta de ruídos.

A medição dos valores de frequência natural e fator de perda foi realizada nas curvas filtradas através do método. O resultado da aplicação em uma FRF de uma medição deste trabalho está apresentado na Figura 64, onde se consegue facilmente perceber os benefícios da utilização do método para a medição dos fatores de perda e frequências de ressonância.

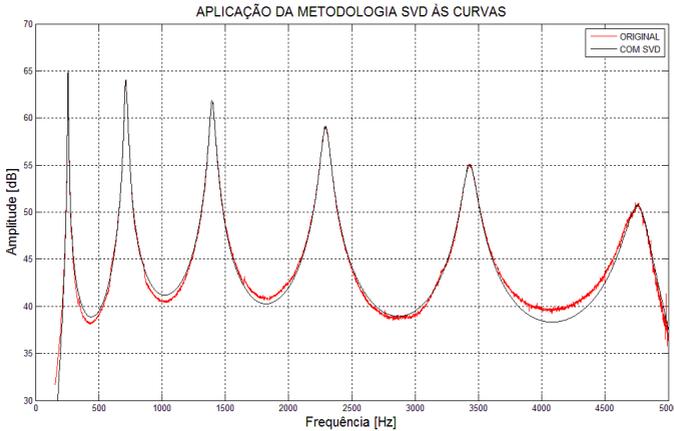


Figura 64 - Aplicação do método SVD a uma curva.

### 5.3.2 Metodologia utilizada para o ajuste de modelos

Essencialmente, para que haja boa aproximação entre as propriedades determinadas através do método da viga vibrante da norma ASTM E-756 e o método numérico, são necessárias curvas FRF similares. Mais especificamente, os valores de ressonâncias e respectivos fatores de perda da estrutura devem ser aproximados, já que a partir destas informações são determinadas as propriedades dos materiais viscoelásticos.

Na Figura 65 pode ser visto o fluxograma representativo do ajuste de modelos utilizado neste trabalho. O procedimento experimental fornece a curva FRF da viga composta, obtida através do método da viga vibrante da norma ASTM E-756. Já o procedimento numérico consiste na simulação numérica pelo MEF com a variação das propriedades  $E$  e  $\eta$  do material viscoelástico, comparando os valores de

frequência natural,  $f_n$ , e respectivos fatores de perda da viga composta,  $\eta_{vc}$ , com os experimentais, repetindo o procedimento até converjarem.

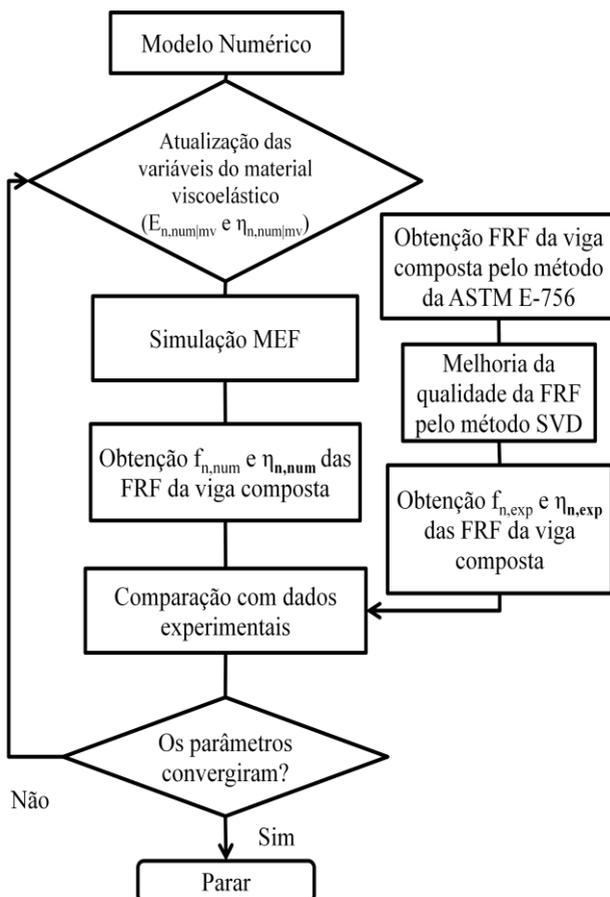


Figura 65 - Fluxograma do processo de ajuste de modelos.

O modelo de simulação utilizado foi validado inicialmente com os resultados da viga uniforme, para posteriormente serem realizados os procedimentos de ajuste. A ordenação apresentada no fluxograma da Figura 65 se aplica à busca das propriedades através dos métodos Oberst, Oberst com camada de constrição e também para as vigas em Configuração sanduíche, desde que haja a validação do modelo numérico.

## 5.4 Validação do Modelo Numérico da Viga Uniforme

A viga simples ou uniforme foi modelada numericamente para avaliar o grau de adequação do modelo de simulação pelo MEF comparado ao modelo real. Dessa forma é possível avaliar se as dimensões e propriedades, como o módulo de elasticidade e a densidade da viga estão corretos, e, se necessário, corrigi-los.

Para a simulação pelo MEF foi utilizado o software ANSYS 14.0 e o elemento sólido *SOLID 95*, que possui 20 nós com três graus de liberdade de translação por nó.

A curva FRF da comparação entre o resultado numérico e experimental está na Figura 66. Percebe-se boa correlação entre as curvas, com valores de frequência muito próximos. As propriedades que representaram bem o modelo foram:  $E=209$  GPa,  $\rho=7860$  Kg/m<sup>3</sup> e  $\nu=0,3$ . As dimensões utilizadas no modelo da viga são de: 250,00 mm x 10,08 mm x 3,14 mm (Comprimento X Largura X Espessura). Considerando que a mesma viga foi utilizada para todos os ensaios (exceto em configuração sanduíche). A malha utilizada está na Figura 67. O tempo aproximado da simulação foi de 11 minutos, com tamanho dos elementos de 2,5 mm e passo de frequência de 5 Hz (Processador Intel Core i7 2,2GHz e 8GB RAM).

