

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TESE DE DOUTORADO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE
VIGAS SANDUÍCHE COM NÚCLEO *HONEYCOMB*
PREENCHIDO COM ELASTÔMERO MAGNETO
REOLÓGICO**

Autor: Felipe de Souza Eloy

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Junior

Co-Orientador: Prof. Dr. Antonio Jose Faria Bombard

Itajubá, Outubro de 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TESE DE DOUTORADO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE
VIGAS SANDUÍCHE COM NÚCLEO *HONEYCOMB*
PREENCHIDO COM ELASTÔMERO MAGNETO
REOLÓGICO**

Autor: **Felipe de Souza Eloy**

Orientador: **Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Junior**

Co-Orientador: **Prof. Dr. Antonio Jose Faria Bombard**

Curso: **Doutorado em Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: **Projeto, Materiais e Processos**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em
Engenharia Mecânica.

Itajubá, Outubro de 2018

M.G. – Brasil

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TESE DE DOUTORADO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE
VIGAS SANDUÍCHE COM NÚCLEO *HONEYCOMB*
PREENCHIDO COM ELASTÔMERO
MAGNETOREOLÓGICO**

Autor: **Felipe de Souza Eloy**

Orientador: **Prof. Dr. Antonio Carlos Ancelotti Junior**

Co-Orientador: **Prof. Dr. Antonio Jose Faria Bombard**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Luiz Claudio Pardini – IAE/CTA

Prof. Dr. Edson Cocchieri Botelho – UNESP

Prof. Dr. Sebastião Simões Cunha Junior – IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Guilherme Ferreira Gomes – IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Antônio Jose Faria Bombard, Presidente – IFQ/UNIFEI

Dedicatória

Aos meus pais, Sebastião e Maria Helena, razão principal do meu esforço.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pela saúde, disposição e inteligência necessárias para conduzir este trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Antônio Carlos Ancelotti Junior, meus agradecimentos pela valiosa colaboração, paciência, dedicação, amizade, grande incentivo e pelos conselhos.

Ao meu Co-Orientador Prof. Dr. Antonio Jose Faria Bombard pela importante contribuição neste trabalho, pelo fornecimento do pó ferromagnético e por disponibilizar seus equipamentos e laboratório.

Aos professores e amigos Prof. Dr. Sebastião Simões da Cunha Junior e Prof. Dr. Guilherme Ferreira Gomes pela importante ajuda na parte experimental deste trabalho e por todo auxílio e incentivo prestados.

À Monique, pelo auxílio na preparação do elastômero magneto reológico. Ao Diego Junqueira pela notável colaboração na análise numérica. Ao pessoal do NTC pela ajuda no processamento do material.

Aos meus pais, Sebastião Eloi Filho e Maria Helena de Souza Eloi, e à Patrícia Kelli Silva de Oliveira, pelo carinho, paciência, incentivo e companheirismo.

A todos os Professores e amigos do Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI, que direta ou indiretamente me auxiliaram até a conclusão deste trabalho.

À Universidade Federal de Itajubá, pela possibilidade de realização deste Doutorado.

Resumo

ELOY, F. S. (2018), Estudo do Comportamento Dinâmico de Vigas Sanduíche com Núcleo *Honeycomb* Preenchido com Elastômero Magneto Reológico, Itajubá, 210 f. Tese de Doutorado em Projeto, Materiais e Processos, Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Estruturas sanduíche vêm sendo empregadas na indústria aeronáutica, onde o fator “peso” é um parâmetro crítico, devido ao fato de apresentarem uma alta relação rigidez/peso. Aeronaves estão sujeitas a vibrações mecânicas severas e a possibilidade de controle ativo dessas vibrações é importante para o conforto da cabine e estabilidade de voo, bem como para a sua integridade estrutural. Materiais inteligentes se apresentam como possível solução para o controle de vibrações, uma vez que permitem a variação de parâmetros modais da estrutura frente a estímulos elétricos ou magnéticos. O objetivo desta tese é uma análise de vibrações em modelos de vigas sanduíche, cujos núcleos são em forma de colmeias (ou *honeycombs*), preenchidos por elastômeros magneto reológicos e as lâminas (*skins*) em material compósito. O trabalho consiste de uma análise experimental, por meio de ensaios de vibrações livre e forçada, e numérica para a determinação dos parâmetros modais destes modelos de viga em função da intensidade de campo magnético aplicado. De acordo com os resultados obtidos, notou-se grande potencialidade no emprego destes materiais em estruturas, uma vez que foram alcançadas reduções de até 40% no valor das frequências naturais, aumentos de até 191% nos fatores de amortecimento e uma redução de até 90% nas amplitudes de vibração forçada dos modelos de viga estudados em função do campo magnético aplicado, variações estas, muito maiores do que as observadas na literatura. Com a conclusão deste trabalho, se propõe um novo modelo de viga, uma vez que são escassas na literatura vigas com núcleo *honeycomb* preenchidas com o elastômero magneto reológico.

Palavras-chave

Viga sanduíche, *Honeycomb*, Elastômero Magneto Reológico, Compósitos, Vibrações.

Abstract

ELOY, F. S. (2018), Study of Dynamic Behavior of Sandwich Beams with Honeycomb Core Filled by Magnetorheological Elastomer. Itajubá, 210 f. Doctoral Dissertation in Project, Materials and Process, Mechanical Engineering Institute, Federal University of Itajubá.

Sandwich structures have been employed in the aeronautical industry, where the "weight" factor is a critical parameter due to the fact that they present a high stiffness / weight ratio. Aircraft are subject to severe mechanical vibrations and the possibility of active control of these vibrations is important for cabin comfort and flight stability as well as for its structural integrity. Intelligent materials are considered as a possible solution for the control of vibrations, since they allow the variation of modal parameters of the structure as a function of electrical or magnetic stimuli. The objective of this thesis is an analysis of vibrations in sandwich beams, whose cores are in the form of honeycombs, filled by magnetorheological elastomers and the skins in composite material. The work consists of an experimental and numerical analysis for the determination of the modal parameters of the studied beams as a function of the applied magnetic field strength in the free and forced vibrations tests. According to the obtained results, significant dynamic responses were observed, since a reduction of up to 40% in the value of the natural frequencies was achieved, as well as an increase of up to 191% in the damping factors and a reduction of up to 90% in the amplitudes of forced vibration of the beam models studied as a function of the applied magnetic field. These variations are bigger than those observed in the literature. With the conclusion of this work, a new beam model is proposed, since that, beams with honeycomb core filled with the magnetorheological elastomer are scarce in the literature.

Keywords

Sandwich beam, honeycomb, magnetorheological elastomer, composites, vibrations.

Sumário

SUMÁRIO	I
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE FOTOS	XV
SIMBOLOGIA	XVI
LETRAS LATINAS	XVI
LETRAS GREGAS	XVII
SUBSCRITOS	XVII
SIGLAS	XVII
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÃO	3
1.2 OBJETIVOS	4
1.3 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO	5
1.4 CONTEÚDO DO TRABALHO	6
CAPÍTULO 2	8
REVISÃO DA LITERATURA	8
2.1 ESTRUTURAS SANDUÍCHE	8
2.1.1 Componentes do painel sanduíche	9
2.1.1.1 Núcleos para perfis sanduíche	10
2.1.1.1.1 Núcleos em forma de colmeia ou honeycomb	10
2.1.1.1.2 Núcleos em forma de espuma	12
2.1.1.2 Lâminas ou skins para perfis sanduíche	13
2.1.1.2.1 Materiais compósitos	14
2.1.1.2.1.1 Propriedades Elásticas de Materiais Compósitos	19
2.2 APLICAÇÕES ESTRUTURAIS DE PERFIS SANDUÍCHE	21
2.2.1 Campo Aeronáutico	22

2.2.2 Campo da construção civil-----	24
2.3 MATERIAIS INTELIGENTES (<i>SMART MATERIALS</i>)-----	26
2.3.1 Materiais Piezelétricos -----	26
2.3.2 Materiais com memória de forma-----	28
2.3.3 Fluidos controláveis -----	30
2.3.4 Elastômeros controláveis-----	34
2.4 APLICAÇÃO DE MATERIAIS MAGNETO REOLÓGICOS EM VIGAS SANDUÍCHE-----	41
CAPÍTULO 3 _____	51
MATERIAIS E METODOLOGIA _____	51
3.1 MATERIAIS -----	51
3.2 METODOLOGIA-----	53
3.2.1 CONFECÇÃO DOS MODELOS DE VIGA SANDUÍCHE -----	55
3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS -----	65
3.2.3 REOLOGIA DO ELASTÔMERO MAGNETO REOLÓGICO -----	67
3.2.4 ENSAIO DE VIBRAÇÕES -----	70
3.2.4.1 Ensaio de vibração livre -----	70
3.2.4.2 Ensaio de vibração forçada-----	74
3.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA -----	77
CAPÍTULO 4 _____	84
RESULTADOS E DISCUSSÕES _____	84
4.1 ANÁLISE MICROSCÓPICA ÓPTICA DE LUZ REFLETIDA DO ELASTÔMERO MAGNETO REOLÓGICO-----	84
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS LÂMINAS EM MATERIAL COMPÓSITO-----	87
4.3 CARCATERÍSTICAS E REOLOGIA DO ELASTÔMERO MAGNETO REOLÓGICO-----	88
4.4 RESULTADOS DO ENSAIO DE VIBRAÇÃO LIVRE -----	93
4.4.1 Frequências naturais -----	93
4.4.2 Simulação numérica -----	107
4.4.3 Fatores de amortecimento-----	117
4.5 RESULTADOS DO ENSAIO DE VIBRAÇÃO FORÇADA-----	128
CAPÍTULO 5 _____	133
CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS _____	133

5.1 CONCLUSÕES -----	133
5.2 PERSPECTIVAS FUTURAS-----	134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	136
APÊNDICE A _____	152
CURVAS DE AJUSTES REALIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO DO FATOR DE AMORTECIMENTO _____	152
APÊNDICE B _____	175
INSTRUMENTAÇÃO _____	175

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Esquema simplificado de um painel sanduíche.	2
Figura 2.1 – Diferentes núcleos em forma de colmeia: a) alumínio; b) resina de papel fenólico; c) cerâmico em células quadrangulares; d) Cerâmico em células triangulares. Fonte: Gibson e Ashby (1997), <i>apud</i> Soares (2007).	11
Figura 2.2 – Esquema mostrando a microestrutura celular: a) espuma de célula aberta; b) espuma de célula fechada. Fonte: Gibson e Ashby (1997), <i>apud</i> Saenz (2012).	12
Figura 2.3 – Painel sanduíche superior com núcleo em espuma e painel inferior com núcleo colmeia. Fonte: Adaptado de Allen (1969), <i>apud</i> Gagliardo (2008).	13
Figura 2.4 – Tipos de compósitos reforçados por fibras. Fonte: Adaptado de Daniel e Ishai (1994).	17
Figura 2.5 – Lâmina unidirecional e eixos principais. Fonte: Adaptado de Daniel e Ishai (1994).	18
Figura 2.6 - Esquema representativo de um tecido plano. Fonte: Adaptado de Gay <i>et al.</i> (2002).	18
Figura 2.7 – Asa com fuselagem em sanduíche colmeia de uma aeronave leve. Fonte: Yunliang(1987), <i>apud</i> Jha (2007).	22
Figura 2.8 – 1- Pás de rotores; 2- Portas principais e de carga; 3- Painéis da fuselagem; 4- Fuselagem e piso; 5- Seção da cauda. Fonte: Hexcel Composites (1998), <i>apud</i> Jha (2007). --	22
Figura 2.9 – Bordo de ataque com estrutura em sanduíche colmeia colada na longarina. Fonte: Adaptado de Rodrigues (2014).	23
Figura 2.10 – Exemplos de aplicações de perfis sanduíche no A380. Fonte: Adaptado de Herrmann <i>et al.</i> (2005), <i>apud</i> Betts (2013).	24
Figura 2.11 – Tabuleiro da ponte sobre o Rio <i>Avabçon</i> próximo a Bex, na Suíça. a) Montagem dos componentes do tabuleiro. b) Posicionamento do tabuleiro. Fonte: Keller <i>et al.</i> (2014), <i>apud</i> Garrido (2016).	25
Figura 2.12 – Exemplo de uso de um atuador com liga de memória de forma submetido a um carregamento constante. Fonte: Koomen (2015).	29

Figura 2.13 – Comportamento do fluido magneto reológico no interior de um amortecedor em funcionamento. Fonte: Ahamed <i>et al.</i> (2018). -----	32
Figura 2.14 – a) Ponte Eiland na Holanda e b) o amortecedor fluido magneto reológico utilizado. Fonte: Weber e Distl (2015) <i>apud</i> Ahamed <i>et al.</i> (2018). -----	33
Figura 2.15 – Exemplos de amortecedores fluido magneto reológicos em a) máquinas de lavar roupa (CARLSON, 2002), b) próteses humanas (POYNOR, 2001) e em c) veículos de passeio (YU <i>et al.</i> , 2009). -----	33
Figura 2.16 – Disposições de partículas em um elastômero. a) Elastômero magneto reológico anisotrópico; b) Elastômero magneto reológico isotrópico. Fonte: Tian <i>et al.</i> (2011). -----	37
Figura 2.17 – Modelo proposto para um absorvedor de vibração a) e seu protótipo b). Fonte: Deng <i>et al.</i> (2006) <i>apud</i> Li <i>et al.</i> (2014). -----	38
Figura 2.18 – Protótipo de um modelo proposto para um absorvedor de vibração em estruturas. Fonte: Behrooz <i>et al.</i> (2014).-----	39
Figura 2.19 – Exemplos de curvas de saturação a) para elastômeros magneto reológicos contendo diferentes frações de pó ferromagnético (YUNUS <i>et al.</i> , 2016, <i>apud</i> KWON <i>et al.</i> , 2018) e b) para elastômero magneto reológico contendo nano tubos de carbono (QI <i>et al.</i> , 2016, <i>apud</i> KWON <i>et al.</i> , 2018).-----	40
Figura 3.1 – Fluxograma das etapas do trabalho.-----	54
Figura 3.2 – Disposição do núcleo colmeia reticulado quadrado. -----	55
Figura 3.3 – Geometria do núcleo colmeia reticulado quadrado. -----	56
Figura 3.4 – Mistura manual do pó ferromagnético ao silicone. -----	57
Figura 3.5 – Núcleo colmeia em ABS preenchido por elastômero magnetoreológico. -----	58
Figura 3.6 – Posicionamento dos núcleos colmeia entre as camadas de tecido de fibra de carbono.-----	59
Figura 3.7 - Esquema do processo VARTM. Fonte: Eloy (2014).-----	60
Figura 3.8 – Homogeneização da mistura resina/catalisador. -----	61
Figura 3.9 – Bolsa de vácuo montada. -----	62
Figura 3.10 – Início do processo de infusão da resina sobre as lâminas. -----	62
Figura 3.11 – Etapa final do processo de infusão da resina sobre as lâminas. -----	62
Figura 3.12 – Marcação dos corpos de prova a serem retirados da placa laminada. -----	63
Figura 3.13 – Geometria das vigas sanduíche finais. -----	64
Figura 3.14 – Reômetro utilizado: à esquerda na ausência de campo magnético e à direita, com a cela magnética acoplada.-----	68

Figura 3.15 – Amostras ensaiadas no reômetro: a) Silicone contendo 30% em massa de partículas de ferro, b) Silicone contendo 60% em massa destas partículas e c) Silicone puro.	69
Figura 3.16 – Martelo utilizado para excitar dinamicamente a viga e placa de aquisição de sinais. -----	71
Figura 3.17 – Montagem dos equipamentos para o ensaio de vibração livre.-----	72
Figura 3.18 – Aparato experimental utilizado nos ensaios. -----	73
Figura 3.19 – a) Detalhe do posicionamento da viga sanduíche no entre-ferros do eletroímã. b) Incidência do laser sobre o corpo de prova. -----	73
Figura 3.21 – Aparato experimental utilizado no ensaio de vibração forçada.-----	77
Figura 3.22 – a) Detalhe da viga engastada ao Shaker posicionada no “entre-ferro” do eletroímã. b) Posicionamento do vibrômetro laser. -----	77
Figura 4.1 – Micrografia para a amostra contendo 30% em massa de partículas no silicone. Aumento de 50x. -----	85
Figura 4.2 – Micrografia para a amostra contendo 60% em massa de partículas no silicone. Aumento de 100x.-----	85
Figura 4.3 – Micrografia para a amostra de silicone puro na ausência de partículas de ferro. Aumento de 200x.-----	86
Figura 4.4 – Módulo de armazenamento e módulo de perda para o elastômero magneto reológico com 30% em massa de partículas ferromagnéticas. -----	89
Figura 4.5 – Módulo de armazenamento e módulo de perda para o elastômero magneto reológico com 60% em massa de partículas ferromagnéticas. -----	90
Figura 4.6 – Comparação entre os módulos de armazenamento e de perda para os elastômeros magneto reológicos com 30% e 60% em massa de partículas ferromagnéticas e o silicone puro na ausência de campo magnético. -----	91
Figura 4.7 – Espectro de frequências para a amostra com núcleo PLA preenchido com elastômero contendo 30% em massa de partículas magnéticas. a) Ímã na extremidade livre; b) Ímã no centro. -----	94
Figura 4.8 – Espectro de frequências para a amostra com núcleo PLA preenchido com elastômero contendo 60% em massa de partículas magnéticas. a) Ímã na extremidade livre; b) Ímã no centro. -----	97
Figura 4.9 – Espectro de frequências para a amostra com núcleo ABS preenchido com elastômero contendo 30% em massa de partículas magnéticas. a) Ímã na extremidade livre; b) Ímã no centro. -----	99

Figura 4.10 – Espectro de frequências para a amostra com núcleo ABS preenchido com elastômero contendo 60% em massa de partículas magnéticas. a) Ímã na extremidade livre; b) Ímã no centro. -----	101
Figura 4.11 – Variação das frequências naturais correspondentes ao primeiro modo de vibração em função do campo magnético. a) Ímã na extremidade livre; b) Ímã no centro.--	103
Figura 4.12 – Variação das frequências naturais correspondentes ao segundo modo de vibração em função do campo magnético. a) Ímã na extremidade livre; b) Ímã no centro.--	104
Figura 4.13 – Variação das frequências naturais correspondentes ao terceiro modo de vibração em função do campo magnético. a) Ímã na extremidade livre; b) Ímã no centro. -----	104
Figura 4.15 – Modos de vibração para a viga sanduíche contendo núcleo em PLA-30% com ímã posicionado na extremidade livre a) e no centro da viga b). -----	111
Figura 4.16 – Modos de vibração para a viga sanduíche contendo núcleo em PLA-60% com ímã posicionado na extremidade livre a) e no centro da viga b). -----	113
Figura 4.17 – Modos de vibração para a viga sanduíche contendo núcleo em ABS-30% com ímã posicionado na extremidade livre da viga a) e na ausência de campo magnético aplicado b).-----	114
Figura 4.18 – Modos de vibração para a viga sanduíche contendo núcleo em ABS-60% com ímã posicionado no centro da viga a) e na ausência de campo magnético aplicado b). -----	115
Figura 4.19 –Resposta de velocidade no tempo para a viga sanduíche com núcleo PLA contendo 60% de partículas ferromagnéticas, sob campo magnético de 50 kA/m aplicado na extremidade livre da viga. -----	118
Figura 4.20 – Ajuste da curva de amplitude no tempo para a viga sanduíche com núcleo em PLA contendo 60% de partículas ferromagnéticas, sob campo magnético de 50 kA/m aplicado na extremidade livre da viga.-----	119
Figura 4.21 – Variação para os valores dos fatores de amortecimento em função do campo magnético aplicado nas extremidades livres das vigas sanduíche, para o primeiro modo de vibração.-----	125
Figura 4.22 – Variação para os valores dos fatores de amortecimento em função do campo magnético aplicado nos centros das vigas sanduíche, para o primeiro modo de vibração.---	125
Figura 4.23 – Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga sanduíche com colmeia em PLA com elastômero contendo 30% de partículas magnéticas. Frequência de excitação de 12,18 Hz. -----	129

Figura 4.24 – Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga sanduíche com colmeia em PLA com elastômero contendo 60% de partículas magnéticas. Frequência de excitação de 11,96 Hz. -----	129
Figura 4.25 – Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga sanduíche com colmeia em ABS com elastômero contendo 30% de partículas magnéticas. Frequência de excitação de 12,31 Hz. -----	130
Figura 4.26 – Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga sanduíche com colmeia em ABS com elastômero contendo 60% de partículas magnéticas. Frequência de excitação de 11,74 Hz. -----	130
Figura A.1 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas na ausência de campo magnético aplicado. -----	153
Figura A.2 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 20 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	153
Figura A.3 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 30 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	154
Figura A.4 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 40 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	154
Figura A.5 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 50 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	155
Figura A.6 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 60 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	155
Figura A.7 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 70 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	156
Figura A.8 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 80 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	156

Figura A.9 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 90 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	157
Figura A.10 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 100 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	157
Figura A.11 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 110 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	158
Figura A.12 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 120 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	158
Figura A.13 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas na ausência de campo magnético aplicado. -----	159
Figura A.14 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 20 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	159
Figura A.15 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 30 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	160
Figura A.16 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 40 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	160
Figura A.17 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 50 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	161
Figura A.18 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 60 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	161
Figura A.19 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 70 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	162

Figura A.20 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 80 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	162
Figura A.21 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 90 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	163
Figura A.22 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 100 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	163
Figura A.23 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas na ausência de campo magnético aplicado. -----	164
Figura A.24 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 20 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	164
Figura A.25 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 30 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	165
Figura A.26 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 40 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	165
Figura A.27 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 50 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	166
Figura A.28 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 60 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	166
Figura A.29 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 70 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	167
Figura A.30 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 80 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	167

Figura A.31 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 90 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	168
Figura A.32 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 100 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	168
Figura A.33 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 110 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	169
Figura A.34 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 120 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	169
Figura A.35 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas na ausência de campo magnético aplicado. -----	170
Figura A.36 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 20 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	170
Figura A.37 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 30 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	171
Figura A.38 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 40 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	171
Figura A.39 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 50 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	172
Figura A.40 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 60 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	172
Figura A.41 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 70 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	173

Figura A.42 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 80 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	173
Figura A.43 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 90 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	174
Figura A.44 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 100 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita). -----	174

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Características de alguns dos materiais utilizados como reforço. Fonte: Adaptado de Callister (2007).-----	15
Tabela 2.2 – Propriedades das resinas geralmente utilizadas. Fonte: Adaptado de Gay <i>et al.</i> (2003). -----	16
Tabela 3.1 – Propriedades do tecido de fibra de carbono. -----	52
Tabela 3.2 – Propriedades da resina epóxi utilizada. -----	53
Tabela 3.3 – Propriedades dos núcleos colmeia. -----	56
Tabela 3.4 – Propriedades das vigas sanduíche finais. -----	64
Tabela 3.5 – Massas dos componentes presentes em cada viga sanduíche. -----	65
Tabela 4.1 – Propriedades do compósito utilizado como lâmina nas vigas sanduíche. -----	87
Tabela 4.2 – Massas específicas dos elastômeros magneto reológicos. -----	88
Tabela 4.3 – Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche com núcleo PLA com 30% em massa de partículas magnéticas com ímã na extremidade livre. -----	96
Tabela 4.4 – Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche com núcleo PLA com 30% em massa de partículas magnéticas com ímã no centro.	96
Tabela 4.5 – Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche com núcleo PLA com 60% em massa de partículas magnéticas com ímã na extremidade livre. -----	98
Tabela 4.6 – Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche com núcleo PLA com 60% em massa de partículas magnéticas com ímã no centro.	98
Tabela 4.7 – Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche com núcleo ABS com 30% em massa de partículas magnéticas com ímã na extremidade. -----	100
Tabela 4.7 – Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche com núcleo ABS com 30% em massa de partículas magnéticas com ímã no centro.	100

Tabela 4.9 – Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche com núcleo ABS com 60% em massa de partículas magnéticas com ímã na extremidade. -----	102
Tabela 4.10 – Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche com núcleo ABS com 60% em massa de partículas magnéticas com ímã no centro.	102
Tabela 4.11 – Comparação entre as frequências naturais numéricas e experimentais do ensaio de vibração livre para a viga contendo PLA com 30% de partículas ferromagnéticas no núcleo. -----	110
Tabela 4.12 – Comparação entre as frequências naturais numéricas e experimentais do ensaio de vibração livre para a viga contendo PLA com 60% de partículas ferromagnéticas no núcleo. -----	112
Tabela 4.13 – Comparação entre as frequências naturais numéricas e experimentais do ensaio de vibração livre para a viga contendo ABS com 30% de partículas ferromagnéticas no núcleo. -----	113
Tabela 4.14 – Comparação entre as frequências naturais numéricas e experimentais do ensaio de vibração livre para a viga contendo ABS com 60% de partículas ferromagnéticas no núcleo. -----	115
Tabela 4.15 – Fatores de amortecimento obtidos pelo ajustes das curvas de amplitude no tempo para a viga sanduíche com colmeia em PLA contendo 30% de partículas magnéticas, com ímã na extremidade. -----	120
Tabela 4.16 – Fatores de amortecimento obtidos pelo ajustes das curvas de amplitude no tempo para a viga sanduíche com colmeia em PLA contendo 30% de partículas magnéticas, com ímã no centro.-----	121
Tabela 4.17 – Fatores de amortecimento obtidos pelo ajustes das curvas de amplitude no tempo para a viga sanduíche com colmeia em PLA contendo 60% de partículas magnéticas, com ímã na extremidade. -----	121
Tabela 4.18 – Fatores de amortecimento obtidos pelo ajustes das curvas de amplitude no tempo para a viga sanduíche com colmeia em PLA contendo 60% de partículas magnéticas, com ímã no centro.-----	122
Tabela 4.19 – Fatores de amortecimento obtidos pelo ajustes das curvas de amplitude no tempo para a viga sanduíche com colmeia em ABS contendo 30% de partículas magnéticas, com ímã na extremidade. -----	122

Tabela 4.20 – Fatores de amortecimento obtidos pelo ajustes das curvas de amplitude no tempo para a viga sanduíche com colmeia em ABS contendo 30% de partículas magnéticas, com ímã no centro.-----	123
Tabela 4.21 – Fatores de amortecimento obtidos pelo ajustes das curvas de amplitude no tempo para a viga sanduíche com colmeia em ABS contendo 60% de partículas magnéticas, com ímã na extremidade. -----	123
Tabela 4.22 – Fatores de amortecimento obtidos pelo ajustes das curvas de amplitude no tempo para a viga sanduíche com colmeia em ABS contendo 60% de partículas magnéticas, com ímã no centro.-----	124
Tabela 4.23 – Frequências de excitação de cada viga no ensaio de vibração forçada sem campo magnético aplicado.-----	128

Lista de Fotos

Fotografia B.1 – Amplificador. -----	175
Fotografia B.2 – Analisador de sinais. -----	176
Fotografia B.3 – Balança. -----	177
Fotografia B.4 – Conjunto eletroímã-bobina. -----	177
Fotografia B.5 – Fonte de tensão ou fonte de alimentação. -----	178
Fotografia B.7 – Gerador de função ou gerador de sinais. -----	179
Fotografia B.8 - Máquina de corte. -----	180
Fotografia B.9 – Martelo de impacto. -----	180
Fotografia B.10 – Microscópio óptico. -----	181
Fotografia B.11 - Misturador. -----	182
Fotografia B.12 – Paquímetro utilizado. -----	182
Fotografia B.13 – Reômetro. -----	183
Fotografia B.14 – <i>Shaker</i> . -----	184
Fotografia B.15 – Vista frontal do vibrômetro laser. -----	184

Simbologia

Letras Latinas

A_i	área do componente i .	m^2
d_1	distância da borda do núcleo à borda da viga sanduíche.	m
E_i	módulo de elasticidade na direção i .	GPa
F	força.	N
G^*	módulo de cisalhamento complexo.	GPa
G'	módulo de armazenamento.	GPa
G''	módulo de perda.	GPa
G_{12}	módulo de cisalhamento no plano 1-2.	GPa
h_1	espessura menor da viga sanduíche.	m
h_2	espessura maior da viga sanduíche.	m
L	comprimento total da viga sanduíche.	m
R^2	coeficiente de determinação.	
s	largura do quadrado do <i>honeycomb</i> .	m
t	espessura.	m
V_f	porcentagem em volume de fibras.	%
V_m	porcentagem em volume de matriz.	%

Letras Gregas

σ	tensão normal.	N/m ²
ν_{ij}	coeficiente de Poisson associado com carregamento na direção i e deformação na direção j .	
ω	frequência natural angular.	rad/s
ω_d	frequência natural amortecida.	rad/s
γ	distorção de cisalhamento.	
ζ	fator de amortecimento.	
μ	permeabilidade magnética.	

Subscritos

1	eixo longitudinal.
2	eixo transversal.
f	fibra.
m	matriz.

Siglas

ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
EMR	Elastômero magneto reológico
FCN	Frequência sob campo N

FSC	Frequência sem campo
MEF	Método dos Elementos Finitos
NTC	Núcleo de Tecnologia em Compósitos
PLA	Poli ácido láctico
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
UV	Ultra-violeta

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com o avanço tecnológico, a demanda por parte das indústrias passa a exigir novos conceitos de materiais e técnicas de fabricação. Materiais mais leves e resistentes surgem como solução ao emprego de materiais tradicionais e com elevada massa específica como os metais, de uma maneira geral. Seguindo-se esta tendência, painéis sanduíche vêm sendo vistos como materiais preferenciais em diversas aplicações, principalmente na indústria aeronáutica onde o fator “peso” é um parâmetro crítico.

Painéis sanduíche são uma combinação de diferentes materiais, podendo estes ser compostos ou simples. Neste tipo de disposição, notam-se geralmente três camadas de materiais, duas placas finas, sendo uma lâmina superior e outra inferior, popularmente conhecidas por “*skins*”, podendo estas ser isotrópicas, ortotrópicas ou anisotrópicas, e por um núcleo, conhecido por “*core*”, geralmente de massa específica menor, podendo ser uma espuma, um reticulado simples, uma geometria em forma de colmeia (*honeycomb*), dentre outras geometrias. Estas camadas são intimamente ligadas umas às outras de modo que as propriedades de cada uma agregam vantagens à estrutura final combinada. Uma ilustração deste tipo de estrutura pode ser visualizada na Figura 1.1 a seguir.

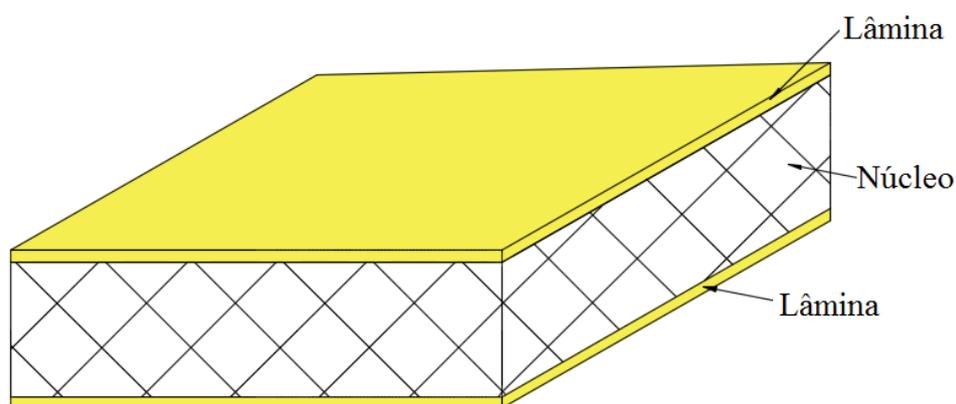


Figura 1.1 – Esquema simplificado de um painel sanduíche.

A resistência de uma estrutura sanduíche à flexão, em certas condições, pode ser muito maior que a de uma placa maciça, constituída de mesmos material e massa específica das duas faces do sanduíche. A principal função das lâminas neste tipo de estrutura é a de fornecer rigidez à flexão e ao cisalhamento em função dos carregamentos requeridos (GAGLIARDO, 2008). De maneira semelhante, o núcleo tem funções importantes nesta classe de material. De acordo com Bertini (1995), ele é responsável por manter as faces superior e inferior separadas por uma distância adequada e também pela transferência dos esforços. O núcleo deve ter uma rigidez adequada, de modo a evitar que as placas escorreguem uma em relação à outra. Além das funções estruturais já citadas, o núcleo garante ainda isolamento térmico e acústico.

Painéis sanduíche apresentam-se como materiais com elevadas relações rigidez/peso e resistência/peso. São estruturas fáceis de serem montadas, uma vez que apresentam peso próprio reduzido e geralmente são pré-fabricados, gerando economia de tempo e de custos. Caracterizam-se ainda pela sua durabilidade, mesmo em ambientes quimicamente agressivos e por permitirem a combinação de diferentes materiais, permitindo a criação de formas relativamente complexas (DE ALMEIDA, 2009).

Frente à potencialidade no uso de estruturas sanduíche nas diferentes indústrias, torna-se de fundamental importância o conhecimento de técnicas destinadas ao controle do campo de deformações e dos parâmetros modais destas estruturas quando solicitadas dinamicamente. Dentre as diferentes técnicas de controle de vibrações em estruturas, encontra-se a baseada na utilização de materiais inteligentes (*smart materials*). Materiais inteligentes são materiais cujas propriedades podem ser alteradas perante um estímulo externo, como por exemplo, tempe-

ratura, umidade, campo elétrico ou magnético, dentre outros (RUDDY *et al.*, 2012). Dentre os chamados *smart materials*, estão os elastômeros magneto reológicos (EMR).

EMR são compostos de partículas polarizáveis magneticamente dispersas, de forma aleatória ou ordenada, em elastômeros não magnéticos como elastômeros termoplásticos e sintéticos ou elastômeros naturais (CHEN *et al.*, 2007a; GONG *et al.*, 2005; KALLIO, 2005; LOKANDER, 2004; NAYAK *et al.*, 2015; ZAJAC *et al.*, 2010). De acordo com Nayak *et al.* (2015), os materiais mais utilizados como matrizes são silicones e elastômeros naturais. EMR são um grupo novo de materiais inteligentes cujas propriedades mecânicas como o módulo elástico e o fator de perda podem ser alteradas rapidamente e de forma reversível sob a aplicação de um campo magnético (BELLAN e BOSSIS, 2002; CARLSON e JOLLY, 2000; GINDER *et al.*, 1999; NAYAK *et al.*, 2015; SHIGA *et al.*, 2003; ZHOU, 2003).

Frente ao exposto, esta Tese apresenta a inserção de um elastômero magneto reológico ao núcleo de uma viga sanduíche, cujas lâminas são fabricados a partir de material compósito laminado, e o núcleo em forma de colmeia. Os parâmetros modais das vigas sanduíche são determinados sob diferentes campos magnéticos aplicados. Perante a bibliografia consultada, nota-se que este tipo de disposição, com núcleo em colmeia preenchido por EMR, é inovador, dada a escassez de publicações científicas abordando esta disposição até a data de publicação desta Tese. Com isso, um novo modelo de viga é apresentado, mostrando-se eficaz na sua resposta dinâmica ao campo magnético aplicado.

1.1 JUSTIFICATIVAS E MOTIVAÇÃO

A presente Tese tem como motivação a proposição, principalmente à indústria aeronáutica, de um novo modelo de viga tipo sanduíche inteligente, capaz de alterar sua resposta dinâmica de maneira rápida e reversível sob estímulos magnéticos.

Muitas das vezes, as fontes de vibração são controladas de uma maneira passiva por modificação estrutural, alterando-se a massa, o material ou a geometria da estrutura. No entanto, quando as faixas de frequência da fonte de vibração são variáveis, torna-se importante a utilização de materiais inteligentes para atenuar as forças de vibração. Sabendo-se disso, o presente trabalho pode ser justificado por várias razões, dentre as quais se destacam como principais:

- ☑ Esta tese tem o caráter inovador no que diz respeito à utilização de placas e vigas sanduíche com núcleos em forma de colmeia preenchidos por material magneto reológico. Esta disposição de montagem de material é escassa na literatura referente ao tema, sendo encontradas apenas pesquisas envolvendo vigas e placas com núcleo somente em elastômero magneto reológico, porém na ausência de um núcleo em forma de colmeia;
- ☑ Superfícies de controle de aeronaves, bem como hélices, são exemplos de componentes estruturais aeronáuticos, geralmente fabricadas com painéis sanduíche, submetidos a cargas dinâmicas que excitam a vibração da estrutura;
- ☑ Estruturas sanduíche apresentam grande adaptabilidade em função dos materiais utilizados tanto para as lâminas quanto para o núcleo. Porém, apresentam comportamento complexo, uma vez que se constituem de materiais diferentes. Logo, as técnicas utilizadas para se amortecer ou atenuar os efeitos de vibrações nestes tipos de estruturas tornam-se extremamente importantes;
- ☑ A grande maioria dos trabalhos encontrados na literatura apresenta as lâminas fabricadas a partir de materiais convencionais, como o aço e o alumínio, e somente alguns trabalhos apresentam lâminas obtidas a partir de materiais compósitos, sendo que estes últimos são mais leves, resistentes e apresentam a vantagem de orientação de suas fibras para atender à rigidez necessária em certas direções.

1.2 OBJETIVOS

Frente ao exposto, este trabalho objetiva, de uma maneira geral, a fabricação de vigas sanduíche com lâminas em material compósito e núcleo colmeia preenchido por elastômero magneto reológico, bem como o estudo de seus comportamentos dinâmicos quando submetidas a intensidades de campo magnético de 0 a 120 kA/m. Desta forma, os objetivos específicos da Tese consistem em:

- ☑ Propor um novo modelo de viga sanduíche, com lâminas em compósito e núcleo colmeia preenchido por elastômero magneto reológico;

- ☑ Analisar a influência do material utilizado nas colmeias, da fração em massa de partículas ferromagnéticas no elastômero magneto reológico e do campo magnético sobre os parâmetros modais dos modelos de viga desenvolvidos;
- ☑ Levantamento das propriedades reológicas do elastômero desenvolvido;
- ☑ Realização de ensaios de vibração livre e forçada sob campo magnético;
- ☑ Realização de ajustes analíticos para determinação do fator de amortecimento das vigas;
- ☑ Simulação numérica via o Método dos Elementos Finitos para a determinação dos modos de vibração das vigas em estudo.

1.3 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

Considerando-se a dificuldade na determinação dos parâmetros modais de estruturas sanduíche envolvendo núcleo com elastômero magneto reológico, tem-se neste trabalho a apresentação de um roteiro experimental para o desenvolvimento e caracterização das propriedades dinâmicas de vigas tipo sanduíche com lâminas em material compósito e núcleo colmeia preenchido por elastômero magneto reológico.

De acordo com a revisão bibliográfica apresentada nesta Tese, não foram encontrados na literatura trabalhos relacionados a vigas sanduíche com colmeia preenchida por elastômero magneto reológico e lâminas em compósito laminado, assim, esta Tese contribui, principalmente, com a inovação na apresentação de um novo modelo de viga sanduíche.

São apresentados os resultados da influência do campo magnético sobre as propriedades dinâmicas dos modelos desenvolvidos, bem como a influência da porcentagem em massa de partículas ferromagnéticas no elastômero sobre essas propriedades, e por fim, dois materiais de fabricação da colmeia são analisados, o PLA e o ABS.

Além do exposto anteriormente, o elastômero contendo as partículas ferromagnéticas, obtido a partir de materiais comercialmente disponíveis, foi analisado quanto às suas propriedades reológicas. Importantes conclusões são apresentadas a partir desta análise.

Foi avaliada a determinação dos fatores de amortecimento por meio de ajustes analíticos, os quais se mostram eficientes para a utilização nesta classe de material. Além disso, um modelo numérico via Método dos Elementos Finitos é proposto e validado.

Com isso, esta Tese contribui com o início dos estudos sobre esta nova disposição de viga proposta, mostrando-se a possibilidade de se alterarem seus parâmetros modais de modo a se evitar ou se afastar o fenômeno da ressonância por meio da variação do campo magnético aplicado.

1.4 CONTEÚDO DO TRABALHO

No Capítulo 1 é apresentada uma visão geral sobre o tema desta Tese, o qual é abordado de forma a se mostrar a importância de seu estudo, bem como a sua contribuição de uma maneira geral para a literatura frente ao seu caráter inovador. Além disso, são expostos os objetivos deste trabalho.

No Capítulo 2, é feita a caracterização de um painel sanduíche, seus componentes são apresentados e a forma de cada componente também. Além disso, são mostradas as principais aplicações desta configuração de material nas principais indústrias nas quais são empregados. Os principais materiais pertencentes à classe de materiais inteligentes (*smart materials*) são apresentados, e seus princípios de funcionamento, vantagens e desvantagens são detalhados. São citados os materiais piezelétricos, as ligas com memória de forma, os fluidos controláveis e os elastômeros controláveis. Uma revisão bibliográfica sobre o emprego de elastômeros magneto reológicos em vigas tipo sanduíche é descrita. São apresentados os principais trabalhos encontrados na literatura pertinente ao tema.

O Capítulo 3 descreve o roteiro experimental utilizado para a fabricação dos perfis sanduíche, a caracterização de cada componente e os ensaios necessários à determinação das propriedades dinâmicas e reológicas dos materiais. Sendo os ensaios aqueles referentes aos ensaios de vibração livre, vibração forçada e ensaios utilizando o reômetro. Além disso, a modelagem via Método dos Elementos Finitos é detalhada.

Já o Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir da metodologia descrita no Capítulo 3, sendo analisada a influência do campo magnético, a porcentagem em massa de partículas ferromagnéticas no elastômero e o material de fabricação do núcleo colmeia sobre os parâmetros modais das vigas sanduíche.

As conclusões desta Tese são apresentadas no Capítulo 5, incluindo comentários sobre os resultados mais significantes alcançados, bem como sugestões para a continuidade deste trabalho.

No Apêndice A, são expostos os gráficos dos ajustes realizados para a determinação do fator de amortecimento das vigas durante o ensaio de vibração livre.

Por fim, o Apêndice B mostra as fotografias e especificações técnicas de todos os equipamentos utilizados nos ensaios experimentais.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentados inicialmente os conceitos referentes às estruturas sanduíche, bem como seus componentes e suas principais aplicações em elementos estruturais. Adicionalmente, é descrita a definição de materiais inteligentes e ao fim do capítulo, são citados os principais trabalhos encontrados na literatura referentes à incorporação desses materiais inteligentes em painéis tipo sanduíche.

2.1 ESTRUTURAS SANDUÍCHE

De acordo com Apetre (2005), a ideia de se utilizarem duas faces cooperantes separadas por uma determinada distância surgiu no começo do século XIX. O conceito foi inicialmente aplicado de forma comercial em aeronaves durante a Segunda Guerra Mundial. Alguns dos primeiros trabalhos teóricos e experimentais sobre construções sanduíche foram publicados no fim dos anos 40 (WILLIAMS *et al.*, 1941; MARCH, 1948). A partir de então, o emprego de estruturas sanduíche tem crescido rapidamente, uma vez que a necessidade por estruturas de alto desempenho e baixo peso garante a sua demanda pelas diferentes indústrias.

Estruturas obtidas a partir da combinação de materiais diferentes estão sendo utilizadas em diversas aplicações atualmente, uma vez que as suas vantagens têm se tornado mais compreendidas. Diferentes empresas têm estudado nos últimos anos vários conceitos para o desenvolvimento de uma fuselagem completa em material compósito sanduíche. A Organização de Pesquisas Aeroespaciais do Governo da Alemanha (*Deutsches Zentrum fuer Luft und Raumfahrt*) tem proposto o projeto de uma estrutura sanduíche para uma fuselagem, na qual o *skin* mais externo é destinado a atuar como uma carenagem aerodinâmica (VINSON, 2005; ZAHLEN *et al.*, 2005).