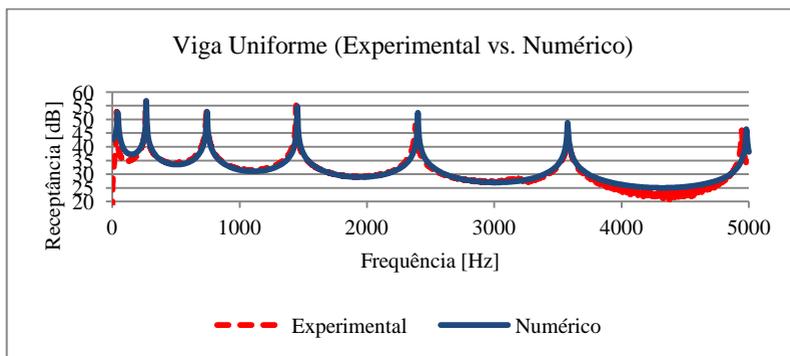


Figura 66 - Validação numérica da viga uniforme.

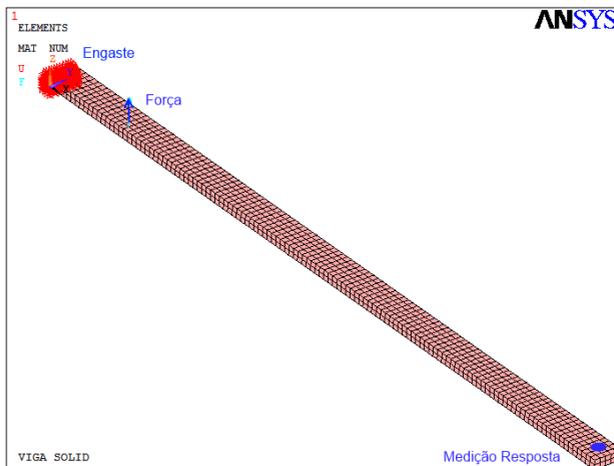


Figura 67 - Modelo Numérico da Viga Uniforme (tamanho malha=2mm).

## 5.5 Validação Numérica da Viga Oberst

A viga em configuração Oberst foi modelada para verificar a precisão do MEF com os tipos de elemento utilizados, bem como a representação do tipo de deformação sofrida pelo material viscoelástico durante a deformação da viga. As propriedades utilizadas para a viga de base foram aqueles determinados na seção anterior. As propriedades utilizadas foram as encontradas através do método da viga vibrante para o SD40 a 20°C (Figura 35 e Figura 39). Considerando que as propriedades variam pouco com a frequência, foram consideradas constantes na simulação, por motivos de simplificação ( $\eta=0,5$  e  $E=3$  GPa e Poisson=0.49).

A simulação foi feita como o software ANSYS 14.0 e o elemento sólido *SOLID 95* (20 nós com três graus de liberdade de translação por nó) foi utilizado para a viga e também para o material SD40.

A comparação das curvas FRF numérica e experimental estão na Figura 68. A comparação do fator de perda destas curvas está na Figura 69. Os resultados obtidos indicam que os resultados obtidos pelo MEF tem boa aproximação com os dados experimentais.

Também se pode concluir que a utilização de um valor médio de propriedades, considerando-as constantes na frequência, fornece resultados médios de atenuação, que dependendo do nível de precisão desejado, satisfazem aos requisitos de uma análise ou projeto.

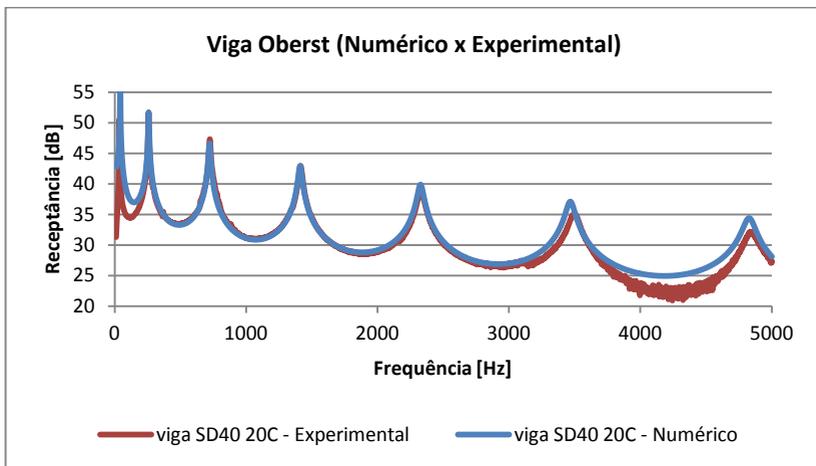


Figura 68 - Avaliação numérica da viga Oberst com SD40.

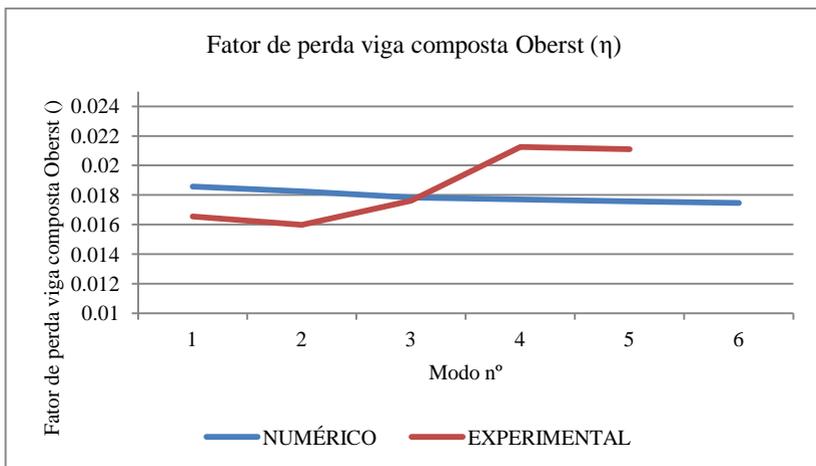


Figura 69 - Fator de perda da viga composta em configuração Oberst com SD40.

## 5.6 Fluxograma Utilizado para a Simulação

Para a obtenção automatizada das propriedades do material viscoelástico, foi utilizado o software de otimização *Mode Frontier v.4.3.0*, cujo fluxograma de trabalho está apresentado na Figura 70.

As propriedades a serem ajustadas são o módulo de elasticidade e o fator de perda do material viscoelástico. Os parâmetros de controle utilizados foram os valores das frequências naturais e respectivos fatores de perda do composto viga+ADC006. As funções objetivo são a minimização destes dois parâmetros.

O algoritmo otimizador utilizado foi o *MOGA-II*. Este otimizador é do tipo genético multi-objetivo e requer muito poucos parâmetros fornecidos pelo usuário, sendo que vários outros parâmetros são resolvidos internamente, a fim de proporcionar robustez e eficiência para o otimizador. O número total de avaliações é igual ao número de posições definidas para o DOE (população inicial), multiplicado pelo número de gerações (**Fonte:** Manual do usuário do software *MODE FRONTIER*).

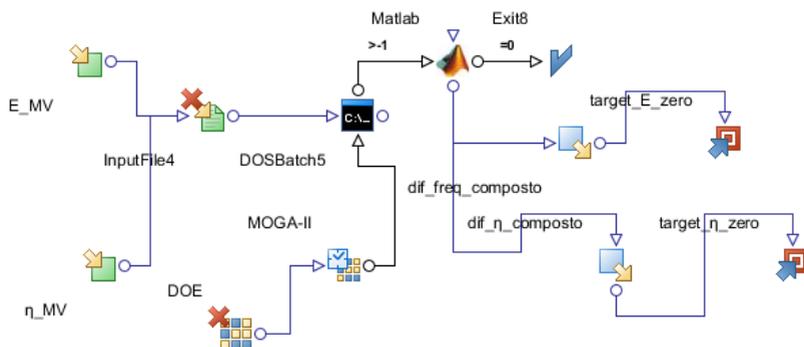


Figura 70 - Fluxograma de trabalho para o ajuste de modelos com o software *Mode Frontier v.4.3.0*.

O software de simulação de MEF foi o Ansys 14.0. Os valores das frequências de ressonância e respectivos fatores de perda da viga composta foram determinados com uma rotina feita em *MATLAB 7.11.0*, que utiliza o método da banda de meia potência para a determinação do fator de perda.

Conforme visto no capítulo 4, as propriedades dos materiais viscoelásticos, de forma geral, são muito mais afetadas devido à variação de temperatura do que com a variação da frequência. Isto pode ser observado para os materiais testados neste trabalho, nos gráficos dos resultados dos testes, apresentados neste mesmo capítulo. Logo, uma simplificação possível é a utilização de propriedades de módulo de elasticidade e fator de perda constantes com a frequência.

Entretanto, deseja-se conhecer a precisão desta metodologia, logo se entendeu que a determinação das propriedades modo a modo seria o procedimento mais adequado. A comparação das FRF poderia consumir um elevado tempo de cálculo computacional e geraria todo o espectro de frequência (até 5 kHz), enquanto que a informação necessária para o ajuste está contida em uma pequena região ao redor dos picos de ressonância.

O otimizador foi configurado utilizando um conjunto de 10 valores iniciais e 15 gerações, totalizando 150 simulações, para cada modo de vibração. Apesar de ser possível a análise dos dados através do próprio software, preferiu-se exportar os dados obtidos para cada simulação e analisá-los analiticamente, a fim de ter-se maior controle na determinação das propriedades através desta técnica.

Para isto, foi desenvolvida em linguagem MATLAB uma rotina para o processamento e análise dos dados. O processo visual de análise e escolha pode ser vistos graficamente nas Figuras 71 e 72. Na Figura 72 as linhas vermelhas representam o objetivo, verticalmente a frequência que se busca e horizontalmente o fator de perda.

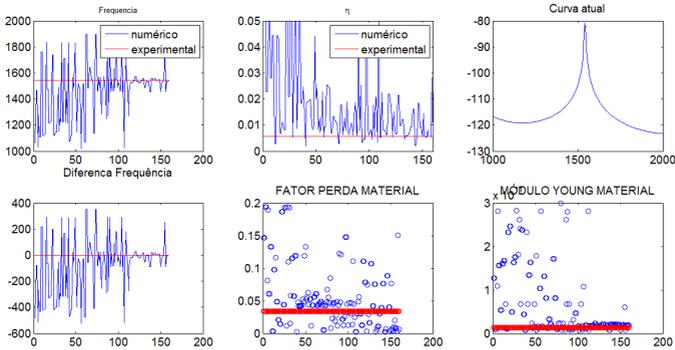


Figura 71 - Resultados das simulações.

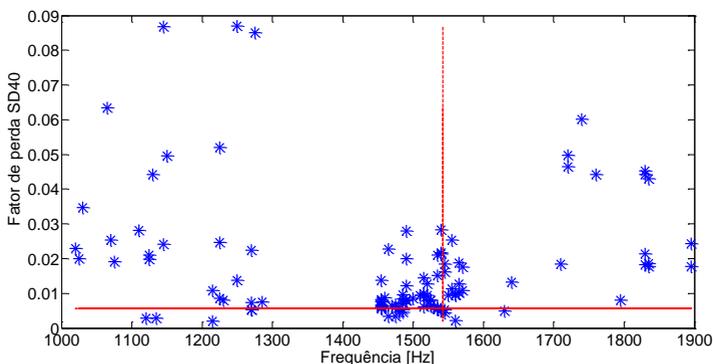


Figura 72 - Convergência das simulações. O ponto desejado é o cruzamento das curvas vermelhas.

### 5.7 Ajuste A - Obtenção das Propriedades do SD40 através do Ensaio com uma Viga com ADC006

Uma das vantagens do ajuste de modelos é a possibilidade de determinação das propriedades de um material de amortecimento que possui camada de constrição. Como o material viscoelástico utilizado no composto ADC006 (SD40) já fora caracterizado pelo método da viga vibrante, há um grande número de informações para a análise.