A Marinha Sueca tem utilizado construções a partir de perfis sanduíche contendo fibra de vidro por mais de vinte anos em todos os cascos de seus navios. Estes foram capazes de mostrar que o projeto adequado de cascos manufaturados em compósito sanduíche foi capaz de alcançar ou superar as capacidades do projeto de um casco fabricado a partir do aço. Um de seus navios mais novos, o *Visby*, emprega também o projeto de um sanduíche com carbono-epóxi. A iniciativa da Marinha Sueca incentivou muitos dos outros países escandinavos a adotar práticas similares (VINSON, 2005; LARES, 2012).

Apesar de seu crescente uso, estruturas sanduíche apresentam-se como materiais de geometrias e comportamento complexos, uma vez que engloba propriedades de mais de um material. Logo, o seu comportamento dinâmico, suas resistências ao impacto, à fratura e à fadiga, por exemplo, precisam ser melhor estudados.

2.1.1 Componentes do painel sanduíche

Uma estrutura sanduíche consiste de duas faces finas, rígidas e resistentes conectadas por um núcleo espesso, leve e de baixo módulo usando-se juntas adesivas (ZENKERT, 1997; VINSON, 2001). Uma viga sanduíche opera da mesma maneira que uma viga I com a diferença de que o núcleo da sanduíche é de um material dissimilar e serve como um suporte contínuo para as faces. Como uma consequência, a construção em sanduíche resulta em menores deformações laterais, alta resistência à flexão e frequências naturais mais altas do que as de outras estruturas (APETRE, 2005).

A seguir, serão apresentados os principais tipos de núcleos e também de lâminas ou faces para estruturas sanduíche.

2.1.1.1 Núcleos para perfis sanduíche

Segundo Apetre (2005), o material do núcleo é talvez o mais importante componente de uma estrutura sanduíche. As propriedades requeridas para este componente são: baixa massa específica, a fim de se incrementar ao mínimo o peso da estrutura; módulo de elasticidade perpendicular às faces relativamente alto, de modo a se evitem deformações excessivas na direção da espessura. Ainda de acordo com o autor, o núcleo deve ser escolhido de modo a não falhar perante aplicação de cargas transversais, bem como ter um módulo de cisalhamento suficiente para garantir a rigidez ao cisalhamento do perfil. Outras funções como isolamento térmico e acústico dependem principalmente do material do núcleo e de sua espessura.

Niu (1996) cita que os dois tipos mais comuns de núcleo para perfis sanduíche em aplicações estruturais são o núcleo em forma de colmeia (ou *honeycomb*) e núcleos em forma de espuma (poliméricos ou metálicos).

2.1.1.1.1 Núcleos em forma de colmeia ou *honeycomb*

Os núcleos em colmeia representam a grande maioria das estruturas sanduíche empregadas hoje na aviação. Os dois tipos mais comuns de colmeia são em células hexagonais e células quadradas (LARES, 2012).

Núcleos em colmeia consistem de um conjunto de células prismáticas iguais, cobrindo um plano. De acordo com Chung e Waas (2002), as células são hexagonais na seção, porém elas também podem ser triangulares, quadradas, rômbricas ou circulares. A Figura 2.1 ilustra diferentes núcleos em forma de colmeia ou *honeycomb*. A disposição é uma estrutura em 2D e regular, o que a torna mais fácil de ser analisada do que espumas que têm arranjos celulares em 3D (LU e YU, 2003, *apud* BETTS, 2013). Apesar de serem utilizadas várias geometrias de células nas estruturas sanduíche, a geometria de células quadradas apresenta a principal vantagem no que diz respeito à sua isotropia no plano, o que torna o seu estudo teórico menos complexo.

As diferentes geometrias de células podem ser fabricadas a partir de diferentes tipos de materiais, dentre eles os polímeros, os metais e as cerâmicas. Os polímeros e os metais são usados em aplicações que vão desde as portas comuns a componentes avançados para a indústria aeroespacial. Nos trens de aterrissagem da nave espacial Apollo I, foi usado alumínio em

núcleo colmeia por reunir características de absorção de energia, típicas de materiais metálicos. Os materiais cerâmicos, devido às suas propriedades de resistência a altas temperaturas, podem ser encontrados em aplicações de suporte de catalizadores e também em trocadores de calor (GIBSON e ASHBY, 1997; SOARES, 2007). Os materiais poliméricos são aplicados com o intuito de se reduzir o peso estrutural, na absorção de energia de impacto, uma vez que são capazes de apresentar grande variação de volume quando submetidos a cargas elevadas, e ainda para o auxílio na redução de vibrações.

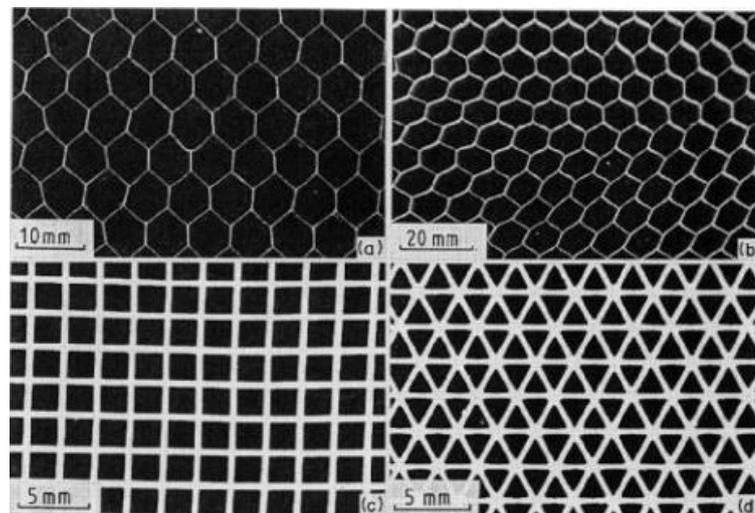


Figura 2.1 – Diferentes núcleos em forma de colmeia: a) alumínio; b) resina de papel fenólico; c) cerâmico em células quadrangulares; d) Cerâmico em células triangulares. Fonte: Gibson e Ashby (1997), *apud* Soares (2007).

As vantagens das colmeias sobre as espumas é o estudo do seu comportamento teórico, dado que no caso das espumas, as células formam uma complexa rede tridimensional que se distorce durante a deformação e que apresenta modo de falha de difícil identificação a nível microestrutural. Nos núcleos colmeia, podem-se desenvolver modelos à escala e observar a sua deformação, uma vez que sua geometria é regular. Quando a colmeia é comprimida no plano, as paredes de suas células fletem, deformando-se elasticamente. A célula colapsa quando a parede oposta toca na outra, e quando isso acontece, a estrutura densifica e a resistência aumenta rapidamente (SOARES, 2007). Além disso, os núcleos em forma de espuma também podem se esfarelar na região de contato com as lâminas, devido ao esforço cortante presente nesta região.

Questões de durabilidade devem ser vinculadas à entrada de umidade no interior dos painéis, o que resulta em corrosão interna e em descolamento das lâminas (MCCORMACK *et al.*, 2001; SYPECK, 2005; BETTS, 2013). Porém, para colmeias poliméricas, a umidade não interfere diretamente no seu processo de corrosão, o que favorece o emprego destes materiais em substituição aos núcleos colmeia em metal.

2.1.1.1.2 Núcleos em forma de espuma

Gibson e Ashby (1997) definem as espumas como sendo materiais consistindo de uma estrutura celular contendo pequenos suportes sólidos interconectados e ou placas formando espumas de células abertas ou fechadas. Alguns exemplos de estruturas em espuma encontradas na natureza são as partes esponjosas de ossos de animais.

Espumas de células abertas têm a estrutura mais simples consistindo de barras definindo cada célula, fornecendo uma estrutura de malha aberta, conforme a Figura 2.2. Espumas de célula fechada tem uma combinação de barras formando as células abertas e membranas que fecham as partes abertas da célula. A fração de polímeros nos elementos de barra e nas membranas é que dita a rigidez da espuma (GIBSON e ASHBY, 1997; SAENZ, 2012).

As propriedades de um núcleo em forma de espuma são controladas pela sua massa específica. Além disso, de acordo com Lu e Yu (2003), o material do qual a espuma é feita também dita suas propriedades. As propriedades de espumas são afetadas ainda pela sua anisotropia e defeitos, como por exemplo, células de grande tamanho, paredes de células quebradas e deformadas (ASHBY e LU, 2003). Núcleos em forma de espuma podem ser metálicos ou poliméricos.

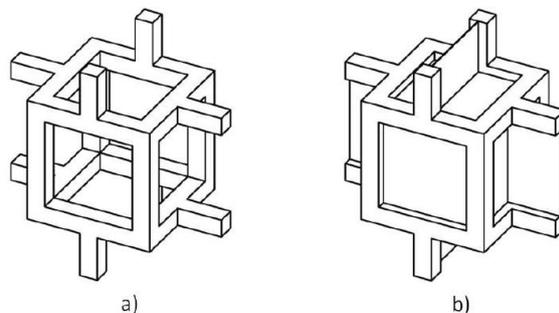


Figura 2.2 – Esquema mostrando a microestrutura celular: a) espuma de célula aberta; b) espuma de célula fechada. Fonte: Gibson e Ashby (1997), *apud* Saenz (2012).

Espumas metálicas, ao contrário de colmeias, apresentam uma isotropia em suas propriedades mecânicas. Além disso, espumas de células abertas retêm menos umidade, ou seja, são menos susceptíveis à corrosão do que colmeias (WORSFOLD, 2008).

Similarmente às metálicas, as espumas poliméricas de células abertas retêm menos umidade (SYPECK, 2005; BETTS, 2013). Núcleos de célula aberta poderiam oferecer uma dupla função e potencialmente ser usados para armazenamento e drenagem de combustível na estrutura da asa de aeronaves. Colmeias ou painéis enrijecidos não oferecem esta vantagem (WICKS e HUTCHINSON, 2001). Uma característica que diferencia as metálicas das poliméricas é a não condutividade elétrica das poliméricas. A Figura 2.3 ilustra duas placas sanduíche, uma com núcleo em forma de espuma e a outra em forma de colmeia.

Espumas poliméricas tendem a ser mais baratas que as metálicas (SYPECK, 2005). Núcleos de espuma polimérica de células fechadas proporcionam maior isolamento térmico com peso moderado, mas sofrem fluência mesmo em temperatura ambiente (MCCORMACK *et al.*, 2001).

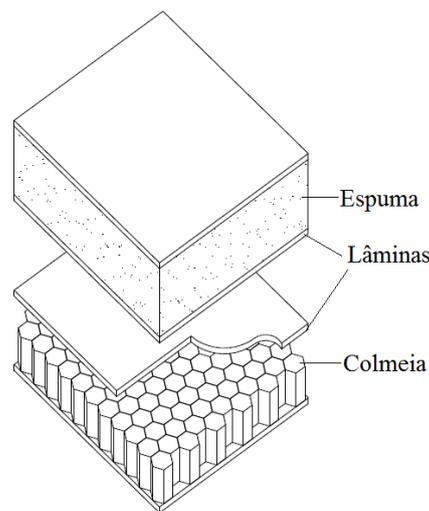


Figura 2.3 – Painel sanduíche superior com núcleo em espuma e painel inferior com núcleo colmeia. Fonte: Adaptado de Allen (1969), *apud* Gagliardo (2008).

2.1.1.2 Lâminas ou *skins* para perfis sanduíche

A principal tarefa de um material utilizado como lâmina é conduzir as tensões de tração e compressão na estrutura sanduíche, além de suportar pressões locais (DIAB, 2012). Quaisquer materiais estruturais que possam ser usados como finas faces podem ser emprega-

dos como lâminas em um painel sanduíche. Os painéis mais utilizados em aeronaves de alta eficiência são os que possuem lâminas de aço, alumínio, dentre outros metais, e de compósitos reforçados por fibras (JHA, 2007). Um dos pontos desta Tese é a utilização de materiais compósitos laminados como lâminas em perfis sanduíche, assim, o foco principal deste subitem será dado aos materiais compósitos.

2.1.1.2.1 Materiais compósitos

Materiais compósitos resultam da combinação de dois ou mais materiais diferentes em uma escala macroscópica, de forma que as propriedades específicas de cada componente contribuam para o bom desempenho do produto final. Os compósitos são constituídos de uma matriz, geralmente polimérica, reforçada por fibras, estas podendo ser contínuas ou descontínuas. Os reforços são responsáveis por resistir aos esforços, e a matriz por manter os reforços espaçados de forma adequada e por transmitir os esforços aos reforços (JONES, 1999; KAW, 2006).

As fibras mais utilizadas como reforços em materiais compósitos são as fibras de vidro, de carbono e de aramida. As fibras de vidro são as mais utilizadas na construção por apresentarem um peso reduzido e por possuírem baixo custo. Apresentam um módulo de elasticidade reduzido, uma reduzida resistência à umidade e a ambientes alcalinos e são susceptíveis à ruptura por fadiga, se comparadas às demais. As fibras de carbono apresentam um elevado desempenho mecânico, incluindo elevados módulo de elasticidade e resistência. Porém, possuem um custo elevado. As fibras de aramida, em que uma das designações comerciais é o *Kevlar*, apresentam uma resistência e um módulo de elasticidade superiores aos das fibras de vidro. Porém, são susceptíveis à degradação por radiação UV e também à ruptura por fadiga (CORREIA, 2004; ALMEIDA, 2009), além de apresentarem características de absorção de umidade. Na Tabela 2.1 são apresentadas as principais propriedades referentes a algumas fibras utilizadas como reforço em materiais compósitos.

As matrizes são divididas em metálicas, cerâmicas e poliméricas (BAKER *et al.*, 2004; FERREIRA, 2016). Os compósitos de matriz metálica podem ser de alumínio, magnésio, titânio, cobre e níquel, dentre outras ligas metálicas, com reforços de fibras cerâmicas ou metálicas, adequados para uso em altas temperaturas, porém de difícil processamento e de maior custo. Os compósitos de matriz cerâmica podem ser de carbono, carvão de silício e

cerâmicas vítreas com reforços de fibra de carbono e fibras cerâmicas, adequados para o uso em altas temperaturas e mais leves se comparados aos de matrizes metálicas. Os compósitos de matriz polimérica, por sua vez, podem ser os poliésteres, resinas vinílicas e resinas epóxi, com reforços de fibra de carbono, fibras de vidro, fibras de aramida, fibras de quartzo e cerâmicas, sendo adequados para emprego estrutural, uma vez que apresentam elevadas propriedades mecânicas (ZANATTA, 2012; FERREIRA, 2016).

Tabela 2.1 – Características de alguns dos materiais utilizados como reforço. Fonte: Adaptado de Callister (2007).

Material	Massa Específica Relativa	Limite de Resistência à Tração (GPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Aramida (Kevlar 49)	1,44	3,6-4,1	131,0
Carbono	1,78-2,15	1,5-4,8	228-724
Vidro E (E-Glass)	2,58	3,45	72,5

As matrizes poliméricas são constituídas por resinas termorrígidas ou elastoméricas. A impregnação e aderência das termoplásticas às fibras são mais difíceis, o que torna a distribuição dos esforços menos eficiente, ao contrário das termorrígidas, as quais apresentam uma boa interface fibra-matriz, sendo estas então as mais utilizadas como matrizes para reforços fibrosos. Dentro do grupo das termorrígidas, as mais comuns são as resinas de poliéster, viniléster, epóxis e fenólicas (CORREIA, 2004; ALMEIDA, 2009). Na Tabela 2.2 encontram-se algumas propriedades das resinas mais utilizadas como matrizes em compósitos.

Tabela 2.2 –Propriedades das resinas geralmente utilizadas. Fonte: Adaptado de Gay *et al.* (2003).

Resina	Massa específica (kg/m³)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Módulo de Cisalhamento (MPa)	Coefficiente de Poisson
Epóxi	1200	4500	1600	0,4
Fenólica	1300	3000	1100	0,4
Poliéster	1200	4000	1400	0,4
Viniléster	1150	3300	-	-
Silicone	1100	2200	-	0,5

A necessidade da orientação das fibras em diferentes direções de acordo com a aplicação específica tem levado a vários tipos de compósitos, como ilustrado na Figura 2.4. Nos compósitos laminados de fibras contínuas, lâminas individuais de fibras contínuas são orientadas nas direções requeridas e aderidas umas às outras por meio da resina, de forma a se obter um laminado. Embora os compósitos de fibra contínua sejam extensivamente utilizados, a separação entre as lâminas ou delaminação ainda é um problema, uma vez que a resistência interlaminar é determinada pela matriz e pela qualidade da interface matriz/fibra. Compósitos de fibras curtas podem ter o reforço aleatoriamente orientado ou não na matriz. Esses compósitos são utilizados em várias aplicações devido ao seu baixo custo de fabricação, porém suas propriedades mecânicas são consideradas pobres em relação aos compósitos de fibras contínuas (GIBSON, 1994). Os compósitos multidirecionais contêm fibras contínuas orientadas em várias direções a fim de se alcançarem propriedades desejadas em determinadas direções. De acordo com Daniel e Ishai (1994), compósitos particulados consistem de partículas de vários tamanhos e formas randomicamente dispersas no interior da matriz. De acordo com o autor, devido à orientação randômica das fibras e para certo número de direções de fibras e distribuição de fibras, os compósitos particulados, os compósitos de fibras descontínuas aleatoriamente orientadas e os compósitos multidirecionais podem ser classificados como materiais quase isotrópicos, por tenderem a apresentar as mesmas propriedades nas diferentes direções.

Um dos focos desta Tese é a utilização de compósitos nas lâminas das vigas sanduíche, sendo que os mesmos são fabricados a partir de tecidos bidirecionais formados por fibras

longas. Assim sendo, serão abordadas aqui as características de compósitos laminados com tecidos bidirecionais.

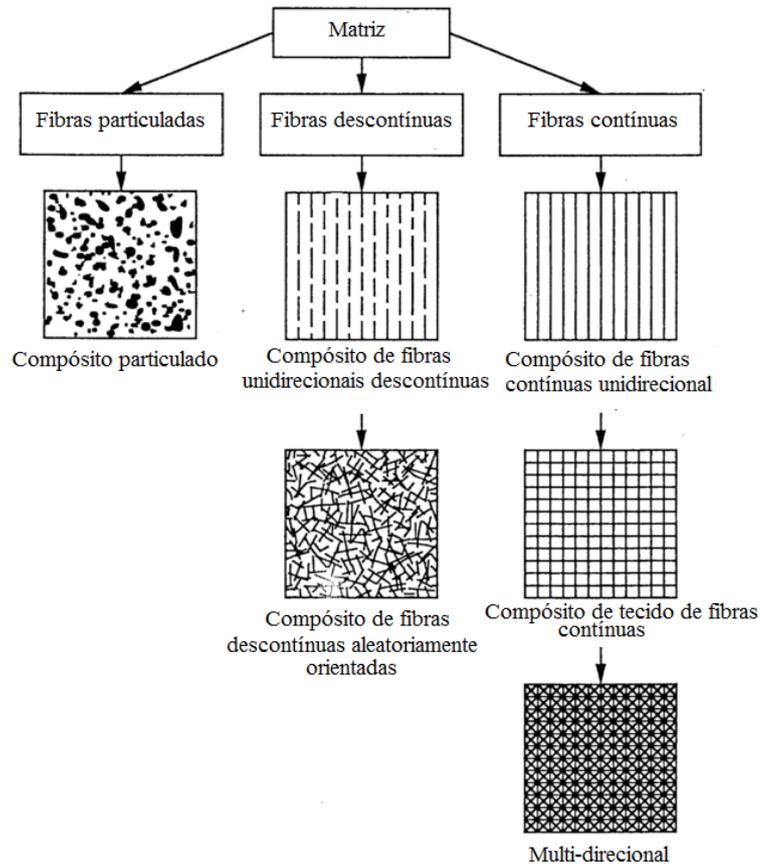


Figura 2.4 – Tipos de compósitos reforçados por fibras. Fonte: Adaptado de Daniel e Ishai (1994).

Uma lâmina é uma camada plana de fibras unidirecionais, ou tecido de fibras (fibras contínuas orientadas em direções perpendiculares), no interior de uma matriz. A lâmina é um material ortotrópico, com os eixos principais do material na direção das fibras (longitudinal), normal às fibras no plano da lâmina, e normal ao plano da lâmina, conforme ilustrado na Figura 2.5. Estes eixos são designados como, 1, 2 e 3, respectivamente. Para o caso de compósitos de tecidos de fibras, as direções do urdume e da trama são as direções principais no plano.

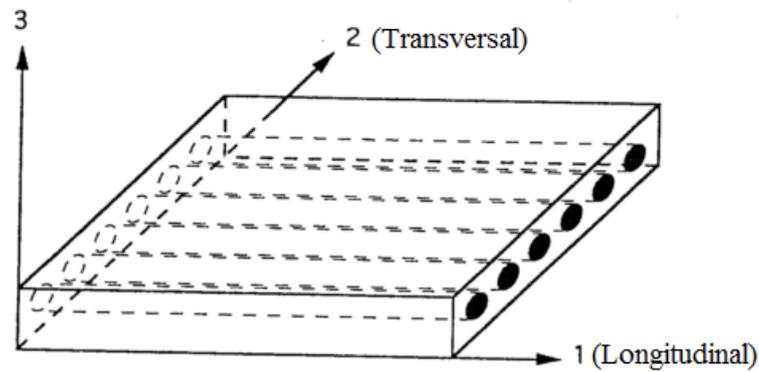


Figura 2.5 – Lâmina unidirecional e eixos principais. Fonte: Adaptado de Daniel e Ishai (1994).

A Figura 2.6 ilustra a disposição das fibras em um tecido bidirecional, onde podem ser vistas as direções referentes ao urdume e à trama.

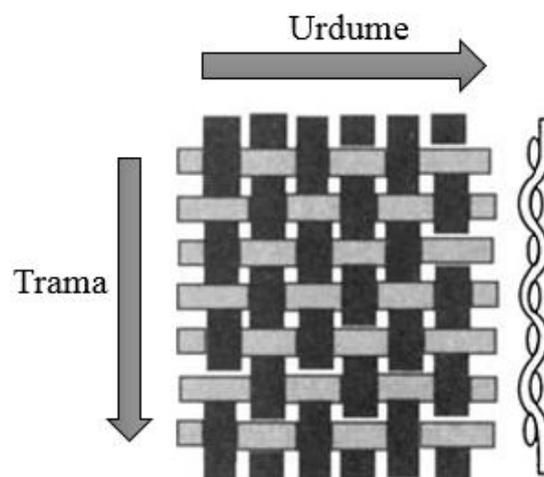


Figura 2.6 - Esquema representativo de um tecido plano. Fonte: Adaptado de Gay *et al.* (2002).

De acordo com Belo (2006), um laminado é o conjunto de duas ou mais lâminas empilhadas orientadas sob diferentes direções, de modo a se obter um aumento nas características físicas e mecânicas que somente uma lâmina teria. A sequência de empilhamento das lâminas segundo as várias direções é chamada de esquema de laminação. A orientação das fibras em várias direções e a sequência de empilhamento das lâminas é que garantem aos compósitos laminados a otimização da estrutura conforme um dado carregamento.

2.1.1.2.1.1 Propriedades Elásticas de Materiais Compósitos

Para se projetar uma estrutura em compósito, é necessário o conhecimento de suas propriedades básicas, as conhecidas propriedades elásticas. Estas propriedades são definidas pelo módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson nas direções principais do reforço.

Entre as maneiras possíveis de se determinarem as propriedades elásticas de materiais compósitos, encontram-se a utilização de ensaios experimentais, modelagem numérica e a Regra das Misturas. A realização de ensaios experimentais requer uma quantidade adequada de corpos de prova, os quais podem ser inutilizados após os ensaios. Além do mais, gera um custo adicional na caracterização do material, uma vez que se necessitam de máquinas de ensaios devidamente calibradas. Uma outra maneira é a utilização de simulações numéricas, que necessitam de aplicativos computacionais devidamente registrados e de modelos teóricos de comportamento de materiais compósitos. Já a Regra das Misturas apresenta-se como uma técnica teórica simples e de fácil aplicação, se comparada às demais, que é baseada nas propriedades de cada componente em separado, no caso a fibra e a matriz, gerando resultados confiáveis e similares aos obtidos experimentalmente. Abaixo são descritos os procedimentos da fundamentação teórica da Regra das Misturas.

As constantes elásticas necessárias para o projeto com materiais compósitos são:

- E_1 ou E_{11} : Módulo de elasticidade na direção 1 ou direção principal do material (paralelo às fibras);
- E_2 ou E_{22} : Módulo de elasticidade na direção 2 (perpendicular à direção das fibras);
- G_{12} : Módulos de cisalhamento no plano 1-2;
- ν_{12} : Coeficiente de Poisson associado com carregamento na direção 1 e deformação na direção 2.

É aqui apresentado, como exemplo, o desenvolvimento das equações para obtenção do módulo elástico longitudinal (E_1), descrito por Vinson e Sierakowski (1987). Seja a área do “componente fibra” igual a A_f (m²), e a área do “componente matriz” A_m (m²). Pode-se representar as quantidades dos dois componentes em termos de suas frações em volume, V_f (%) e V_m (%), logo, sua soma é $V_f + V_m = 1$. A fração em volume de fibra, V_f , é o parâmetro material crítico para a maioria dos propósitos.

Uma carga aplicada sobre o compósito na sua direção longitudinal, pode ser dividida em duas fases, de modo que $F = F_f + F_m$ e a deformação relativa na direção principal 1 (longitudinal à fibra) é a mesma tanto para a matriz quanto para a fibra, logo $\varepsilon_1 = \varepsilon_f = \varepsilon_m$. A tensão é uma relação entre a força aplicada e a área, conforme Equação (2.1):

$$\sigma_1 A = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m \quad (2.1)$$

Da relação tensão em função da deformação de um material sabe-se que:

$$\sigma_f = \varepsilon_1 E_f \quad (2.2)$$

$$\sigma_m = \varepsilon_1 E_m \quad (2.3)$$

Sendo E_f e E_m os módulos de elasticidade da fibra e da matriz, respectivamente, na direção principal do material. Dividindo-se toda a Equação (2.1) por ε_1 , obtém-se:

$$E_1 A = E_f A_f + E_m A_m \quad (2.4)$$

Como $V_f = \frac{A_f}{A}$ e $V_m = \frac{A_m}{A}$, e $V_f + V_m = 1$, então a determinação do módulo de elasticidade na direção principal (comprimento das fibras) do material é dada pela Equação (2.5):

$$E_1 = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (2.5)$$

Na prática, muitas das vezes, se conhecem somente as frações em massa da fibra e da matriz, W_f e W_m (%). Nestes casos, a fração em volume de fibra é obtida pela seguinte equação, onde ρ_f e ρ_m são as massas específicas da fibra e da matriz (kg/m^3), respectivamente:

$$V_f = \frac{\rho_m W_f}{\rho_m W_f + \rho_f W_m} \quad (2.6)$$

De maneira similar ao desenvolvimento anterior, tem-se, para as demais propriedades elásticas do compósito no plano, de acordo com Gay *et al.* (2003), as seguintes equações:

$$E_2 = E_m \left(\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{E_m}{E_{2f}} V_f} \right) \quad (2.7)$$

$$G_{12} = G_m \left(\frac{1}{(1 - V_f) + \frac{G_m}{G_f} V_f} \right) \quad (2.8)$$

$$\nu_{12} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f) \quad (2.9)$$

Sendo E_{2f} o módulo de elasticidade transversal da fibra, G_f e G_m os módulos de cisalhamento da fibra e da matriz, respectivamente, ν_f e ν_m os coeficientes de Poisson da fibra e da matriz, respectivamente.

Logo, se têm as equações provenientes da Regra das Misturas para a obtenção das propriedades elásticas de compósitos laminados contendo fibras unidirecionais.

2.2 APLICAÇÕES ESTRUTURAIS DE PERFIS SANDUÍCHE

A seguir são exemplificadas algumas das principais aplicações de painéis sanduíche nas duas principais áreas da engenharia que mais empregam esta classe de material.

2.2.1 Campo Aeronáutico

Na indústria aeronáutica, painéis sanduíche são amplamente empregados em diferentes componentes estruturais de aviões e helicópteros, como por exemplo, fuselagens, asas, ailerons, painéis do piso da aeronave e tanques de armazenamento e de pressão, como mostrado nas Figuras 2.7 e 2.8 abaixo.

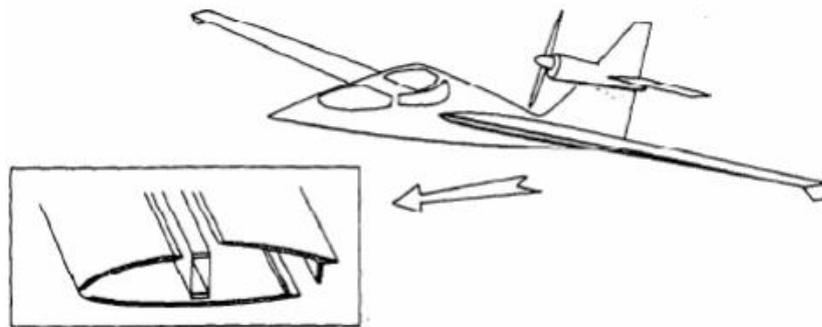


Figura 2.7 – Asa com fuselagem em sanduíche colmeia de uma aeronave leve. Fonte: Yunliang(1987), *apud* Jha (2007).

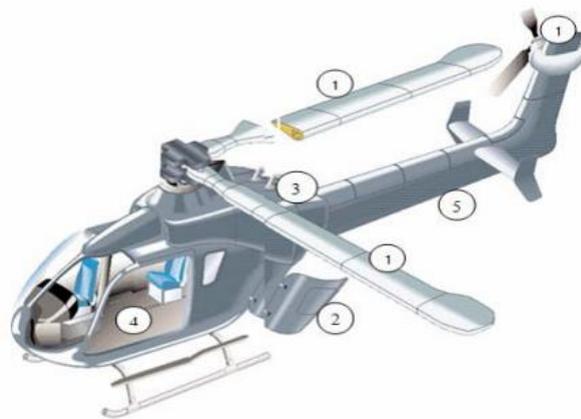


Figura 2.8 – 1- Pás de rotores; 2- Portas principais e de carga; 3- Painéis da fuselagem; 4- Fuselagem e piso; 5- Seção da cauda. Fonte: Hexcel Composites (1998), *apud* Jha (2007).

Estruturas sanduíche colmeia têm sido amplamente utilizadas em componentes de sustentação de cargas na indústria aeroespacial devido ao seu peso leve, alta rigidez à flexão e resistência sob cargas distribuídas em adição à sua boa capacidade de absorção de energia (ZHOU *et al.*,2006).

De acordo com Rodrigues (2014), tanto os materiais formados por sanduíche de colmeia de alumínio, como os de colmeia de fibra de vidro, são comumente usados na construção

de superfícies da asa e de estabilizadores, paredes, pisos, superfícies de comando e compensadores. O sanduíche colmeia de alumínio é feito de um núcleo de colmeia de folha de alumínio, colada entre duas chapas de alumínio. Já o sanduíche de fibra de vidro, consiste de um núcleo de colmeia colado entre camadas de fibra de vidro. A Figura 2.9 ilustra a estrutura em sanduíche do bordo de ataque da asa, que é colada à longarina metálica.

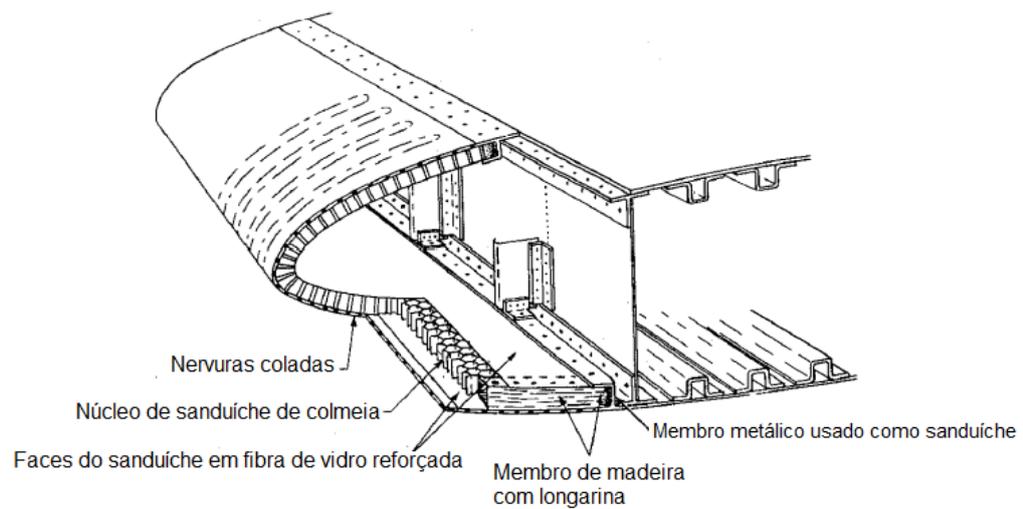


Figura 2.9 – Bordo de ataque com estrutura em sanduíche colmeia colada na longarina. Fonte: Adaptado de Rodrigues (2014).

Estruturas sanduíche são extensivamente usadas no projeto de aeronaves. Outro exemplo seriam os componentes em sanduíche do Airbus A380, que podem ser vistos conforme apresentado na Figura 2.10 (SHUMACHER *et al.* 2004), onde 46% da superfície externa do Boeing 757/767 é composta de sanduíche colmeia (VINSON, 2005).



Figura 2.10 – Exemplos de aplicações de perfis sanduíche no A380. Fonte: Adaptado de Herrmann *et al.* (2005), *apud* Betts (2013).

Nota-se a partir dos exemplos aeronáuticos citados, que o maior campo de aplicação de perfis sanduíche em aeronaves está relacionado às estruturas secundárias. Para que seu emprego seja viabilizado em componentes primários de aeronaves, ou seja, aqueles que devem sustentar de forma direta as cargas de voo e de aterrissagem, estruturas sanduíche devem garantir que nenhuma falha venha a ocorrer e o controle de seus campos de deformação e parâmetros modais deve ser de fácil realização e de total domínio por parte dos projetistas e engenheiros. Para isso, estes tipos de estruturas devem ser profundamente estudadas e as técnicas de controle de vibrações em perfis sanduíche, que é o foco desta Tese, devem ser claramente conhecidas.

2.2.2 Campo da construção civil

Recentemente tem-se notado um aumento no uso de painéis sanduíche para funções estruturais importantes nos projetos de engenharia civil, como isolamento térmico e acústico. Painéis sanduíche, como já discutido, apresentam baixo peso, e suas faces podem ser molda-

das de forma a se alcançarem geometrias complexas, fato este que agrega beleza e também valor à estrutura final.

Engenheiros usam estruturas sanduíche fabricadas a partir de uma variedade de materiais para paredes, tetos, painéis para pisos e telhados. Núcleos para materiais de construção incluem espumas de diferentes composições, colmeias metálicas, tecidos, colmeias em papel impregnado em resina fenólica, madeira, dentre outros vários materiais. Já as lâminas podem ser constituídos de fibra de vidro, folhas metálicas, resina epóxi reforçada por fibra de vidro, dentre outros (ALBERT, 1967; JHA, 2007).

Painéis sanduíche contendo faces fabricadas a partir de polímeros reforçados por fibras, têm sido usados também em construções de pontes ferroviárias, como a ponte sobre o Rio *Avançon* próximo a Bex, na Suíça, montada em 2012 (GARRIDO, 2016; KELLER *et al.*, 2014). Esta ponte, com uma distância entre apoios de 11,5 metros, inicialmente possuía um tabuleiro de concreto que precisou ser substituído devido ao seu processo de degradação. O novo tabuleiro utilizado era constituído de um sanduíche contendo faces de polímero reforçado por fibra de vidro e núcleo de madeira do tipo balsa. Com esta solução, o tráfego no local foi cancelado por um período de 10 dias, diminuindo a duração dos trabalhos em aproximadamente 40 dias se comparado ao uso do tabuleiro convencional fabricado em concreto. A Figura 2.11 mostra a montagem do tabuleiro sobre a ponte.



Figura 2.11 – Tabuleiro da ponte sobre o Rio *Avançon* próximo a Bex, na Suíça. a) Montagem dos componentes do tabuleiro. b) Posicionamento do tabuleiro. Fonte: Keller *et al.* (2014), *apud* Garrido (2016).

Os exemplos mostrados aqui ilustram o potencial de aplicação de painéis sanduíche estruturalmente empregados na construção civil. Mesmo no campo civil, os elementos estruturais estão sujeitos a vibrações, que podem levar ao colapso da estrutura. Logo técnicas de controle de vibrações em diferentes tipos de estruturas, no caso desta Tese, em estruturas fabricadas em painéis sanduíche, precisam ser estudadas e aplicadas a esta classe de material.

2.3 MATERIAIS INTELIGENTES (*SMART MATERIALS*)

Materiais que apresentam respostas reversíveis perante diferentes tipos de estímulos são considerados como materiais inteligentes, ou *smart materials*, tornando-se assim, muito úteis para diversas aplicações.

Dentro da classe dos chamados materiais inteligentes, encontram-se os piezelétricos, eletro-resistivos, magneto-resistivos, eletroreológicos, magnetoreológicos, termossensíveis e ligas com memória de forma. As respostas destes materiais frente aos estímulos a eles aplicados são de interesse nas áreas da mecânica, elétrica, magnética e térmica (FUKUSHIMA, 2016).

Materiais inteligentes tais como os piezelétricos, eletroreológicos, magnetoreológicos, elastômeros e ligas com memória de forma geralmente são embebidos ou colados sobre as estruturas, e utilizados como atuadores e sensores. Dessa forma, pode-se dizer que a estrutura como um todo também é uma estrutura inteligente, ou seja, uma estrutura capaz de se adaptar ao ambiente no qual ela se encontra.

A seguir, serão apresentados os principais materiais inteligentes utilizados nas diferentes indústrias.

2.3.1 Materiais Piezelétricos

Materiais piezelétricos são cada vez mais estudados por se tornarem materiais inco-muns com propriedades muito específicas e interessantes. Esses materiais têm a capacidade de produzir energia elétrica a partir de energia mecânica. Eles podem, por exemplo, converter comportamento mecânico como vibrações em eletricidade. Estes dispositivos são geralmente

referidos como coletores de energia e podem ser usados em aplicações onde não se tem uma energia externa disponível e baterias não são uma opção praticável (LEDOUX, 2011).

De acordo com Trolier-McKinstry (2008), a natureza dos materiais piezelétricos é fortemente ligada à quantidade significativa de dipolos elétricos no interior destes materiais. Estes dipolos podem ser induzidos por certos grupos moleculares com propriedades elétricas. Um dipolo é um vetor que tem uma direção e um valor de acordo com as cargas elétricas em sua vizinhança. Estes dipolos tendem a ter a mesma direção quando próximos uns aos outros e eles podem todos juntos formar regiões chamadas domínios Weiss. Os domínios geralmente são orientados aleatoriamente, porém podem ser alinhados a partir de um processo no qual um forte campo elétrico é aplicado por meio do material. No entanto, nem todos os materiais piezelétricos sofrem este fenômeno. A razão pela qual um material piezelétrico cria uma voltagem é devida ao momento em que a tensão mecânica é aplicada, instante em que a estrutura cristalina é perturbada e muda a direção do vetor de polarização dos dipolos elétricos. Esta mudança na polarização pode ser causada ou por uma reconfiguração dos íons dentro da estrutura cristalina, ou por uma reconfiguração dos grupos moleculares. Como uma consequência, quanto maior a tensão mecânica, maior a mudança na polarização e mais eletricidade é produzida.

Ao passo que materiais piezelétricos geram um campo elétrico ao longo de sua superfície quando submetidos a tensões mecânicas eles também apresentam uma mudança de forma quando um campo elétrico é aplicado. Alguns dos materiais que compõem os piezelétricos são as cerâmicas e os polímeros. Ao contrário das cerâmicas onde a estrutura cristal do material cria o efeito piezelétrico, em polímeros as longas cadeias moleculares entrelaçadas atraem e repelem umas às outras quando um campo elétrico é aplicado. A maioria dos sensores e atuadores piezelétricos, seja colada à superfície ou embebida à estrutura, é baseada ou na extensão ou no mecanismo de cisalhamento. Piezos cerâmicos têm uma alta rigidez estrutural, que pode proporcionar-lhes uma autoridade de atuação dependente da voltagem (CHOI,2009).

Algumas desvantagens são notadas no emprego desta classe de material. De certa forma, a natureza frágil da cerâmica torna os piezelétricos vulneráveis à quebra durante a sua manipulação ou processo de colagem à estrutura. Além do mais, sua pequena faixa de movimento mecânico restringe a sua aplicação a estruturas de grande porte (CHOI, 2009; YOSHIKAWA *et al.*, 1999).

2.3.2 Materiais com memória de forma

Esta classe diz respeito às ligas de materiais que têm a capacidade de “lembrar” de sua forma original antes de uma determinada deformação. Ou seja, se tais ligas forem deformadas plasticamente a uma determinada temperatura, elas irão recuperar completamente a sua forma original ao serem submetidas a uma temperatura mais elevada. Ao recuperar a sua forma, estas ligas podem produzir um deslocamento ou uma força como uma função da temperatura. Este efeito único de retornar à uma geometria original após uma grande deformação inelástica (aproximadamente 8%) é conhecido então como Efeito de Memória de Forma (WAYMAN *et al.*, 1990).

Para ligas de aço, por exemplo, o fenômeno de mudança de forma resulta da mudança da fase cristalina conhecida como “transformação da martensita termoelástica”. Em temperaturas abaixo da temperatura de transformação, as ligas com memória de forma são martensíticas. A martensita é macia e pode facilmente ser deformada. O aquecimento acima da temperatura de transformação recupera a forma original e converte o material à sua elevada resistência, condição austenítica. Como a austenita é a fase estável termodinamicamente a esta temperatura na ausência de cargas, o efeito mola do material o retorna à sua posição original quando a tensão é aplicada por um período não tão longo. Este fenômeno é conhecido como “pseudoelasticidade” (OTSUKA e WAYMAN, 1998; SÖYLEMEZ, 2009).

Ligas com memória de forma atuam como elementos de conexão, atuadores, sensores, dentre outros meios em uma variedade de aplicações eletrônicas, mecânicas, hidráulicas, térmicas e médicas (DONMEZ, 2007).

As ligas com memória de forma podem ser aplicadas de várias maneiras, um exemplo é ilustrado na Figura 2.12, onde um filamento feito a partir de uma liga com memória de forma é submetido a uma carga constante a partir de uma massa com peso m , a qual gere um alongamento no filamento de dL . Quando o circuito se fecha e a corrente I passa por meio do atuador com liga de memória de forma, o mesmo se aquece. À medida que a temperatura T alcança a temperatura de início de formação da austenita, a estrutura cristalina do material causa a contração do fio. A transformação é completa quando o fio inteiro é aquecido até a temperatura do fim da formação da austenita (A_f). Neste ponto, o fio contrai o seu comprimento de um valor dL . Quando o circuito é aberto novamente, o fio lentamente resfria-se. Quando a temperatura do fio atinge a temperatura de início de formação de martensita, o

mesmo começa a alongar-se lentamente devido à massa por ele suspensa. Quando a temperatura passa a temperatura do fim da formação de martensita (M_f), a transformação é completa e o fio retorna ao seu comprimento original L_0 (KOOMEN, 2015).