Inicialmente, a mesma viga utilizada para os ensaios Oberst foi preparada com uma camada do material ADC006 e ensaiada a temperatura de 20°C, utilizando o procedimento da viga Oberst apresentada no capítulo 4. A viga utilizada tem dimensões de 250,00 mm x 10,08 mm x 3,14 mm (Comprimento X Largura X Espessura) e pode ser vista na Figura 73.

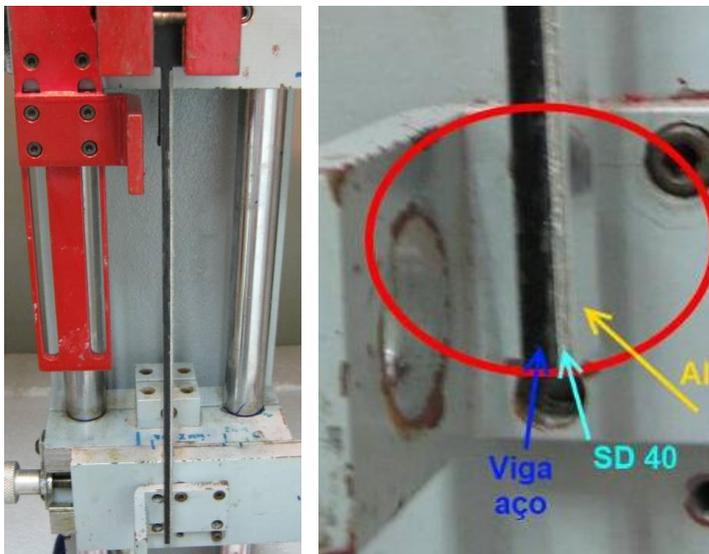


Figura 73 - Na esquerda, a viga com ADC 006 e na direita estão indicados a viga, material viscoelástico e camada de constrição.

A FRF obtida pode ser vista na Figura 74, na qual podem ser vistos até a frequência de 5 kHz a presença de sete frequências naturais. Já que é recomendada a omissão do primeiro modo (ASTM E756-, 2005), o ajuste foi feito para os seis modos subsequentes. No mesmo gráfico foi adicionada a curva do mesmo material sem a camada de constrição, com o objetivo de mostrar a adição de amortecimento obtida com uma camada constritora de 0.1 mm.

### 5.7.1 Modelo Numérico

A simulação através do MEF foi feita no ANSYS 14.0. Para representar a camada de constrição de 0,1 mm foi utilizado o elemento SHELL 63, que é um elemento de casca com quatro nós, três graus de liberdade de rotação e três de translação. A viga e o material viscoelástico foram modelados com o elemento SOLID 95, que possui 20 nós com três graus de liberdade de translação por nó. As condições de contorno utilizadas foram as mesmas da viga apresentada na seção 5.4.

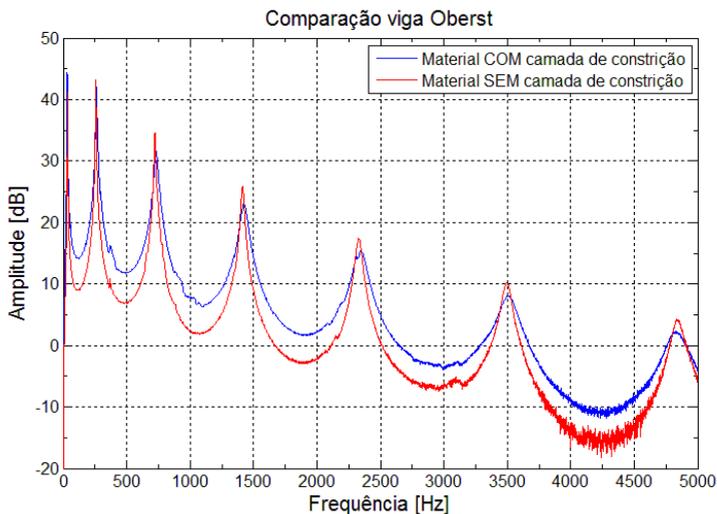


Figura 74 - FRF Viga Com SD40 x Viga com ADC006 (20°C).

O ajuste foi rodado do segundo ao sexto modo, um a um. Os tempos de simulação para cada modo divergiram, já que para cada região de frequência foram utilizados passos e largura de faixas de frequências diferente. A convergência dos resultados ocorreu mais rapidamente para determinados modos. O tempo médio das simulações foi de 110min, portanto de aproximadamente 11h para todos os modos. (Processador Intel Core i7 2,2GHz e 8GB RAM). Os resultados do fator de perda obtidos estão apresentados na Figura 75 e os do módulo de elasticidade na Figura 76.

O mesmo procedimento foi repetido para -20°C e o fator de perda e o módulo de elasticidade estão apresentados respectivamente nas Figura 77 e Figura 78. Nota-se que na região de menor amortecimento do SD40 (-20°), os resultados são menos próximos do que na região em que atenua melhor as vibrações (20°C). Ou seja, o ajuste foi mais preciso tanto para o fator de perda quanto para o módulo de elasticidade na região em que o material é mais significativo na resposta da viga, como um conjunto. Esta tendência já havia sido observada na determinação das propriedades através da norma ASTM E-756, mostrando que se trata de um ponto de sensibilidade na medição da FRF, em regiões de baixo amortecimento.

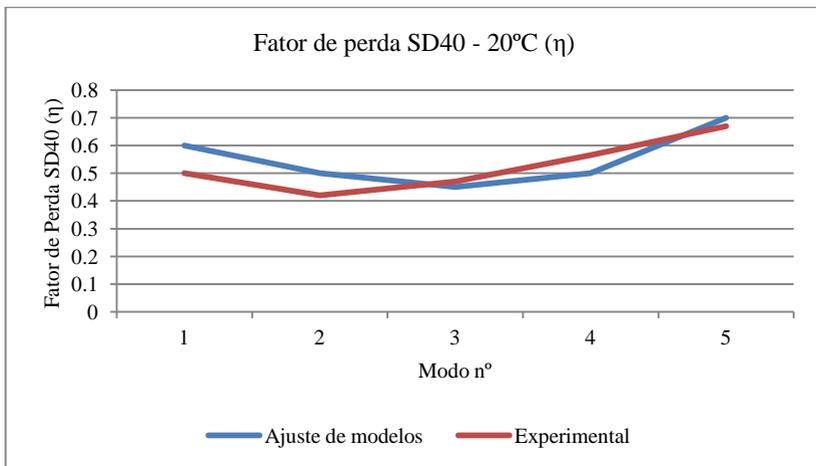


Figura 75 - Fator de perda SD40 obtido via ajuste de modelos (20°C)..