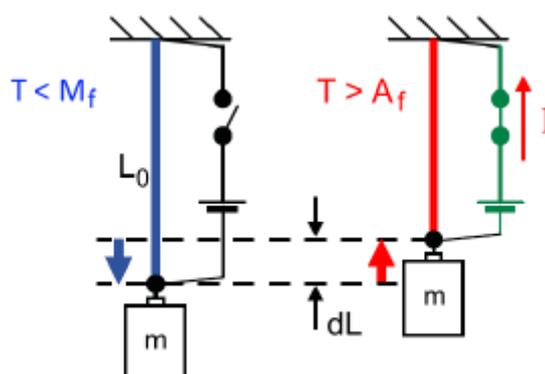


Figura 2.12 – Exemplo de uso de um atuador com liga de memória de forma submetido a um carregamento constante. Fonte: Koomen (2015).

De acordo com Choi (2009), ligas com memória de forma possuem pobres propriedades de fadiga. Uma vez que sob as mesmas condições de carga tais como torção, flexão e compressão, elementos com memória de forma podem resistir por muito menos ciclos do que um componente em aço. Logo a sua aplicação fica restrita ao tipo de emprego desejado.

Adicionalmente às ligas comuns com memória de forma, existem também os polímeros com memória de forma, que assim como as ligas metálicas, podem ser considerados como materiais inteligentes. No entanto, de acordo com Malmierca *et al.* (2012), ligas com memória de forma possuem algumas características que limitam suas possíveis aplicações, como por exemplo o seu alto custo e baixo limite de deformação reversível (mantém as propriedades de memória de forma até deformações de 10%). Nesse sentido, polímeros com memória de forma são uma alternativa com inúmeras vantagens, como a alta deformação elástica, baixo custo, baixa massa específica, e possíveis biocompatibilidade e biodegradabilidade (LIU *et al.*, 2007).

Os polímeros com memória de forma são materiais que apresentam resposta mecânica devido a mudanças de temperatura. Ao se aquecerem estes polímeros acima de sua temperatura de “ativação” (temperatura de transição vítrea), obtém-se uma mudança radical de polímero rígido para um estado elástico, o qual permite deformações de até 300%. Uma vez manipulado, se o material é resfriado mantendo-se a deformação imposta, “congela-se” a estrutura, que

retorna a um estado rígido de não-equilíbrio. Aquecendo-se novamente o material acima de sua temperatura de ativação, se recupera a forma inicial não deformada (LENDLEIN e KELCH, 2002; LENDLEIN e LANGER, 2002; LENDLEIN *et al.*, 2005). Para se compreender a evolução do efeito da memória de forma em um polímero, é fundamental conhecer a microestrutura do material. Em todos os polímeros existe certo deslizamento entre cadeias e, para evitá-lo, é necessário criar entrecruzamentos (físicos ou químicos), que serão os que retornam a forma original permanente. Estas uniões permitem à cadeia possuir certa elasticidade, que é a força impulsora para restaurar a forma permanente desde a forma transitória. Por outro lado, é necessário existir uma transição térmica reversível que permita fixar a forma temporária, de modo a reduzir o efeito da força elástica que tende a devolver ao material sua forma original. A transição térmica responsável pelo efeito de memória de forma é uma transição vítrea ou uma cristalização (MALMIERCA *et al.*, 2012). Assim sendo, o efeito da memória de forma exige dois elementos a nível molecular: ligações cruzadas, que determinam a forma permanente, e os chamados “segmentos *switshing*” que são usados para manter a forma temporária (RODRIGUES, 2012). Então são estas as características que tornam alguns polímeros com memória de forma com relação aos polímeros convencionais.

O ciclo pode ser repetido inúmeras vezes sem a degradação do polímero, e é possível a formulação de diferentes materiais com temperaturas de ativação entre -30°C e 260°C , de acordo com a aplicação desejada. Os polímeros com memória de forma são, portanto, materiais ativos que apresentam ação termomecânica e uma alta capacidade de recuperação de deformação (maior do que as experimentadas pelas ligas com memória de forma), que, juntamente com sua menor massa específica e custo, melhoram o projeto de inúmeras aplicações. Suas propriedades permitem aplicações na fabricação de dispositivos sensores/atuadores, especialmente para os setores aeronáutico, automotivo e médico (MORGADO *et al.*, 2007).

2.3.3 Fluidos controláveis

Os fluidos controláveis são definidos como fluidos que podem alterar a sua viscosidade quando um estímulo externo é aplicado, seja esse estímulo elétrico ou magnético. Existem três tipos principais de fluidos controláveis, são eles: fluidos eletro reológicos, fluidos magneto reológicos e ferrofluidos. Todos estes três podem ser classificados como misturas coloidais, ou seja, uma suspensão de partículas dispersas em um meio contínuo.

Fluidos eletro reológicos são sistemas coloidais tipicamente formados por finas partículas dielétricas suspensas em um líquido dielétrico. A principal característica dos fluidos eletro reológicos é a sua capacidade em sofrer uma transição reversível de um estado líquido para um estado viscoso ou sólido dentro de milissegundos, na presença de um campo elétrico. As magnitudes das mudanças reológicas no fluido dependem do campo elétrico aplicado (MOLES, 2015).

Já os fluidos magneto reológicos consistem de partículas magnéticas embebidas em um líquido não magnético, como por exemplo, querosene, água ou óleo. De forma similar aos fluidos eletro reológicos, a característica mais significativa dos fluidos magnéticos é a sua capacidade de transição do estado líquido para um estado visco elástico ou sólido dentro de milissegundos, em resposta a um campo magnético aplicado, ao invés de um campo elétrico (MOLES, 2015). Fluidos magneto reológicos poderiam ser usados onde vibrações controladas e dissipação de energia de impactos são requeridas. Estes fluidos estão sendo desenvolvidos para usos em suspensões automotivas (CARLSON e JOLLY, 2000), fundações de construções e pontes (CHOI, 2009). Fluidos magneto reológicos podem ser divididos em duas categorias, dependendo dos diâmetros das partículas: ferrofluidos e fluidos magneto reológicos. Sendo os ferrofluidos os que contêm partículas da ordem de nanômetros e os fluidos magneto reológicos com partículas da ordem de micrometros (MOLES, 2015).

Dos fluidos controláveis, os fluidos magneto reológicos estão se tornando os mais aceitos devido à sua capacidade em gerar altas tensões. Um fluido magneto reológico é uma suspensão de micropartículas dúcteis e magnéticas misturadas a um líquido transportador. Esta suspensão é capaz de sofrer mudanças dramáticas em suas propriedades reológicas. Quando o campo magnético é aplicado, o fluido magneto reológico muda de um estado líquido de fluxo livre para um estado semelhante a sólido, de maneira reversível. Pó de ferro tem alta propriedade de magnetização de saturação e por isso, é usado como partícula de inclusão. Quando o campo magnético é aplicado, essas partículas se arranjam de modo a formar uma cadeia muito forte de fluxo com o polo de uma partícula sendo atraído ao polo oposto de outra partícula. Uma vez arranjadas desta maneira, as partículas ficam restritas de se moverem fora do caminho de suas respectivas linhas de fluxo, se tornando assim, uma barreira contra o fluxo do líquido transportador (JOLLY *et al.*, 1999; REWABHAI, 2017).

Fluidos magneto reológicos têm sido empregados em dispositivos para controle semi-ativo e têm as propriedades que podem ser controladas para reduzir de forma otimizada a res-

posta de sistemas em grande escala, como pontes e construções (CHOI, 2009; RIBAKOV e GLUCK, 2002). Estes fluidos têm vasta aplicação em dispositivos utilizados no campo da engenharia mecânica, como por exemplo, amortecedores para motores pesados e amortecedores para cabines e assentos em veículos pesados (STEWART, 2015; RAHMAN *et al.*, 2017).

Um amortecedor fluido magneto reológico é um dispositivo semi-ativo que atua como um isolador de vibrações e pode ser controlado alterando o campo magnético aplicado. Basicamente é constituído pela carcaça do amortecedor, pela haste do pistão, pela cabeça do pistão e pelo fluido magneto reológico. A haste do pistão consiste da cabeça do pistão e pode consistir também das bobinas magnéticas que são responsáveis por gerar o campo magnético. Estas bobinas podem ser internas à haste, internas à cabeça do pistão ou serem posicionadas nas extremidades ou no entorno da carcaça do amortecedor. Se uma corrente elétrica é aplicada às bobinas durante o movimento da cabeça do pistão, então se cria um campo magnético por meio do fluido magneto reológico, por meio do qual as partículas magnéticas se ordenam, gerando, conseqüentemente, um aumento da tensão de escoamento do fluido magneto reológico dentro do seu reservatório no interior do amortecedor. O incremento na tensão de escoamento é capaz de aumentar a pressão interna, e conseqüentemente alterar a velocidade de deslocamento da cabeça do pistão (AHAMED *et al.*, 2018). A Figura 2.13 ilustra um modelo simplificado de um amortecedor fluido magneto reológico.

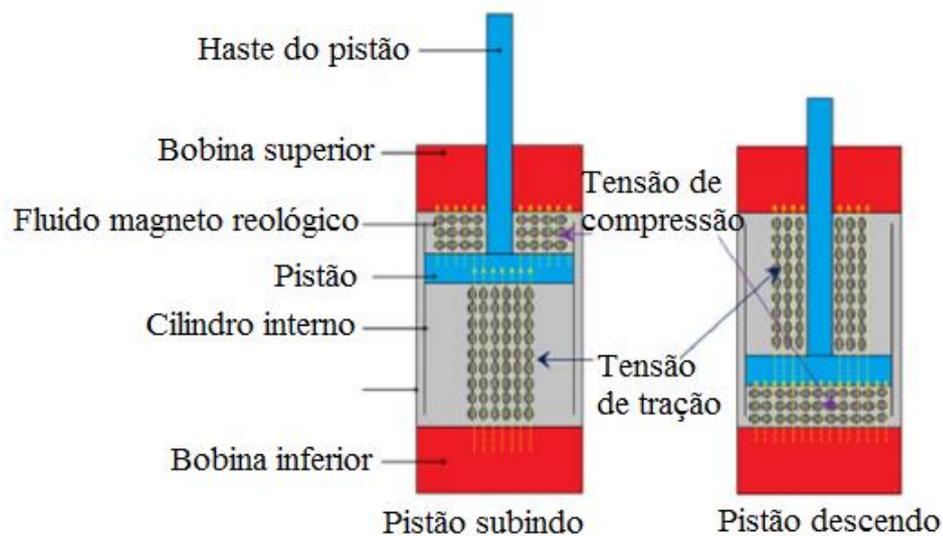


Figura 2.13 – Comportamento do fluido magneto reológico no interior de um amortecedor em funcionamento. Fonte: Ahamed *et al.* (2018).

No campo da engenharia civil, fluidos magneto reológicos têm sido utilizados em diferentes tipos de estruturas a fim de se reduzir as intensas vibrações induzidas por terremotos, bem como balanços causados por ventos de velocidades altas (AHAMED *et al.*, 2018). Um exemplo de aplicação é o amortecedor fluido magneto reológico utilizado na Ponte Eiland na Holanda, conforme Figura 2.14.

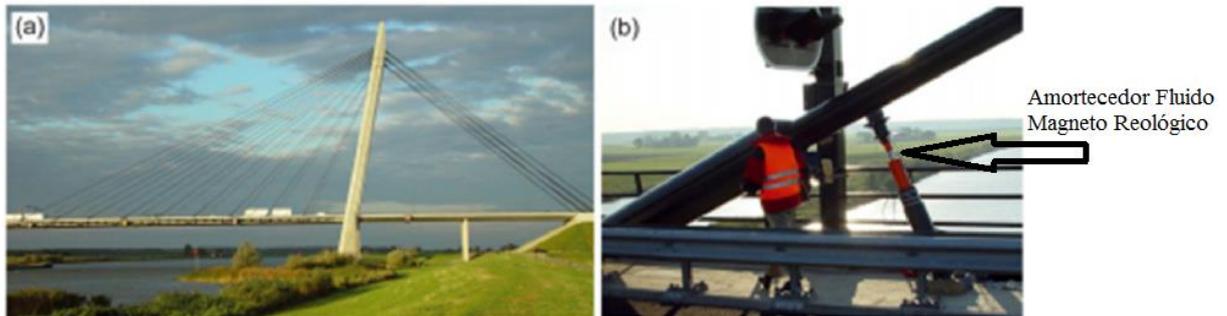


Figura 2.14 – a) Ponte Eiland na Holanda e b) o amortecedor fluido magneto reológico utilizado. Fonte: Weber e Distl (2015) *apud* Ahamed *et al.* (2018).

Diferentes propostas de aplicações destes amortecedores fluido magneto reológicos podem ser encontradas na literatura. Como alguns outros exemplos, visualizados nas Figuras 2.15 a), b) e c), citam-se sua utilização em máquinas de lavar roupa (CARLSON, 2002), em próteses humanas (POYNOR, 2001) e em veículos de passeio (YU *et al.*, 2009), dentre outras inúmeras aplicações.

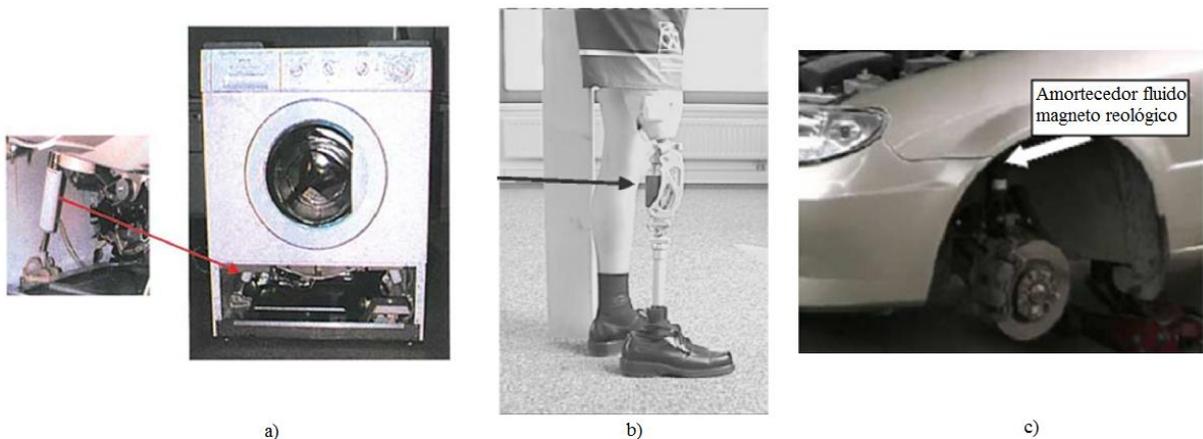


Figura 2.15 – Exemplos de amortecedores fluido magneto reológicos em a) máquinas de lavar roupa (CARLSON, 2002), b) próteses humanas (POYNOR, 2001) e em c) veículos de passeio (YU *et al.*, 2009).

Apesar da possibilidade de aplicação de fluidos magneto reológicos em diversos dispositivos e amortecedores, de acordo com Ahamed *et al.* (2018), existem vários problemas a serem resolvidos de modo a serem aplicados no mercado de maneira concreta. Um problema significativo é a sedimentação das partículas de ferro no fluido magneto reológico, o que gera a degradação no desempenho do fluido. Outros problemas estão diretamente relacionados à temperatura de operação, ao desgaste e à abrasividade devido às partículas de ferro e problemas de vedação. Além disso, de acordo com os autores, o tempo de resposta dos dispositivos deveria ser melhorado, mesmo o tempo de resposta do fluido magneto reológico por si só já ser alto. Esse tempo de resposta afeta os dispositivos que são utilizados, principalmente, em domínios de alta frequência.

2.3.4 Elastômeros controláveis

Anteriormente foram expostos os pontos principais sobre os fluidos magneto reológicos. Porém, as suas principais desvantagens são a sedimentação de suas partículas e o fato de que os dispositivos utilizados devem ser vedados. A resposta definitiva para a sedimentação das partículas foi o uso de elastômeros como matriz. As partículas magnéticas são misturadas no interior de uma amostra de polímero fluido, mas permanecem presas no interior da estrutura reticulada do elastômero curado. Assim, esses materiais compósitos são considerados como os análogos sólidos dos fluidos magneto reológicos. Os primeiros pesquisadores a conduzir testes preliminares sobre estes então chamados elastômeros magneto reológicos foram Rigbi e Jilken (1983). Eles estudaram o comportamento de um compósito elastômero-ferrita sob a influência combinada da mudança das tensões elásticas e dos campos magnéticos e descreveram os efeitos magneto-mecânicos prévios desconhecidos (PÖSSINGER, 2015). Esses elastômeros podem possuir como matrizes as borrachas naturais ou sintéticas e têm partículas polarizáveis dispersas nestas matrizes. Logo tornam-se possíveis mudanças em suas propriedades quando submetidos a variações de campo magnético.

Elastômeros eletro reológicos têm exibido até 380% de deformação quando são altamente pré-deformados a 5 ou 6 kV (PEI *et al.*, 2004). No entanto, para elastômeros eletro reológicos, as deformações dependem do módulo elástico do polímero e da relação deformação/campo elétrico do material eletro reológico ser não linear perante grandes deformações

(CHOI, 2009). Enquanto os materiais ativados eletricamente requerem alta voltagem por ativação, campos magnéticos gerados economicamente (ímãs permanentes, solenóides) podem ser usados para ativar os materiais magnéticos (HARVEY, 2006).

Dentro da classe de elastômeros controláveis encontram-se também os elastômeros magneto reológicos. De acordo com Nambudiry (2015), estes são materiais capazes de apresentar múltiplos valores de rigidez e encontram aplicações em estruturas adaptativas aeroespaciais, automotivas, civis e elétricas. Podem ser considerados materiais análogos aos fluidos magneto reológicos, porém no estado sólido. Nos elastômeros magneto reológicos, as partículas ativas são fixadas à matriz polimérica durante o seu processo de cura. Sob a influência de um campo magnético, as partículas tendem a se alinhar paralelamente a este campo, o que irá gerar uma tensão sobre a estrutura formada, parecida com cadeia micro estrutural, no interior da matriz polimérica (TIAN *et al.*, 2013), além de produzir uma mudança nas dimensões do elastômero (NAMBUDIRY, 2015).

As matrizes sólidas mais utilizadas nesta classe de material são o silicone (polissiloxano), o elastômero natural, o poliuretano e elastômeros termoplásticos (KALLIO, 2005; HU *et al.*, 2005; CHEN *et al.*, 2007). De fato, uma grande variedade de materiais para matrizes cobrindo uma ampla faixa de propriedades em módulo, resistência à tração ou viscosidade pode ser encontrada no mercado e também na literatura. No entanto, entre estes materiais, os elastômeros magneto reológicos baseados no elastômero do silicone têm mais popularidade devido à sua excelente processabilidade, ao bom compromisso entre as propriedades mecânicas e térmicas, além de seu uso generalizado nas aplicações industriais (PÖSSINGER, 2015). Além disso, matrizes relativamente macias com baixo módulo elástico são alcançadas no silicone e tendem a facilitar a interação magneto-mecânica (KALLIO, 2005; GONG *et al.*, 2007; DIGUET, 2010; PÖSSINGER, 2015).

Diferentes tipos de partículas magnéticas têm sido utilizadas em elastômeros magneto reológicos: as partículas magnetostrictivas ou partículas magnéticas com memória de forma, bem como partículas magnéticas duras e macias. As partículas magnetostrictivas são formadas por uma liga de raros cristais terrestres e são as mais efetivas, porém representam um material de alto custo (GÜNTHER *et al.*, 2012). Dentre os principais materiais magnetostrictivos citam-se o Galfenol (liga contendo Fe-Ga), Alfenol (liga Fe-Al) e Terfenol-D (liga contendo Tb-Fe-Dy) (HALL *et al.*, 2018). Partículas magnéticas com memória de forma também têm sido utilizadas produzindo compósitos magneto reológicos influenciáveis pela temperatura e

pelo campo magnético aplicado (SCHEERBAUM *et al.*, 2007). A dispersão de partículas magnéticas duras em uma matriz elastomérica, magnetizada durante a fabricação, produz elastômeros magneto reológicos anisotrópicos similares a um ímã permanente flexível (KOO *et al.*, 2012). No entanto, as partículas mais comumente utilizadas são feitas de materiais ferromagnéticos macios tais como níquel, cobalto ou ferro e suas ligas (AUSANIO *et al.*, 2011). Em particular, pó de ferro carbonila com partículas esféricas tem sido amplamente preferido na fabricação de elastômeros magneto reológicos (KALLIO, 2005; BÖSE, 2007; DIGUET, 2010). O ferro tem de fato uma alta susceptibilidade magnética e saturação magnética, fornecendo altas forças de interação entre partículas, bem como uma baixa magnetização remanente necessária a fim de se obter um controle rápido e reversível pela aplicação de campo magnético em aplicações envolvendo elastômeros magneto reológicos (PÖSSINGER, 2015).

As propriedades dos elastômeros magneto reológicos dependem da intensidade e direção do campo magnético, o que pode afetar a rigidez e distribuição das estruturas em forma de cadeia. O processo de fabricação de elastômeros magneto reológicos é similar ao de um elastômero convencional. Todos os ingredientes são misturados a uma temperatura de trabalho suficiente para a dispersão das partículas no interior da matriz. Se existe campo magnético durante o processo de cura do elastômero, as partículas ferromagnéticas são ordenadas em forma de cadeia ou em série (anisotropia). No entanto, se há ausência de campo magnético aplicado durante o processo de cura da matriz, as partículas são distribuídas aleatoriamente (isotropia). O processo de cura para elastômeros anisotrópicos requer um forte campo magnético aplicado, usualmente acima de 0,8 T, de modo a se formar a estrutura em forma de cadeia de acordo com a direção do campo magnético imposto (KWON *et al.*, 2018). A análise da literatura clifilamentonte indica que com o mesmo volume de partículas, elastômeros magneto reológicos com microestrutura anisotrópica formada durante o processo de cura da matriz perante campo magnético, são caracterizados com um efeito magneto reológico muito melhor do que elastômeros magneto reológicos com isotropia de distribuição de partículas (MASTOWSKI e ZABORSKI, 2014). A Figura 2.16 ilustra dois casos de disposição de distribuição de partículas em um elastômero. A figura da esquerda (a)) mostra um elastômero magneto reológico curado sob campo magnético, no qual as partículas ferromagnéticas se encontram na forma encadeada. Já a figura do lado direito (b)), mostra um elastômero curado na ausência de um campo magnético, logo as partículas se encontram randomicamente orientadas.

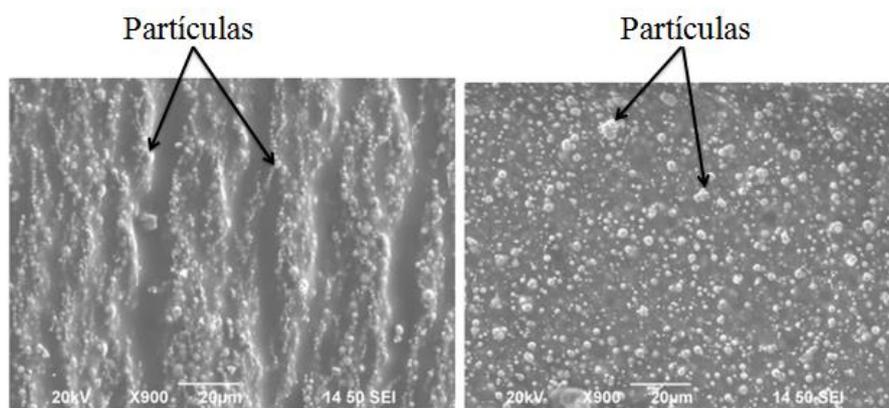


Figura 2.16 – Disposições de partículas em um elastômero. a) Elastômero magneto reológico anisotrópico; b) Elastômero magneto reológico isotrópico. Fonte: Tian *et al.* (2011).

A máxima mudança possível induzida por campo magnético no valor da tensão (e módulo elástico) ocorre quando as partículas alinhadas se tornam magneticamente saturadas. Esta observação suporta a utilização de um material de partícula com alta saturação de magnetização. O ferro puro tem a mais alta saturação de magnetização, entre os elementos conhecidos, embora algumas ligas de ferro e cobalto apresentem também uma alta saturação de magnetização (RUDDY *et al.*, 2012). Varga e Filipcsei (2005) *apud* Ruddy *et al.* (2012) também mostraram que elastômeros formados a partir de partículas ferromagnéticas alinhadas, exibiram um aumento maior no módulo elástico do que o aumento apresentado por aqueles contendo partículas randomicamente orientadas, sendo que o aumento no módulo é mais significativo se a tensão aplicada for paralela ao alinhamento das partículas. Outras características das partículas ferromagnéticas como o seu tamanho, forma, distribuição na matriz e porcentagem em volume também têm efeitos sobre o comportamento do elastômero magneto reológico final.

De acordo com Ruddy *et al.* (2012), tem sido reportado da literatura que o aumento máximo no módulo de elastômeros magneto reológicos com o campo magnético é de aproximadamente 0,6 MPa, correspondente a um aumento de 40% sobre o módulo inicial. Materiais magneto reológicos de uma maneira geral apresentam vários comportamentos mecânicos, mas elastômeros magneto reológicos apresentam somente um tipo de comportamento mecânico. Por exemplo, fluidos magneto reológicos e espumas magneto reológicas apresentam tensão de escoamento dependente do campo magnético, mas os elastômeros apresentam somente o módulo, controlável e dependente do campo. No entanto, as propriedades de amortecimento destes elastômeros mudam na presença de campo magnético.

Elastômeros magneto reológicos também têm diversas aplicações na engenharia mecânica, tais como isoladores de vibrações, em montagens de rigidez ajustável e em suspensões (DENG E GONG, 2008; AHAMED *et al.*, 2018). A vibração ou excitação é produzida a partir de motores e bombas, durante seus movimentos rotacionais desbalanceados e os absorvedores de vibração são então geralmente utilizados para reduzir estas vibrações indesejáveis. Os elastômeros magneto reológicos são usados para desenvolver o sistema absorvedor de vibração, uma vez que as propriedades de rigidez dependentes do campo magnético podem ser utilizadas para uma ampla faixa de frequências (LI *et al.*, 2014). A Figura 2.17 mostra um esquema simplificado proposto para um absorvedor dinâmico de vibração. Nesta Figura, o oscilador corresponde à massa que deve ter seu movimento oscilatório reduzido, por meio do acionamento das propriedades magnéticas do elastômero reológico ativando-se o funcionamento das bobinas via aplicação e controle de uma corrente elétrica.

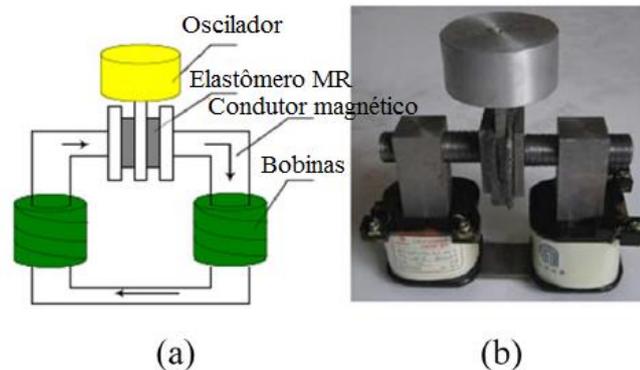


Figura 2.17 – Modelo proposto para um absorvedor de vibração a) e seu protótipo b). Fonte: Deng *et al.* (2006) *apud* Li *et al.* (2014).

Na engenharia civil, os elastômeros reológicos são utilizados com o mesmo objetivo dos fluidos reológicos, como já citado anteriormente, ou seja, na isolamento ou redução das vibrações causadas por terremotos e ventos de velocidades altas em estruturas de prédios e pontes (NI *et al.*, 2010). Normalmente, múltiplas camadas de anéis de elastômeros e faces finas metálicas geram sistemas de isolamento das vibrações causadas por terremotos, e os elastômeros magneto reológicos podem proteger a estrutura contra uma ampla faixa de terremotos (LI *et al.*, 2013; AHAMED *et al.*, 2018). Outro exemplo de uma proposta de isolador de vibrações com rigidez e amortecimento variáveis pode ser visto na Figura 2.18, na qual se observam

duas massas formando um sistema e quatro bobinas responsáveis pela geração do campo magnético. Um calço metálico foi colocado entre os elastômeros magneto reológicos.

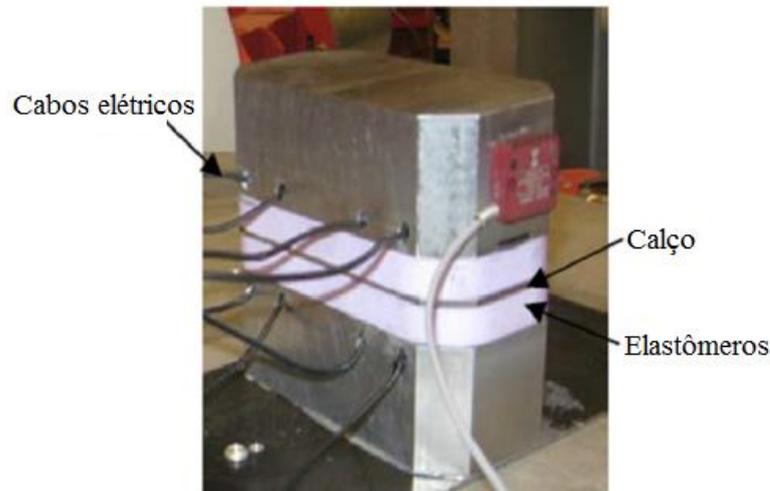


Figura 2.18 – Protótipo de um modelo proposto para um absorvedor de vibração em estruturas. Fonte: Behrooz *et al.* (2014).

Com relação às suas propriedades magnéticas, elastômeros magneto reológicos são caracterizados pela investigação de suas medidas de saturação e histerese (FUCHS *et al.*, 2010; YANG *et al.*, 2013; KWON *et al.*, 2018). A Figura 2.19 a) ilustra algumas curvas de magnetização para elastômeros magneto reológicos baseados em elastômero natural com epóxi para diferentes frações em peso de partículas ferromagnéticas (10, 30, 50 e 70% em peso). Para todas as amostras, as curvas de magnetização revelam estreitos ciclos de histerese magnética. Este fato indica que o elastômero estudado apresenta uma característica magnética reduzida (*soft magnetic*). A tendência dos gráficos é similar para todas as amostras estudadas, de tal maneira que as curvas de magnetização aumentaram significativamente até certa intensidade de campo magnético, aproximadamente 400 mT e 600 mT (KWON *et al.*, 2018).

A Figura 2.19 b) mostra ciclos de histerese de vários elastômeros magneto reológicos com e sem nano tubos de carbono (elastômero magneto reológico puro, elastômero magneto reológico com nano tubos de carbono - CNT, elastômero com nano tubos de carbono com carboxilatos- COOH-MWCNT e nano tubos de carbono hidroxilados – OH-CNT), medidos em campos magnéticos de até 1,2 T. A Figura mostra que as amostras de elastômero contendo os nano tubos de carbono apresentam um valor de saturação de magnetização maior se comparadas ao elastômero sem os nano tubos de carbono, o que mostra que os nano tubos de car-

bono enrijecem a micro estrutura do elastômero, resultando em uma alta saturação de magnetização (FURUKAWA *et al.*, 2005; FANG *et al.*, 2009; KWON *et al.*, 2018).

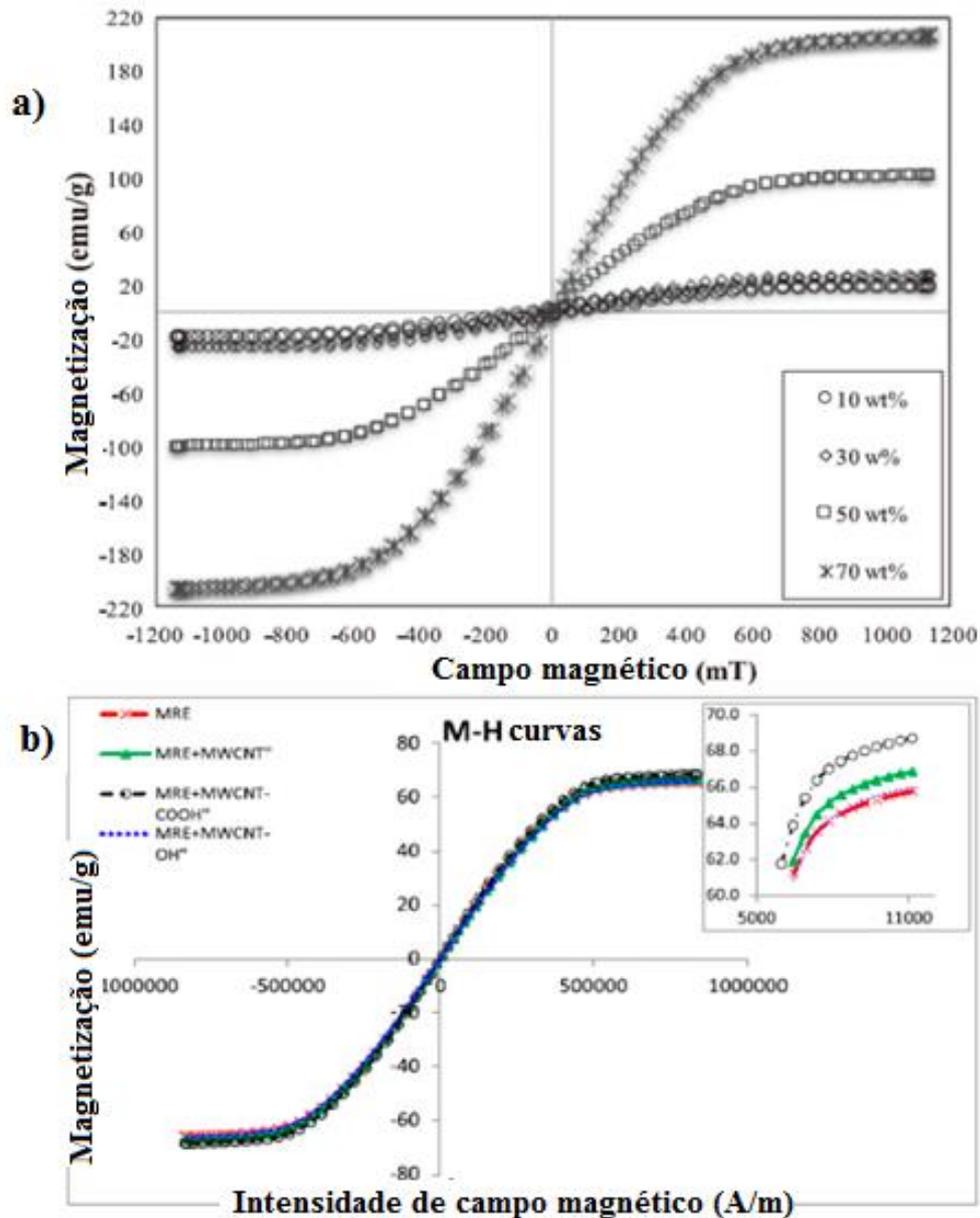


Figura 2.19 – Exemplos de curvas de saturação a) para elastômeros magneto reológicos contendo diferentes frações de pó ferromagnético (YUNUS *et al.*, 2016, *apud* KWON *et al.*, 2018) e b) para elastômero magneto reológico contendo nano tubos de carbono (QI *et al.*, 2016, *apud* KWON *et al.*, 2018).

Além das propriedades magnéticas dos elastômeros magneto reológicos, eles também podem ser caracterizados em função de seus módulos de armazenamento (G') e de perda (G''). Estes materiais são conhecidos como materiais visco elásticos que podem armazenar e dissipar energia durante sua deformação sob cisalhamento e campo magnético externamente aplicados. Geralmente, a capacidade do material em armazenar energia elasticamente é relacionada a G' , que representa a elasticidade do material. Por outro lado, G'' , que quantifica a capacidade do material em dissipar energia de deformação como calor, representa as propriedades viscosas do material. Fundamentalmente, G' e G'' são os principais parâmetros que descrevem as propriedades reológicas de materiais visco elásticos, assim como os elastômeros magneto reológicos. Para se examinar as características magneto reológicas desses elastômeros, são realizados testes dinâmicos utilizando-se reômetros rotacionais equipados com geradores de campo magnético e amostras de elastômero em forma de disco. A partir destes ensaios plotam-se gráficos, geralmente de deformação em função de G' ou G'' . Uma vez obtidos estes gráficos, determina-se a região linear visco elástica (LVE). Assim, as propriedades dinâmicas do elastômero magneto reológico podem ser estudadas dentro da região linear ou da região não linear, separadamente (KWON *et al.*, 2018).

2.4 APLICAÇÃO DE MATERIAIS MAGNETO REOLÓGICOS EM VIGAS SANDUÍCHE

Uma vez que esta Tese tem por finalidade a aplicação de elastômeros magneto reológicos como núcleo em estruturas sanduíche, esta seção destina-se à realização de uma revisão bibliográfica sobre os materiais com propriedades ferromagnéticas que vêm sendo aplicados em modelos de viga sanduíche. Os trabalhos encontrados aplicam os elastômeros como núcleo total de vigas sanduíche, ou seja, vigas com duas lâminas em material qualquer, e o núcleo, todo, ou em partes, em elastômero magneto reológico. Sendo notada a ausência de um núcleo em forma de colmeia. Além disso, lâminas em material compósito também são escassas na literatura.

Como já discutido nos capítulos anteriores, elastômeros magneto reológicos são partículas magnetizáveis moldadas tanto em matrizes de polímeros de elastômero quanto em ma-

trizes de polímero inorgânico (FARSHAD e BENINE, 2004; MIKHASEV et al, 2014). A ótima relação peso/ massa específica das partículas magnéticas e o polímero determinam o módulo de cisalhamento, a viscosidade e a resposta no tempo de materiais inteligentes (GINDER *et al.*, 2001; MIKHASEV *et al.*, 2014). Eles pertencem ao grupo de materiais ativos cujas propriedades físicas tais como viscosidade e módulo de cisalhamento podem variar quando submetidos a diferentes níveis de campo magnético (FARSHAD e BENINE, 2004; GINDER *et al.*, 2001; MIKHASEV *et al.*, 2014; YING E NI, 2017). Espera-se que elastômeros magneto reológicos embebidos entre camadas elásticas venham a fornecer ao perfil sanduíche final uma ampla faixa de propriedades reológicas que podem ser controladas rapidamente e reversivelmente pela aplicação de um campo magnético externo (MIKHASEV *et al.*, 2014).

De acordo com Eshaghi *et al.* (2015), os estudos experimentais em vigas sanduíche contendo núcleo em material reológico, em sua maioria têm sido conduzidos com vigas na condição engastada-livre, ou em balanço (CHEN *et al.*, 1994; DON E COULTER, 1995; BERG *et al.*, 1996; PHANI E VENKATRAMAN, 2005; RAJAMOHAN *et al.*, 2010; WEI *et al.*, 2011), apesar de alguns autores estudarem a condição engastada-engastada (HAIQING E KING, 1997) e a bia-apoiada (YALCINTAS E COULTER, 1995; YALCINTAS *et al.*, 1995; LEE E CHENG, 1998; SUN *et al.*, 2003). Ainda segundo Eshaghi *et al.* (2015), os principais experimentos que têm sido conduzidos para caracterizar as respostas dinâmicas de vigas contendo camada magneto ou eletro reológica em termos de frequência natural e propriedades de amortecimento são ensaios de vibração livre (GANDHI *et al.*, 1989; CHOI *et al.*, 1990; LENG *et al.*, 1997; LARA-PIETRO *et al.*, 2010; JOSHI, 2012) e vibração forçada via excitação por meio de um *shaker* (BISHAY *et al.*, 2010; RAJAMOHAN *et al.*, 2010; JOSHI, 2012; ALLAHVERDIZADEH *et al.*, 2013).

Camadas coladas ou embebidas de materiais magneto reológicos em estruturas sanduíche facilitam o controle da vibração estrutural sobre faixas de frequência por meio das variações na rigidez distribuída e nas propriedades de amortecimento em resposta aos diferentes níveis de campos magnéticos aplicados. De acordo com Ramamoorthy *et al.* (2016), Gandhi *et al.* (1989) iniciaram o desenvolvimento de estruturas sanduíche baseadas em materiais eletro reológicos e investigaram suas características dinâmicas. Foi concluído que ambos, fator de amortecimento e frequências naturais da estrutura, poderiam ser aumentados com um aumento no campo elétrico. A partir desse estudo inicial, diversos outros trabalhos foram desenvolvidos.

Yalcintas e Dai (1999) e Yalcintas e Dai (2004) empregaram o método da energia para comparar as respostas de uma viga sanduíche com fluido adaptativo magneto reológico com as respostas de uma viga sanduíche com fluido eletro reológico. Esses autores concluíram que as frequências naturais foram aumentadas em aproximadamente duas vezes em uma viga sanduíche com fluido magneto reológico se comparadas àquelas da estrutura com fluido eletro reológico. Testes experimentais também foram feitos e os resultados confrontados com os resultados teóricos. De acordo com o modelo teórico, notou-se uma redução na amplitude de vibração da viga magneto reológica de até 20 dB, bem como uma variação máxima na frequência natural de até 30%.

Sun *et al.* (2003) propuseram um modelo teórico de viga sanduíche, com núcleo em fluido magneto reológico e lâminas em alumínio, simplesmente suportada nas duas extremidades. Os autores concluíram que as amplitudes de vibração podem ser diminuídas com a variação do campo magnético aplicado. Além disso, as frequências naturais aumentaram seus valores quando o campo magnético foi aumentado de 0 a 900 Oe. Esses autores afirmaram ainda que a aplicação de campo magnético sobre camadas magneto reológicas está se tornando um importante critério de projeto quando se utilizam estruturas magneto reológicas adaptativas, uma vez que se considera uma tarefa desafiante aplicar campo magnético sobre uma camada magneto reológica.

Zhou e Wang (2005) conduziram um estudo teórico sobre vigas sanduíche inteligentes e núcleo com uma parte em elastômero magneto reológico e partes em material não magnético, com elastômero magneto reológico embebido, com lâminas não condutivas baseando-se na teoria de vigas sanduíche de alta ordem. A pesquisa realizada por estes autores revelou, na forma de gráficos, que a rigidez flexural da viga proposta pôde ser amplamente ajustada pelo campo magnético aplicado. Posteriormente Zhou e Wang (2006a e 2006b) desenvolveram equações dinâmicas para o movimento de uma viga sanduíche embebida com núcleo elastômero magneto reológico macio, contendo lâminas condutoras submetidas à aplicação de um campo magnético. Estes autores conseguiram um aumento nas frequências de ressonância e de antirressonância de até 30% a medida que o campo magnético foi aumentado até a saturação magnética.

Lara-Pietro *et al.* (2010) investigaram experimentalmente a resposta dinâmica de uma viga sanduíche com lâminas em alumínio e núcleo fluido magneto reológico contendo 80,98% de partículas ferromagnéticas. A condição de apoio foi a engastada-livre. O ímã foi posicio-

nado em várias posições ao longo do comprimento da viga. Estes autores observaram que quanto mais distante do engaste, maior a variação na frequência natural obtida da viga, ou seja, a posição mais significativa para aplicação de campo magnético considerando-se a resposta dinâmica da viga foi na sua extremidade livre. Além disso, foi mostrado também que as frequências naturais da viga em estudo diminuem à medida que o campo magnético aplicado aumenta. Conseguiu-se uma redução de até 17,5% no valor da frequência natural quando o campo magnético variou de 0 a 0,24 T. Alcançou-se também, uma redução de até 15,7 dB nos níveis de vibração. O fator de amortecimento na ausência de campo magnético foi de 1,8%, já na presença de um campo magnético de 0,23 T, foi de 3,7%. Os autores relacionam a redução da frequência natural com o aumento do campo magnético devido ao enrijecimento não homogêneo do fluido reológico, uma vez que as partículas de ferro tendem a aglomerar-se em uma posição específica do núcleo, gerando ali, uma massa concentrada destas partículas.