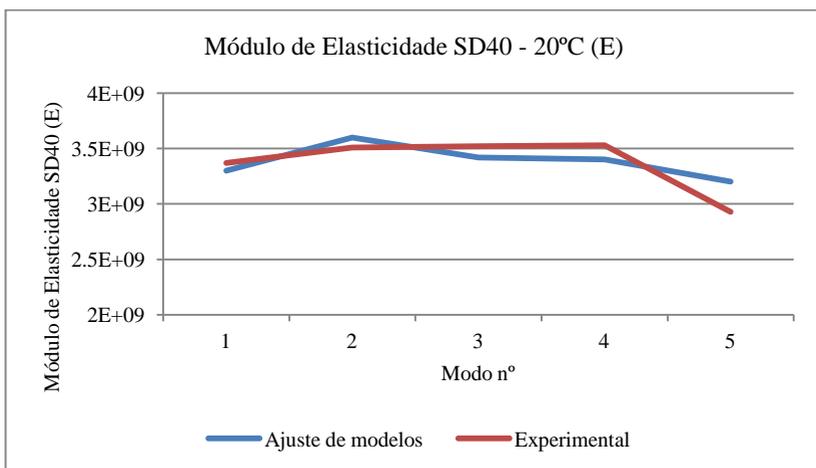


Figura 76 - Módulo de Elasticidade SD40 obtido via ajuste de modelos (20°C).

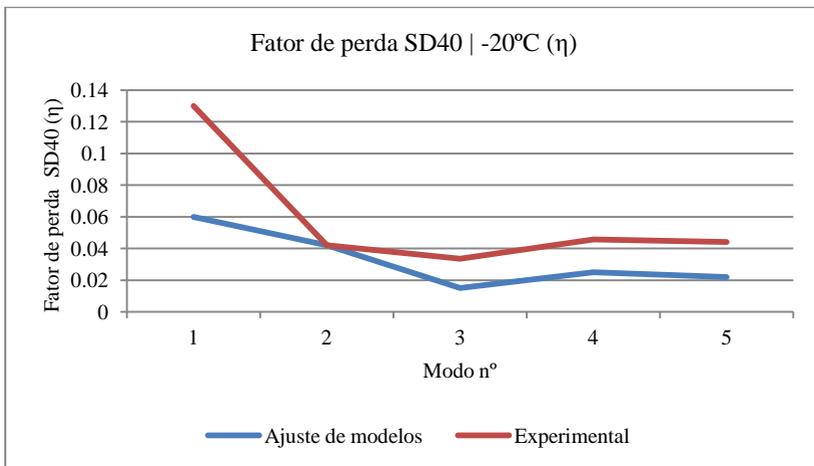


Figura 77 - Fator de perda SD40 obtido via ajuste de modelos (-20°C)..

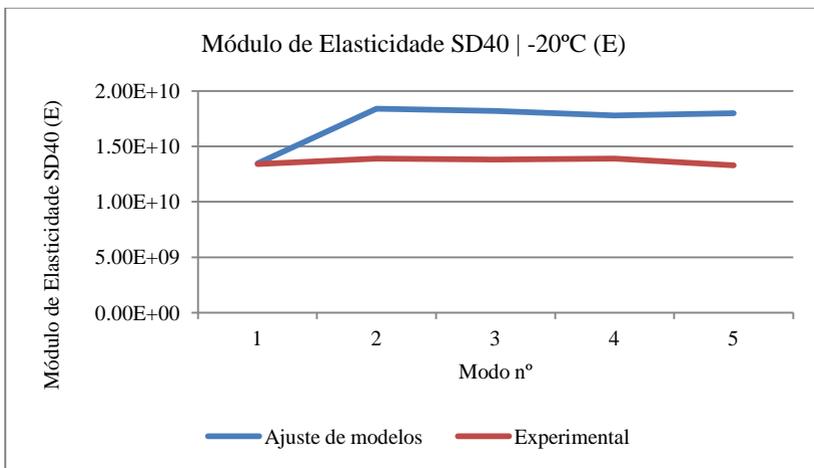


Figura 78 - Módulo de Elasticidade SD40 obtido via ajuste de modelos (-20°C).

## 5.8 Ajuste B – Modelo de viga na configuração Oberst com material SMAC 1135-04 (sem camada de constricção)

As propriedades do material SMAC 1135-04 foram determinadas através do método da viga na configuração sanduíche (Seção 4.2). Sabe-se que há diferenças na deformação do material quando aplicado em

configuração sanduíche ou Oberst, na primeira havendo tensões cisalhantes e na segunda esforços de flexão, entretanto o objetivo é explorar o método. O material foi ensaiado a 5°C na configuração Oberst, utilizando uma das vigas do ensaio sanduíche da seção 4.2 (250,00 mm x 10,70 mm x 1,36 mm). A viga de ensaio montada no engaste pode ser vista na Figura 79.

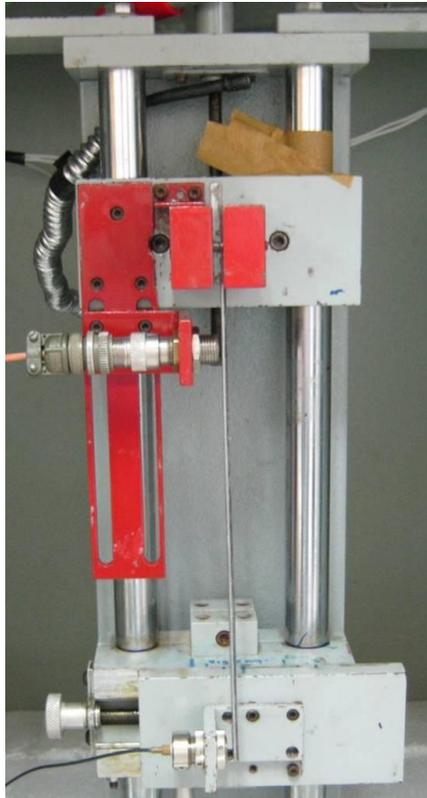


Figura 79 – Medição viga configuração Oberst com SMAC 1135-04.