Hu *et al.* (2011) apresentaram de forma experimental as características de vibração de uma viga sanduíche nucleada por elastômero magneto reológico contendo 70% em massa de partículas ferromagnéticas e lâminas em alumínio submetida a um campo magnético não homogêneo. Foi mostrado que a viga sanduíche tem a capacidade de diminuir o valor de sua primeira frequência natural quando o campo magnético é aumentado nas regiões ativadas da viga. A primeira frequência natural da viga foi diminuída em até 13,9% quando o ímã foi deslocado de uma posição próxima ao engaste até uma posição na extremidade livre da viga. Para uma variação de 0 a 95 mT no campo magnético aplicado, conseguiu-se uma diminuição na primeira frequência natural de 11,5%. De acordo com o espectro de frequências encontrado pelos autores no ensaio de vibração livre, notou-se que a amplitude dos picos não obedeceu a uma certa tendência à medida que o campo ia sendo aumentado ou diminuído, ou seja, para cada valor de campo magnético aplicado, o pico da frequência apresentou um valor, o qual não se relaciona com o valor daquele pico devido a um campo imediatamente inferior ou superior.

A estabilidade dinâmica de uma viga sanduíche simétrica com segmentos de núcleo viscoelástico e segmento em elastômero magneto reológico entre lâminas condutoras submetida à força axial variante no tempo e à aplicação de campo magnético foi analisada por Nayak *et al.* (2012). A Teoria Clássica de Vigas Sanduíche e o Princípio Estendido de Hamilton foram usados para o estudo do sistema. As condições de engaste estudadas foram as condições de viga simplesmente apoiada e também a condição de viga engastada-livre. Elas-

tômeros com diferentes porcentagens de partículas ferromagnéticas foram analisados, bem como diferentes intensidades de campo magnético aplicadas. Encontrou-se que além do campo magnético aplicado, cargas estáticas e dinâmicas também alteram as propriedades dinâmicas das vigas estudadas.

Nayak *et al.* (2013) desenvolveram um método baseado no Método dos Elementos Finitos para avaliar os efeitos de cargas estáticas e dinâmicas, força de campo magnético e localização e comprimento do segmento do núcleo em elastômero magneto reológico de vigas sanduíche sobre as regiões de instabilidade destas vigas. As análises foram feitas para oito diferentes condições de viga sanduíche variando-se a localização e o comprimento do segmento do núcleo em elastômero magneto reológico. De acordo com estes autores, a estabilidade do sistema pôde ser alcançada passivamente mudando-se o comprimento e a localização do segmento em elastômero magneto reológico no núcleo e ativamente alcançada pela aplicação de um campo magnético de intensidade adequada.

Nayak *et al.* (2014) investigaram o comportamento dinâmico de uma viga sanduíche rotativa de três camadas, sendo um núcleo em elastômero magneto reológico e duas lâminas condutoras, submetida a cargas axiais periódicas usando o Método dos Elementos Finitos. A validade dos valores das frequências naturais encontrados foi feita com os resultados publicados na literatura. À medida que a rigidez aumentava com o aumento do campo magnético aplicado e também com a velocidade de rotação, a frequência fundamental do sistema também aumentou com estes parâmetros. Estes autores encontraram que a variação da frequência natural e do fator de perda não foi linear. Comparando-se a condição na ausência de campo magnético e com um campo magnético aplicado de 0,6 T, o modelo numérico proposto pelos autores mostrou um aumento de 23% no valor da frequência natural fundamental.

Mikhasev *et al.* (2014) estudaram o efeito do campo magnético sobre a vibração livre de uma placa cilíndrica contendo um núcleo em elastômero magneto reológico contendo 30% em massa de partículas ferromagnéticas. Os autores afirmam que o projeto de painéis sanduíche de espessura fina com uma camada de material magneto reológico sendo absolutamente uniforme é uma tarefa tecnologicamente difícil. A modelagem analítica que rege o comportamento deste tipo de placa foi desenvolvida e as abordagens baseadas na hipótese cinemática generalizada de Timoshenko foram tomadas. Os resultados encontrados por estes autores mostraram que os modos de vibração da placa sanduíche com núcleo em elastômero magneto reológico são fracamente influenciados pelo campo magnético uniforme induzido, ao passo

que as amplitudes de vibração são mais dependentes do campo magnético. Quando estes autores aplicaram um campo magnético num intervalo de 25 a 75 mT notaram um aumento de até 300% no fator de amortecimento.

Dyniewicz *et al.* (2015) analisaram o controle de vibrações de uma viga parcialmente preenchida com elastômero magneto reológico contendo 8% em volume de partículas ferromagnéticas. Assim sendo, colocaram o elastômero magneto reológico somente na extremidade livre da viga sanduíche engastada-livre. Modelos analíticos que regem o comportamento de tal viga foram descritos e ensaios experimentais também foram realizados com a aplicação de campo magnético sobre a viga em vibração. De acordo com esses autores, o fator de amortecimento e o módulo de cisalhamento do elastômero aumentam quando este é exposto a um campo eletro-magnético. Esses autores estudaram três condições específicas de aplicação de campo magnético: sem campo; campo aplicado constantemente e campo aplicado em momentos selecionados. A amplitude do movimento para a condição sem campo foi de 12 mm, para a condição de campo aplicado constantemente, a amplitude foi de 4,2 mm, e finalmente para a condição de campo parcialmente aplicado, a amplitude de deslocamento foi de 2,6 mm.

Chikh *et al.* (2016) realizaram um estudo experimental sobre as vibrações de uma viga sanduíche com lâminas em alumínio, preenchida com núcleo elastômero magneto reológico contendo 40% de micropartículas de ferro, além de um estudo numérico utilizando o aplicativo computacional ABAQUS. Os resultados experimentais foram comparados aos resultados numéricos com boa concordância. Para a mesma frequência, foi observada uma redução na amplitude de vibração a medida que o campo magnético aplicado se tornava maior. Foi notado no trabalho destes autores, que para campos aplicados de 0; 0,35 e 0,45 T os valores das frequências de ressonância não sofreram alterações, mantendo-se em 9,11 Hz, embora sua amplitude tenha diminuído enquanto o campo aumentou.

Kozłowska *et al.* (2016) apresentaram um novo modelo de viga sanduíche com núcleo em elastômero magneto reológico com partículas ferromagnéticas alinhadas, ou seja, núcleo anisotrópico, e lâminas em compósito de fibra de carbono. Os espectros de frequência do ensaio de vibração livre, bem como o sinal de velocidade no tempo foram obtidos para disposições de vigas fabricadas contendo núcleos com diferentes espessuras, assim como diferentes porcentagens de partículas ferromagnéticas na matriz poliuretana. Constatou-se que para a viga sanduíche contendo núcleo magneto reológico de 1,55 mm de espessura preenchido por partículas ferromagnéticas na fração de 11,5% em volume apresentou uma redução na fre-

quência natural fundamental de 47,26 Hz, sob um estado inativado, para 42,97 Hz sob um campo magnético de 131 kA/m. As vigas sanduíche estudadas, em diferentes disposições e geometrias de núcleo, apresentaram a capacidade de redução de suas frequências sob campo de 6 a 9%. A viga com o maior conteúdo de partículas de ferro (33% em volume) no poliuretano no núcleo apresentou os valores ligeiramente menores para o fator de amortecimento.

Megha *et al.* (2016) estudou a influência do campo magnético sobre as frequências naturais de uma viga sanduíche com lâminas em alumínio e núcleo fabricado a partir de elastômero magneto reológico. Mostrou-se que as frequências naturais da viga, correspondentes ao seu primeiro modo de vibração, diminuem com o aumento do campo. Uma redução de 11,96% foi conseguida quando se elevou a intensidade do campo magnético aplicado de 0 a 285 mT sob o ímã posicionado próximo ao centro da viga. Fato similar ao trabalho desenvolvido por Hu *et al.* (2011), e já citado neste texto, foi observado com relação às amplitudes dos picos de frequência no ensaio de vibração livre. Notou-se também que as amplitudes obtidas no espectro de frequência não obedeceram uma certa tendência à medida que o campo magnético ia sendo aumentado. Por exemplo, para a condição sem campo, a amplitude observada foi próxima a 0,12 mm, para um campo de 250 mT, ultrapassou 0,14 mm e para 285 mT, reduziu para pouco mais de 0,13 mm, aproximadamente.

Yildirim *et al.* (2016) investigaram experimentalmente a resposta dinâmica de uma viga de alumínio com um segmento de elastômero magneto reológico colado na metade do comprimento da viga. Um campo magnético externo foi aplicado sobre a viga e sua resposta dinâmica analisada. A resposta não simétrica foi maior do lado no qual o segmento em elastômero magneto reológico foi colado, quando na presença de um campo magnético externo. Além disso, a resposta ao movimento máximo foi maior para a viga alumínio/elastômero magneto reológico na ausência do campo magnético se comparada à resposta da viga de alumínio puro. Ou seja, somente a presença da porção em elastômero magneto reológico colada à viga já é capaz de alterar significativamente a sua resposta dinâmica. Para campos magnéticos aplicados à viga de 0, 10 e 25 mT suas frequências naturais fundamentais obtidas foram de 30,14, 29,98 e 29,94 Hz, respectivamente.

Yildirim *et al.* (2016) avaliaram experimentalmente o comportamento dinâmico não linear de uma viga sanduíche geometricamente imperfeita com núcleo em elastômero magneto reológico. A viga foi desenvolvida de modo a ter uma lâmina de alumínio e outra do elastômero magneto reológico. A presença de um campo magnético externo à viga aumenta os

valores das frequências naturais fundamentais e ao mesmo tempo diminui a amplitude do movimento transversal da viga. As frequências naturais com 2,5; 45 e 180 mT são 13,98; 14,13 e 14,69 Hz, respectivamente. Outras condições de geometria foram analisadas também, como a viga feita somente de uma lâmina de alumínio e viga sanduíche com uma massa concentrada no seu centro.

Ramamoorthy *et al.* (2016) apresentaram um estudo dinâmico sobre um compósito laminado parcialmente tratado com fluido magneto reológico constituindo então uma placa sanduíche. As equações diferenciais de movimento da placa sanduíche são apresentadas em formulação de elementos finitos. Vários estudos paramétricos foram realizados para investigar o efeito do campo magnético sobre a variação das frequências naturais e do fator de perda da placa sanduíche sobre diferentes condições de contorno. Além disso, estes autores verificaram a influência dos comprimentos e das localizações das camadas do fluido magneto reológico sobre as propriedades de vibração livre da placa sanduíche parcialmente tratada. De acordo com os autores, as frequências naturais de altos modos poderiam ser aumentadas pela diminuição do tamanho do segmento fluido magneto reológico no núcleo das vigas. Estes autores observaram ainda uma redução no pico de amplitude para o ensaio de vibração livre para os três primeiros modos de 38,37%, 23,78% e 24,02%, respectivamente, quando o campo magnético aumentou de 0 a 100 G, e de 46,80%, 26,86% e 33,96% quando o campo magnético variou de 0 a 250 G.

Irazu e Elejabarrieta (2017) propuseram uma análise experimental dinâmica sobre uma viga sanduíche consistindo de lâminas de alumínio e fino núcleo visco elástico. Duas condições foram estudadas, uma sendo a viga contendo o núcleo a partir de um elastômero sem partículas ferromagnéticas, e a outra, a viga sanduíche com núcleo elastômero magneto reológico contendo uma concentração volumétrica de partículas ferromagnéticas de 12% no elastômero. Estes autores mostraram que quando o campo magnético é aplicado na extremidade livre da viga em balanço, o valor das frequências naturais correspondentes ao primeiro modo de vibração diminui, em função do aumento de seu amortecimento e diminuição de sua rigidez. Já para o segundo e terceiro modo, os valores das frequências naturais permaneceram inalterados. Tal fato é justificado em função da amplitude em deslocamento do espectro de frequências. Os autores afirmam que para o primeiro modo de vibração, a amplitude possui uma ordem de aproximadamente duas vezes a amplitude correspondente ao segundo modo, e

que por esta razão, a influência do campo magnético sobre o segundo modo, e também sobre o terceiro, é muito menor, e respostas significativas não foram observadas para estes modos.

Wei *et al.* (2017) empregaram uma viga sanduíche com núcleo em fluido magneto reológico para controlar as vibrações de uma viga móvel axialmente. Um modelo dinâmico teórico é desenvolvido. Os efeitos da velocidade axial, da força axial e do campo magnético, dentre outras propriedades, são analisados sobre as frequências naturais da viga sanduíche em estudo. Para uma força axial ou velocidade axial constante, a capacidade de supressão do fluido magneto reológico sobre a frequência natural aumenta com o aumento do campo magnético. Para uma velocidade de 20,0 m/s, uma carga axial compressiva de 100 N e um campo magnético aplicado de 2,0 T, conseguiram-se reduções nos valores das frequências naturais da viga de até 10,3%.

Navazi *et al.* (2017) realizaram uma análise de vibrações livres em uma viga sanduíche rotativa de forma cônica com núcleo em elastômero magneto reológico, baseando-se na teoria de Euler-Bernoulli. A razão entre largura e altura da seção transversal variou linearmente ao longo do comprimento da viga. Os efeitos do campo magnético aplicado e da velocidade de rotação da viga, além de outros parâmetros, sobre as frequências naturais e fatores de perda da viga foram estudados. Foi mostrado que o campo magnético aplicado exerce um efeito de enrijecimento da estrutura e gera um aumento no valor da frequência natural do sistema. De acordo com os autores, o fator de perda aumenta com o aumento do campo magnético até um valor máximo, a partir do qual começa a diminuir, e logo em seguida se satura, neste caso em um valor de 0,6 T. Assim sendo, um valor ótimo para o campo magnético pode ser previsto de modo a tornar o fator de perda máximo. Para um aumento no valor do campo magnético aplicado de 0 a 0,6 T, esses autores conseguiram um aumento no valor da frequência natural fundamental da viga em estudo de 16,9%.

Bornassi e Navazi (2018) e Bornassi *et al.* (2018) realizaram uma análise teórica da vibração torsional de uma viga rotativa cônica e de uma viga retangular com lâminas paralelas, respectivamente, com núcleos em elastômero magneto reológico. Um modelo analítico foi desenvolvido para a determinação aproximada da resposta dinâmica da viga ao efeito do campo magnético aplicado. Os resultados foram todos apresentados na forma gráfica, a partir dos quais observou-se, de uma maneira geral, que as frequências naturais para todos os modos de vibração aumentam com o aumento da velocidade de rotação da viga, ao passo que o fator de

perda diminui para o aumento na velocidade. A frequência natural da viga estudada também sofreu aumento com o aumento no valor do campo magnético aplicado.

Eloy *et al.* (2018) propuseram uma nova disposição de viga tipo sanduíche com núcleo colmeia preenchido por elastômero magneto reológico e lâminas em material compósito. Duas frações mássicas de partículas no elastômero foram analisadas, 30% e 60%, bem como colmeias em PLA e em ABS foram também estudados. A resposta dinâmica das vigas analisadas foi obtida por ensaios de vibração livre e também vibração forçada. Conseguiram-se reduções na frequência natural fundamental de até 37% para aplicação de um campo magnético de intensidade 100 kA/m e também reduções na amplitude de vibração no ensaio de vibração forçada de até 90% quando este mesmo campo foi aplicado.

Frente aos principais trabalhos relacionados ao tema desta Tese, ressalta-se a escassez de trabalhos envolvendo um núcleo em forma de colmeia (ou *honeycomb*) preenchido por material magneto reológico. Somente núcleos completamente ou parcialmente preenchidos por elastômeros ou fluidos magneto reológicos foram encontrados, em sua maioria. Outra característica notada foi a escassez de estruturas sanduíche com núcleo em elastômero magneto reológico fabricadas a partir de lâminas em material compósito, sendo que a maioria dos trabalhos encontrados utiliza lâminas feitas a partir de alumínio. Sendo assim, esta Tese tem o caráter inovador no que diz respeito ao desenvolvimento e análise, numérica e experimental, de uma nova disposição de perfis sanduíche com núcleo ativo, ou seja, esta Tese propõe uma nova classe de estruturas inteligentes tipo sanduíche.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

Nesta seção são apresentados os componentes utilizados na obtenção dos modelos de vigas sanduíche, bem como suas propriedades.

Para a fabricação do núcleo colmeia, foram utilizados dois materiais diferentes: o PLA (polímero constituído por moléculas de ácido láctico) e o ABS (acrilonitrila butadieno estireno). Conforme fornecido pelo fabricante, as propriedades do PLA e do ABS são, respectivamente: módulo de elasticidade de 4 GPa e 2,05 GPa, coeficiente de Poisson de 0,4 e 0,38, e massa específica de 1,4 g/cm³ e 1,2 g/cm³.

O elastômero utilizado para a preparação da mistura com o pó ferromagnético, e posterior preenchimento das células das colmeias, foi o silicone acético comercial, da marca AMAZONAS[®], de cor transparente. O pó ferromagnético usado como partícula, cujo fornecedor foi a Quebec Metal Powders[®], possui diâmetro de 30 µm, massa específica de 7,2 g/cm³, resistência à tração de 245 MPa e é composto de grafite e o pó ATOMET 1001, sintetizado a 1120°C por 30 minutos, conforme informações do fabricante. O pó ATOMET 1001 é constituído de carbono, oxigênio, enxofre, manganês e ferro.

As lâminas utilizadas neste trabalho foram fabricadas a partir de material compósito, sendo o reforço o tecido bidirecional de fibra de carbono e a matriz a resina epóxi da Huntsman, em sistema resina/endurecedor (Araudite LY 5052/ Aradur 5052).

O tecido de fibra de carbono apresenta fibras orientadas a 0° e a 90° . A direção da fibra orientada a 0° é chamada de urdume, ao passo que a direção da fibra a 90° é chamada de trama. O tecido utilizado como reforço para o compósito é produzido pela empresa SIGRATEx[®], modelo SKDL 8051, sendo fabricado com a fibra Grafil/Pyrofil TR50S, com 6000 filamentos por cabo de urdume e trama, ou seja, o número de fibras na direção do urdume é o mesmo na direção da trama. A Tabela 3.1 apresenta as propriedades deste tecido de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante, citado por Bortoluzzi (2017).

Tabela 3.1 – Propriedades do tecido de fibra de carbono.

Propriedade	Valor	Unidade
Massa Específica do Filamento	1,82	g/cm ³
Resistência à Tração	4,9	GPa
Módulo de Elasticidade	240	GPa
Gramatura do Tecido	300	g/m ²
Espessura	0,4	mm
Nº de Filamentos por Cabo	6000	-
Coefficiente de Poisson	0,27	-

A resina epóxi citada anteriormente foi escolhida por apresentar excelentes propriedades mecânicas após sua cura, além de ser indicada para processos de laminação manual e infusão a vácuo. A Tabela 3.2 fornece as propriedades referentes ao sistema epóxi Araldite LY 5052/ Aradur 5052, de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante, retiradas de Bortoluzzi (2017).

Tabela 3.2 – Propriedades da resina epóxi utilizada.

Propriedade	Valor	Unidade
Resistência à Tração	84-86	MPa
Módulo de Elasticidade	3000-3200	MPa
Massa Específica	1,14-1,17	g/cm ³
Coefficiente de Poisson	0,35	-

3.2 METODOLOGIA

A parte experimental do presente trabalho consta de duas etapas conforme apresentado no fluxograma da Figura 3.1. A Etapa I diz respeito à confecção dos modelos de viga sanduíche com lâminas em material compósito e núcleo colmeia preenchido por elastômero magneto reológico e a Etapa II refere-se à determinação experimental dos parâmetros modais dessas vigas, seguida pela análise numérica via Método dos Elementos Finitos.

Inicialmente escolhido o silicone, foi feita a mistura deste ao pó ferro magnético em duas frações mássicas diferentes, uma de 30% de partículas ferromagnéticas na matriz em silicone, e a outra, 60%. Após a mistura, foi verificada a homogeneidade na distribuição das partículas no silicone por meio de análises microscópicas da superfície de amostras de elastômero e pó ferromagnético. Estando a mistura adequada, partiu-se para o preenchimento das cavidades dos quatro núcleos colmeias com a mistura obtida inicialmente, ressaltando-se que o preenchimento foi feito com o silicone ainda no seu estado gel. Aguardou-se o tempo de cura do silicone e a seguir, iniciou-se a fabricação da viga sanduíche propriamente dita utilizando o processo de infusão de resina a vácuo – VARTM. Para isso, foi utilizada resina epóxi reforçada por tecido bidirecional de fibra de carbono nas lâminas, sendo que a própria resina epóxi das lâminas serviu como adesivo entre os mesmos e o núcleo colmeia. Finalizado o processo, aguardou-se o tempo de cura da resina epóxi e a bolsa de vácuo foi desmoldada. A partir da mesma infusão, foi obtida uma placa com as quatro vigas sanduíche, sendo necessário, portanto, o corte da placa para a retirada dos modelos de viga desenvolvidos. De maneira visual, foi analisada a distribuição de resina sobre as fibras, bem como a adesão entre as lâminas e o núcleo.

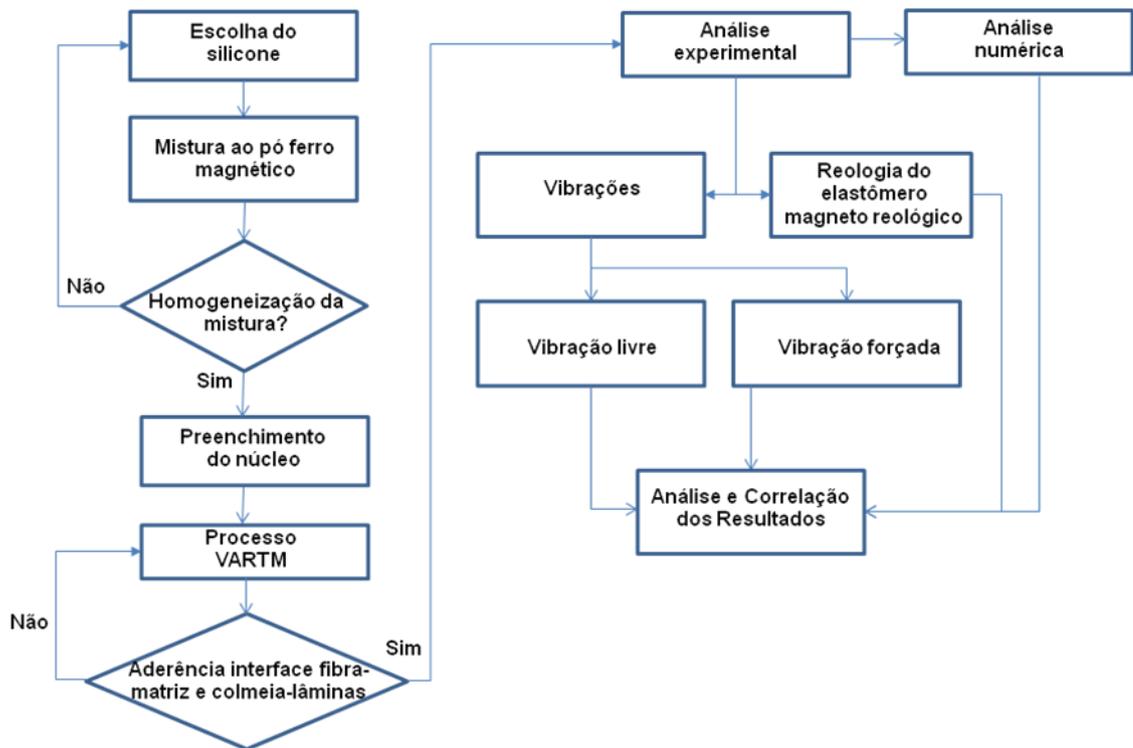


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas do trabalho.

Obtidos todos os corpos de prova a serem estudados, foi efetuada a análise experimental, a qual constou de ensaios de vibração livre e vibração forçada nos modelos de viga sanduíche, além da determinação das propriedades reológicas das amostras da mistura silicone e pó ferromagnético. Além da análise experimental, foi realizada também uma análise numérica via o Método dos Elementos Finitos, de modo a se confrontarem os resultados experimentais com os numéricos e a se determinarem os modos de vibração de cada disposição de viga sanduíche.

A seguir, ambas etapas são detalhadamente descritas, incluindo-se os processos utilizados, os materiais e os equipamentos envolvidos. Todos os dados técnicos dos equipamentos utilizados estão contidos no Apêndice B desta Tese.

3.2.1 CONFEÇÃO DOS MODELOS DE VIGA SANDUÍCHE

Inicialmente, é descrito o processo de confecção do núcleo colmeia preenchido por elastômero magneto reológico, e posteriormente a associação deste núcleo às lâminas em compósito laminado, de forma a constituir-se a viga tipo sanduíche.

A confecção dos modelos de viga ensaiados foi realizada no Núcleo de Tecnologia em Compósitos - NTC da UNIFEI.

As colmeias foram geradas em uma impressora 3D Ultimaker®. A escolha pela impressão 3D e pela utilização destes materiais é devida ao fato de ser um processo relativamente novo e muito promissor para as diferentes indústrias, além do fato de que estes dois materiais já vêm sendo amplamente utilizados em impressões 3D, o que favorece a continuidade de seu emprego, agora como materiais estruturais. A impressão em 3D consiste de um processo no qual se obtém um modelo ou um protótipo tridimensional, por meio da deposição sucessiva de camadas de material. Para sua utilização é necessário o desenho tridimensional prévio do objeto a ser fabricado. Comparada a outras técnicas de fabricação de componentes em três dimensões, a impressora 3D pode ser vista como uma técnica relativamente mais simples de ser utilizada. Na Figura 3.2, os dois núcleos da esquerda (em preto) são fabricados a partir do ABS, e os dois da direita (em azul), a partir do PLA.

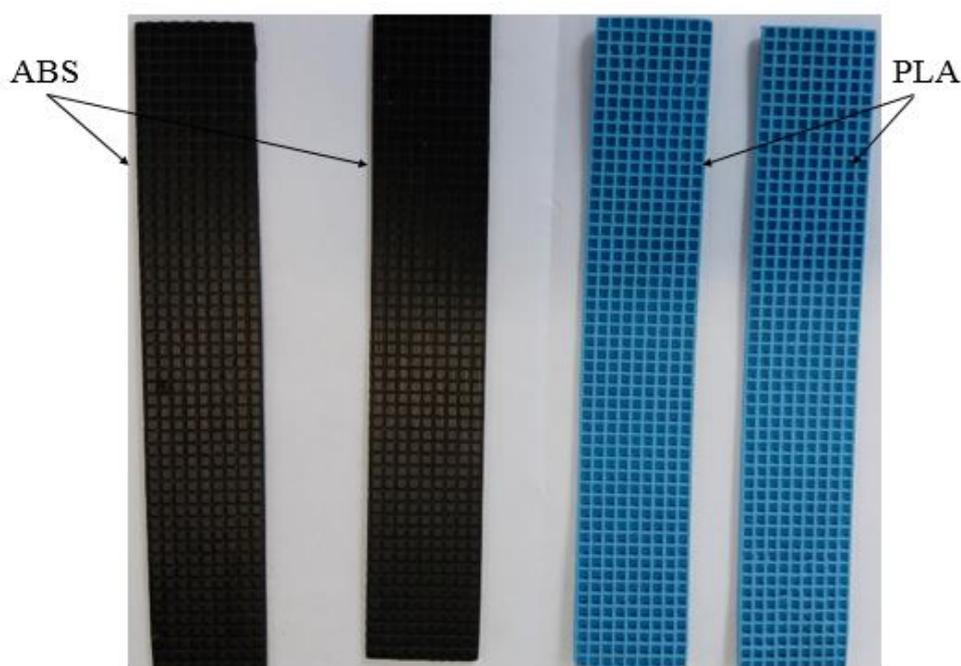


Figura 3.2 – Disposição do núcleo colmeia reticulado quadrado.

Foram utilizados dois núcleos de cada material, de modo que no final foram fabricadas quatro vigas tipo sanduíche. Para os dois núcleos de mesmo material, um foi preenchido com elastômero magneto reológico na fração mássica de 30% de pó ferromagnético sobre o elastômero de silicone, e o outro com 60%. Assim, obtiveram-se duas vigas, uma de PLA e outra de ABS, com núcleo contendo 30% de pó ferromagnético e outras duas, uma de PLA e outra de ABS, com 60% de pó ferromagnético com relação ao elastômero de silicone. As dimensões e massas dos núcleos tanto em PLA quanto em ABS estão presentes na Figura 3.3 e na Tabela 3.3 a seguir.

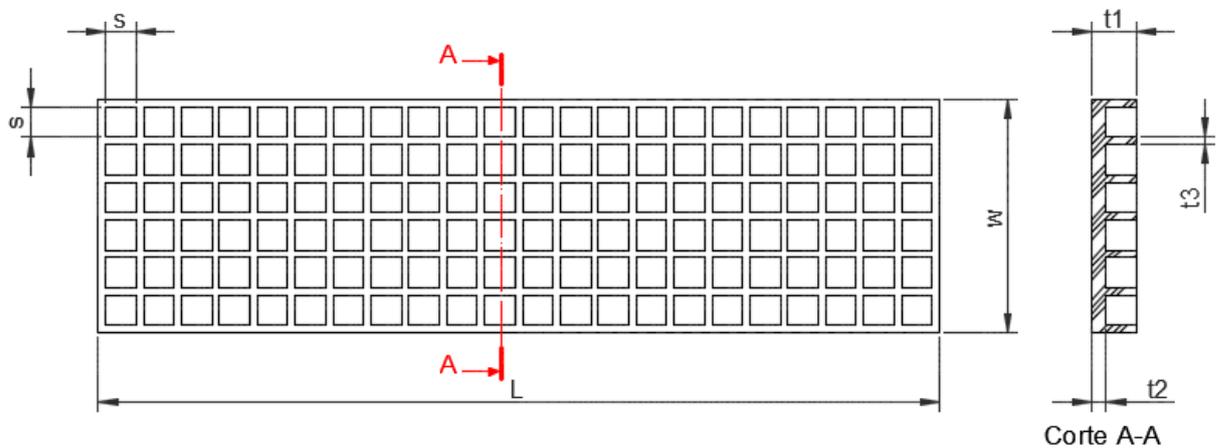


Figura 3.3 – Geometria do núcleo colmeia reticulado quadrado.

Tabela 3.3 – Propriedades dos núcleos colmeia.

Núcleo	Dimensão (mm)						Massa (g)
	L	s	w	t1	t2	t3	
PLA-1	198,40	3,10	34,82	2,15	0,21	0,55	8,08
PLA-2	198,40	3,10	34,88	2,22	0,21	0,55	8,25
ABS-1	198,40	3,10	34,95	1,73	0,17	0,59	5,84
ABS-2	198,40	3,10	34,77	1,73	0,17	0,59	5,97

Definidos os núcleos, o próximo passo foi a preparação do elastômero magneto reológico a preencher os núcleos colmeia.

A mistura do pó ferromagnético ao silicone foi feita de forma manual durante 6 minutos até a completa homogeneização da amostra, conforme ilustrado na Figura 3.4. Para facilitar a escrita, as amostras serão denominadas corpos de prova 1 e 2, aquelas com colmeia em PLA, e corpos de prova 3 e 4 aquelas com colmeia em ABS. Os corpos de prova 1 e 3 foram preenchidos com a mistura silicone/pó ferromagnético contendo 30% em massa de pó ferromagnético, e os corpos de prova 2 e 4 com 60%.

Feita a mistura, realizou-se então o preenchimento das cavidades do reticulado com o elastômero ferromagnético. O preenchimento também foi feito de forma manual com o auxílio de uma espátula metálica, de modo que o elastômero fosse bem prensado no interior das cavidades e de modo a expulsar a porosidade do interior do reticulado. A forma final do núcleo colmeia preenchido com o elastômero magneto reológico é ilustrada na Figura 3.5.

Após o preenchimento do núcleo, aguardou-se, à temperatura ambiente, o tempo de cura necessário do silicone, neste caso 24 horas.



Figura 3.4 – Mistura manual do pó ferromagnético ao silicone.

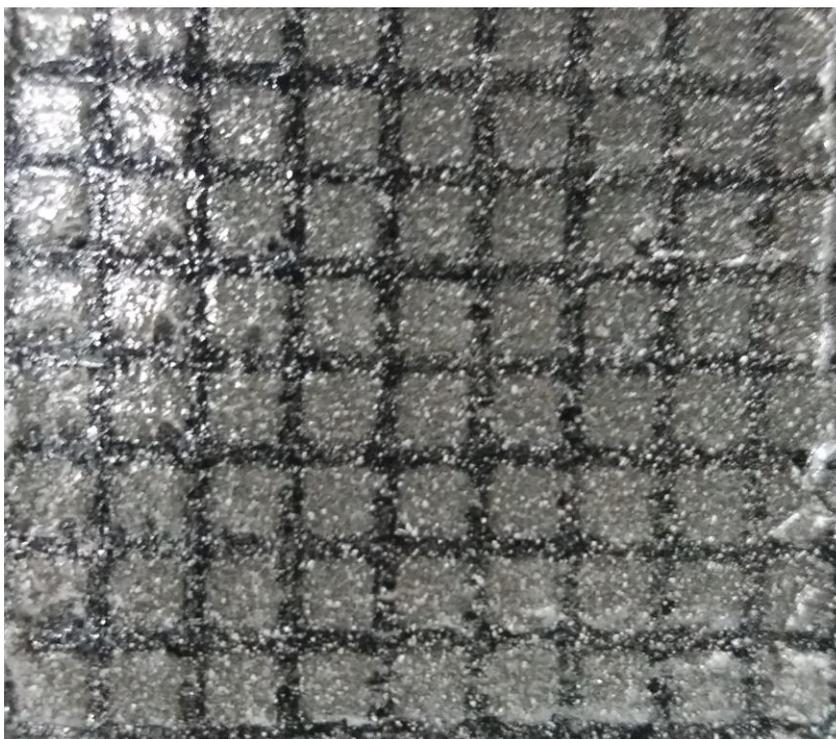


Figura 3.5 – Núcleo colmeia em ABS preenchido por elastômero magnetoreológico.

Decorrido o tempo necessário para a cura do silicone, a homogeneização da mistura pó de ferro e silicone foi averiguada por meio de micrografias utilizando-se um microscópio óptico da marca Olympus®, modelo BX41M, detalhado no Apêndice B ao fim desta Tese. Após a mistura manual, foram retiradas amostras, as mesmas a serem utilizadas no ensaio no reômetro, para a realização da microscopia óptica. Verificada a homogeneização da mistura pó de ferro/silicone, partiu-se para o próximo passo.

Inicialmente, com a ajuda de uma régua e um pincel marcador, foram desenhados no tecido de fibra de carbono dois retângulos de 35 cm de comprimento (no sentido do comprimento do rolo a 0°) por 30 cm de largura. Esses retângulos foram cortados com uma tesoura, tomando-se os devidos cuidados para que o corte fosse realizado na direção 0° das fibras do tecido. Em seguida, as lâminas em forma de retângulos cortados foram combinadas de modo a formar um sanduíche com o núcleo colmeia já fabricado. As lâminas foram colocadas de modo que a orientação de suas fibras fosse 0° com relação ao seu comprimento. Primeiramente, foi colocada uma lâmina do tecido, logo em seguida os núcleos colmeias e por fim, mais uma camada do tecido de fibra de carbono. Dessa forma, após a infusão da resina nas lâminas, a placa pôde ser cortada no sentido de seu comprimento, assim obtêm-se os modelos de viga tipo sanduíche. A disposição da montagem pode ser vista na Figura 3.6.

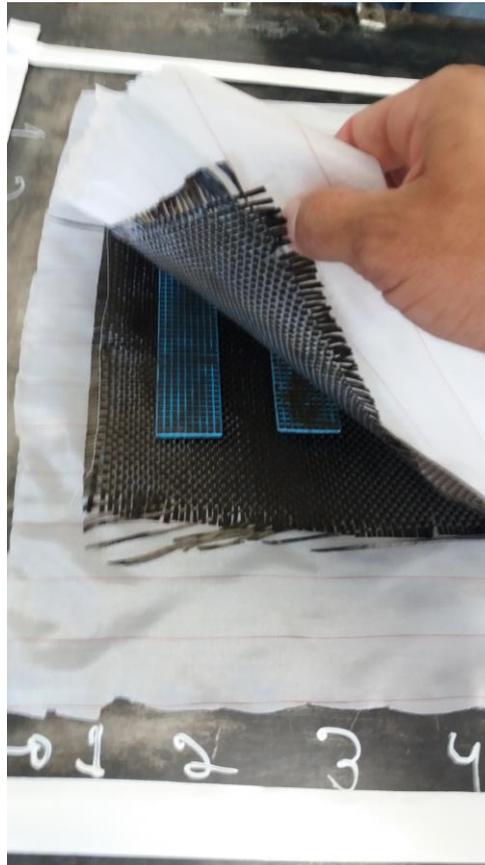


Figura 3.6 – Posicionamento dos núcleos colmeia entre as camadas de tecido de fibra de carbono.

Montado o esquema de laminação, parte-se para o procedimento de infusão da resina no tecido de fibra de vidro. Para isso foi utilizada a Moldagem por Transferência de Resina Assistida a Vácuo (VARTM), que consta de um processo onde a resina é transferida para o interior das fibras das lâminas por meio de um gradiente de pressão desenvolvido no interior de uma bolsa de vácuo, onde se encontra a pré-forma (ou conjunto fibras-núcleo), como mostrado na Figura 3.7. Tem-se a seguir o passo-a-passo do processo de infusão da resina via processo VARTM.

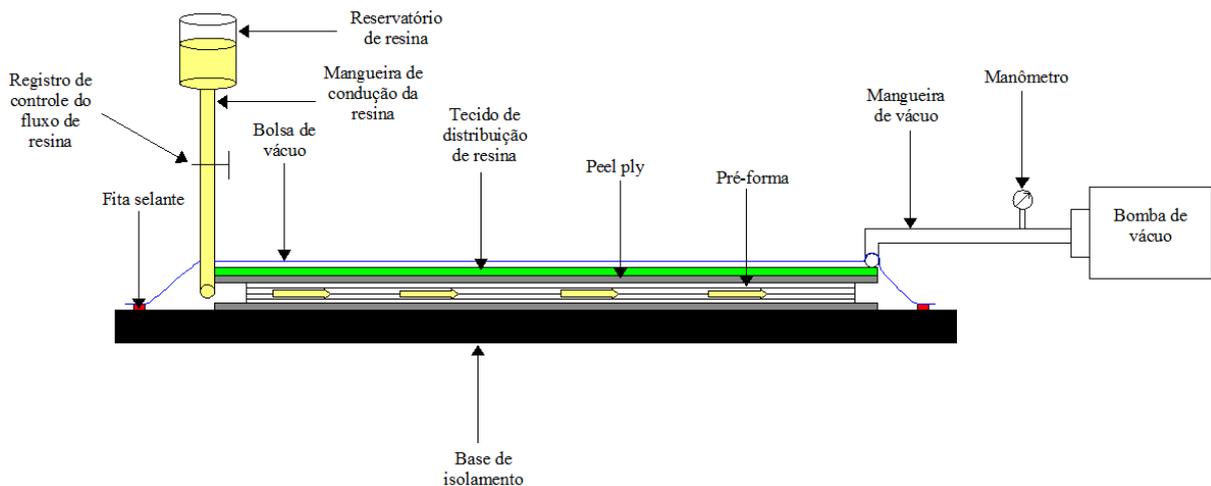


Figura 3.7 - Esquema do processo VARTM. Fonte: Eloy (2014).

Inicialmente, passou-se sobre o ferramental (ou base de isolamento), neste caso uma superfície metálica plana, um desmoldante (acetona), cuja função é facilitar a desmoldagem na retirada do laminado. Em seguida foi colocada uma camada de *peel ply*, que é um tecido fino e poroso responsável pelo bom acabamento superficial do material. Sobre a primeira camada de *peel ply*, foram colocadas as lâminas do tecido de fibra de carbono já com os núcleos colmeia envolvidos (pré-forma) na disposição desejada. Sobre a pré-forma, colocou-se novamente outra camada de *peel ply*, e sobre esta, uma rede de plástico (tecido de distribuição de resina), cuja função é facilitar e acelerar o movimento da resina sobre as fibras, diminuindo-se assim o tempo do processo. Após esse arranjo, foram colocados dois dutos em forma de espiral, nas extremidades da placa a ser laminada, sendo um duto responsável pela entrada e distribuição de resina no interior da bolsa de vácuo, e o outro, responsável pela sucção e consequente saída de excesso de resina. Em seguida, toda a montagem foi coberta por um plástico para a formação da bolsa de vácuo, de modo que esse plástico teve suas bordas vedadas por meio de um selante de bordas de marca 3M[®], que foi colocado entre o plástico e a base de isolamento.

Fechada a bolsa, o próximo passo foi conectar uma mangueira externa a um dos dutos e a um funil que iria conter a resina à pressão atmosférica. Outra mangueira foi conectada no outro duto e em uma bomba de vácuo, cujas especificações estão presentes do Apêndice B ao final desta Tese. Para a averiguação do correto fechamento da bolsa antes da infusão da resina, ligou-se a bomba e retirou-se todo o ar de dentro da bolsa, e foi procurada qualquer possível entrada de ar na mesma.

Logo após, a resina foi preparada, sendo misturados 100 gramas de Araudite LY 5052 com 38 gramas de Aradur 5052, tal como indicado pelo fabricante (100 partes em peso de resina para 38 de endurecedor). A quantidade necessária dessas duas partes é uma função da área ou do peso do reforço e do volume de fibras desejado, de acordo com o recomendado pelo fabricante. Os componentes da resina foram misturados por 5 minutos com o auxílio de um misturador elétrico (Figura 3.8), com uma rotação de 540 rpm, até a completa homogeneização da mistura. Nenhum resultado referente à viscosidade da resina foi determinado neste trabalho.



Figura 3.8 – Homogeneização da mistura resina/catalisador.

Após toda a preparação, partiu-se finalmente para a infusão da resina, a qual foi colocada em um funil suspenso e conectado a uma mangueira com uma válvula para o controle de seu fluxo. Assim, a partir do momento em que a bomba de vácuo foi ligada, devido ao gradiente de pressão a resina começou a ser movimentada sobre a pré-forma. O tempo total da infusão foi de aproximadamente 15 minutos. As fotografias mostradas nas Figuras 3.9 a 3.11 ilustram as etapas do processo. A Figura 3.9 mostra a bolsa de vácuo montada, ao passo que as Figuras 3.10 e 3.11 ilustram a movimentação da resina sobre a pré-forma no início e no fim do processo. Todo o processo de infusão da resina foi feito à temperatura ambiente.

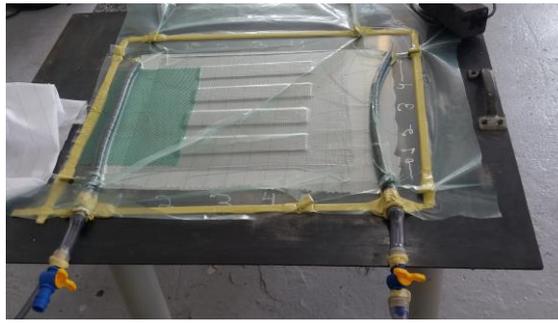


Figura 3.9 – Bolsa de vácuo montada.