Inicialmente foi feita a tentativa de determinação através do procedimento de viga Oberst (seção 4.1). Os resultados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Dados obtidos para o SMAC 1135-4 através do ensaio Oberst.

Modo	Frequência [Hz]	Módulo de Elasticidade [Pa]	Fator Perda
1	15	-8,74E+09	-0,76
2	109	7,26E+08	2,56
3	301	-6,71E+08	-0,23
4	595	9,29E+08	0,70
5	977	-3,01E+08	-0,23
6	1459	-2,85E+08	-0,17
7	2035	-2,50E+08	-0,18
8	2702	-4,56E+08	-0,24
9	3479	-3,66E+08	-0,26
10	4610	3,44E+09	0,01

Percebe-se pela tabela acima que os resultados obtidos para o módulo de elasticidade e fator de perda foram negativos, indicando que o método da viga vibrante não abrange este caso em específico. Logo, o MAM pode ser utilizado.

Da mesma forma que realizado para na seção 5.4, inicialmente o modelo de viga simples ou uniforme foi realizado e as propriedades da viga determinadas, para evitar erros sistemáticos.

Em seguida, com o mesmo procedimento da seção 5.7, foi realizada a simulação. A comparação entre as FRF obtidas pelos métodos numérico e experimental está apresentada na Figura 80 e na Figura 81 está a comparação dos fatores de perda da FRF obtidos pelo método.

## 5.9 Resultados e discussão

A respeito dos dois casos de ajuste de modelos (5.7 e 5.8), nota-se que há um enorme potencial no uso das ferramentas dos métodos de ajuste de modelos para a determinação das propriedades de materiais viscoelásticos. Acima de tudo, os MEF se identificaram como sendo ótimas alternativas para o estudo destes materiais, podendo ser utilizados em geometrias mais complexas e em estudos mais abrangentes.

Entretanto, o método deve ser usado com prudência, visto a infinidade de tipos de materiais viscoelásticos existentes, bem como as características distintas observadas, para que se consigam bons resultados.

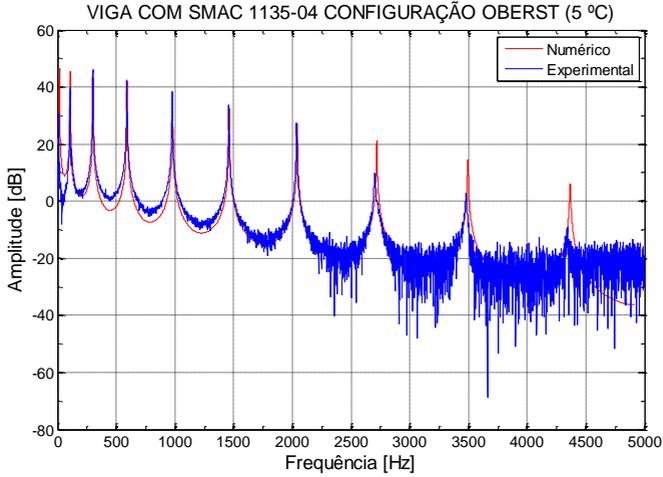


Figura 80 – Comparação entre FRF obtidas via métodos numérico e experimental de uma viga com material viscoelástico SMAC 1135-04.

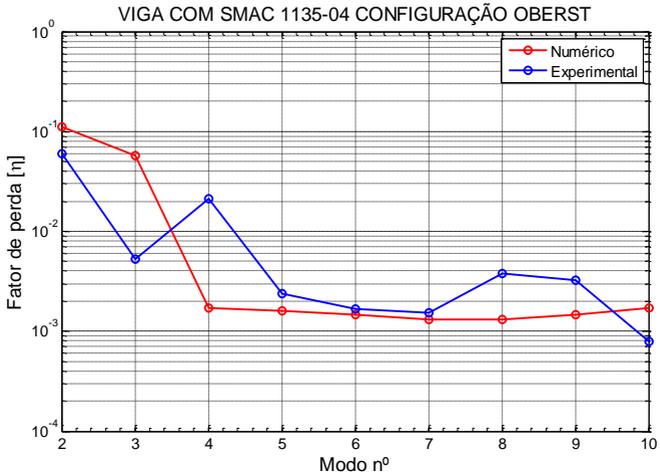


Figura 81 – Comparação do fator de perda medido das FRF de uma viga com material viscoelástico SMAC 1135-04.

## 6 CONCLUSÕES

O conhecimento das propriedades mecânicas e de amortecimento de materiais viscoelásticos é importante e necessário para a predição do comportamento dinâmico de estruturas nas quais possam ser aplicados. A determinação destas propriedades é uma tarefa custosa, exigindo tempo e cuidado na execução, quando utilizado o método descrito na norma ASTM E-756. Há uma grande quantidade de detalhes que devem ser levados em conta para a obtenção de resultados confiáveis e diversos pré-requisitos são necessários para a validade de aplicação da norma, como relação entre espessuras da viga e material de amortecimento, por exemplo. Tudo isto faz com que o método da viga vibrante da norma ASTM E-756 tenha faixas limitadas em face à grande quantidade de materiais de amortecimento existentes. Para alguns específicos, há outras formas de determinação das propriedades, que não foram explorados neste trabalho.

Os testes experimentais tem procedimento de simples realização, entretanto requerem uma série de cuidados. A infraestrutura laboratorial se mostrou suficiente e de qualidade para a realização dos ensaios, bem como a câmara de climatização do LVA é precisa e de fácil manuseio. Os transdutores sem contato também foram importantes por proporcionarem respostas satisfatórias para a faixa de frequência desejada, sem adição de massa ao sistema. Buscando a utilização de corpos de prova maiores, possivelmente não seria possível os utilizar.

Outro ponto de atenção em relação aos testes foi a análise da repetibilidade, que mostrou consideráveis erros gerados na realização do procedimento. Uma sugestão para trabalhos futuros é a análise estatística do procedimento, com a avaliação de repetibilidade, reprodutibilidade bem como estudo de sensibilidade da medição.

O método de ajuste de modelos demonstrou ser uma ferramenta poderosa, podendo ser aplicada a uma infinidade de configurações, materiais e geometrias. Os resultados obtidos dos dois casos analisados mostraram que há um enorme potencial na utilização da ferramenta para a determinação das propriedades dos materiais viscoelásticos.

Pode-se concluir também, em relação a isso, que simplificações, como utilização de propriedades constantes com a frequência podem reduzir a complexidade e o tempo de análise, sem grandes prejuízos de resultados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI S2.24 - 2001. *Graphical Presentation of the Complex Modulus of Visco-elastic Materials*. American National Standards Institute. 2001.

ANSYS MULTIPHYSICS, versão 14.0: Guia do usuário: Ansys Inc.

ARAÚJO, A. A. D. *Ajuste de Modelos Numéricos de Elementos Finitos Usando Métodos de Otimização*. [S.l.]: [s.n.]. Dissertação de Mestrado - UNICAMP, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Campinas, Set. 2007.

ASTM E230 - *Standard Specification and Temperature-Electromotive Force (emf) Tables for Standardized Thermocouples*. American Society for Testing and Materials. 2002.

ASTM E756 - 05. *Standard Test Method for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials*. American Society for Testing and Materials. 2005.

DOI, Ricardo M. *Validação de um Modelo de Conjunto para Predição e Análise Vibroacústica de um Compressor Hermético*. Tese de Doutorado - UFSC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, Fev. 2011.

FRISWELL, M. I; MOTTERSHEAD, J. E. *Finite Element Model Updating In Structural Dynamics*. Dordrecht: Kluwer Academic Press, 1995.

HEYLEN, W., SAS, P., 1987, Review of model optimization techniques, *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference*, London, England, pp. 1177-1182.

JONES, D. I. G.; *Viscoelastic Vibration Damping*, John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 2001.

LOPES, E. M. O. *Um estudo da precisão do método da viga vibrante aplicado à determinação das propriedades dinâmicas de elastômeros*. Dissertação de Mestrado - UFSC, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, Mar. 1989.

MODE FRONTIER, versão 4.3.0: Manual do usuário: Esteco.

MOTTERSHEAD, J. E., FRISWELL, M. I., 1993, Model updating in structural dynamics: a survey, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 167, No. 2, pp. 347-375.

NASHIF, A. D.; JONES, D. I. G.; HENDERSON, J. P.; Vibration Damping; John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 1985.

NATKE, H. G., 1988, Updating computational models in the frequency domain based on measured data: a survey, *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 3, No. 1, pp. 28-35.

RAMOS, E. M. P. *Identificação do módulo complexo de materiais viscoelásticos pelo método da viga de Oberst Modificado*. FEUP, Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Portugal, Jul, 2010.

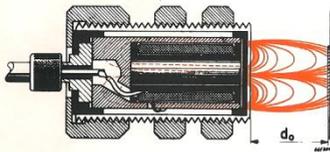
RAO, M. D. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial airplanes. *Journal of Sound and Vibration*, v. 262, n. 3, p. 457-474, 2003.

SANLITURK, K. Y., CAKAR, O. *A new method for noise elimination from measured frequency*. Istanbul Technical University, Faculty of Mechanical Engineering, Istanbul, Turkey, 2005.

## ANEXO 1 - ESPECIFICAÇÃO DOS TRANSDUTORES SEM CONTATO

### Transdutor B&K MM-0002

Magnetic Transducer Type MM 0002.



**Brüel & Kjær**  
Copenhagen

**Open Circuit Sensitivity:** About 1.5 mV/cm sec<sup>-1</sup> when the transducer is placed at a static distance  $d_0 = 2$  mm from the High- $\mu$  disc. The sensitivity decreases very rapidly as a function of  $d_0$ . The sensitivity in front of a large iron plate is around 8 db higher (2.5 times higher) than in front of the High- $\mu$  disc. The sensitivity remains fairly constant throughout the audio-frequency range (varies less than  $\pm 1$  db up to 2000 c/s).

**Impedance** (with open magnetic circuit): 1800  $\Omega$  in series with 400 mH.

**Distortion:** Less than 5% if the relative peak-to-peak amplitude ( $\Delta d/d_0$ ) is less than around 5%.

**Maximum Input Voltage** (exciter): Around 100 V (max. continuous power dissipation is 5 W at 20°C).

**Principle and Operation.** Type MM 0002 is an electromechanical transducer of the variable reluctance type, which can be used as velocity-sensitive vibration pick-up, or as electro-magnetic vibration exciter. Type MM 0002 should be fastened carefully in front of the vibrating structure, at less than a few millimeters distance. If the vibrating structure is non-magnetic, one of the High- $\mu$  Discs supplied should be cemented on to the structure in front of the axis of the Transducer (see drawing) by means of ordinary good quality glue. The dimensions of the supplied discs may be reduced, if necessary. As pick-up, Type MM 0002 is in normal cases only used for relative measurements.



MM 0002

**Static Magnetic Attraction.** The static force acting on the disc decreases rapidly when the distance  $d_0$  increases. For  $d_0 = 0.5, 1, 1.5$  mm the force is equal to 15, 6.6 and 3.3 gr. respectively. The attraction on a large iron plate is about twice as high.

**Construction:**

Permanent Magnet Core: Ticonal.  
Coil and magnet are isolated from the housing.  
Diameter of the main housing: 16 mm (thread: M 16  $\times$  1).