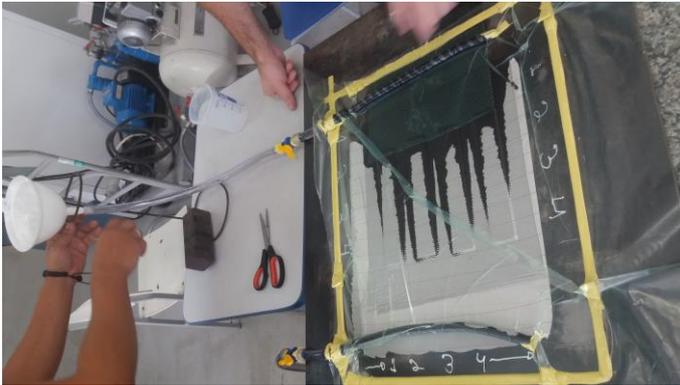


Figura 3.10 – Início do processo de infusão da resina sobre as lâminas.



Figura 3.11 – Etapa final do processo de infusão da resina sobre as lâminas.

Após o término do processo de infusão da resina sobre as lâminas, aguardaram-se as 24 horas necessárias à cura completa da resina epóxi à temperatura ambiente. Decorrido este tempo, a bolsa de vácuo foi desmoldada. Sobre a placa obtida, por meio de marcadores, marcaram-se as dimensões dos corpos de prova a serem retirados. Como ilustrado na Figura 3.12. Os modelos de viga sanduíche foram então obtidos pelo corte nos traços marcados sobre a placa laminada. Desta forma, obtiveram-se então os quatro corpos de prova a serem estudados neste trabalho.

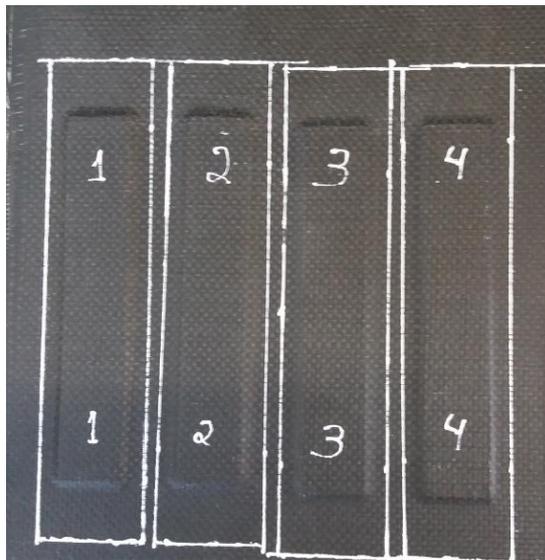


Figura 3.12 – Marcação dos corpos de prova a serem retirados da placa laminada.

Após o corte da placa, as vigas sanduíche possuem as dimensões mostradas na Figura 3.13 e Tabela 3.4 abaixo.

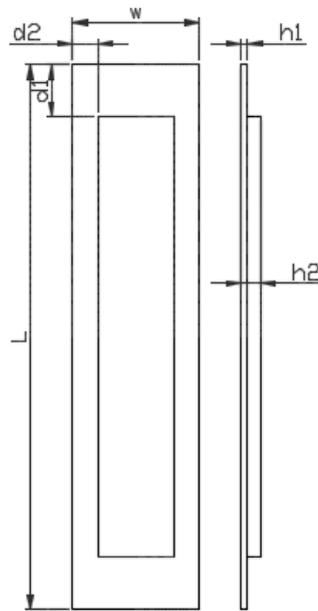


Figura 3.13 – Geometria das vigas sanduíche finais.

Notam-se nas figuras 3.12 e 3.13 que existe uma borda ou uma margem além da largura e do comprimento do núcleo colmeia. Esta borda extra foi deixada como uma margem de segurança contra a delaminação das lâminas quando as vigas estiverem carregadas estática ou dinamicamente. Na Figura 3.13, w é a largura, L o comprimento, h_2 a espessura maior (junto ao núcleo) e h_1 a espessura menor (junto às bordas) das vigas sanduíche. d_1 é a distância, ao longo do comprimento, da extremidade do núcleo colmeia à extremidade da viga sanduíche, ao passo que d_2 é a distância ao longo da largura, desde a lateral do núcleo colmeia à lateral da viga sanduíche.

Tabela 3.4 – Propriedades das vigas sanduíche finais.

Viga sanduíche	Dimensão (mm)						Massa (g)
	L	w	h1	h2	d1	d2	
Amostra 1(PLA-30%)	259,50	57,20	0,73	3,03	30,55	11,19	36,34
Amostra 2 (PLA-60%)	259,45	57,00	0,69	3,12	30,53	11,06	42,92
Amostra 3 (ABS-30%)	259,70	57,38	0,71	2,60	30,65	11,22	30,33
Amostra 4 (ABS-60%)	259,28	57,20	0,76	2,55	30,44	11,22	33,28

A Tabela 3.5 apresenta os valores das massas de cada componente presente em cada uma das vigas tipo sanduíche obtidas.

Tabela 3.5 – Massas dos componentes presentes em cada viga sanduíche.

Amostra	Massa de compósito (lâminas) (g)	Massa das colmeias vazias(g)	Massa de silicone puro (g)	Massa de pó ferro-magnético (g)	Massa total (g)
Amostra 1 (PLA-30%)	13,4974	8,08	10,3338	4,4288	36,34
Amostra 2 (PLA-60%)	13,4476	8,25	8,4890	12,7334	42,92
Amostra 3 (ABS-30%)	13,5503	5,84	7,6578	3,2819	30,33
Amostra 4 (ABS-60%)	13,5026	5,97	5,5230	8,2844	33,28

Os núcleos em PLA apresentaram espessura maior do que os de ABS, assim sendo a massa de elastômero magneto reológico acomodada por eles foi maior. Ao fim do processo de impressão 3D dos núcleos, foi necessário lixarem-se os materiais de modo a se obter um bom acabamento superficial, devido a isso, não foi possível a obtenção das mesmas dimensões em todos os núcleos colmeia.

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Primeiramente foram determinados os valores das massas específicas dos elastômeros magneto reológicos e do material compósito utilizado nas lâminas. A determinação das massas específicas destes dois materiais foi feita por meio do Princípio de Arquimedes, de acordo com a Norma ASTM D792. Foram retiradas três amostras retangulares da placa obtida no processo VARTM, de regiões da placa contendo somente material compósito, e duas amostras do elastômero com 30% em massa de partículas ferromagnéticas e duas com 60 % em massa de partículas. Ao fim, os valores finais apresentados ao longo do trabalho foram obtidos pela

média aritmética dos valores obtidos para a massa específica de cada material em cada formulação específica. De acordo com o Princípio de Arquimedes, todo corpo submerso parcialmente ou totalmente em um líquido está sujeito à ação de uma força vertical de baixo para cima chamada empuxo (E), de intensidade igual ao peso do líquido deslocado. As Equações de (3.1) a (3.6) descrevem a determinação da massa específica das amostras imersas no líquido, neste caso, a água, sendo m_L a massa do líquido deslocado, g a aceleração da gravidade, ρ_L a massa específica do líquido, V_L o volume do líquido deslocado, V_C o volume do corpo imerso, m_C a massa do corpo e ρ_C a massa específica do corpo.

$$E = m_L g \quad (3.1)$$

ou

$$E = \rho_L V_L g \quad (3.2)$$

Considerando-se que o volume do líquido deslocado seja igual ao volume do corpo:

$$V_C = V_L = V \quad (3.3)$$

Como:

$$V = \frac{m_C}{\rho_C} \quad (3.4)$$

Substituindo (3.4) em (3.2):

$$E = \rho_L \frac{m_C}{\rho_C} g \quad (3.5)$$

Igualando-se (3.5) a (3.1):

$$\rho_c = \rho_L \frac{m_c}{m_c} \quad (3.6)$$

Desta forma, a partir da Equação (3.6) torna-se possível a obtenção da massa específica das amostras. Após a obtenção e caracterização dos modelos de viga sanduíche, partiu-se para os ensaios de vibração livre e vibração forçada dos corpos de prova.

3.2.3 REOLOGIA DO ELASTÔMERO MAGNETO REOLÓGICO

Com o avanço da tecnologia dos materiais, atualmente os polímeros encontram posição notável e grande emprego nos diversos segmentos das diferentes indústrias, uma vez que suas propriedades podem ser adaptadas aos diferentes campos de aplicação. Alguns polímeros podem possuir ductilidade elevada, bem como maciez e flexibilidade, como é o caso do elastômero, ao passo que outros polímeros podem ser frágeis e rígidos, como o acrílico por exemplo. Nota-se assim, a importância de se caracterizar os materiais poliméricos, bem como conhecer o seu comportamento quando submetidos a diversos tipos de carregamentos. No escopo desta Tese, torna-se importante o conhecimento das propriedades reológicas do elastômero magneto reológico constituído por silicone comercial e por partículas ferromagnéticas quando em deformação sob a aplicação de campos magnéticos.

Neste subcapítulo, são descritos os ensaios de amostras do elastômero magneto reológico em um Reômetro ANTON PAAR PHYSICA MCR-301 equipado com uma cela magnética MRD-180/ 1T (Physica Anton Paar, Alemanha) apresentado na Figura 3.14 e descrito no Apêndice B. Quando se acopla a cela magnética ao Reômetro, torna-se possível a aplicação de um campo magnético no interior da cela, que é onde se encontra a amostra a ser ensaiada. Em um Reômetro, a determinação das propriedades reológicas é feita acomodando-se a amostra entre duas superfícies. Impõe-se à amostra um esforço cisalhante, o qual é gerado pela oscilação da superfície superior com relação à inferior. A superfície superior pode ser tanto paralela à inferior (disposição placa-placa), quanto possuir a forma cônica (disposição cone-placa). Optou-se por utilizar neste trabalho a disposição placa-placa (ou “*plate-plate*”), uma vez que é esta a configuração apropriada para situações nas quais os materiais possuam uma ampla faixa de viscosidade, como é o caso dos materiais visco elásticos. As amostras ensaiadas, apresentadas na Figura 3.15 possuem diâmetro de 18 mm e espessura de 1,35 mm. As

amostras da Figura 3.15 são as mesmas utilizadas para a análise microscópica com o intuito de se determinar a homogeneização da mistura pó de ferro e silicone, descrita anteriormente. As placas utilizadas no Reômetro possuem diâmetro de 20 mm, e a distância (*gap*) utilizada entre elas no ensaio foi de 1,15 mm. Nota-se que o *gap* é menor do que a espessura das amostras. Esse valor foi necessário para se evitar o escorregamento e a consequente acomodação da amostra no interior das placas, o que geraria resultados inconsistentes.

Foram analisadas as amostras do elastômero com 30% e com 60% em massa de partículas ferromagnéticas, sob deformação aplicada.



Figura 3.14 – Reômetro utilizado: à esquerda na ausência de campo magnético e à direita, com a cela magnética acoplada.

No Reômetro com cela magnética, o campo magnético é aplicado por meio da alteração nos valores de corrente elétrica. Conforme mostrado na Figura 3.14, com o auxílio do *Gaussmeter* foi possível a determinação do valor do campo magnético aplicado no interior da cela magnética junto à amostra a ser ensaiada, à medida que a corrente elétrica ia sendo alterada. Neste trabalho, os módulos de armazenamento e de perda foram medidos como uma função da deformação e também do campo magnético aplicado, o qual variou de zero a 592 kA/m, à temperatura ambiente.

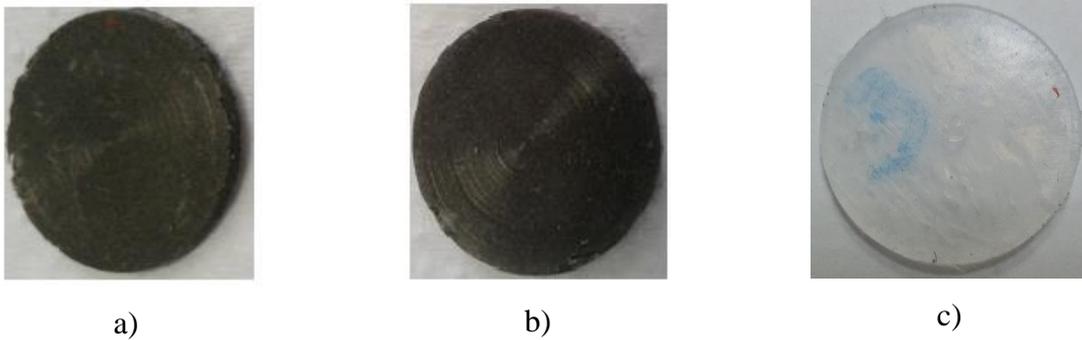


Figura 3.15 – Amostras ensaiadas no reômetro: a) Silicone contendo 30% em massa de partículas de ferro, b) Silicone contendo 60% em massa destas partículas e c) Silicone puro.

Estes ensaios objetivam o levantamento dos módulos de rigidez ao cisalhamento real e complexo em função da deformação e também do campo magnético aplicado. De acordo com Hu *et al.* (2011), nas disposições de viga sanduíche com núcleo em elastômero magneto reológico, estes elastômeros sofrem tensão e deformação de cisalhamento, presentes no regime elástico. A relação entre tensão e deformação baseada na teoria visco-elástica linear é dada pela seguinte Equação:

$$\tau = G^* \gamma \quad (3.7)$$

sendo τ a tensão cisalhante, γ a deformação causada pelo cisalhamento e G^* o módulo de cisalhamento complexo representado na forma da Equação (3.8).

$$G^* = G' + G''i \quad (3.8)$$

sendo G' o módulo de armazenamento e G'' o módulo de perda. O módulo de armazenamento é proporcional à energia média armazenada durante um ciclo de deformação por unidade de volume do elastômero magneto reológico. Já o módulo de perda é proporcional à energia dissipada por unidade de volume do elastômero magneto reológico em um ciclo (HU *et al.*, 2011). Assim, torna-se possível com este ensaio a análise da influência do campo magnético sobre os módulos acima citados.

3.2.4 ENSAIO DE VIBRAÇÕES

Os ensaios dinâmicos foram repartidos em duas etapas, sendo a primeira o ensaio de vibração livre, de modo a se obterem as frequências naturais e os fatores de amortecimento das vigas sanduíche para diversos valores de campo magnético, e a segunda sendo o ensaio de vibração forçada, com a finalidade de se avaliar o quão significativo se torna o campo magnético sobre a amplitude de vibração das vigas tipo sanduíche.

Os ensaios de vibração foram realizados no Laboratório de Vibrações Mecânicas do Instituto de Engenharia Mecânica - IEM da UNIFEI. Esta parte do experimento tem a finalidade de levantar experimentalmente as propriedades dinâmicas das vigas sanduíche com núcleo colmeia preenchido por elastômero magneto reológico a fim de se avaliarem os efeitos do campo magnético aplicado sobre as vigas e das porcentagens de partículas ferromagnéticas presentes nos núcleos sobre estas propriedades dinâmicas.

Foram analisadas as quatro vigas sanduíche, sendo duas com núcleo colmeia em PLA (destas, uma com 30% em massa de partículas ferromagnéticas e a outra com 60%) e outras duas com núcleo colmeia em ABS (da mesma forma, uma com 30% e a outra com 60% em massa de partículas ferromagnéticas).

3.2.4.1 Ensaio de vibração livre

Os ensaios em laboratório tiveram como objetivo a determinação das frequências naturais das vigas sanduíche com núcleo colmeia preenchido por elastômero ferromagnético, sob a influência de vários níveis de campo magnético aplicado externamente às vigas, uma vez que a determinação dessas frequências é de fundamental importância para o conhecimento do comportamento de uma estrutura quando solicitada dinamicamente.

Para a realização do ensaio, a condição de contorno utilizada foi a engastada-livre, onde a viga tem seus movimentos restritos em uma extremidade, por meio de seu engaste em um suporte que é muito bem fixado, elevando assim a rigidez no apoio da viga, a qual é colocada em oscilação mediante a aplicação de um impulso no plano perpendicular ao plano de fixação da viga, na altura de sua linha neutra. Todas as vigas foram engastadas a 18 mm da extremidade.

O impulso aplicado por meio de um martelo de impacto conectado à placa de aquisição de sinais, ou analisador de sinais (Figura 3.16), excita dinamicamente a viga. Assim a viga entra em movimento e o sinal deste movimento é captado pelo vibrômetro laser, posicionado no mesmo plano de aplicação da força impulsiva e transmitido à placa de aquisição de sinais. Optou-se por utilizar o vibrômetro laser devido ao fato de que o mesmo não entra em contato com o corpo de prova, não influenciando assim a massa e nem favorecendo a dissipação do campo magnético aplicado sobre a viga, o que poderia acontecer caso se optasse pela utilização de um acelerômetro, o qual deveria ser colado à superfície das vigas. Foi colocado na extremidade livre da viga, sob a incidência do laser, um pequeno pedaço de fita isolante, de modo que o laser pudesse capturar melhor o movimento da viga. A placa de aquisição de sinais é capaz de receber um número bastante grande de sinais do vibrômetro em curtos intervalos de tempo, permitindo a obtenção dos gráficos de espectro de frequência. Além disso, foi verificada a influência da posição de aplicação do campo magnético sobre a viga. Compararam-se as frequências naturais obtidas com o campo aplicado próximo à extremidade livre com aquelas obtidas quando o campo foi posicionado no centro das vigas.



Figura 3.16 – Martelo utilizado para excitar dinamicamente a viga e placa de aquisição de sinais.

Para a geração do campo magnético, foi utilizado um eletroímã, que consta de duas bobinas conectadas a uma fonte de tensão, por meio da qual se torna possível a alteração nos valores de corrente elétrica, alterando-se assim os valores das intensidades de campo magnéti-

co aplicado. As vigas foram posicionadas no vão livre entre os dois ferros do eletroímã, os quais possuem uma área de seção transversal $30 \times 30 \text{ mm}^2$. A distância “entre-ferros” utilizada foi de 30 mm. Com a ajuda de um *Gaussmeter*, antes da excitação da viga, aplicava-se o campo magnético na intensidade desejada por meio da variação da corrente elétrica na fonte de tensão, ao passo que o campo magnético ia sendo medido com a ponta do sensor do *Gaussmeter* em contato com a superfície da viga, captando-se assim o campo magnético direto sobre o material. Os ferros do eletroímã foram posicionados na extremidade livre do núcleo, e não na extremidade livre da viga como um todo, uma vez que o material magneto reológico encontra-se no interior de todo o núcleo, e a viga tem uma borda extra deixada para se evitar a delaminação, e nesta borda não se tem pó magneto reológico.

As Figuras 3.17 a 3.19 ilustram o aparato experimental utilizado, bem como alguns detalhes de montagem e utilização dos equipamentos. As especificações técnicas e mais fotografias de todos os equipamentos utilizados para o desenvolvimento desta Tese estão presentes no Apêndice B ao final desta Tese.

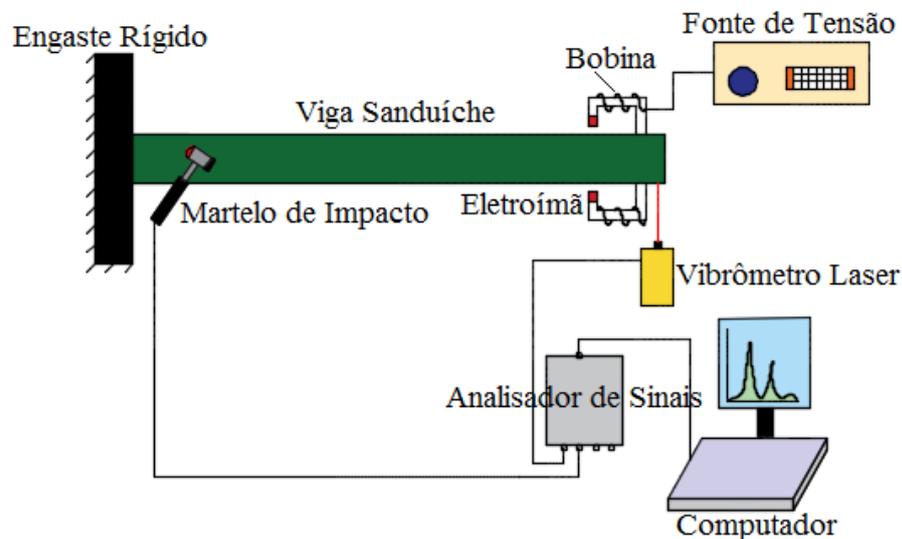


Figura 3.17 – Montagem dos equipamentos para o ensaio de vibração livre.

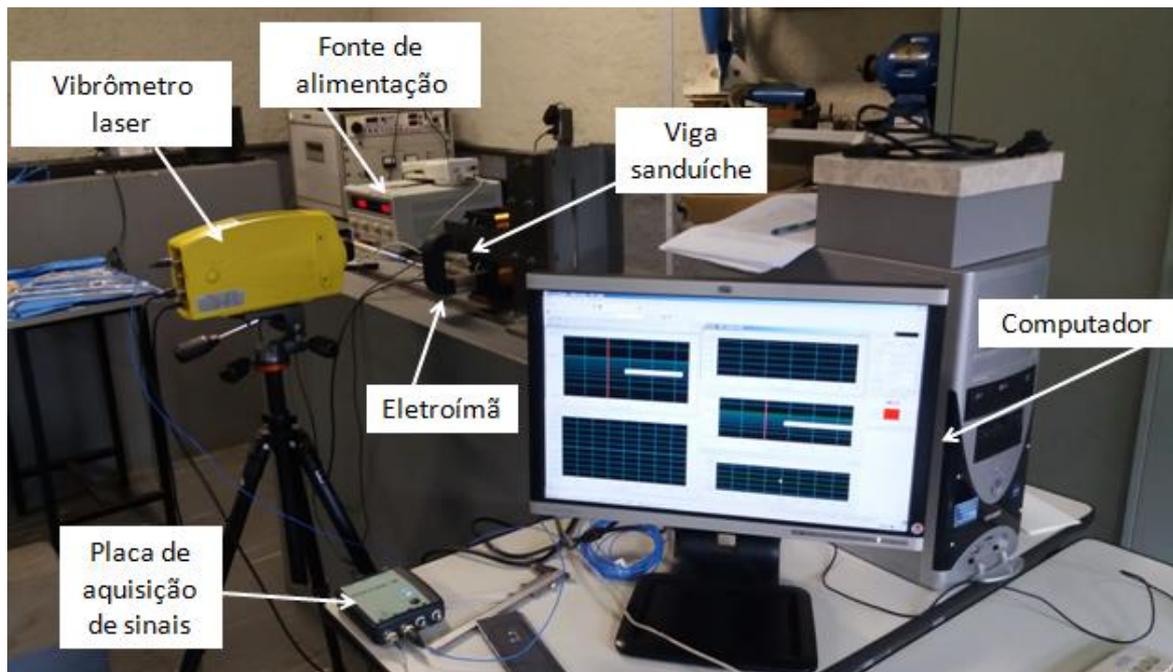


Figura 3.18 – Aparato experimental utilizado nos ensaios.

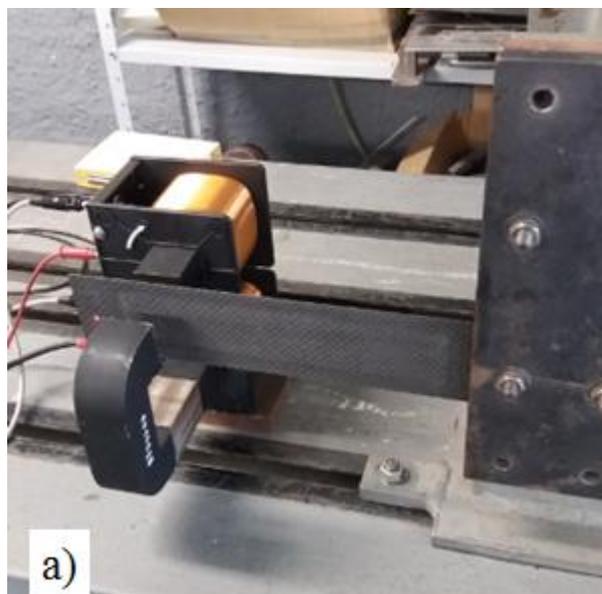


Figura 3.19 – a) Detalhe do posicionamento da viga sanduíche no entre-ferros do eletroímã. b) Incidência do laser sobre o corpo de prova.

Com relação à configuração do equipamento, os parâmetros de configuração do canal foram força = 21,08 mV/N (*input*) e velocidade = 8,00 mV/(mm/s) (*output*). *Trigger Source* foi *Analog Input*, o *Run Mode* foi *Auto Arm every frame*, os *Pre/Post Points* (-/+) foram -3(-1023, +65535), o *Pre/Post Trigger Time* foi -2,34 ms e os níveis em % e em V foram ambos 0. Para a análise, o número de *Lines* e *Points* foi, respectivamente, 12800 e 32768, enquanto a *Frequency* foi de 500 Hz e ΔT foi 781,3 μ s. O *Adopted Acquisition Time* foi 26 s e a *Resolution* de 0,015Hz/*point*.

Conhecidas as frequências naturais dos modelos de viga tipo sanduíche ensaiados, foi possível excitá-los dinamicamente em suas frequências de ressonância, conforme descrito a seguir.

3.2.4.2 Ensaio de vibração forçada

Os ensaios de vibração forçada tornam-se importantes no intuito de se mostrar o quão efetiva se torna a aplicação de um campo magnético sobre os modelos de viga tipo sanduíche desenvolvidas nesse trabalho, principalmente em uma condição de ressonância. O fenômeno da ressonância ocorre quando um corpo é excitado dinamicamente de modo a vibrar em uma de suas frequências naturais ou em uma frequência muito próximo delas. Este fenômeno faz com que o corpo ou a estrutura aumente a sua amplitude de vibração de maneira exagerada, o que pode levar ao seu colapso ou causar danos à estrutura.

O objetivo principal deste subcapítulo da Tese é o de induzir os modelos de viga sanduíche desenvolvidas neste trabalho a serem sujeitas à vibração nas suas frequências naturais fundamentais, ou seja, cada uma das quatro vigas será dinamicamente excitada na sua primeira frequência natural, uma vez que, como será visto no capítulo referente aos resultados, é esta a frequência ou o modo de vibração mais sensível à variação da intensidade do campo magnético aplicado.

Para a realização deste experimento, foi necessária a utilização de um *Shaker*, que é um equipamento capaz de induzir a vibração de um corpo a ele acoplado. *Shakers* geralmente são utilizados para ensaios de fadiga, análise modal e ensaios de vibração de uma maneira geral. Estes equipamentos são capazes de transmitir um impulso a um corpo por meio de várias funções, como por exemplo, funções senoidais ou dente de serra.

Neste ensaio, foram utilizados os seguintes equipamentos: *Shaker*, Gerador de funções, Amplificador, Analisador de sinais, Computador, Vibrômetro laser, Eletroímã e Fonte de Tensão. Primeiramente deve-se escolher, no Gerador de funções, o tipo de função que irá excitar dinamicamente a viga, neste caso foi utilizada uma função senoidal. O sinal emitido pelo Gerador de funções chega ao Amplificador, o qual irá amplificar o sinal elétrico recebido e o transmitirá ao *Shaker*, que por sua vez fará com que a viga vibre de acordo com a função senoidal de excitação. A viga é posicionada entre os ferros do eletroímã, ou seja, existe um vão livre de 30 mm dentro do qual a viga pode vibrar. Por meio do Amplificador, é possível controlar a amplitude de vibração da viga. A disposição dos equipamentos utilizados neste ensaio está ilustrada na Figura 3.20. Após vários testes, foi escolhida uma amplitude de vibração intermediária, uma vez que quando a amplitude máxima era escolhida, a viga ao vibrar encostava-se nos ferros do eletroímã e a eles ficava aderida, devido à atração do campo magnético. As frequências de excitação não foram as mesmas encontradas no ensaio de vibração livre, uma vez que o apoio utilizado neste último era totalmente rígido, e o engaste do *Shaker* permite uma pequena movimentação na direção perpendicular ao plano da viga. Movimentação esta responsável por fazer com que a viga entre em movimento.

Uma vez que a viga era engastada ao *Shaker*, determinava-se a sua primeira frequência natural nesta condição de apoio. Assim, a mesma era excitada a vibrar nesta frequência natural encontrada.

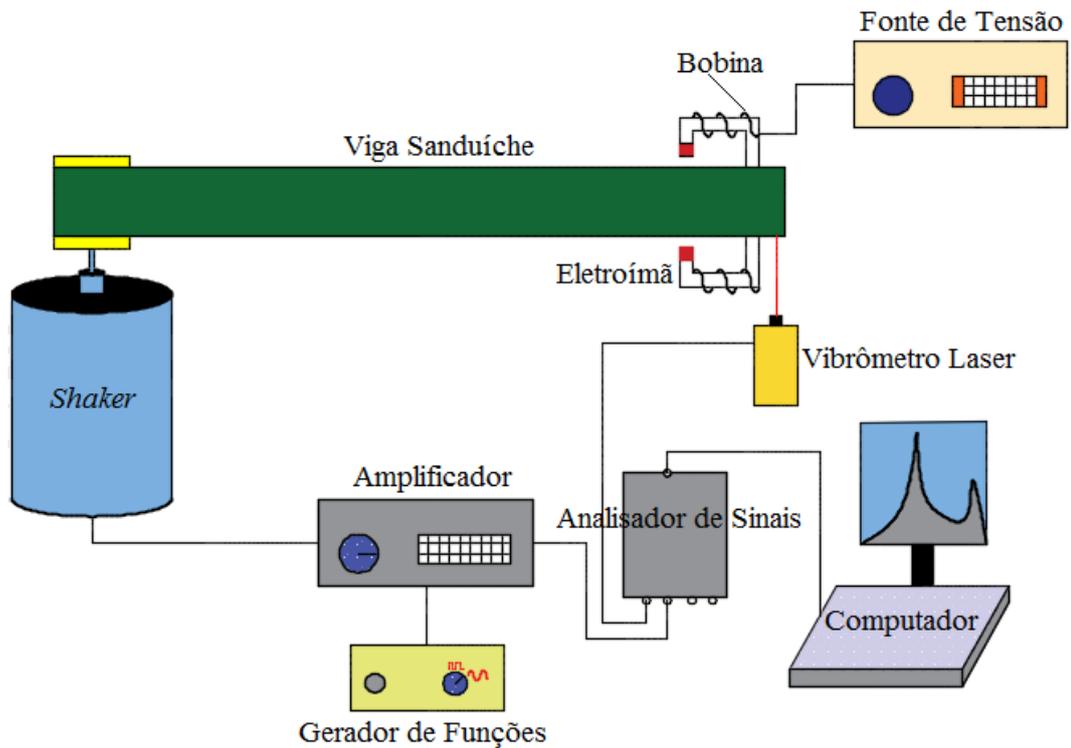


Figura 3.20 – Montagem dos equipamentos para o ensaio de vibração forçada.

Antes de se ligar o *Shaker*, calibrava-se a intensidade do campo magnético aplicado sobre a viga por meio do controle da corrente elétrica e da medição sobre a viga com o auxílio do *Guassmeter*. A velocidade de deslocamento de um ponto na superfície da viga em movimento era captada pelo Vibrômetro laser, o qual por sua vez era conectado ao Analisador de sinais, que finalmente envia os sinais recebidos ao computador. Ressalta-se aqui que as especificações dos equipamentos bem como as configurações utilizadas nos ensaios encontram-se no Apêndice B ao fim desta Tese. As fotografias presentes nas Figuras 3.21 e 3.22 mostram os equipamentos e seus detalhes de montagem no laboratório durante os ensaios.

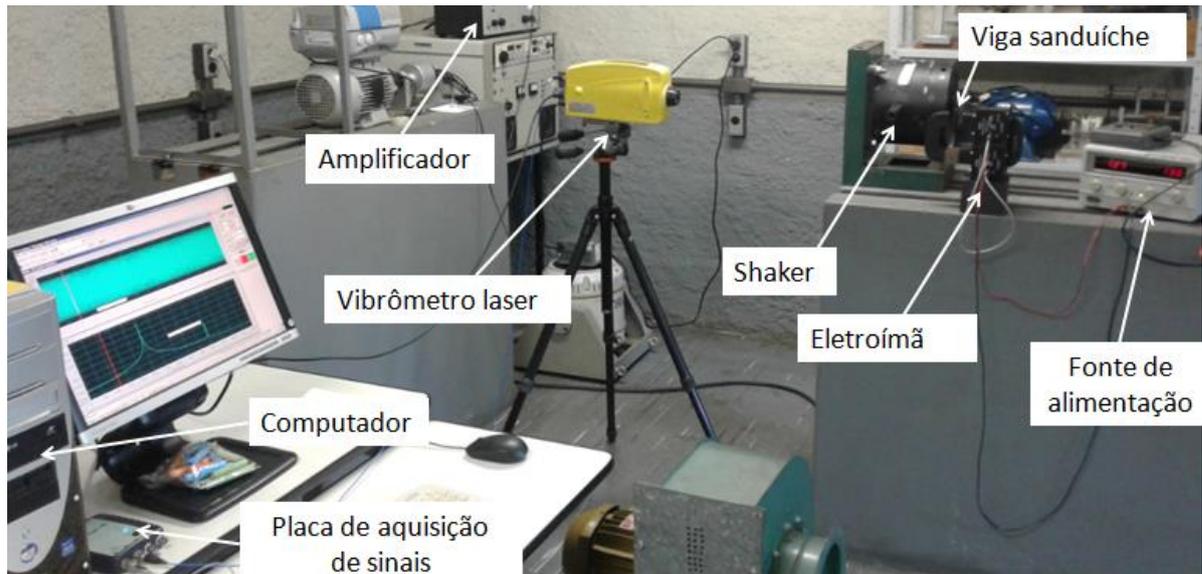


Figura 3.21 – Aparato experimental utilizado no ensaio de vibração forçada.

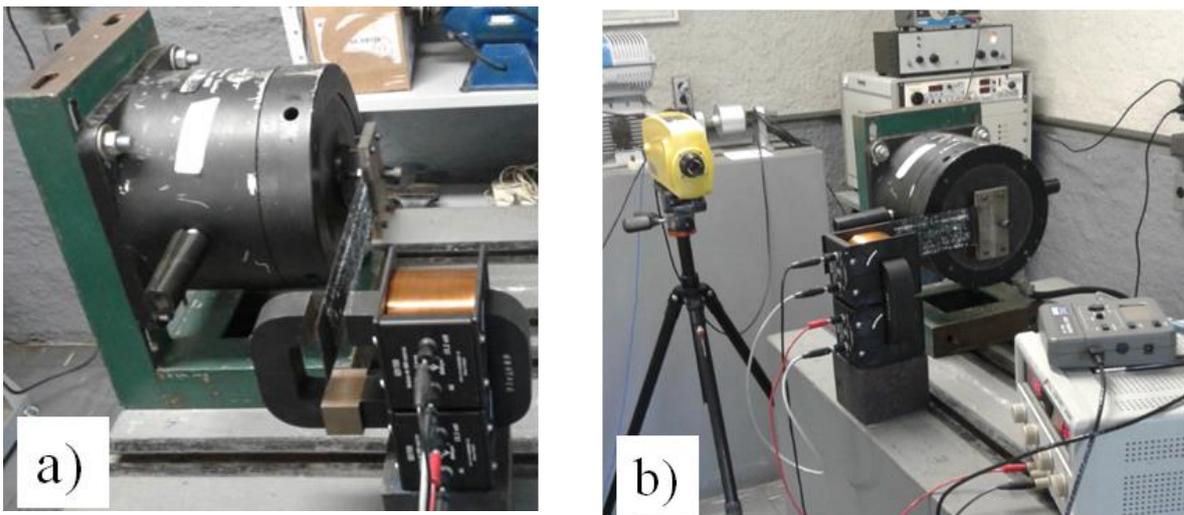


Figura 3.22 – a) Detalhe da viga engastada ao Shaker posicionada no “entre-ferro” do eletroímã. b) Posicionamento do vibrômetro laser.

3.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A simulação numérica via Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma forma para se obterem soluções aproximadas para os problemas de engenharia geralmente complexos, sendo estas soluções muitas das vezes de difícil determinação analiticamente. O MEF tem um de-

sempenho muito bom para resolver equações diferenciais parciais sobre domínios complexos que podem variar com o tempo. Este método surgiu em meados dos anos 50 como uma ferramenta analítica e teve seu desenvolvimento vertiginoso na década de 60 com a demanda do setor espacial. A sua aplicação é bastante ampla, podendo ser aplicado tanto na parte de cálculo estrutural (análises estáticas e dinâmicas) como também na área de fluidos e na área térmica (SILVEIRA E FRANCELLO, 2015; JUNQUEIRA, 2018).

Devido ao fato dos modelos de viga estudados nesta Tese apresentarem geometrias e combinações de materiais distintos, bem como a necessidade de utilização de parâmetros físicos relativamente complexos de serem estudados analiticamente, como, por exemplo, a aplicação de diferentes intensidades de campo magnético, optou-se por utilizar a simulação numérica via MEF com o objetivo principal de se determinarem os modos de vibração dos modelos de viga e suas frequências naturais, bem como a obtenção de um modelo numérico que seja capaz de prever o comportamento dinâmico destas vigas sob outras condições de contorno de acordo com a necessidade do projeto, como por exemplo outras condições de apoio, assim como outras intensidades de campo magnético aplicadas, as quais não foram capazes de serem alcançadas durante o procedimento experimental deste trabalho.

Alguns autores (AGUIB *et al.*, 2016; NAYAK *et al.*, 2014; NAYAK *et al.*, 2013; SAINSBURY e ZHANG, 1999; JHONSON e KIENHOLZ, 1982 e SAINSBURY e EWINS, 1974) adotaram o elemento de viga padrão (*standard beam element*) com dois nós de extremidade com quatro graus de liberdade em cada nó para a modelagem de vigas sanduíche com núcleo em elastômero magneto reológico. Neste estudo, as diferentes partes constituintes do painel sanduíche com núcleo colmeia contendo o elastômero magneto reológico foram considerados no modelo. Os núcleos colmeia foram modelados de acordo com as dimensões e propriedades contidas nas Tabelas de 3.1 a 3.7. Para as simulações, dois aplicativos computacionais comerciais foram utilizados. No ANSYS Multiphysics® criou-se um modelo simplificado do núcleo magneto reológico, sobre o qual simulou-se a aplicação do campo magnético, com o intuito de se determinar qual o valor da força magnética correspondente ao campo aplicado. De posse do valor da força magnética aplicada, fez-se a análise dinâmica dos modelos de viga sanduíche sob a força magnética no aplicativo computacional da Altair, como será descrito em detalhes a seguir.

Inicialmente, o núcleo colmeia, juntamente ao elastômero magneto reológico foram desenvolvidos no aplicativo computacional comercial de *Computer Aided Design (CAD)* So-

lidWorks[®]. Uma vez criada a geometria inicial do núcleo, iniciou-se a etapa referente à criação da malha, ou seja, a discretização da geometria em vários elementos que servirão de base para a simulação numérica. A modelagem do núcleo foi feita utilizando-se elementos sólidos 3D (*solid elements*). A geometria desenvolvida no CAD foi importada no aplicativo computacional comercial Hypermesh[®], da Altair Hyperworks. O programa computacional Hypermesh[®] consiste de um programa para modelagem em elementos finitos que engloba desde a geração da malha, criação de propriedades e materiais, até a aplicação das condições de contorno da estrutura como por exemplo as restrições nos apoios. A biblioteca de elementos de malha e propriedades que foram utilizados no Hypermesh[®] provêm do OptiStruct[®], que é o aplicativo computacional que realiza o processamento das modelagens previamente criadas sob as condições de contorno impostas ao modelo (JUNQUEIRA, 2018). O elemento sólido 3D utilizado para a malha da colmeia foi o elemento HEXA, o qual possui oito nós, com três graus de liberdade por nó (translações ao longo de x , y e z). As Figuras 3.23 a) e b) ilustram o núcleo colmeia preenchido pelo elastômero magneto reológico com a malha já criada.

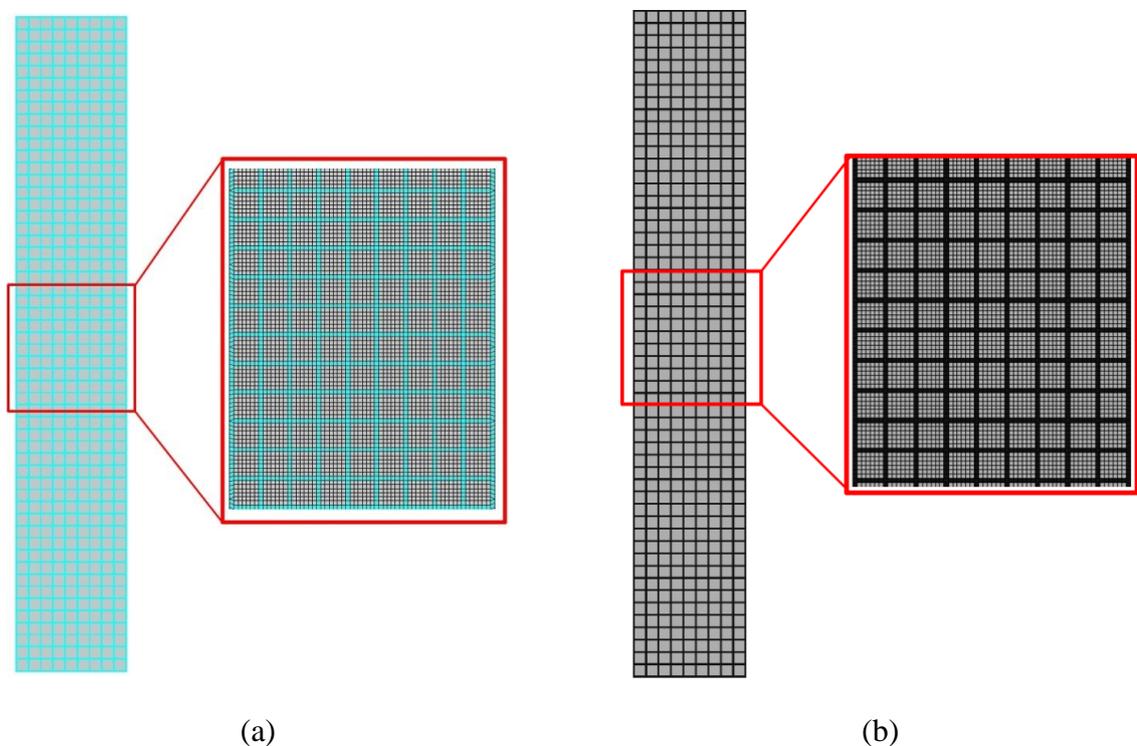


Figura 3.23 – Modelo 3D da viga sanduíche com colmeia preenchida por elastômero magneto reológico com a malha criada, com a colmeia em PLA-60% a) e em ABS-60% b).

Para a modelagem das lâminas, as camadas (*layers*) de fibra de carbono foram criadas como cascas (*shells*), assim, o procedimento de criação da malha pôde ser conduzido, porém utilizando-se na malha elementos 2D (QUAD4 *shell element*). Elementos de malha *Shell* suportam 6 graus de liberdade por nó, sendo eles: translação na direção x , y e z , e rotação em torno dos eixos x , y e z . Com relação à sua formulação, baseia-se na Teoria de Kirchoff, uma vez que a relação comprimento/espessura é maior do que 20, como recomendado por Reddy (2007). Este tipo de modelagem é amplamente utilizado na área de projetos envolvendo simulações numéricas, uma vez que garante bons resultados ao mesmo tempo em que requer baixo custo computacional (JUNQUEIRA, 2018). Para a inserção das propriedades da camada de material compósito, tomou-se como referências aquelas contidas na Tabela 3.7.