**Temperature Range:** From very low temperatures to +250°C.

**High- $\mu$  Discs YO 0010:** Radiometal  $\phi = 9$  mm.  
Weight: 0.17 gr.

BR MM0002 - October 1967



Type Number	MM-0002	
Signal Outputs		Velocity or Trigger for Tachometer
Detection Principle		Variable Reluctance
Conditioning		None (self-generating)
Frequency Range	Hz	0 to 2000
Typical Working Distances	mm	2
Operating Temperature Range	°C	-150 to +250
	°F	-238 to +482
Dimensions	mm	21 $\times$ 29.5
Connector		10-32 UNF
Mounting Provision		M16-1 thread with two included nuts
Further information		BP 0298

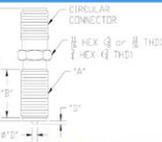
Figura 82 - Carta com especificações do transdutor B&K MM-0002. **Fonte:**  
**Site:** <http://www.bksv.com/doc/bf0236.pdf>.

# Transdutor MOTION SENSORS PC 55-18E

**MOTION SENSORS** Phone: 252-331-2080 / Fax: 252-331-1666  
 sales@motionsensors.com / www.motionsensors.com  
 Speed Sensing Solutions

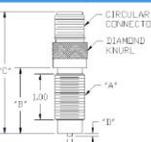
The sensors listed represent commonly requested models. We specialize in the customization of speed sensors and can provide cost effective customization options whether you require one unit or thousands. If you do not see the specifications you are looking for please contact us.

## Hermetically Sealed VR Sensors (Premium Series)



Please visit our website at [www.motionsensors.com](http://www.motionsensors.com) for additional specifications and features

## Epoxy Encapsulated VR Sensors (Value Series)



Model Number	Type	Mounting Thread (A)	Thread Length (B)	Overall Length (C)	Tp (Lamp Dia)	Resistance (ohms)	Inductance (Henry)	Output Strength	Interconnection	Temperature Range	Certification
PC55-18E	Value	5/8x18	1.43	2.666	015/ 897	150	0.85	1200	MIL-C-5018 Connector	-50C to +100C	
PC55-18E	Value	5/8x18	1.13	2.366	015/ 897	150	0.85	1200	MIL-C-5018 Connector	-50C to +100C	
PC55-18E	Value	5/8x18	1.13	2.366	015/ 897	150	0.85	1200	MIL-C-5018 Connector	-50C to +100C	Intrinsically Safe
PC55-49	Value	5/8x18	1.43	2.666	015/ 897	150	L/L/0/H/H	1200	MIL-C-5018 Connector	-50C to +100C	
PC55-18E	Value	5/8x18	1.43	2.666	025/ 100	1200	450	1000	MIL-C-5018 Connector	-50C to +100C	
PC55-18E	Value	5/8x18	1.13	2.366	025/ 100	1200	450	1000	MIL-C-5018 Connector	-50C to +100C	
PC55-30	Value	5/8x18	1.43	2.666	025/ 100	1200	L/L/0/H/H	1000	MIL-C-5018 Connector	-50C to +100C	Intrinsically Safe
PC55-20	Premium	5/8x18	1.00	2.212	031/ 100	1700	1.4	305	MIL-C-5018 Connector	-200C to +200C	
PC459	Premium	5/8x18	0.75	2.666	031/ 100	1700	L/L/0/H/H	305	MIL-C-5018 Connector	-200C to +175C	Intrinsically Safe
PC51-1G	Premium	5/8x18	1.00	2.212	031/ 100	1200	0.54	810	MIL-C-5018 Connector	-200C to +200C	
PC45-7	Premium	5/8x18	0.75	2.666	031/ 100	1200	L/L/0/H/H	810	MIL-C-5018 Connector	-50C to +175C	Intrinsically Safe
PC24-46G	Premium	11/16x24	0.63	2.250	019/ 05	1360	1.6	360	MIL-C-5018 Connector	-200C to +200C	
PC45-5	Premium	11/16x24	0.63	2.666	019/ 05	1360	L/L/0/H/H	360	MIL-C-5018 Connector	-50C to +175C	Intrinsically Safe
PC13-70C	Premium	11/16x24	0.63	1.975	019/ 05	1600	1.3	660	MIL-C-5018 Connector	-200C to +200C	
PC13-34C	Premium	11/16x24	0.63	2.666	019/ 05	1600	1.3	660	MIL-C-5018 Connector	-200C to +200C	
PC45-1	Premium	11/16x24	0.63	2.666	019/ 05	1600	L/L/0/H/H	660	MIL-C-5018 Connector	-50C to +175C	Intrinsically Safe
PC24-141G	Premium	3/4x20	1.25	2.666	FL/8H	1360	1.6	360	MIL-C-5018 Connector	-200C to +200C	
PC45-7	Premium	3/4x20	1.25	2.666	FL/8H	1360	L/L/0/H/H	360	MIL-C-5018 Connector	-50C to +175C	Intrinsically Safe
PC13-100G	Premium	3/4x20	1.25	2.666	FL/8H	1600	1.3	660	MIL-C-5018 Connector	-200C to +200C	
PC45-8	Premium	3/4x20	1.25	2.666	FL/8H	1600	L/L/0/H/H	660	MIL-C-5018 Connector	-50C to +175C	Intrinsically Safe

Specifications for Intrinsically Safe Versions

Approvals: Intrinsic safety to CSA (with NRTL/C) and LCE to ATEX (94/9/EC).

Entity Parameters: Group IIC; Vmax/Im = 30 VDC; Imax/Im = 300 mA; C/Ci = 0 uF; L/Li = 0 mH

Hazardous Location: Class I, Div. 1, Group A,B,C,D; Class II, Div. 1, Group E,F,G; Class III and coal dust

(If equipped with NPT/pigtail lead combinations, below units are also suitable for Class I, Div. 1, Group A,B,C,D; Class II, Div. 1, Group E,F,G; and Class III)

Dimensions in inches

Specifications +/- .010"

Mounting Threads UNF-2A; Metric and smaller thread sizes available

All units can also come equipped with pigtail leads and/or NPT threading

Figura 83 - Carta com especificações do transdutor MOTION SENSORS PC 55-18E.