Devido ao tamanho das paredes das cavidades da colmeia ser muito pequeno, o tamanho máximo dos elementos (quadrados) permitido para a malha para todos os componentes da viga sanduíche tiveram dimensões de 0,55 mm. Aumentar o tamanho dos elementos da malha e encontrar a convergência de malha para o refinamento tornou-se de difícil realização, ao mesmo tempo que diminuir os elementos da malha para dimensões inferiores a 0,55 mm aumentaria significativamente o custo computacional. Para o tamanho de malha criado, cada uma das simulações levou cerca de cinco horas para serem finalizadas. Para a criação das *layers* referentes à resina epóxi/fibra de carbono, a espessura de 0,2 mm foi adotada. Uma maneira de se conectar elementos de malha 2D e elementos 3D pode ser por meio de elementos rígidos, porém esta técnica pode acarretar erros devido ao fato de elementos de casca 2D terem 6 graus de liberdade e elementos sólidos 3D terem somente 3. Assim, neste trabalho, o contato entre a camada de material compósito e o núcleo colmeia foi realizada por equivalência de nós, ou seja, os nós das malhas das lâminas e do núcleo foram perfeitamente alinhados. A equivalência de nós elimina os efeitos do atrito e torna este tipo de contato perfeitamente regular, conforme recomendado por Cui *et al.* (2008) e Aguib *et al.* (2016). Devido a isso, é que os elementos HEXA e QUAD4 foram utilizados, por serem, ambos, elementos quadrados. A Figura 3.24 ilustra a malha criada ao longo da espessura, bem como a conexão entre lâminas e núcleo colmeia.

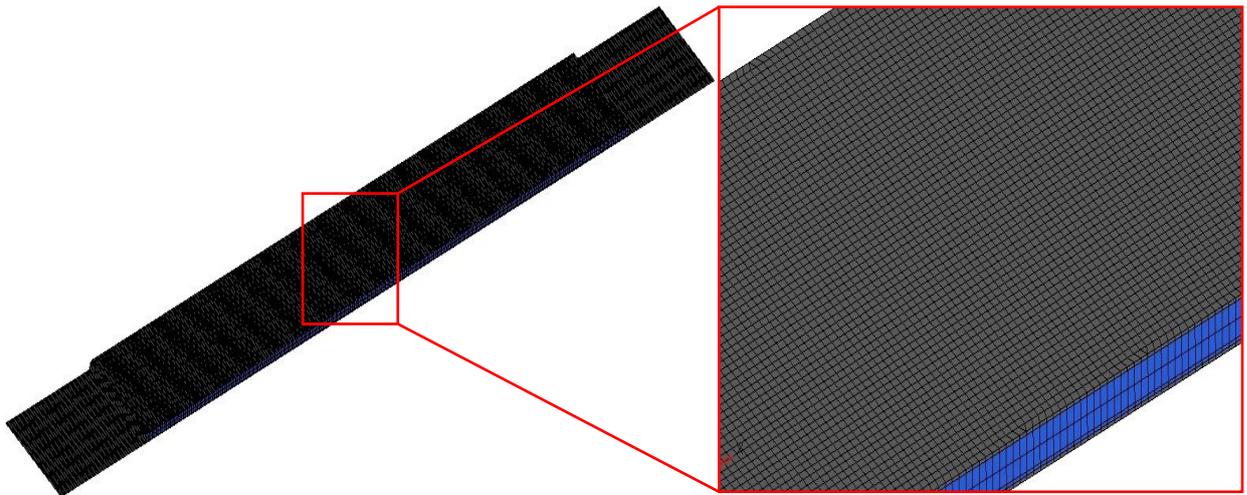


Figura 3.24 – Detalhe da malha ao longo da espessura da viga sanduíche com núcleo colmeia.

Após a criação da malha, as propriedades de todos os componentes foram aplicadas de acordo com os dados experimentais obtidos para os materiais componentes das vigas. O número de elementos para a modelagem de todos os componentes da viga foi de 137120 elementos na malha. No passo (*step*) de criação da condição de contorno, a restrição foi aplicada a uma extremidade da viga, enquanto que a outra permaneceu livre (viga em balanço). A inserção do engaste foi feita restringindo-se o movimento (todos os graus de liberdade restringidos) dos nós da malha naquela extremidade. Assim, a primeira simulação foi realizada para a obtenção das frequências naturais das vigas na ausência de campo magnético aplicado, simulando-se o ensaio de vibração livre. O *solver* utilizado foi o OptStruct[®], da Altair Hyperworks[®]. Para a simulação da vibração das vigas na incidência de intensidades de campo magnético aplicadas no aplicativo computacional da Altair, foi necessário o conhecimento da força gerada pelo campo magnético. Esta força, por sua vez, foi aplicada à viga, que teve seu comportamento dinâmico simulado sob esta força exercida.

Então, para a simulação do campo magnético aplicado sob a viga, com o intuito de se determinar a força gerada por este campo, utilizou-se a plataforma Multiphysics do aplicativo computacional comercial ANSYS[®]. Criou-se um modelo simplificado representativo do núcleo magneto reológico das vigas. O modelo foi desenvolvido em 2D, a fim de se reduzir o custo computacional, porém sem acarretar perdas nos resultados. O tipo de elemento utilizado no ANSYS[®] foi o PLANE13 quad 4, por ser adequado à superfície retangular, presente na biblioteca de vetor magnético do aplicativo computacional. PLANE13 é definido por 4 nós e tem uma capacidade magnética não linear para a modelagem de curvas de saturação, ou cur-

vas B-H (densidade de fluxo magnético – intensidade de campo magnético). A Figura 3.25 ilustra o modelo simplificado da viga entre os polos do eletroímã com a malha já criada.

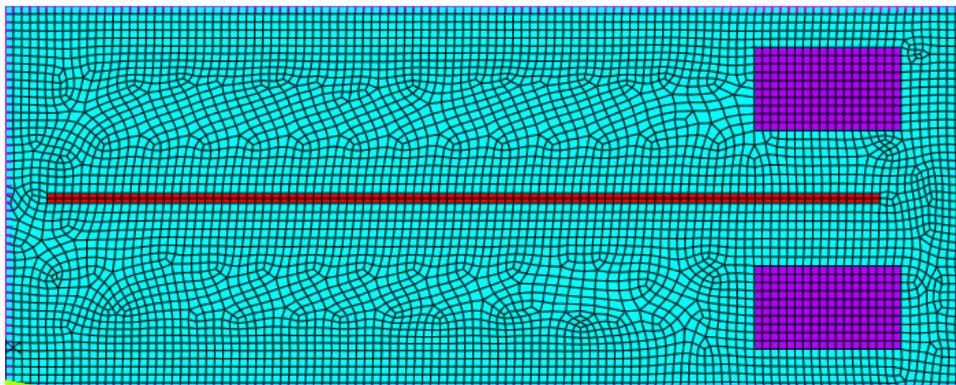


Figura 3.25 – Modelo simplificado da viga entre os ímãs com a malha criada.

Em alguns materiais, a saturação magnética é o estado alcançado quando um aumento na aplicação externa de um campo magnético H não pode aumentar a magnetização do material adicionalmente, de modo que o campo magnético total B limita-se (EDMINISTER, 1980). Para definir no aplicativo computacional os modelos de materiais eletromagnéticos, a constante de permeabilidade magnética do ar foi $\mu = 1$, a dos ímãs $\mu = 400$ e as propriedades do elastômero magneto reológico foram inseridas pela relação B-H aproximada mostrada na Figura 3.26, retirada de Lord Corporation (2008). Uma vez que a relação B-H do elastômero magneto reológico utilizado neste trabalho não é conhecida, optou-se então, na simulação numérica, por utilizar uma relação aproximada disponível na literatura, sendo a principal e mais citada a disponível pela Lord Corporation (2008).

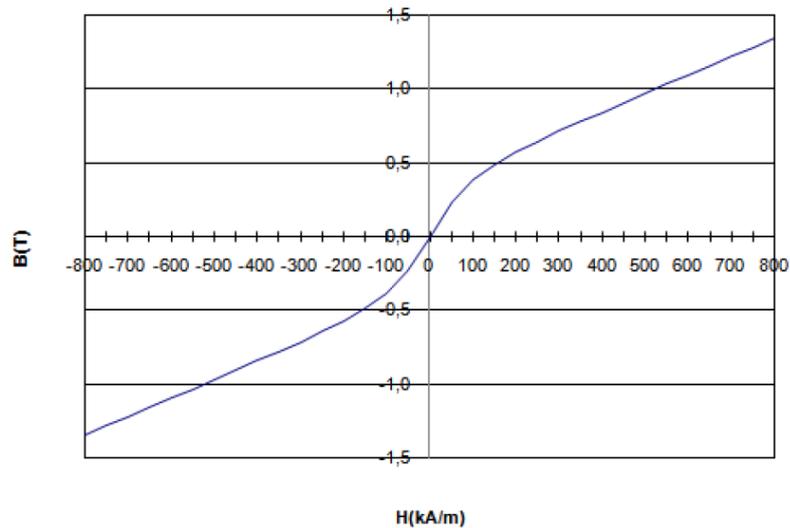


Figura 3.26 – Relação B-H aproximada para o elastômero magneto reológico utilizado nesta Tese. Fonte: Lord Corporation (2008).

Após a obtenção das forças magnéticas, um novo *step* foi realizado no aplicativo computacional Hypermesh[®] da Altair. A condição de contorno utilizada foi a mesma da simulação da vibração livre (viga em balanço), anteriormente descrita. Porém, as forças magnéticas encontradas no ANSYS[®] foram aplicadas em uma primeira simulação, na extremidade livre da viga, e em uma segunda, no centro da viga. Então, foi possível a condução da “simulação forçada” da vibração da viga, na incidência desta força obtida a partir da aplicação do campo magnético. Com isso, tornou-se possível a obtenção dos modos de vibração das vigas e de suas frequências naturais. As frequências naturais serviram para a validação do modelo numérico, e os modos de vibração para facilitar o entendimento do complexo comportamento dinâmico dos modelos de viga na incidência de campo magnético, como será visto e melhor descrito mais adiante nesta Tese.

Findada a descrição da metodologia utilizada neste trabalho, parte-se para a exposição dos resultados encontrados, bem como suas discussões no próximo Capítulo.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo deste capítulo é o de apresentar os resultados obtidos na análise microscópica e nos ensaios de vibração livre, vibração forçada, ajustes realizados para a determinação do fator de amortecimento, resultados obtidos no ensaio de cisalhamento utilizando-se o Reômetro e analisar o efeito da variação da intensidade do campo magnético, bem como a posição de sua aplicação, sobre os parâmetros obtidos por estes ensaios.

4.1 ANÁLISE MICROSCÓPICA ÓPTICA DE LUZ REFLETIDA DO ELASTÔMERO MAGNETO REOLÓGICO

Nesta seção são apresentadas as imagens obtidas na análise microscópica das amostras da mistura silicone e pó de ferro nas concentrações mássicas de 30 e 60% de partículas de ferro no elastômero. Para tal análise foi utilizado um microscópio óptico Olympus® BX41M-LED. O objetivo principal desta seção é o de avaliar se a dispersão das partículas ferromagnéticas na matriz de silicone feita manualmente foi bem-sucedida, verificando-se a possível existência de regiões contendo concentrações de partículas e possíveis regiões com ausência de partículas. As Figuras 4.1 e 4.2 mostram as micrografias para as amostras de silicone con-

tendo 30% e 60% em massa de partículas, respectivamente. Já a Figura 4.3 ilustra a micrografia para a amostra de silicone puro.

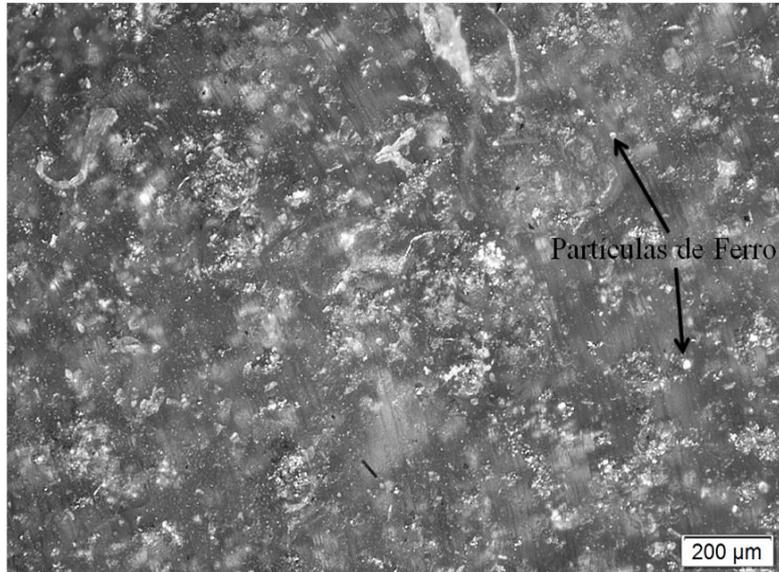


Figura 4.1 – Micrografia para a amostra contendo 30% em massa de partículas no silicone.
Aumento de 50x.

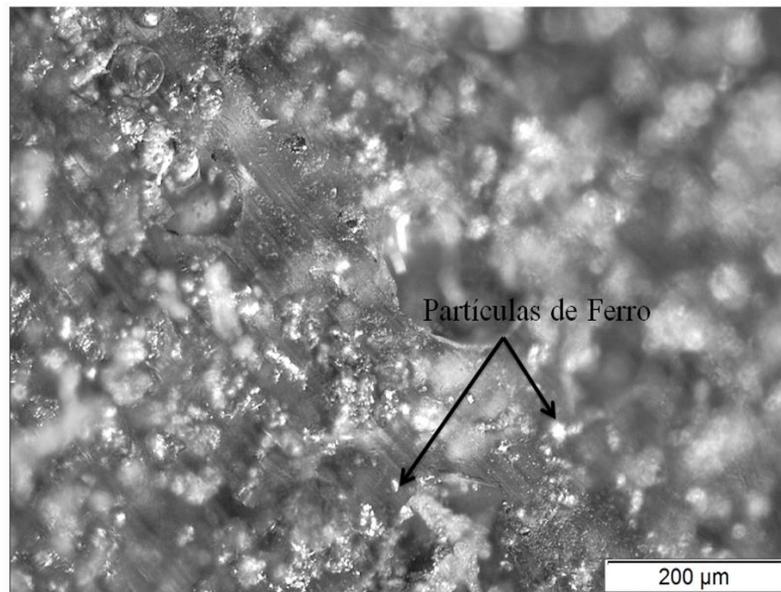


Figura 4.2 – Micrografia para a amostra contendo 60% em massa de partículas no silicone.
Aumento de 100x.

As Figuras de 4.1 a 4.3 mostram as imagens obtidas para a superfície das amostras. Não foram feitos cortes ao longo de suas espessuras para se verificar a homogeneidade de distribuição de partículas de ferro ao longo dessa direção, uma vez que essas amostras seriam utilizadas no ensaio de reologia. Tanto para a amostra contendo 30% em massa de partículas ferromagnéticas quanto para aquela contendo 60%, nota-se uma boa distribuição das partículas de ferro ao longo da superfície do elastômero, ou seja, as partículas foram bem dispersas e misturadas ao silicone durante o processo de mistura manual. Não se observaram aglomerados significativos de partículas magnéticas em uma mesma região da amostra, o que indica que provavelmente não houve também sedimentação de partículas ao longo da matriz.

A Figura 4.3 apresenta a microscopia para a amostra de silicone puro. Nesta figura notam-se a transparência da amostra, bem como alguns pontos de porosidade, inerentes ao processo da mistura.

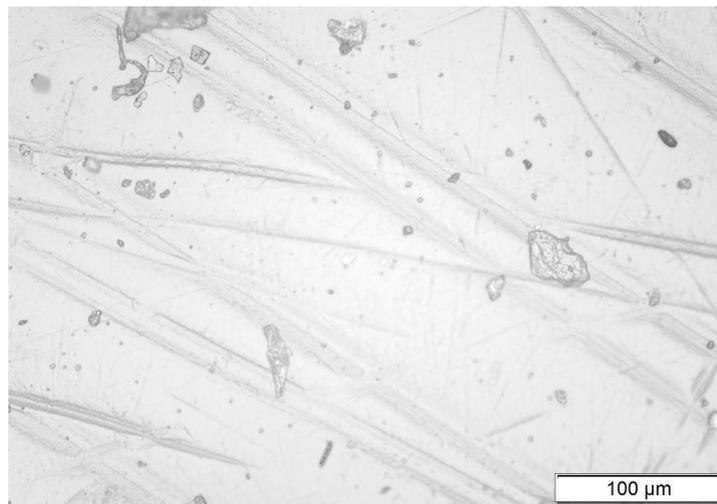


Figura 4.3 – Micrografia para a amostra de silicone puro na ausência de partículas de ferro.

Aumento de 200x.

Todas as três figuras apresentadas anteriormente contêm traços e riscos. Estas marcas são devidas ao acabamento superficial do molde no qual estas amostras foram colocadas durante o tempo necessário à cura completa do silicone.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS LÂMINAS EM MATERIAL COMPÓSITO

Para a determinação das propriedades do material compósito, por meio da Regra das Misturas, as características de cada componente foram dadas separadamente nas Tabelas 3.2 e 3.3. Com a finalidade de se obter a porcentagem em volume de fibras e de matriz presente no compósito desenvolvido, é necessário o conhecimento da porcentagem em peso de cada constituinte. Para isso foram retirados três corpos de prova da placa compósita, com dimensões conhecidas. Assim, calcularam-se as áreas de cada corpo de prova e uma vez que a gramatura do tecido de fibra de carbono é conhecida, conseguiu-se teoricamente o valor das frações em massa de cada componente no compósito final obtido.

Assim, a porcentagem em peso média do reforço foi de 65,99% e da matriz, 34,01%. Por meio da Regra das Misturas, apresentada anteriormente, as propriedades características do compósito utilizado como lâmina (*skin*) nos modelos de viga sanduíche presentes neste trabalho são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Propriedades do compósito utilizado como lâmina nas vigas sanduíche.

Propriedade	Unidade	Valor
Fração volumétrica de fibra (V_f)	%	56,53
Massa específica (ρ)	g/cm ³	1,4837
Módulo de elasticidade longitudinal (E_1)	GPa	49,00
Módulo de elasticidade transversal (E_2)	GPa	49,00
Módulo de cisalhamento no plano 1-2 (G_{12})	MPa	5,00
Coefficiente de Poisson no plano 1-2 (ν_{12})	-	0,09

4.3 CARCATERÍSTICAS E REOLOGIA DO ELASTÔMERO MAGNETO REOLÓGICO

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados obtidos ao se ensaiarem as amostras de elastômero magneto reológico. Os valores das massas específicas determinadas estão presentes na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Massas específicas dos elastômeros magneto reológicos.

Propriedade	Elastômero com 30% em massa de pó ferromagnético	Elastômero com 60% em massa de pó ferromagnético
Massa específica (g/cm ³)	1,3643	2,1858

Após os ensaios no Reômetro em modo oscilatório, os resultados presentes nos gráficos das Figuras 4.4 e 4.5 foram obtidos para os elastômeros com 30% e 60%, em massa de partículas ferromagnéticas, respectivamente, ao passo que o gráfico da Figura 4.6 mostra um comparativo entre os módulos de armazenamento e de perda para as amostras com 30% e 60% de partículas ferromagnéticas no elastômero e o silicone puro, a fim de se mostrar quão significativa foi a inserção das partículas ferromagnéticas na matriz de silicone. Foi ensaiada uma amostra para cada configuração. Nestas figuras são mostradas as relações entre os módulos de perda e de armazenamento do elastômero magneto reológico e a deformação causada pelo cisalhamento sob diferentes intensidades de campo magnético.

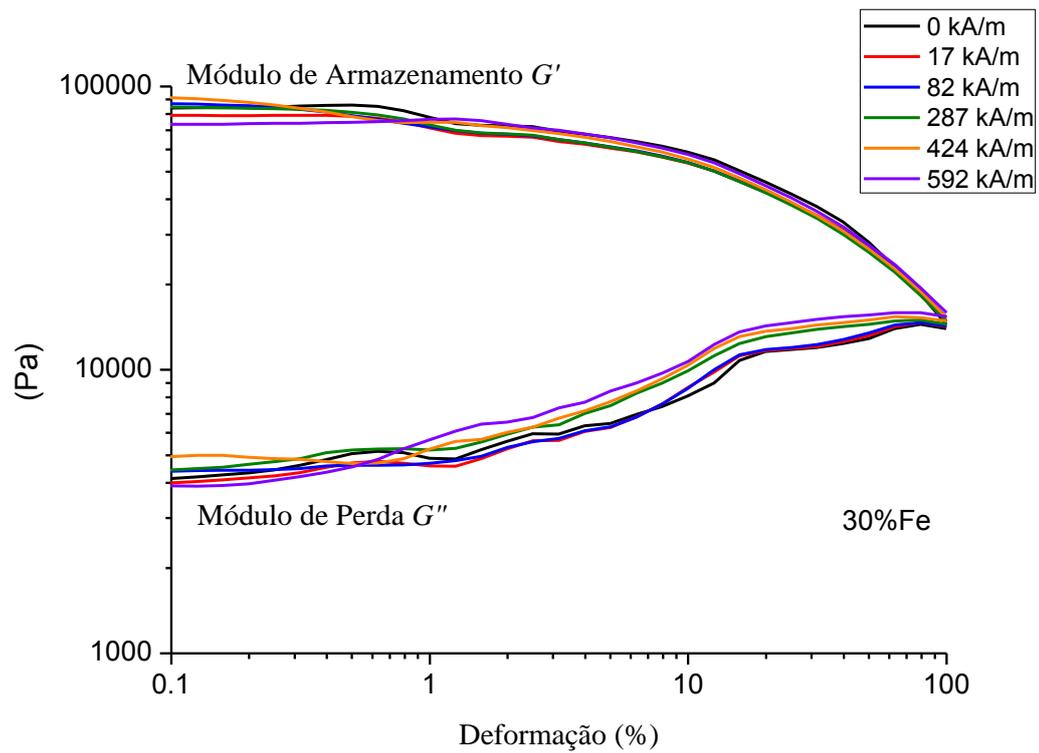


Figura 4.4 – Módulo de armazenamento e módulo de perda para o elastômero magneto reológico com 30% em massa de partículas ferromagnéticas.

Nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 a variação nos valores de intensidade de campo magnético foi de 0 kA/m a 592 kA/m. Esta variação foi alcançada variando-se os valores de corrente elétrica no Reômetro antes de cada ensaio. A partir do comportamento das curvas presentes nestas figuras, nota-se que o valor do limite da região viscoelástica linear do elastômero de silicone, tanto pura quanto contendo as frações mássicas de 30% e 60% de partículas ferromagnéticas, foi até aproximadamente 1% de deformação.

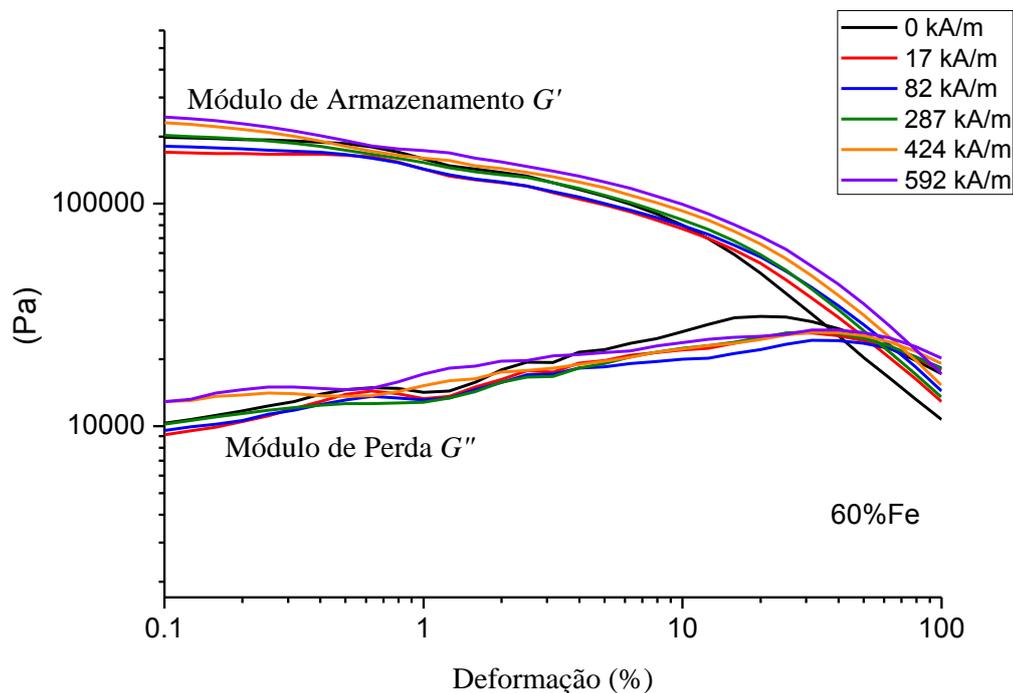


Figura 4.5 – Módulo de armazenamento e módulo de perda para o elastômero magneto reológico com 60% em massa de partículas ferromagnéticas.

De acordo com a Figura 4.4, observa-se que não houve variação significativa para o módulo de armazenamento, permanecendo este, no início de sua curva (região viscoelástica linear), na faixa entre 7×10^4 a 10^5 Pa, ao passo que o módulo de perda se iniciou entre 3×10^3 e 5×10^3 Pa. Não se notou um ordenamento das curvas à medida que o campo magnético ia sendo elevado e nem quando o seu valor era diminuído. Ou seja, as curvas oscilaram de forma desordenada em torno de uma posição, o que mostra que o material não foi alterado pelo campo magnético de forma significativa.

Analisando-se agora, de forma isolada o gráfico da Figura 4.5, nota-se que também não houve uma variação significativa dos módulos de armazenamento (iniciando-se as curvas entre 1×10^5 e 3×10^5 Pa) e de perda (iniciando-se as curvas entre 9×10^3 e 2×10^4 Pa) à medida em que a intensidade do campo foi aumentada, nem uma ordem foi seguida também, uma vez que o módulo de armazenamento para o campo de 17 kA/m foi o menor (abaixo daquele encontrado para o campo 0 kA/m), e quando o campo magnético foi elevado, o módulo

de armazenamento apresentou leve tendência em ser aumentado. O mesmo comportamento foi notado para o módulo de perda.

Com o objetivo de se analisar a influência da inserção de partículas ferromagnéticas à matriz de silicone, uma amostra de elastômero de silicone puro também foi analisada no reômetro. A Figura 4.6 ilustra a comparação dos módulos de perda e de armazenamento na ausência de campo magnético para as amostras do silicone puro, com 30% e com 60% em massa de partículas ferromagnéticas.

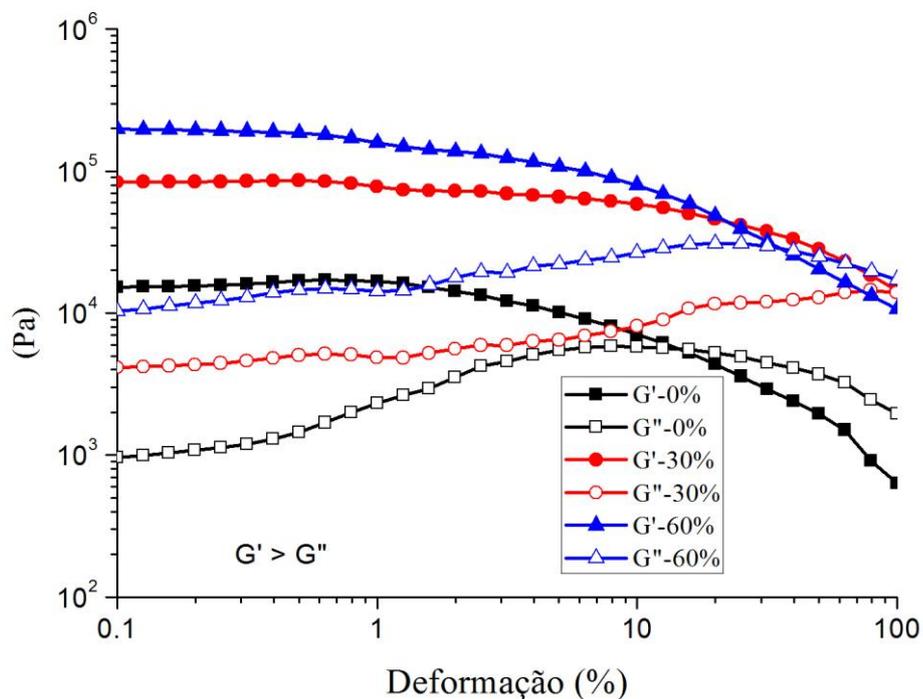


Figura 4.6 – Comparação entre os módulos de armazenamento e de perda para os elastômeros magneto reológicos com 30% e 60% em massa de partículas ferromagnéticas e o silicone puro na ausência de campo magnético.

A partir da Figura 4.6, fica evidente que o aumento no teor de partículas ferromagnéticas na matriz de silicone aumenta de maneira significativa tanto o módulo de armazenamento, quanto o módulo de perda das amostras. Para a amostra de silicone puro (0%), a curva para o módulo de armazenamento iniciou-se aproximadamente em $1,6 \times 10^4$ Pa, ao passo que o módulo de perda, em aproximadamente 10^3 Pa. Logo os menores valores para os módulos de armazenamento e de perda foram notados para a amostra de silicone puro, enquanto os maio-

res valores observados foram referentes à amostra contendo 60% em massa de partículas ferromagnéticas. Assim, a inserção de partículas ferromagnéticas em uma matriz de silicone tem a capacidade de melhorar a sua rigidez ao cisalhamento em função do aumento de sua massa específica.

Como será visto mais adiante no subcapítulo referente aos ensaios de vibração, as frequências naturais foram obtidas para intensidades de campo magnético em incrementos de 10 kA/m. Nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 não se observam essas variações para os valores das intensidades de campo magnético aplicado. Isso se deve ao fato de que como o campo magnético não estava influenciando as propriedades reológicas do elastômero de maneira significativa, optou-se por varrer a faixa de campos magnéticos utilizada no ensaio de vibração, e ainda aplicarem-se campos muito mais elevados do que aqueles utilizados no ensaio de vibração, com o intuito de se averiguar a influência de campos magnéticos elevados sobre o elastômero.

Com isso, conclui-se que o campo magnético não influencia de maneira significativa a rigidez do elastômero magneto reológico, tanto com 30% ou com 60% de partículas ferromagnéticas. Tal fato pode ser explicado pela rigidez elevada do silicone comercial utilizado como elastômero, uma vez que ao se aplicar o campo magnético, as partículas ferro magnéticas encontram um meio rígido ao qual permanecem aderidas, e ficam impossibilitadas de se alinharem naquela direção imposta pelo campo. Ou seja, para os valores de intensidade de campo magnético utilizados neste trabalho, não foi possível alterar-se a microestrutura do elastômero magneto reológico, nem para o elastômero com 30% em massa de partículas ferro magnéticas, nem para aquele contendo 60%. A condição teórica perfeita, inicialmente esperada, era a de que ao se aumentar o campo magnético, as partículas magnéticas fossem capazes de se alinhar no interior do elastômero, com isso, aumentar a rigidez do mesmo. Conclui-se com estes ensaios, que o maior teor de partículas ferromagnéticas presente na matriz de silicone parece ter efeito mais significativo sobre os módulos de armazenamento e de perda do elastômero do que o próprio campo magnético. Assim, espera-se que o elastômero magneto reológico desenvolvido seja capaz de modificar as propriedades dinâmicas das vigas sanduíche no ensaio de vibrações em função da atração magnética de suas partículas pelo campo aplicado, ao invés de sua alteração micro estrutural em função do campo.

4.4 RESULTADOS DO ENSAIO DE VIBRAÇÃO LIVRE

Os ensaios de vibração livre realizados no laboratório objetivaram a determinação das frequências naturais e dos fatores de amortecimento das vigas tipo sanduíche com núcleo colmeia preenchido por elastômero magneto reológico, cujo desenvolvimento foi descrito nos capítulos anteriores desta Tese. Estes parâmetros são de extrema importância para o conhecimento deste tipo de estrutura quando solicitada dinamicamente.

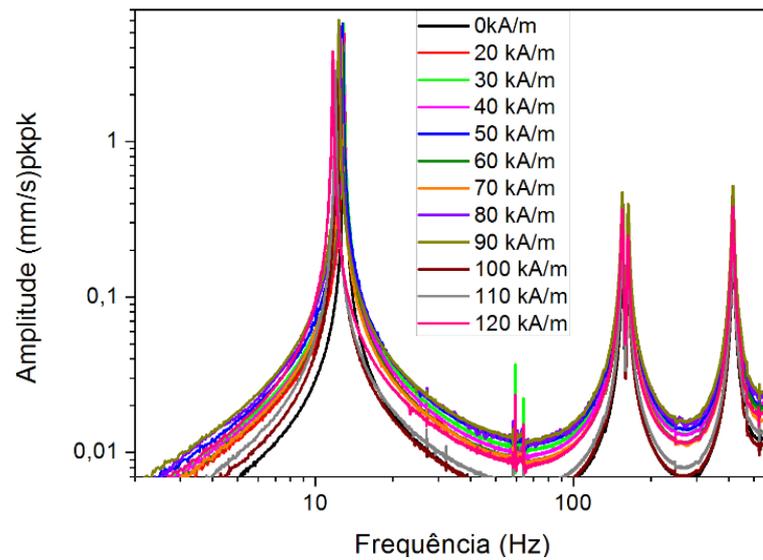
A condição de apoio utilizada no ensaio de vibração livre foi a engastada-livre e o aparato experimental foi mostrado nas Figuras de 3.17 a 3.19. A seguir têm-se os resultados para as frequências naturais obtidos experimentalmente, logo em seguida os resultados obtidos numericamente, para fins de comparação e melhor entendimento da resposta dinâmica das vigas, e por fim, os fatores de amortecimento obtidos a partir do ensaio.

4.4.1 Frequências naturais

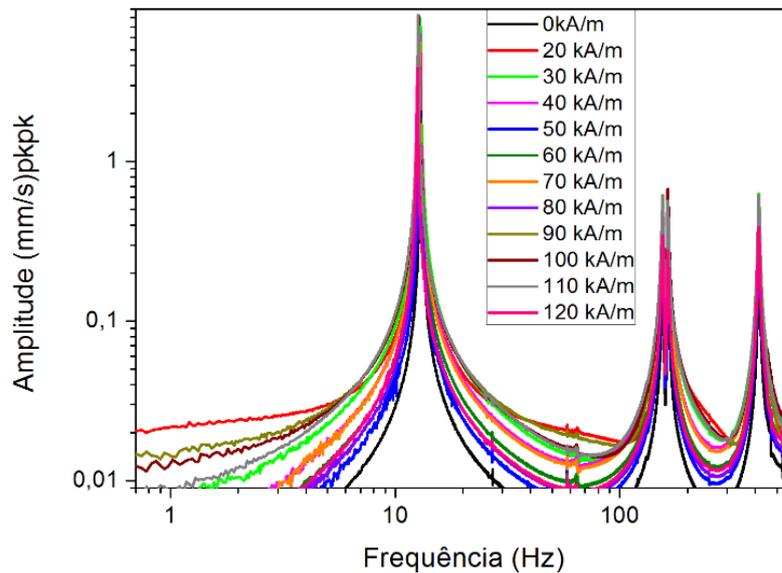
A determinação das frequências naturais dos modelos de viga tipo sanduíche é de extrema importância, uma vez que sucede a este ensaio o ensaio de vibração forçada, assim torna-se importante o conhecimento aproximado dos valores das frequências naturais dos corpos de prova, de modo a proceder ao ensaio de vibração forçada na condição de ressonância. Além disso, em uma situação real de aplicação destes tipos de estruturas, é necessário o seu projeto de modo a se evitar o fenômeno da ressonância, assim, os valores das frequências naturais de um corpo é extremamente importante. Além do mais, o objetivo deste ensaio foi o de verificar a influência do campo magnético sobre as frequências naturais dos modelos de viga sanduíche desenvolvidos.

As frequências naturais obtidas no ensaio em laboratório são apresentadas em Hertz (Hz). Os campos magnéticos tiveram suas intensidades aumentadas em incrementos de 10 kA/m. Inicialmente, determinou-se o valor da frequência natural para cada corpo de prova na ausência de campo magnético, e a partir daí o campo começou a ser incrementado. Então, para cada valor de campo magnético, determinou-se um espectro de frequências. Os mesmos valores de intensidades de campo magnético aplicados à extremidade foram aplicados no centro das vigas, com o intuito de se avaliar a posição de aplicação do campo magnético mais

efetiva. As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam os espectros de frequências para a viga sanduíche com núcleo PLA contendo 30% e 60% em massa de partículas ferromagnéticas no elastômero respectivamente, com campo magnético aplicado na extremidade e no centro das vigas. Cada espectro de frequências foi obtido a partir de uma média de três aquisições.



a)



b)

Figura 4.7 – Espectro de frequências para a amostra com núcleo PLA preenchido com elastômero contendo 30% em massa de partículas magnéticas. a) Ímã na extremidade livre; b) Ímã no centro.

O campo magnético máximo aplicado nos ensaios foi de 120 kA/m para os modelos de viga contendo elastômero com 30% em massa de partículas, e 100 kA/m para aqueles contendo 60%. Para as vigas com maior porcentagem de partículas ferromagnéticas, a atração magnética exercida pelo eletroímã é mais forte do que aquela observada para as vigas com 30%. Assim, quando se ultrapassava o campo de 100 kA/m para as vigas com 60% de partículas, essas vigas ficavam fortemente aderidas aos polos do ímã, já para as vigas contendo 30% de partículas, o campo magnético a partir do qual as vigas aderiam-se aos polos do ímã foi de 120 kA/m. Em função destes acontecimentos não se utilizaram valores de campo magnético maiores.

O valor do primeiro campo aplicado foi de 20 kA/m e não 10 kA/m, como era o esperado, uma vez que o campo magnético variou de 10 em 10 kA/m. Isso se deve ao fato de que os ferros do eletroímã são montados em uma disposição que permita um vão livre (distância “entreferos”), na qual é posicionada a viga durante o ensaio. Então os ferros são compostos por partes, assim, é preciso um campo magnético mínimo para superar o peso próprio das partes dos ferros e mantê-las unidas pela atração magnética. Quando o campo magnético de 10 kA/m foi aplicado, o mesmo não foi capaz de sustentar as partes do ferro unidas, uma vez que elas eram suspensas e não permaneciam apoiadas, assim optou-se neste trabalho por descartar o campo magnético de 10 kA/m ao invés de se exercer influência nos resultados tentando apoiar as partes do ferro do eletroímã com algum suporte ou até mesmo com a mão.

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam os valores das frequências naturais obtidas no ensaio de vibração livre para cada valor de campo magnético aplicado para os espectros de frequência da Figura 4.7, com ímã posicionado na extremidade livre da viga e no seu centro, respectivamente, bem como a variação das frequências sob a aplicação do campo a partir da frequência natural sem campo aplicado, conforme Equação 4.1.

$$Variação(\%) = \left(\frac{FSC - FCN}{FSC} \right) \times 100 \quad (4.1)$$

Na Equação (4.1), FSC é o valor da frequência natural sem campo aplicado e FCN é o valor da frequência natural sob a aplicação de um campo n , onde n varia de 20 a 120 kA/m (amostras com 30% de partículas ferromagnéticas no núcleo) ou de 20 a 100 kA/m (amostras com 60% de partículas no núcleo). A Equação (4.1) é válida para as Tabelas de 4.3 a 4.10.

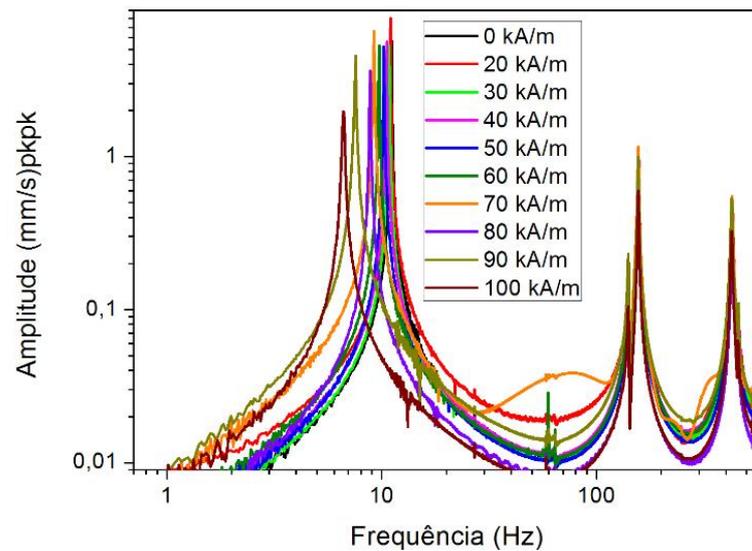
Tabela 4.3 – Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche com núcleo PLA com 30% em massa de partículas magnéticas com ímã na extremidade livre.

	Frequência (Hz)			Variação (%)		
	1° Modo	2° Modo	3° Modo	1° Modo	2° Modo	3° Modo
0	12,97	163,30	416,09	0,00	0,00	0,00
20	12,93	163,26	415,63	0,33	0,02	0,11
30	12,89	163,19	415,48	0,63	0,07	0,15
40	12,81	163,26	415,52	1,25	0,02	0,14
50	12,74	163,27	415,48	1,80	0,02	0,15
60	12,65	163,23	415,56	2,44	0,05	0,13
70	12,54	163,24	415,55	3,34	0,04	0,13
80	12,46	163,19	415,40	3,94	0,07	0,17
90	12,30	163,15	415,35	5,17	0,09	0,18
100	12,11	163,13	415,46	6,66	0,12	0,15
110	11,95	163,01	415,35	7,85	0,18	0,18
120	11,68	162,94	415,01	9,96	0,22	0,26

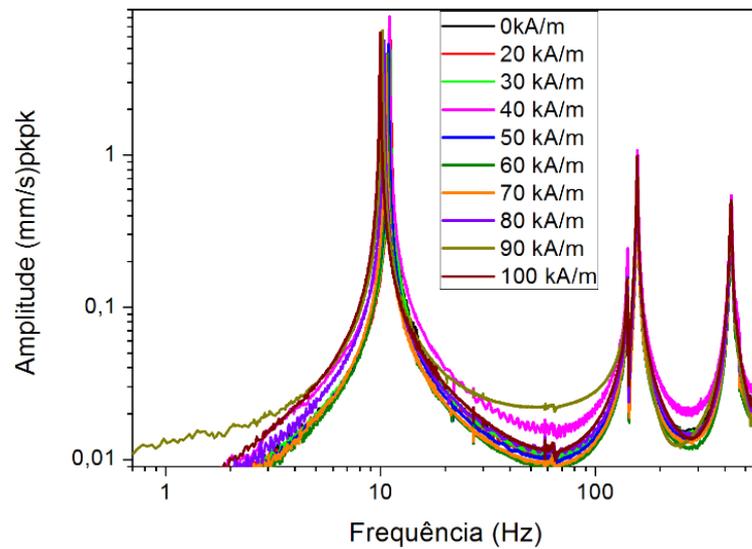
Tabela 4.4 – Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche com núcleo PLA com 30% em massa de partículas magnéticas com ímã no centro.

	Frequência (Hz)			Variação (%)		
	1° Modo	2° Modo	3° Modo	1° Modo	2° Modo	3° Modo
0	12,97	163,30	416,09	0,00	0,00	0,00
20	12,97	163,30	415,30	0,02	0,00	0,19
30	12,93	163,29	415,26	0,32	0,01	0,20
40	12,93	163,29	415,26	0,34	0,01	0,20
50	12,89	163,31	415,46	0,62	-0,01	0,15
60	12,85	163,29	415,34	0,92	0,01	0,18
70	12,81	163,25	415,30	1,23	0,03	0,19
80	12,77	163,27	415,34	1,53	0,02	0,18
90	12,74	163,26	415,05	1,82	0,03	0,25
100	12,66	163,16	415,03	2,44	0,09	0,26
110	12,62	163,17	415,00	2,73	0,08	0,26
120	12,54	163,11	415,04	3,35	0,12	0,25

A Figura 4.8 mostra os espectros de frequência para a viga sanduíche com núcleo em PLA preenchido por elastômero com 60% em massa de partículas magnéticas. As Tabelas 4.5 e 4.6 apresentam os valores das frequências naturais e de suas variações em função do campo magnético para os espectros da Figura 4.8, para ímã posicionado na extremidade livre e no centro das vigas, respectivamente.



a)



b)

Figura 4.8 – Espectro de frequências para a amostra com núcleo PLA preenchido com elastômero contendo 60% em massa de partículas magnéticas. a) Ímã na extremidade livre; b) Ímã no centro.

Tabela 4.5 – Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche com núcleo PLA com 60% em massa de partículas magnéticas com ímã na extremidade livre.

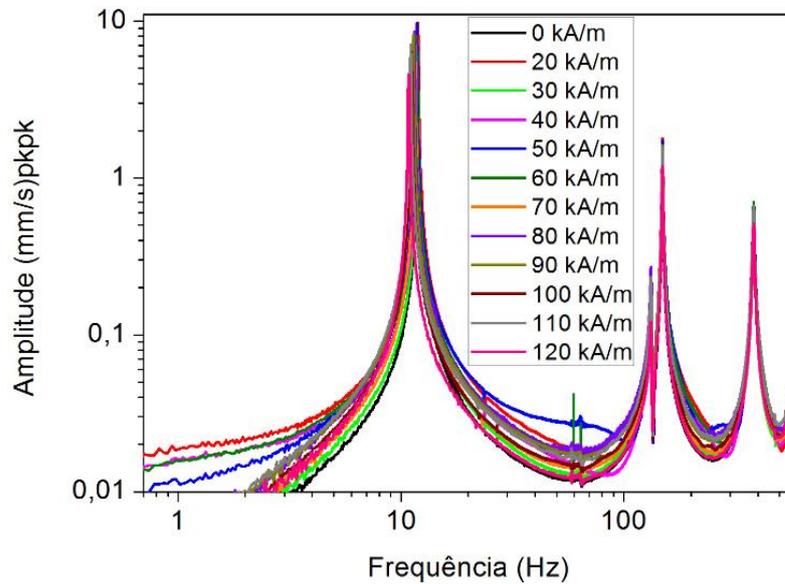
	Frequência (Hz)			Variação (%)		
	1º Modo	2º Modo	3º Modo	1º Modo	2º Modo	3º Modo
0	11,13	156,68	428,91	0,00	0,00	0,00
20	10,97	156,56	428,48	1,44	0,08	0,10
30	10,82	156,60	428,59	2,83	0,05	0,07
40	10,55	156,48	428,24	5,26	0,13	0,15
50	10,23	156,45	428,20	8,08	0,15	0,16
60	9,73	156,41	427,50	12,64	0,18	0,33
70	9,18	156,29	427,03	17,53	0,25	0,44
80	8,82	156,45	427,93	20,74	0,15	0,23
90	7,54	156,25	426,41	32,32	0,27	0,58
100	6,64	156,25	426,41	40,35	0,27	0,58

Tabela 4.6 – Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche com núcleo PLA com 60% em massa de partículas magnéticas com ímã no centro.

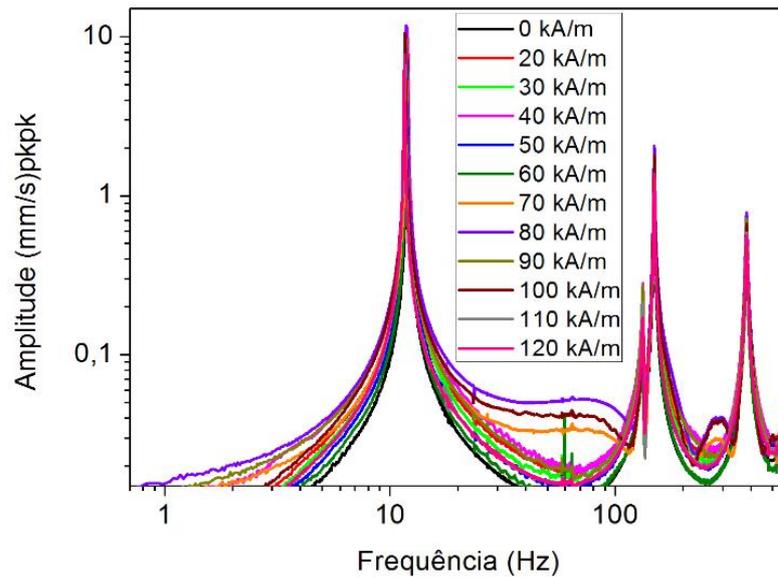
	Frequência (Hz)			Variação (%)		
	1º Modo	2º Modo	3º Modo	1º Modo	2º Modo	3º Modo
0	11,13	156,68	428,91	0,00	0,00	0,00
20	11,13	156,91	429,57	0,00	-0,15	-0,15
30	11,05	156,87	429,30	0,73	-0,12	-0,09
40	10,98	156,72	428,59	1,41	-0,02	0,07
50	10,86	156,72	428,79	2,47	-0,02	0,03
60	10,74	156,68	428,79	3,52	0,00	0,03
70	10,58	156,60	428,52	4,94	0,05	0,09
80	10,39	156,48	428,09	6,69	0,13	0,19
90	10,20	156,33	427,34	8,41	0,23	0,36
100	9,96	156,29	427,42	10,53	0,25	0,35

A Figura 4.9 mostra os espectros de frequência para a viga sanduíche com núcleo em ABS preenchido por elastômero com 30% em massa de partículas magnéticas. As Tabelas 4.7 e 4.7 apresentam os valores das frequências naturais e de suas variações em função do campo

magnético para os espectros da Figura 4.9, para ímã posicionado na extremidade e no centro das vigas, respectivamente.



a)



b)

Figura 4.9 – Espectro de frequências para a amostra com núcleo ABS preenchido com elastômero contendo 30% em massa de partículas magnéticas. a) Ímã na extremidade livre; b) Ímã no centro.

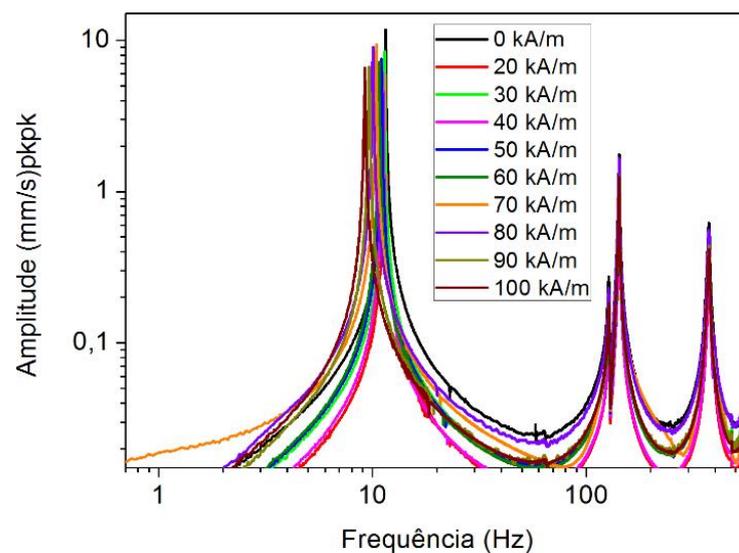
Tabela 4.7 – Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche com núcleo ABS com 30% em massa de partículas magnéticas com ímã na extremidade.

	Frequência (Hz)			Variação (%)		
	1° Modo	2° Modo	3° Modo	1° Modo	2° Modo	3° Modo
0	11,95	148,98	382,62	0,00	0,00	0,00
20	11,95	149,10	382,54	0,00	-0,08	0,02
30	11,91	149,14	382,85	0,33	-0,10	-0,06
40	11,87	149,10	382,66	0,66	-0,08	-0,01
50	11,80	149,10	382,46	1,31	-0,08	0,04
60	11,72	149,06	382,46	1,97	-0,05	0,04
70	11,60	149,06	382,81	2,94	-0,05	-0,05
80	11,48	149,02	382,58	3,92	-0,03	0,01
90	11,37	149,02	382,62	4,90	-0,03	0,00
100	11,21	148,98	382,34	6,20	0,00	0,07
110	11,05	148,98	382,38	7,52	0,00	0,06
120	10,82	148,95	382,50	9,48	0,03	0,03

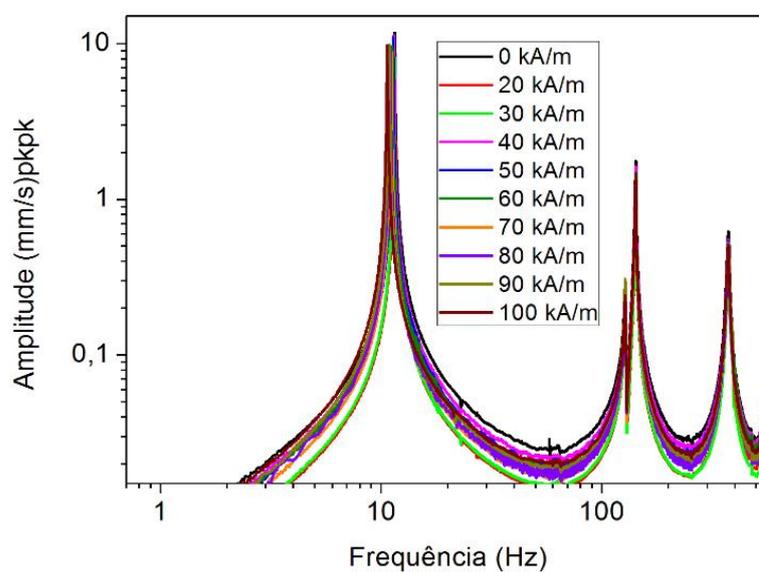
Tabela 4.7 – Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche com núcleo ABS com 30% em massa de partículas magnéticas com ímã no centro.

	Frequência (Hz)			Variação (%)		
	1° Modo	2° Modo	3° Modo	1° Modo	2° Modo	3° Modo
0	11,95	148,98	382,62	0,00	0,00	0,00
20	11,99	149,30	383,32	-0,33	-0,21	-0,18
30	11,99	149,26	383,32	-0,33	-0,18	-0,18
40	11,95	149,22	383,09	0,00	-0,16	-0,12
50	11,91	149,22	383,20	0,33	-0,16	-0,15
60	11,87	149,22	383,09	0,65	-0,16	-0,12
70	11,83	149,18	383,01	0,99	-0,13	-0,10
80	11,80	149,10	382,70	1,31	-0,08	-0,02
90	11,76	149,10	382,77	1,64	-0,08	-0,04
100	11,68	149,06	382,69	2,29	-0,05	-0,02
110	11,60	149,06	382,77	2,94	-0,05	-0,04
120	11,56	149,02	382,81	3,26	-0,03	-0,05

A Figura 4.10 mostra os espectros de frequência para a viga sanduíche com núcleo em ABS preenchido por elastômero com 60% em massa de partículas magnéticas. As Tabelas 4.9 e 4.10 apresentam os valores das frequências naturais e de suas variações em função do campo magnético para os espectros da Figura 4.10, para ímã posicionado na extremidade e no centro das vigas, respectivamente.



a)



b)

Figura 4.10 – Espectro de frequências para a amostra com núcleo ABS preenchido com elastômero contendo 60% em massa de partículas magnéticas. a) Ímã na extremidade livre; b) Ímã no centro.

Tabela 4.9 – Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche com núcleo ABS com 60% em massa de partículas magnéticas com ímã na extremidade.

		Frequência (Hz)			Variação (%)		
		1º Modo	2º Modo	3º Modo	1º Modo	2º Modo	3º Modo
Campo (kA/m)	0	11,52	142,54	374,65	0,00	0,00	0,00
	20	11,48	142,81	376,21	0,34	-0,19	-0,42
	30	11,37	142,73	375,43	1,35	-0,14	-0,21
	40	11,21	142,77	376,02	2,71	-0,16	-0,37
	50	11,02	142,66	375,27	4,41	-0,08	-0,17
	60	10,74	142,62	375,04	6,78	-0,06	-0,10
	70	10,43	142,54	374,18	9,49	0,00	0,12
	80	10,08	142,46	374,18	12,54	0,05	0,13
	90	9,65	142,54	375,20	16,27	0,00	-0,15
	100	9,22	142,50	375,08	20,00	0,03	-0,11

Tabela 4.10 – Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche com núcleo ABS com 60% em massa de partículas magnéticas com ímã no centro.

		Frequência (Hz)			Variação (%)		
		1º Modo	2º Modo	3º Modo	1º Modo	2º Modo	3º Modo
Campo (kA/m)	0	11,52	142,54	374,65	0,00	0,00	0,00
	20	11,52	142,66	375,35	0,00	-0,08	-0,19
	30	11,48	142,66	375,47	0,34	-0,08	-0,22
	40	11,41	142,50	374,26	1,02	0,03	0,10
	50	11,33	142,46	374,03	1,69	0,05	0,17
	60	11,21	142,50	374,53	2,71	0,03	0,03
	70	11,09	142,46	374,80	3,73	0,05	-0,04
	80	10,98	142,42	374,84	4,74	0,08	-0,05
	90	10,86	142,42	374,41	5,76	0,08	0,06
	100	10,66	142,30	374,02	7,46	0,16	0,17

De acordo com as Figuras de 4.7 a 4.10, nota-se que com a variação da intensidade do campo magnético, as frequências naturais de todas as configurações de vigas tipo sanduíche sofreram variações. À medida que a intensidade do campo magnético aumentou, os valores das frequências naturais correspondentes ao primeiro modo de vibração diminuiram. Redu-

ções nos valores das frequências naturais de vigas sanduíche com núcleo reológico com o aumento da intensidade do campo magnético também foram observadas nos trabalhos de outros autores, como Lara-Pietro (2010), Hu *et al.* (2011), Megha *et al.* (2016) e Irazu e Elejabarrieta (2017). Isto deve-se ao fato de que quando um campo magnético é aplicado a uma viga sanduíche magneto reológica em vibração, mais fenômenos além da modificação das propriedades reológicas do material magneto reológico estão envolvidos, como a indução por correntes parasitas ou lâminas condutores ou forças magnéticas devido à natureza magnética do núcleo ou das lâminas (SODANO *et al.*, 2005). Adicionalmente, a contribuição de cada um desses efeitos sobre a resposta dinâmica final da viga sanduíche será diferente, dependendo das propriedades geométricas e físicas da viga sanduíche, e da configuração do campo magnético aplicado (IRAZU e ELEJABARRIETA, 2017). Já para o segundo e terceiro modo de vibração, esse fato não foi observado, fato semelhante ao trabalho publicado por Irazu e Elejabarrieta (2017). O comportamento das frequências naturais em função do campo magnético aplicado pode ser melhor visualizado nos gráficos das Figuras de 4.11 a 4.13 abaixo.

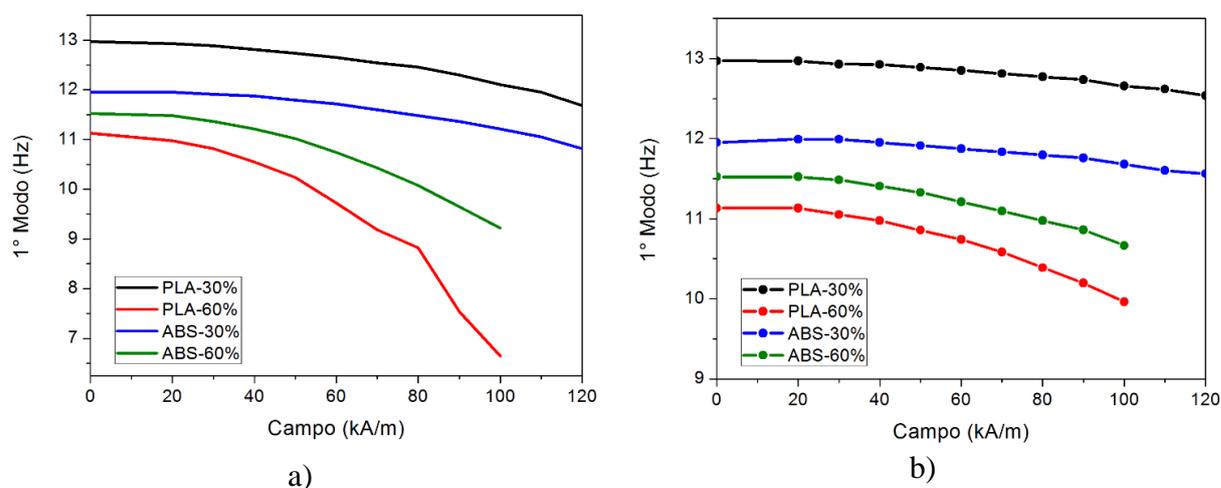


Figura 4.11 – Variação das frequências naturais correspondentes ao primeiro modo de vibração em função do campo magnético. a) Ímã na extremidade livre; b) Ímã no centro.

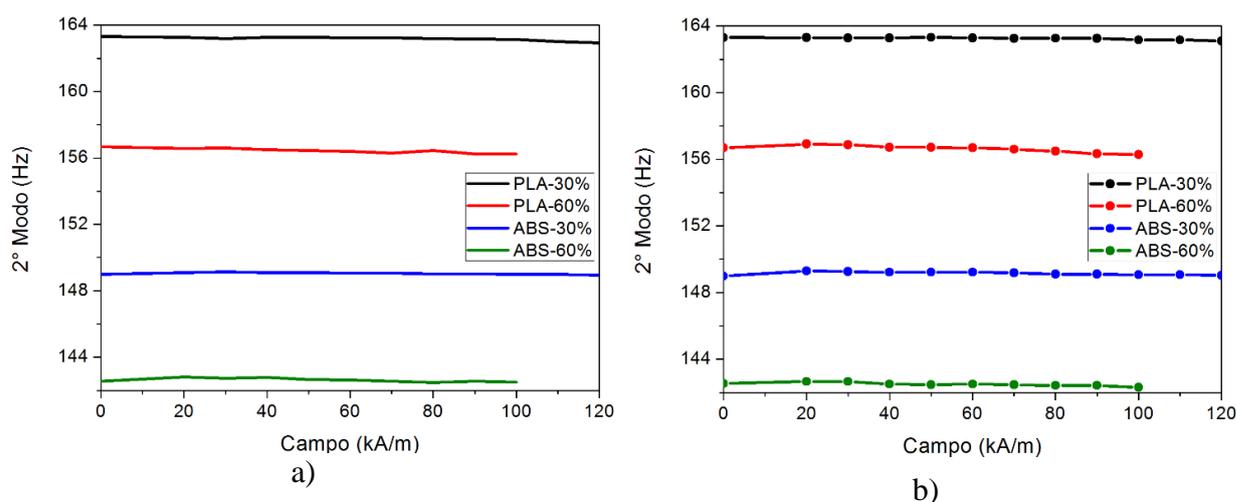


Figura 4.12 – Variação das frequências naturais correspondentes ao segundo modo de vibração em função do campo magnético. a) Ímã na extremidade livre; b) Ímã no centro.

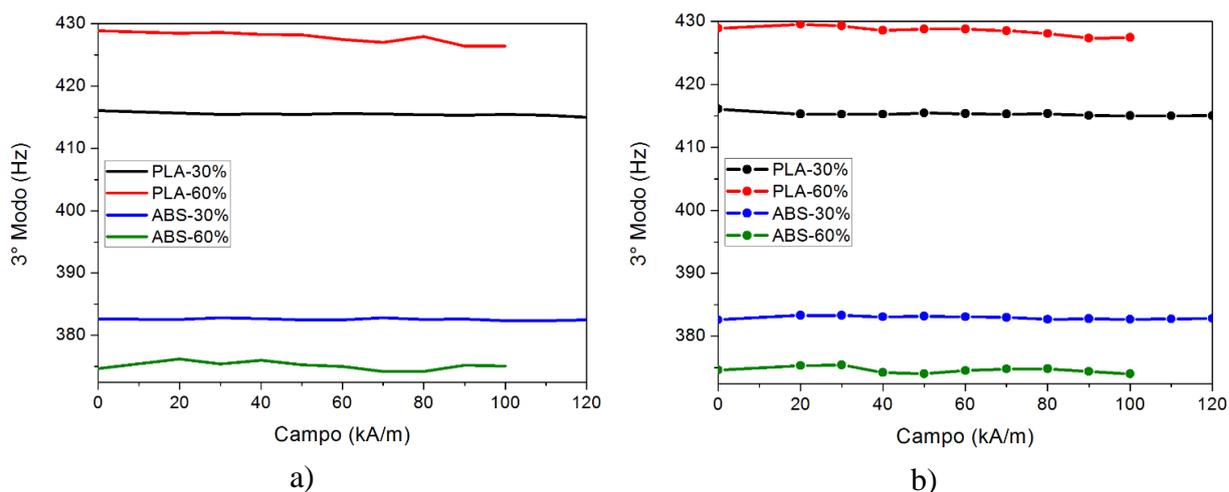


Figura 4.13 – Variação das frequências naturais correspondentes ao terceiro modo de vibração em função do campo magnético. a) Ímã na extremidade livre; b) Ímã no centro.

Conforme discutido no subcapítulo 4.1, o campo magnético não alterou as propriedades reológicas e nem a microestrutura do elastômero magneto reológico, de modo que as partículas ferromagnéticas permaneceram presas ao silicone comercial e não conseguiram se alinhar de acordo com o campo aplicado. Assim sendo, as variações nos valores das frequências naturais são devidas exclusivamente à atração magnética das partículas, presentes no elastômero, pelo campo magnético. Mesmo presas em um meio relativamente rígido, as partículas ferromagnéticas sofrem a influência da força gerada pelo campo, tendendo a serem atraídas

aos polos do ímã. Essa atração magnética das partículas faz com que a oscilação do corpo ao qual elas estão submersas, tenda a diminuir.

A visualização das Figuras de 4.11 a 4.13 mostra que o posicionamento do ímã na extremidade livre das vigas, onde a amplitude de movimento de um ponto sobre a superfície da viga é maior, é a configuração mais favorável à influência do campo sobre as frequências das vigas, uma vez que quanto mais próximo do engaste, maior a rigidez ao movimento da viga. Logo, a uma posição mais distante do engaste, melhor a resposta dinâmica da viga em função do campo magnético aplicado. Além disso, estas figuras deixam claro que o primeiro modo de vibração foi o mais influenciado pelo campo magnético. Somente as frequências relativas ao primeiro modo de vibração tiveram seus valores diminuídos ao passo que o campo magnético aumentou. Para as frequências referentes aos segundo e terceiro modos de vibração, praticamente não houve variação em seus valores, com exceção para as vigas contendo 60% de partículas magnéticas, para as quais se notam pequenas oscilações nas curvas das Figuras 4.12 e 4.13.

O fato descrito anteriormente pode ser explicado da seguinte maneira: a força necessária para se excitar uma viga no seu primeiro modo de vibração é diferente daquela necessária no segundo modo, que por sua vez difere daquela para o terceiro modo. Quanto maior o modo de vibração, maior a força requerida para manter a viga vibrando naquele modo. Os valores de campo magnético alcançados neste trabalho provavelmente são muito pequenos para gerar forças magnéticas capazes de se aproximar ou superar o valor da força de excitação dinâmica das vigas no segundo e no terceiro modo de vibração. Assim, as forças magnéticas alcançadas nos ensaios, são capazes de influenciar modos de vibração possuindo baixas frequências, como é o caso do primeiro modo de vibração, no qual as frequências obtidas são relativamente pequenas se comparadas àquelas do segundo e terceiro modo. Para se alterarem os valores das frequências relativas aos segundo e terceiro modos, seriam necessárias intensidades de campo magnético muito maiores do que as utilizadas neste trabalho.

Outra observação muito importante é a de que as vigas sanduíche contendo elastômero com 60% em massa de partículas são muito mais susceptíveis à variação do campo magnético do que aquelas contendo 30%, referindo-se ao primeiro modo de vibração, principalmente com o ímã posicionado junto à extremidade livre das vigas. Para a intensidade de campo magnético aplicado de 100 kA/m, na extremidade, a viga com núcleo PLA com 30% de partículas apresentou uma variação percentual de 6,66%, já a com PLA contendo 60% apresentou

variação de 40,35%, ao passo que as vigas com núcleo ABS apresentaram variação de 6,20% e 20,00%, para as composições de 30 e 60% em massa de partículas, respectivamente. Ou seja, para a viga contendo colmeia em PLA com 60% de partículas, esta é aproximadamente 6 vezes mais susceptível ao campo magnético do que a que contém 30%, para a intensidade de campo magnético de 100 kA/m. Já para a viga com núcleo em ABS, a que contém 60% de partículas é 3 vezes mais susceptível do que a que contém 30%, nesta intensidade de campo aplicado. Assim, nota-se que a configuração de viga sanduíche com núcleo colmeia em PLA contendo 60% em massa de partículas ferromagnéticas no elastômero de preenchimento é a mais eficiente na redução dos valores de suas frequências naturais com o aumento do campo magnético.

Os valores das frequências naturais decrescem à medida que o campo aumenta devido à atração magnética das partículas no interior da colmeia, visto que no interior de um campo magnético, a força magnética por ele gerada tende a reduzir o movimento oscilatório das partículas ferromagnéticas, uma vez que as mesmas se encontram atraídas aos polos do ímã. De acordo com a Figura 4.11, os decaimentos mais significativos para os valores das frequências naturais das amostras contendo 30% em massa de partículas magnéticas é a partir de uma intensidade de campo magnético de aproximadamente 50 kA/m, já para aquelas contendo 60%, apenas um campo de aproximadamente 30 kA/m já é capaz de causar um decaimento expressivo no valor das frequências naturais das vigas sanduíche. Sabe-se que a frequência natural de um corpo é diretamente proporcional à sua rigidez e inversamente proporcional à sua massa. Neste caso envolvendo campo magnético, é como se o campo aumentasse o valor da massa da viga, devido à atração magnética das partículas pelo campo. Assim, quando o campo magnético é aplicado, um esforço maior se torna necessário para que a viga se mantenha em vibração na mesma oscilação daquela na ausência de campo aplicado. Então, de uma maneira simplista, à medida que o campo magnético aumenta, aumenta-se também o “atrito magnético”, o qual se torna responsável pela diminuição na oscilação das partículas presentes no silicone contido no interior da colmeia, diminuindo-se conseqüentemente o valor das frequências naturais.

A variação no valor da primeira frequência natural da viga, com colmeia em PLA contendo 60% em massa de partículas, de 40,35% representa um valor expressivo, que mostra que é possível a alteração nos valores das frequências naturais de um corpo apenas alterando-se a intensidade do campo magnético sobre ele aplicado. Ou seja, não há a necessidade de se

alterarem a massa, a rigidez ou o material para se alterar a frequência natural de uma estrutura, a fim de se distanciar da frequência de ressonância ou se evitar este fenômeno.

4.4.2 Simulação numérica

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos após a realização da simulação numérica via Método dos Elementos Finitos para algumas das condições analisadas no ensaio de vibração livre. O objetivo principal da simulação numérica é o de determinar as frequências naturais dos modelos de viga, bem como compará-las às aquelas obtidas experimentalmente, validando então o experimento realizado, e também determinar os modos de vibração das vigas, a fim de se avaliar o efeito da posição dos eletroímãs com relação aos nós dos modos de vibração.

O modelo representativo da viga foi colocado entre dois ímãs e a caixa de ar foi posicionada entre os ímãs e a viga. O campo magnético de 100 kA/m foi aplicado em duas posições diferentes, na extremidade livre e no centro das vigas. Com isso, conseguiu-se obter os valores das forças magnéticas, como pode ser visualizado nas Figuras 4.14 a) e b). Nota-se nas Figuras 4.14 a) e b), que aparecem vários vetores de força magnética sobre a viga, com intensidades de forças diferentes. Cada um desses vetores de força que incidem sobre a viga foram aplicados ao modelo no aplicativo computacional Hypermesh[®].

De obtenção dos valores dos vetores de força magnética em cada nó ao longo da malha da viga, foi possível a simulação da vibração livre dos modelos de viga na condição engastada-livre sob a incidência destas forças.

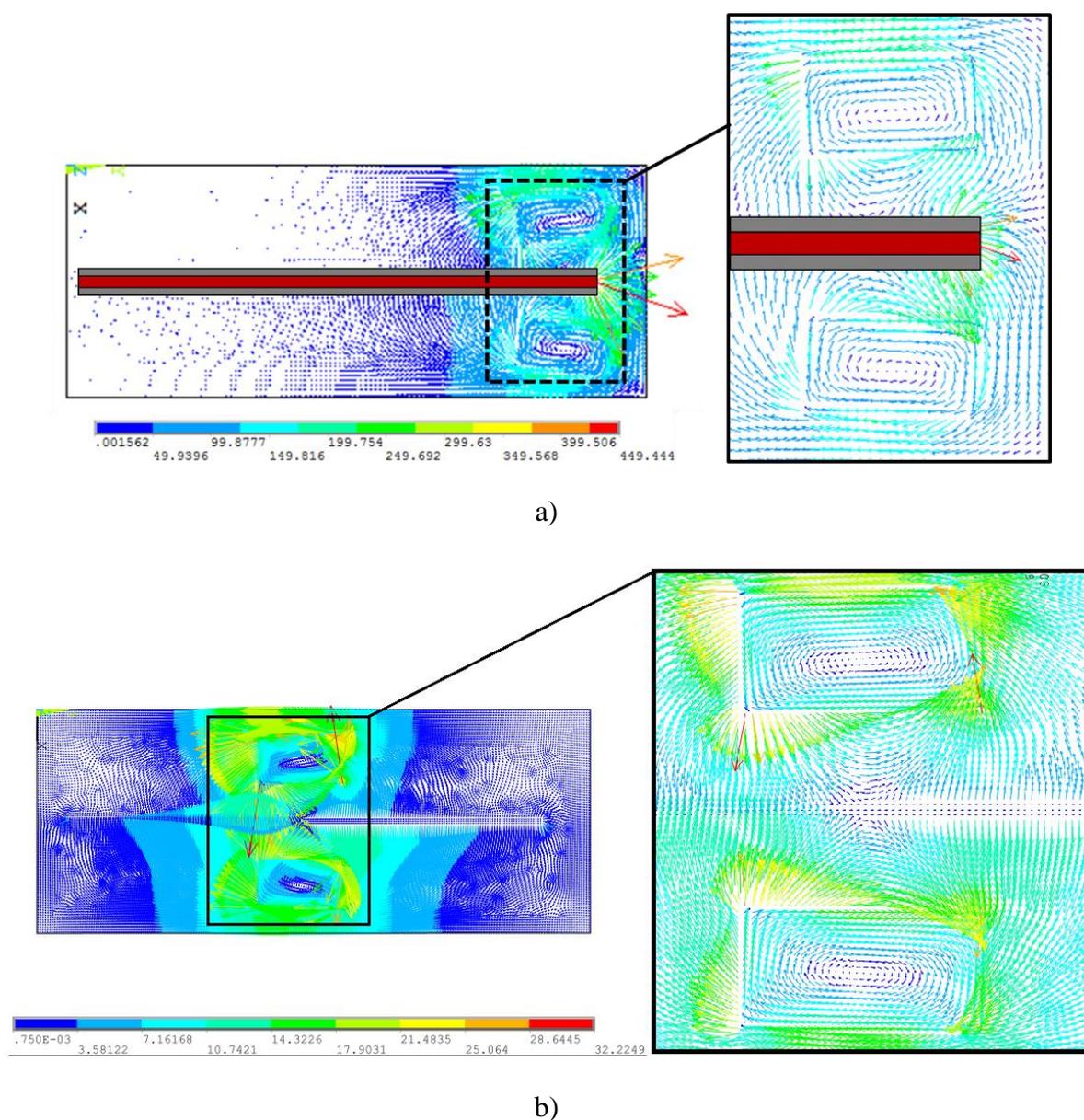


Figura 4.14 – Vetores de forças magnéticas geradas pelo ímã sobre o modelo simplificado do painel sanduíche com núcleo magneto reológico: a) ímã na extremidade livre; e b) ímã no centro.

Para todas as condições apresentadas a seguir, o campo magnético aplicado foi de 100 kA/m, uma vez que foi este o máximo campo magnético aplicado comum a todos os modelos de viga sanduíche aqui estudados. As Tabelas de 4.11 a 4.14 apresentam um comparativo entre as frequências naturais obtidas experimentalmente e numericamente via MEF no ensaio de vibração livre. Para cada uma das vigas, foram escolhidas aleatoriamente duas condições para a realização das simulações, podendo ser a condição com o ímã posicionado na extremidade livre, com o ímã posicionado no centro das vigas e a viga em vibração na ausência de campo

magnético aplicado. As Figuras de 4.15 a 4.18 mostram os modos de vibração para as vigas nas condições presentes nas Tabelas de 4.11 a 4.14.

Nas Tabelas de 4.11 a 4.14, o Desvio (%) foi calculado de acordo com a Equação 4.5 a seguir:

$$Desvio(\%) = \left(\frac{F_{exp} - F_{num}}{F_{exp}} \right) \times 100 \quad (4.5)$$

onde F_{exp} é a frequência natural obtida experimentalmente e F_{num} a frequência natural obtida numericamente, para a mesma condição.

A Tabela 4.11 e as Figuras 4.15 a) e b) apresentam as frequências naturais e os modos de vibração, respectivamente, para a viga sanduíche contendo núcleo em PLA com 30% em massa de partículas no elastômero magneto reológico.

De acordo com a Tabela 4.11, nota-se uma forte correlação entre os valores obtidos numericamente com aqueles obtidos experimentalmente, com desvios percentuais pequenos, o que valida a simulação numérica proposta e realizada neste trabalho. Na simulação numérica, a montagem e disposição dos elementos constituintes da viga sanduíche são consideradas perfeitas, ou seja, a direção das fibras do urdume perfeitamente na direção longitudinal, as laterais da viga são consideradas perfeitamente paralelas, a redução da espessura do núcleo para a borda deixada a fim de se evitar a delaminação faz um ângulo reto, dentre outras considerações. Porém, durante a parte experimental, tais condições podem sofrer pequenas variações, como por exemplo as fibras das lâminas, durante o processo de infusão da resina, podem sofrer pequenos desalinhamentos. Após a infusão da resina no processo VARTM, procedeu-se ao corte dos modelos de viga a partir da placa obtida, sendo que por mais que se controlaram as dimensões das amostras de modo a se manterem o paralelismo e a uniformidade dimensional entre as laterais das amostras, pode ser que pequenas disparidades geométricas estejam presentes nas amostras obtidas. Conforme descrito ao longo da metodologia experimental, o *skin* inferior foi mantido plano, sobre ele colocou-se o núcleo colmeia e sobre o núcleo outro *skin* em material compósito. A inclinação desse *skin* na transição do núcleo para a margem destinada a evitar a delaminação na prática é de difícil determinação, sendo assim, considerou-se na simulação numérica que essa redução se dá por meio de um ângulo de 90°. Frente a essas possíveis variações, nota-se a partir da Tabela 4.11 até a Tabela 4.14, que os

desvios percentuais entre os resultados obtidos pelo modelo numérico e os resultados experimentais mostraram-se bastante pequenos.

Tabela 4.11 – Comparação entre as frequências naturais numéricas e experimentais do ensaio de vibração livre para a viga contendo PLA com 30% de partículas ferromagnéticas no núcleo.

Modo	Experimental (Hz)		MEF (Hz)		Desvio (%) ímã na extremidade	Desvio (%) ímã no centro
	100 kA/m extremidade	100 kA/m no centro	100 kA/m extremidade	100 kA/m no centro		
1	12,11	12,66	11,47	11,68	5,28	7,74
2	163,13	163,16	166,84	165,28	-2,27	-1,30
3	415,46	415,03	412,96	410,05	0,60	1,20

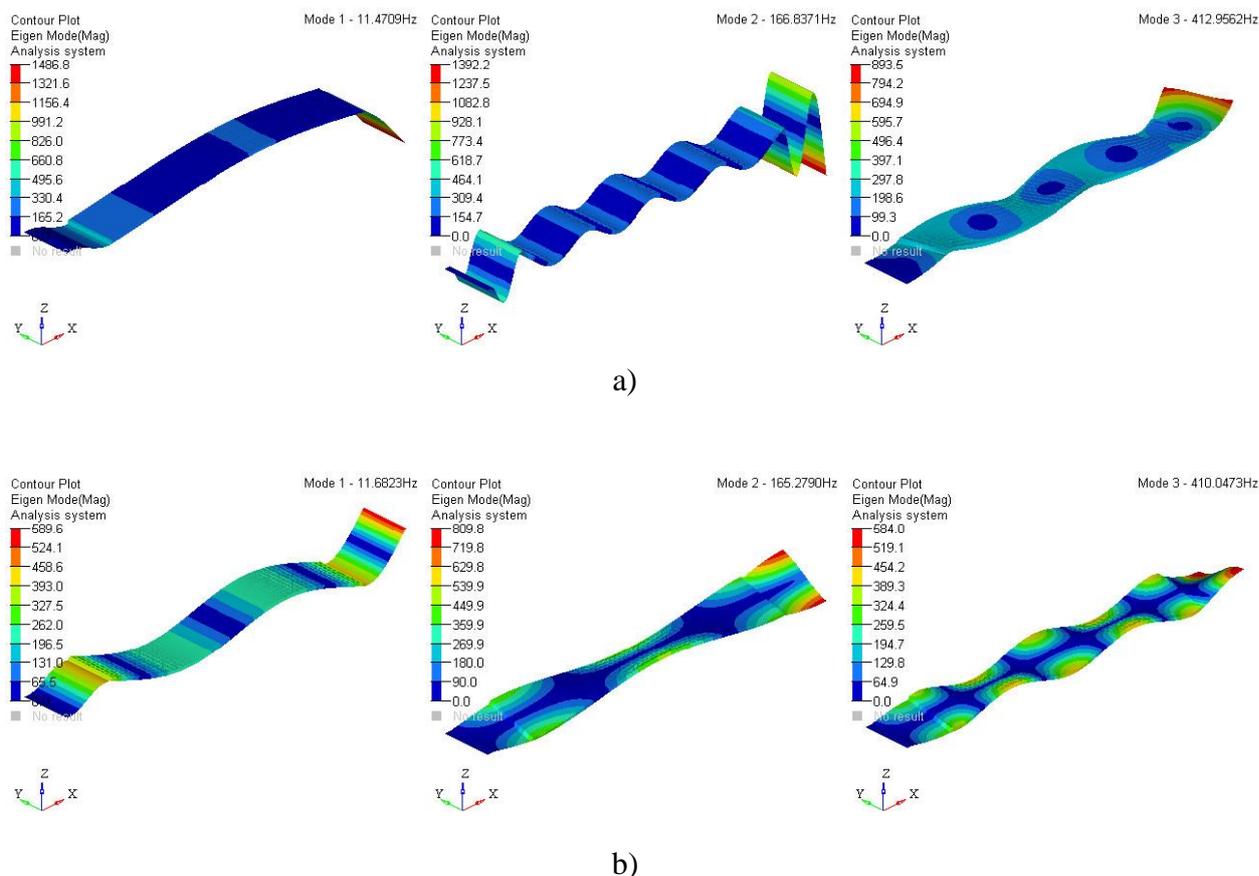


Figura 4.15 – Modos de vibração para a viga sanduíche contendo núcleo em PLA-30% com ímã posicionado na extremidade livre a) e no centro da viga b).

De acordo com a Figura 4.15, observa-se que as maiores deformações durante a vibração são sofridas pelas bordas destinadas a evitar a delaminação, ao passo que a parte central da viga pouco deforma-se, o que mostra sua rigidez elevada. Quando o ímã é simulado estar no centro da viga, nota-se que a mesma tende a apresentar um modo torcional já no seu segundo modo de vibração.

A Tabela 4.12 e as Figuras 4.16 a) e b) apresentam as frequências naturais e os modos de vibração, respectivamente, para a viga sanduíche contendo núcleo em PLA com 60% em massa de partículas no elastômero magneto reológico.

Tabela 4.12 – Comparação entre as frequências naturais numéricas e experimentais do ensaio de vibração livre para a viga contendo PLA com 60% de partículas ferromagnéticas no núcleo.

Modo	Experimental (Hz)		MEF (Hz)		Desvio (%) ímã na extremidade	Desvio (%) ímã no centro
	100 kA/m extremidade	100 kA/m no centro	100 kA/m extremidade	100 kA/m no centro		
1	6,64	9,96	6,91	8,82	-4,07	11,44
2	156,25	156,29	149,37	150,02	4,40	4,01
3	426,41	427,42	425,38	423,38	0,24	0,95

Novamente, nota-se forte correlação entre os resultados numéricos com aqueles experimentais.

A Tabela 4.13 e as Figuras 4.17 a) e b) apresentam as frequências naturais e os modos de vibração, respectivamente, para a viga sanduíche contendo núcleo em ABS com 30% em massa de partículas no elastômero magneto reológico.

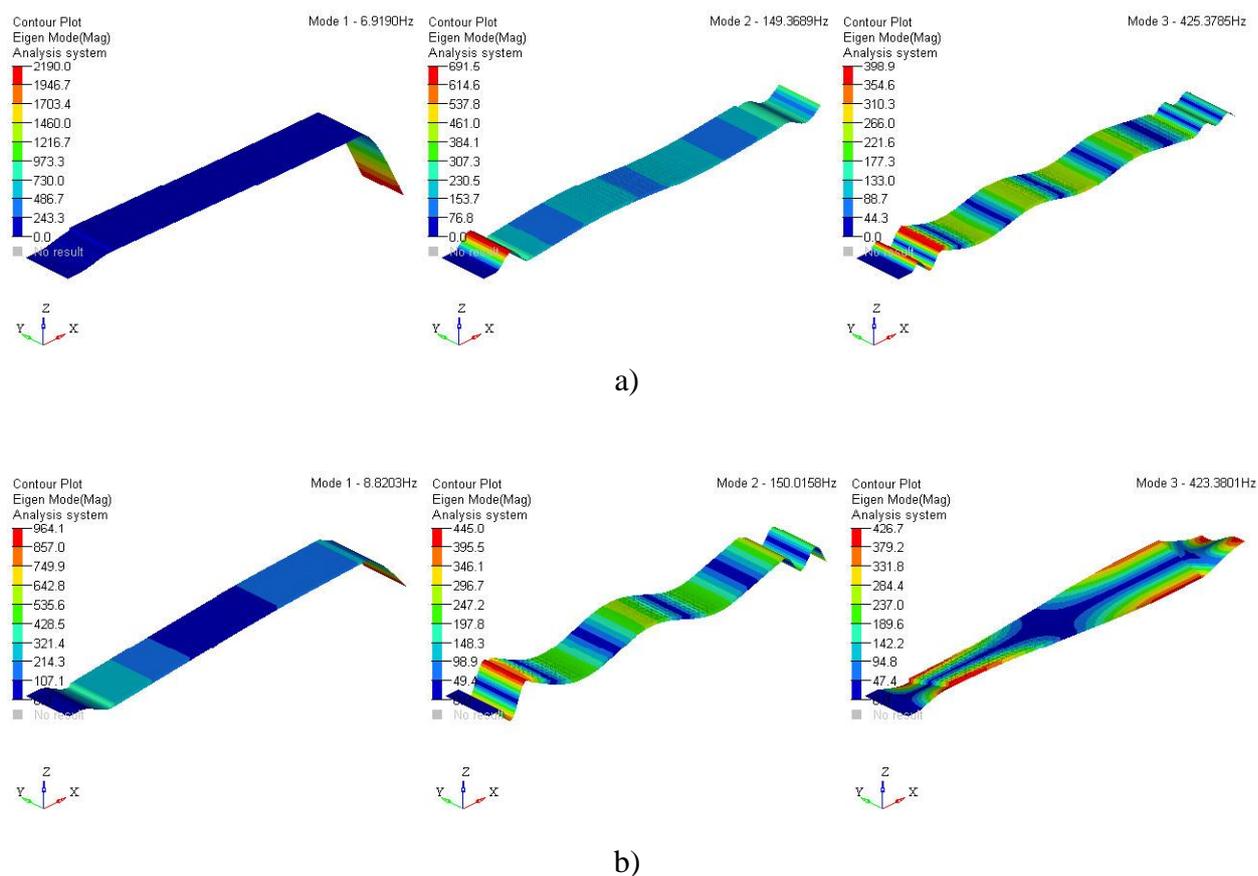
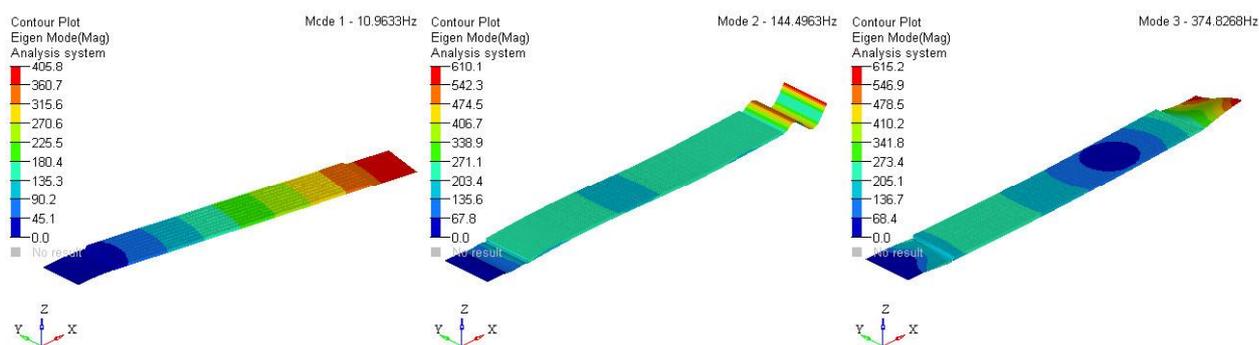


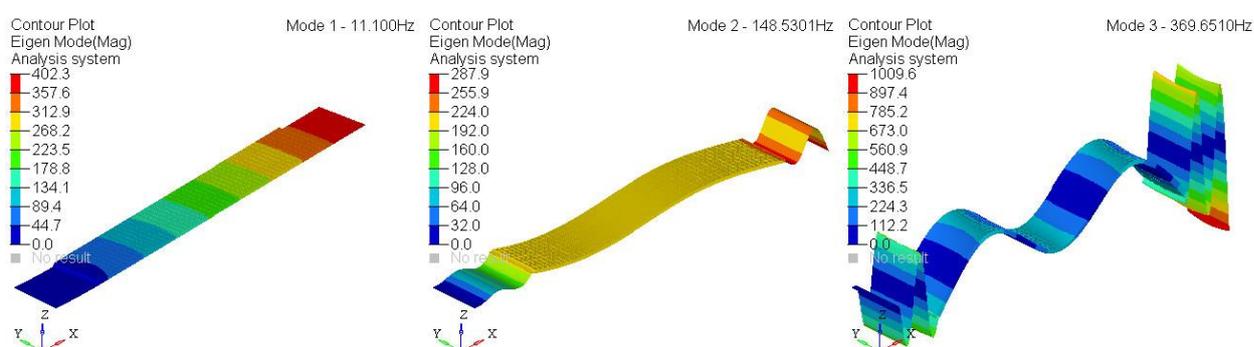
Figura 4.16 – Modos de vibração para a viga sanduíche contendo núcleo em PLA-60% com ímã posicionado na extremidade livre a) e no centro da viga b).

Tabela 4.13 – Comparação entre as frequências naturais numéricas e experimentais do ensaio de vibração livre para a viga contendo ABS com 30% de partículas ferromagnéticas no núcleo.

Modo	Experimental (Hz)		MEF (Hz)		Desvio (%) ímã na extremidade	Desvio (%) sem campo
	100 kA/m extremidade	Sem campo	100 kA/m extremidade	Sem campo		
1	11,21	11,95	10,96	11,10	2,23	7,11
2	148,98	148,98	144,50	148,53	3,01	0,30
3	382,34	382,62	374,83	369,65	1,96	3,39



a)



b)

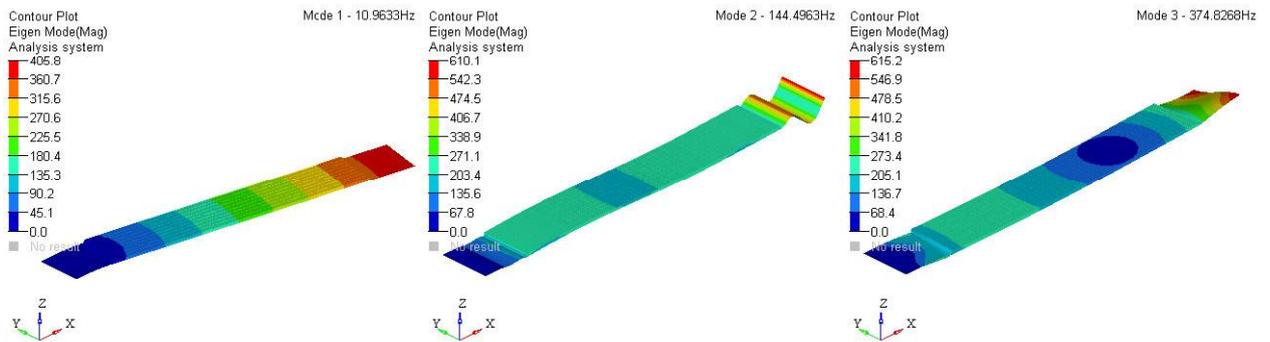
Figura 4.17 – Modos de vibração para a viga sanduíche contendo núcleo em ABS-30% com ímã posicionado na extremidade livre da viga a) e na ausência de campo magnético aplicado b).

Por fim, a Tabela 4.14 e as Figuras 4.18 a) e b) apresentam as frequências naturais e os modos de vibração, respectivamente, para a viga sanduíche contendo núcleo em ABS com 60% em massa de partículas no elastômero magneto reológico.

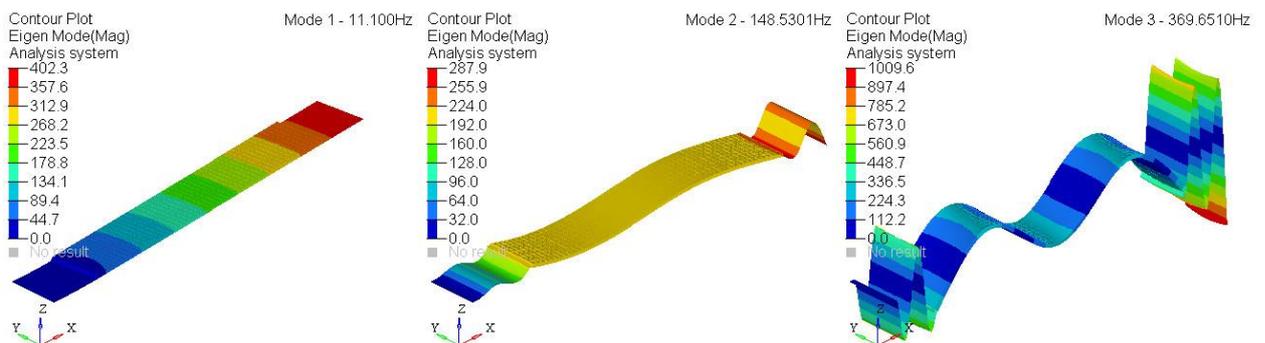
Na ausência de campo magnético aplicado, conforme visualizado nas Figuras 4.17 e 4.18, observa-se que os modos de vibração das vigas são mais visíveis e bem definidos, bem como os deslocamentos apresentados por estas vigas mais pronunciados. Este fato mostra que a aplicação de um campo magnético, seja ele aplicado à extremidade livre da viga em balanço, ou ao seu centro, exerce influência direta sobre os modos de vibração destas vigas, além de alterar suas frequências naturais, fatores de amortecimento e reduzir suas amplitudes de vibração, como mostrado nos subcapítulos anteriores.

Tabela 4.14 – Comparação entre as frequências naturais numéricas e experimentais do ensaio de vibração livre para a viga contendo ABS com 60% de partículas ferromagnéticas no núcleo.

Modo	Experimental (Hz)		MEF (Hz)		Desvio (%) ímã no centro	Desvio (%) sem campo
	100 kA/m no centro	Sem campo	100 kA/m no centro	Sem campo		
1	10,66	11,52	10,02	11,03	6,00	4,25
2	142,30	142,54	147,48	143,67	-3,64	-0,79
3	374,02	374,65	370,15	365,79	1,03	2,36



a)



b)

Figura 4.18 – Modos de vibração para a viga sanduíche contendo núcleo em ABS-60% com ímã posicionado no centro da viga a) e na ausência de campo magnético aplicado b).

A partir das Figuras de 4.15 a 4.18, nota-se que a região central da viga na qual o núcleo colmeia localiza-se apresenta um modo de vibração com deslocamentos muito inferiores ao modo de vibração observado para as margens da viga, destinadas a se evitarem delaminações. Este fato mostra o quão rígido é o conjunto lâminas em fibra de carbono e o núcleo colmeia, tanto em PLA quanto em ABS, preenchido pelo silicone comercial com partículas ferromagnéticas.

Pela deformação modal, o comportamento característico de uma viga clássica em balanço para o primeiro modo pôde ser observado nas Figuras de 4.15 a 4.18, para as condições de ímã posicionado na extremidade livre e na ausência de campo magnético aplicado. Quando o ímã foi simulado estar posicionado sobre o centro das vigas, o modo de vibração sofreu alterações. Conforme discutido nos subcapítulos anteriores, quando se posiciona o ímã no centro da viga, é como se surgisse ali um novo apoio, ou talvez, um “apoio virtual”, o qual interfere diretamente sobre os fatores de amortecimento da viga, como já discutido, como também sobre o modo de vibração fundamental, agora demonstrado numericamente. Entretanto, para os segundo e terceiro modos, vários nós e anti-nós aparecem, conseqüentemente, o cálculo analítico para os resultados referentes a esses modos se tornaria de difícil determinação, devido à natureza complexa do problema, que envolve materiais distintos, bem como aplicação de campo magnético. Esta complexidade analítica mostra então, que a utilização do Método dos Elementos Finitos (MEF), é um “ponto-chave” nesta Tese.

Como foi visto anteriormente, uma variação significativa para a frequência natural dos modelos de viga frente à aplicação do campo magnético em diferentes intensidades só foi possível para o primeiro modo de vibração. Este fato pode ser explicado a partir dos modos de vibração. Como pode ser visto nas Figuras de 4.15 a 4.18, a amplitude máxima referente ao primeiro modo de vibração é localizada na extremidade livre da viga, ou seja, posição esta onde se encontra o ímã. Quando o ímã foi posicionado no centro das vigas, atenuações significativas como aquelas para o caso do ímã na extremidade da viga não foram observadas. Para os segundo e terceiro modos, os nós locais e anti-nós contribuíram negativamente para a melhoria do amortecimento da viga, uma vez que o ímã, nestes casos, poderia estar posicionado sobre um nó, o que requer grande força magnética para gerar algum efeito, principalmente sobre as frequências naturais. Ou seja, quanto mais próximo o posicionamento do ímã de um nó no modo de vibração, maior deve ser a intensidade do campo magnético aplicado de modo a se alcançarem respostas dinâmicas significativas. Além do mais, como discutido anterior-

mente, a combinação dos materiais adotados para a fabricação das vigas sanduíche estudadas neste trabalho gerou um produto final com rigidez elevada, o que interfere diretamente sobre a resposta dinâmica das vigas ao efeito do campo magnético, não permitindo deformações significativas nos segundo e terceiro modos de vibração, uma vez que os valores de campo magnético aplicados neste trabalho não são capazes de gerar uma energia de deformação suficiente para deformar a viga nestes modos de vibração.

Assim, a simulação numérica serviu para a determinação dos modos de vibração, bem como para o melhor embasamento dos motivos pelos quais houve variação na resposta dinâmica dos modelos de viga estudados em função do campo magnético aplicado. Além disso, confirmou-se novamente que a melhor posição para aplicação do campo magnético é a extremidade livre da viga e que a combinação dos materiais componentes das vigas sanduíche de fato geram um produto final de elevada rigidez, em função dos modos de vibração.

4.4.3 Fatores de amortecimento

Juntamente ao ensaio de vibração livre, gravaram-se as respostas das velocidades de deslocamento das vigas em função do tempo. Um exemplo de curva de velocidade pelo tempo é mostrado na Figura 4.19. Com essas respostas na forma gráfica, tornou-se possível a determinação dos fatores de amortecimento das vigas sanduíche em função do campo magnético aplicado, que será descrita a seguir.

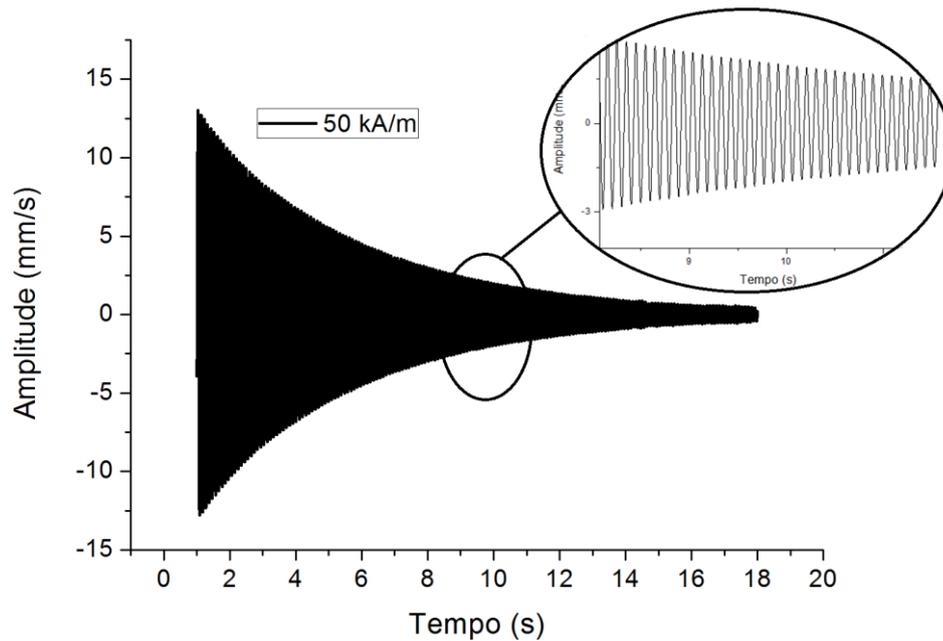


Figura 4.19 –Resposta de velocidade no tempo para a viga sanduíche com núcleo PLA contendo 60% de partículas ferromagnéticas, sob campo magnético de 50 kA/m aplicado na extremidade livre da viga.

A fim de se determinar o fator de amortecimento das curvas semelhantes à da Figura 4.19, foi realizado um ajuste pelo método dos mínimos quadrados não linear. Para isso, foi utilizada como resposta de solução analítica a Equação 4.3 a seguir dada por Harris e Pierson (2002), *apud* Souza (2015). A Equação 4.2 diz respeito à equação em deslocamento e a 4.3, em velocidade, de um sistema em vibração livre amortecida com um grau de liberdade, assumindo-se fatores de amortecimento menores do que 1.

$$y(t) = e^{-\zeta\omega_n t} [A \cos(\omega_d t) + B \sin(\omega_d t)] \quad (4.2)$$

$$\dot{y}(t) = -\zeta\omega_n \left[\frac{A \cos(\omega_d t) + B \sin(\omega_d t)}{e^{\zeta\omega_n t}} \right] - \left[\frac{A\omega_d \sin(\omega_d t) - B\omega_d \cos(\omega_d t)}{e^{\zeta\omega_n t}} \right] \quad (4.3)$$

sendo ω_d a frequência natural amortecida em rad/s, A e B as constantes arbitrárias e ζ o fator de amortecimento. A frequência natural amortecida, em rad/s, é dada por:

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (4.4)$$

Assim, a Equação 4.3 foi implementada junto a um aplicativo computacional, no qual os valores das constantes e do fator de amortecimento tiveram seus valores iniciais atribuídos pelo usuário. Na Figura 4.20, apresenta-se um ajuste realizado para o exemplo da Figura 4.19, bem como os quatro parâmetros da resposta analítica já apresentada, sendo eles as constantes arbitrárias A e B, o fator de amortecimento ajustado representado pela letra q, e a frequência natural dada em rad/s representada pela letra r. O coeficiente de determinação, representado por Adj. R-Square na tabela da Figura 4.20, tal como obtido pelo aplicativo computacional, indica o ajustamento do modelo estatístico ou, no caso, da Equação 4.3 com os dados ou a curva experimental obtida no ensaio de vibração livre. O coeficiente de determinação a ser apresentado nas tabelas seguintes terá a nomenclatura de R².

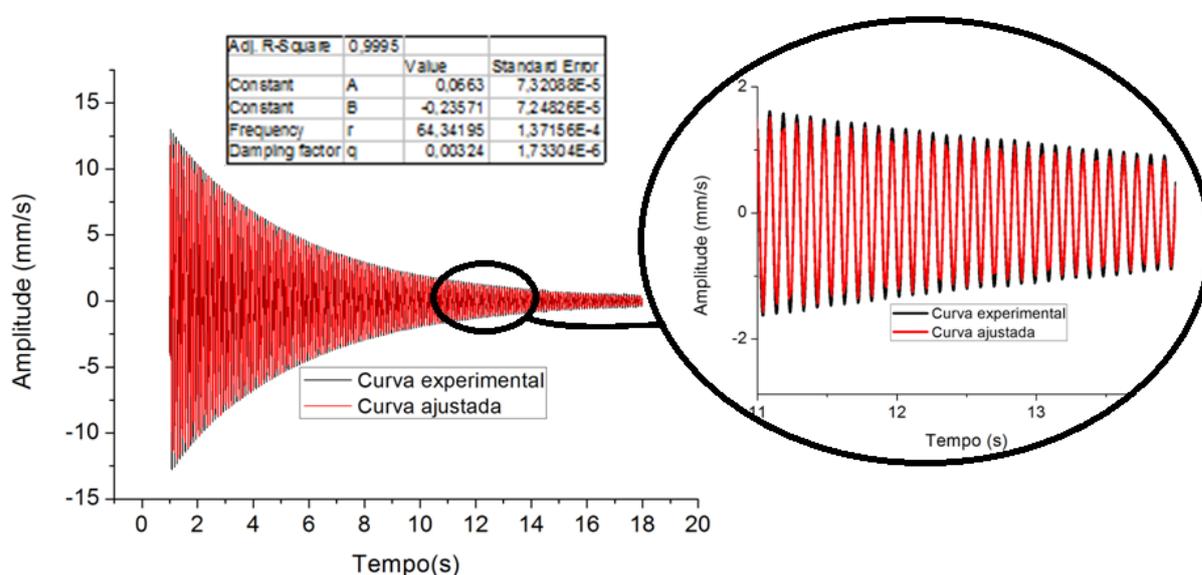


Figura 4.20 – Ajuste da curva de amplitude no tempo para a viga sanduíche com núcleo em PLA contendo 60% de partículas ferromagnéticas, sob campo magnético de 50 kA/m aplicado na extremidade livre da viga.

De acordo com a Figura 4.20, o valor do fator de amortecimento ζ é de 0,00324, ao passo que o ajuste realizado teve um coeficiente de determinação R² de 0,9995, o que repre-

senta uma forte relação entre o ajuste realizado e a curva obtida experimentalmente. Os ajustes das demais curvas obtidas em todos aqueles ensaios de vibração livre citados no sub-item 3.2.4.1 estão presentes no Apêndice A ao fim desta Tese, uma vez que são muitos gráficos a serem inseridos no corpo deste texto. Porém os valores do fator de amortecimento ζ e do coeficiente de determinação R^2 para todos os ajustes realizados estão presentes nas Tabelas de 4.15 a 4.22, para os ímãs posicionados na extremidade livre e no centro das vigas. Nestas tabelas, a coluna *Variação(%)* foi obtida pela Equação 4.1, apenas trocando-se o valores de cada frequência pelo valor do fator de amortecimento.

Observam-se nestas tabelas, que os valores de R^2 obtidos foram todos superiores a 0,92, o que mostra que os ajustes realizados são confiáveis e as curvas ajustadas acomodam-se fortemente às curvas experimentais. Cabe ressaltar aqui, que os valores obtidos para os fatores de amortecimento ζ são valores aproximados, uma vez que são obtidos a partir de um ajuste, ou seja, a partir de um modelo teórico analítico.

Tabela 4.15 – Fatores de amortecimento obtidos pelo ajustes das curvas de amplitude no tempo para a viga sanduíche com colmeia em PLA contendo 30% de partículas magnéticas, com ímã na extremidade.

	Fator de amortecimento (ζ)	Coefficiente de determinação (R^2)	Variação (%)	
	0	0,00296	0,99029	0,00000
	20	0,00250	0,99411	15,54054
	30	0,00269	0,99440	9,12162
	40	0,00274	0,99744	7,43243
	50	0,00299	0,95915	-1,01351
Campo (kA/m)	60	0,00285	0,98298	3,71621
	70	0,00294	0,92516	0,67567
	80	0,00282	0,94753	4,72973
	90	0,00367	0,93617	-23,98649
	100	0,00323	0,98461	-9,12162
	110	0,00338	0,94708	-14,18919
	120	0,00355	0,94421	-19,93243

Tabela 4.16 – Fatores de amortecimento obtidos pelo ajustes das curvas de amplitude no tempo para a viga sanduíche com colmeia em PLA contendo 30% de partículas magnéticas, com ímã no centro.

	Fator de amortecimento (ζ)	Coefficiente de determinação (R^2)	Varição (%)
	0	0,99029	0,00000
	20	0,96674	6,08108
	30	0,95311	-3,71622
	40	0,99876	-1,35135
	50	0,98276	7,43243
Campo (kA/m)	60	0,98177	9,45946
	70	0,99333	-3,71622
	80	0,96754	11,82432
	90	0,99780	-5,74324
	100	0,98577	-3,37838
	110	0,96881	13,85135
	120	0,98815	1,68919

Tabela 4.17 – Fatores de amortecimento obtidos pelo ajustes das curvas de amplitude no tempo para a viga sanduíche com colmeia em PLA contendo 60% de partículas magnéticas, com ímã na extremidade.

	Fator de amortecimento (ζ)	Coefficiente de determinação (R^2)	Varição (%)
	0	0,99690	0,00000
	20	0,95614	-6,20690
	30	0,94802	-10,34483
	40	0,98547	-12,75862
Campo (kA/m)	50	0,99950	-11,72414
	60	0,98801	-20,00000
	70	0,99014	-54,13793
	80	0,99525	-57,58621
	90	0,99249	-133,10345
	100	0,99342	-191,03448

Tabela 4.18 – Fatores de amortecimento obtidos pelo ajustes das curvas de amplitude no tempo para a viga sanduíche com colmeia em PLA contendo 60% de partículas magnéticas, com ímã no centro.

	Fator de amortecimento (ζ)	Coefficiente de determinação (R^2)	Variação (%)
	0	0,99690	0,00000
	20	0,96082	-8,27586
	30	0,99579	-6,89655
	40	0,99109	-11,37931
Campo (kA/m)	50	0,99144	5,17241
	60	0,97543	3,79310
	70	0,99870	-14,13793
	80	0,98551	-27,24138
	90	0,95003	-20,68966
	100	0,94439	-27,24138

Tabela 4.19 – Fatores de amortecimento obtidos pelo ajustes das curvas de amplitude no tempo para a viga sanduíche com colmeia em ABS contendo 30% de partículas magnéticas, com ímã na extremidade.

	Fator de amortecimento (ζ)	Coefficiente de determinação (R^2)	Variação (%)
	0	0,95652	0,00000
	20	0,94435	5,08475
	30	0,99777	6,77966
	40	0,94732	-6,44068
	50	0,99446	3,38983
Campo (kA/m)	60	0,95927	-2,03390
	70	0,94693	-18,30508
	80	0,99756	-2,03390
	90	0,96011	-2,03390
	100	0,99843	-6,10169
	110	0,97996	-27,45763
	120	0,95905	-34,23729

Tabela 4.20 – Fatores de amortecimento obtidos pelo ajustes das curvas de amplitude no tempo para a viga sanduíche com colmeia em ABS contendo 30% de partículas magnéticas, com ímã no centro.

	Fator de amortecimento (ζ)	Coefficiente de determinação (R^2)	Varição (%)	
	0	0,00295	0,95652	0,00000
	20	0,00315	0,96178	-6,77966
	30	0,00294	0,99891	0,33898
	40	0,00249	0,97777	15,59322
	50	0,00302	0,96397	-2,37288
Campo (kA/m)	60	0,00271	0,94605	8,13559
	70	0,00288	0,94547	2,37288
	80	0,00289	0,99913	2,03390
	90	0,00316	0,95758	-7,11864
	100	0,00318	0,96148	-7,79661
	110	0,00323	0,96030	-9,49153
	120	0,00341	0,95518	-15,59322

Tabela 4.21 – Fatores de amortecimento obtidos pelo ajustes das curvas de amplitude no tempo para a viga sanduíche com colmeia em ABS contendo 60% de partículas magnéticas, com ímã na extremidade.

	Fator de amortecimento (ζ)	Coefficiente de determinação (R^2)	Varição (%)	
	0	0,00261	0,96651	0,00000
	20	0,00245	0,95242	6,13027
	30	0,00259	0,97531	0,76628
	40	0,00302	0,95678	-15,70881
Campo (kA/m)	50	0,00324	0,93238	-24,13793
	60	0,00299	0,99732	-14,55939
	70	0,00333	0,95590	-27,58621
	80	0,00383	0,95553	-46,74330
	90	0,00422	0,95596	-61,68582
	100	0,00448	0,97461	-71,64751

Tabela 4.22 – Fatores de amortecimento obtidos pelo ajustes das curvas de amplitude no tempo para a viga sanduíche com colmeia em ABS contendo 60% de partículas magnéticas, com ímã no centro.

	Fator de amortecimento (ζ)	Coefficiente de determinação (R^2)	Variação (%)	
	0	0,00261	0,96651	0,00000
	20	0,00302	0,93036	-15,70881
	30	0,00263	0,98966	-0,76628
	40	0,00253	0,97745	3,06513
Campo (kA/m)	50	0,00277	0,97896	-6,13027
	60	0,00252	0,94310	3,44828
	70	0,00272	0,97220	-4,21456
	80	0,00273	0,99893	-4,59770
	90	0,00294	0,98201	-12,64368
	100	0,00311	0,99762	-19,15709

As Tabelas de 4.15 a 4.22 deixam claro que, assim como para as frequências naturais, o fator de amortecimento interage com o campo magnético aplicado.

Nas Figuras 4.21 e 4.22, têm-se de forma resumida as informações contidas nas tabelas citadas referentes à variação do fator de amortecimento ζ das vigas sanduíche com o aumento do campo magnético aplicado.

A Figura 4.21 ilustra como o fator de amortecimento comportou-se enquanto o campo magnético aumentou para os quatro modelos de viga quando o ímã era posicionado em suas extremidades livres. De acordo com esta figura, notou-se aumento significativo do fator de amortecimento para as vigas contendo 60% em massa de partículas ferromagnéticas com ímã posicionado em suas extremidades livres, à medida que o campo magnético aumentou. Para as vigas sanduíche contendo 30% em massa de partículas, notou-se uma tendência de aumento nos valores dos fatores de amortecimento ao passo que o campo magnético aumentou, apesar de pequenas oscilações.

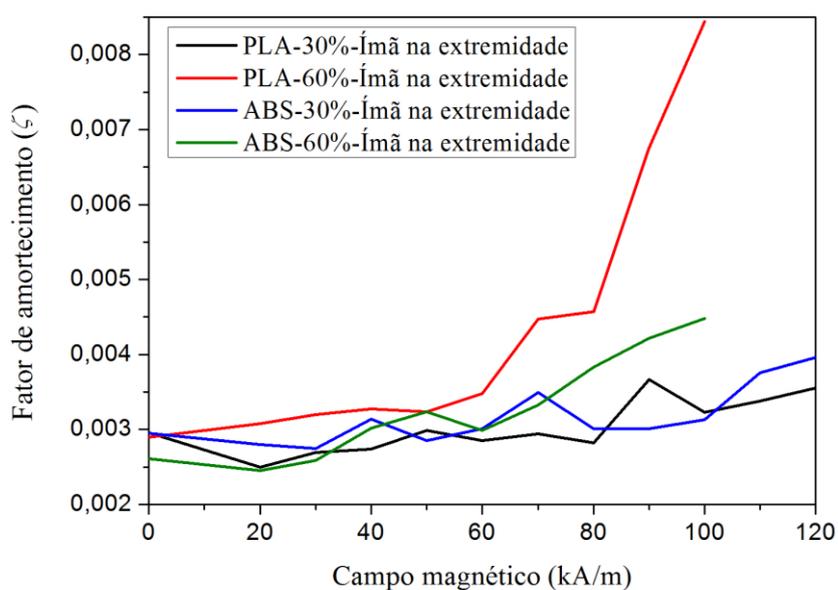


Figura 4.21 – Variação para os valores dos fatores de amortecimento em função do campo magnético aplicado nas extremidades livres das vigas sanduíche, para o primeiro modo de vibração.

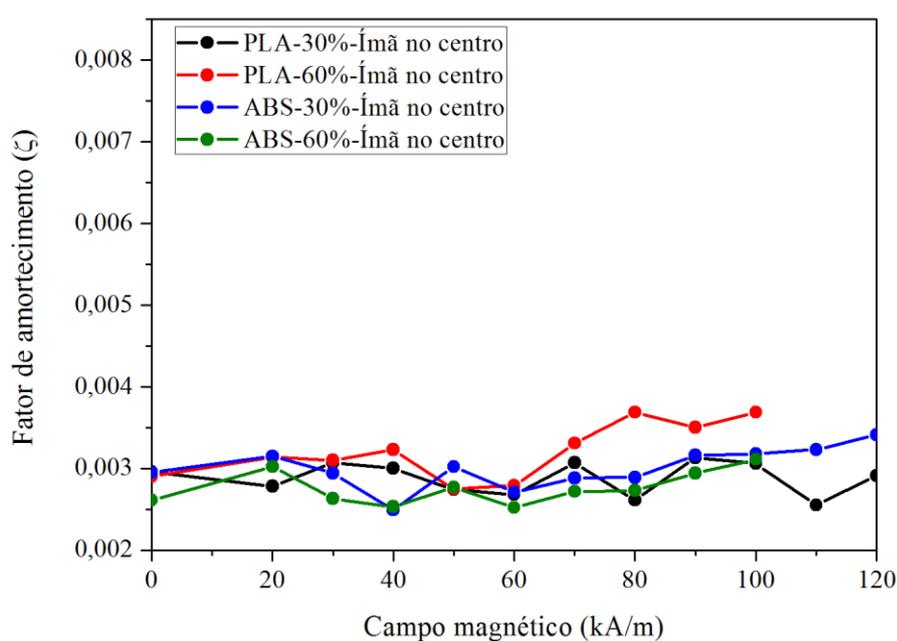


Figura 4.22 – Variação para os valores dos fatores de amortecimento em função do campo magnético aplicado nos centros das vigas sanduíche, para o primeiro modo de vibração.

Considerando-se a Figura 4.22, a qual mostra o comportamento do fator de amortecimento com o aumento do campo magnético quando o ímã é posicionado nos centros das vi-

gas, nota-se comportamento semelhante ao descrito para a Figura 4.21 para as vigas, com exceção para a viga contendo PLA com 30% de partículas no elastômero, para a qual não se observou uma tendência de elevação nos valores de seus fatores de amortecimento a medida que o campo magnético aumentou, além de serem notadas oscilações nos seus valores. Isto pode ser devido ao fato de que o PLA é mais rígido que o ABS e também que a fração mássica de partículas no elastômero é relativamente pequena para alterar de forma significativa os valores do fator de amortecimento. Nota-se ainda, a partir desta figura, que o ímã quando posicionado junto ao centro da viga em balanço, é pouco capaz de amortecer o seu movimento oscilatório. Isto deve-se ao fato de que a utilização combinada entre as lâminas em fibra de carbono e o núcleo preenchido pelo silicone comercial gerou uma estrutura significativamente rígida e, uma vez posicionado mais próximo ao engaste, menor a influência do campo sobre o amortecimento e conseqüente redução da frequência amortecida (como mostrado anteriormente) devido à rigidez elevada própria da proximidade ao engaste. É como se o ímã, grosso modo, representasse um novo engaste no centro da viga, restando ainda a porção livre da mesma para manter a oscilação, então do engaste no suporte até o ímã, existe uma grande restrição à oscilação da viga, porém do ímã até a extremidade livre, continua existindo uma certa flexibilidade livre para que a mesma continue oscilando (comprimento livre), e é exatamente na extremidade livre da viga onde o vibrômetro laser é posicionado, sendo então ali o ponto de medição da velocidade da viga. Então, como mostrado nas figuras anteriores, o posicionamento do ímã no centro da viga é pouco efetivo no aumento de seu amortecimento, uma vez que existe uma porção livre da viga sujeita à vibração livre mesmo após a aplicação de campo magnético, e essa porção livre em vibração pode influenciar o amortecimento próprio devido ao campo magnético. Por fim, esses valores de fator de amortecimento foram obtidos a partir de ajustes numéricos, que constituem técnicas aproximadas, podendo acarretar algum pequeno desvio a partir do valor real.

Para as disposições de vigas sanduíche ensaiadas, percebeu-se que a partir de um campo magnético de mais ou menos 50 kA/m os fatores de amortecimento tendem a aumentar de maneira mais pronunciada e visível graficamente, e a partir de 70 kA/m, para configurações de ímãs posicionados nas extremidades livres das vigas, os valores dos fatores de amortecimento para as vigas contendo 60% de partículas se tornam superiores aos observados para as vigas com 30%. Variações significativas foram alcançadas para o fator de amortecimento sob

um campo magnético de 100 kA/m para a viga com PLA contendo 60% de partículas, por exemplo, cuja variação foi de 191,04%.

Com o intuito de se ter uma ordem de grandeza para os fatores de amortecimento aqui encontrados com relação os fatores de amortecimento presentes na literatura, foram encontrados alguns valores para materiais compósitos obtidos a partir de fibra de carbono. No trabalho de Ancelotti Jr. (2006), foram encontrados valores para o fator de amortecimento que variaram de 0,0063 a 0,0075 para compósitos obtidos a partir de resina epóxi e fibra de carbono, para uma disposição de 16 camadas de tecido bidirecional de fibra de carbono ($0^\circ, 90^\circ$). No trabalho de Tauchert (1971), foram obtidos fatores de amortecimento iguais a 0,0054 para um compósito de fibra de carbono ($0^\circ, 90^\circ$) com matriz em resina fenólica. Estes valores encontrados na literatura mostram que somente os compósitos obtidos a partir da fibra de carbono por si só apresentam fatores de amortecimento muito pequenos, ou seja, a fibra de carbono representa um reforço significativamente rígido e de pobre capacidade de amortecimento. A associação da fibra de carbono com a resina epóxi, mais os núcleos em ABS e PLA, mostrada nesta Tese, gera como resultado um produto final de elevada rigidez e baixa capacidade de amortecimento também, assim como os compósitos obtidos a partir de fibra de carbono e resina somente.

Com os resultados apresentados, conclui-se que o campo magnético é capaz de aumentar as propriedades de amortecimento de vigas sanduíche com núcleo colmeia preenchido por elastômero magneto reológico. À medida que a intensidade do campo magnético aumenta, a atração magnética das partículas também aumenta, com isso, essa atração faz com que o movimento oscilatório das partículas seja reduzido, e uma vez reduzida a amplitude de oscilação da viga, tem-se um amortecimento de sua oscilação em função direta e exclusivamente do campo magnético. A Equação (4.4) mostra a relação entre a frequência natural amortecida ω_d e o fator de amortecimento ζ . Confrontando-se esta equação com as Figuras 4.21 e 4.22, confirma-se que à medida que a frequência amortecida diminui com o aumento do campo, o fator de amortecimento tende a aumentar, mostrando que esses parâmetros são inversamente proporcionais. Assim, pode-se dizer que, principalmente para as vigas contendo 60% em massa de partículas ferromagnéticas, o fator de amortecimento é uma propriedade diretamente proporcional ao campo magnético.

Em situações práticas de projeto, o campo magnético pode ser utilizado para se aumentarem as propriedades de amortecimento de vigas quando se necessitam de respostas rá-

pidas no tempo, ou seja, menos oscilações no tempo, o que pode gerar à estrutura uma maior resistência à fadiga, por exemplo.

4.5 RESULTADOS DO ENSAIO DE VIBRAÇÃO FORÇADA

Neste subcapítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios descritos no subitem 3.3.2, relativo ao ensaio de vibração forçada. As vigas foram engastadas ao *Shaker*, e excitadas dinamicamente em suas frequências de ressonância. As frequências de excitação para as quatro vigas tipo sanduíche estudadas aqui estão presentes na Tabela 4.23. Ressalta-se, porém, que estas frequências dizem respeito ao primeiro modo de vibração das vigas engastadas ao *Shaker*, na ausência de um campo magnético aplicado. Então, no decorrer do ensaio, a frequência de excitação era mantida e apenas o campo magnético variava, mostrando-se assim, o efeito do campo sobre uma viga em ressonância.

Tabela 4.23 – Frequências de excitação de cada viga no ensaio de vibração forçada sem campo magnético aplicado.

Viga	Frequência de Ressonância (Hz)
Amostra 1 (PLA-30%)	12,18
Amostra 2 (PLA-60%)	11,96
Amostra 3 (ABS-30%)	12,31
Amostra 4 (ABS-60%)	11,74

As Figuras de 4.23 a 4.26 mostram a variação da amplitude de vibração, dada em mm/s, pelo tempo, dado em segundos, para os modelos de viga ensaiados, em função do campo magnético aplicado conforme esquematizado na Figura 3.19. Uma vez que o campo magnético se torna mais influente sobre os parâmetros modais das vigas quando posicionado em suas extremidades livres, no ensaio de vibração forçada analisou-se somente o efeito do campo magnético na extremidade livre das vigas.

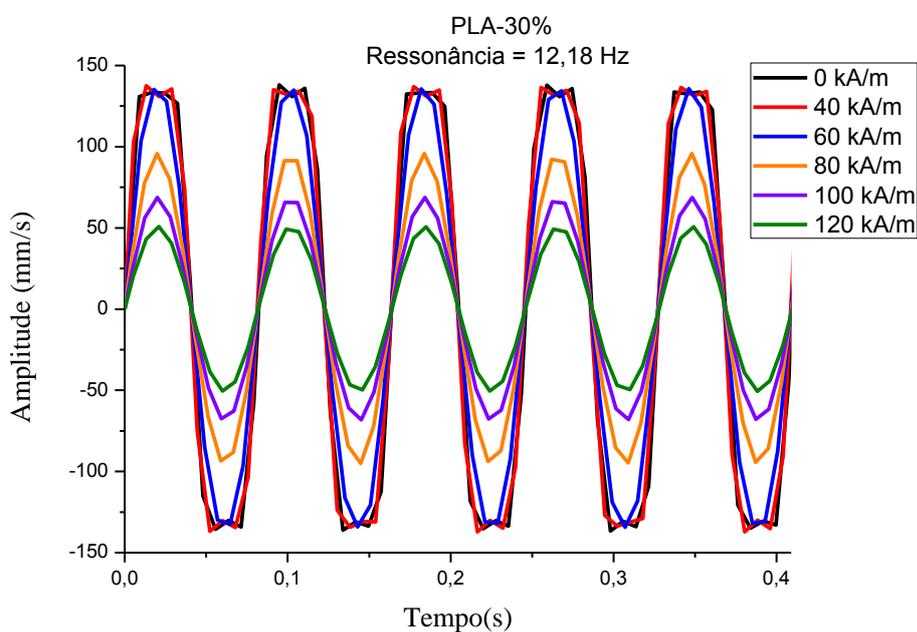


Figura 4.23 – Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga sanduíche com colmeia em PLA com elastômero contendo 30% de partículas magnéticas. Frequência de excitação de 12,18 Hz.

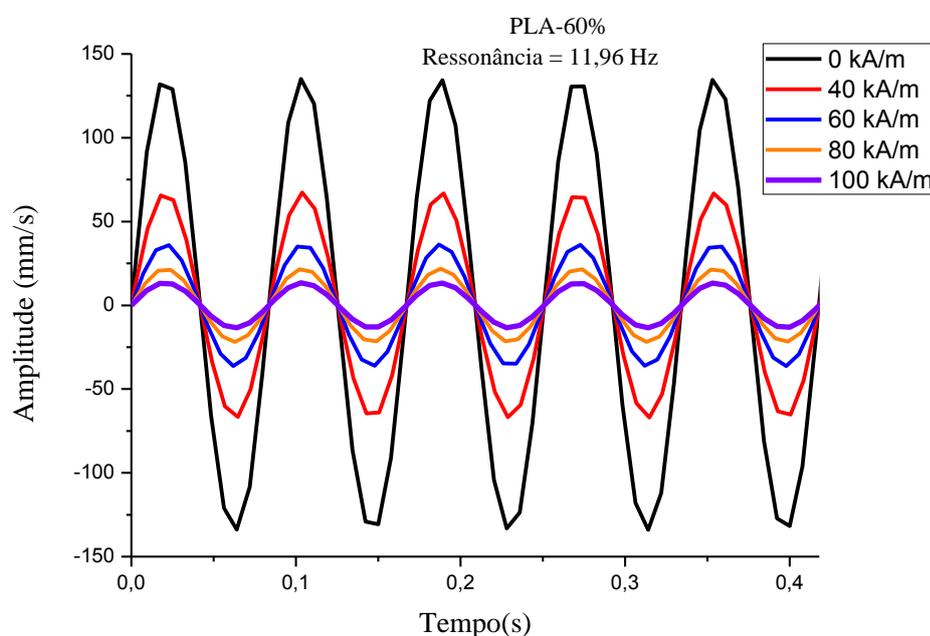


Figura 4.24 – Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga sanduíche com colmeia em PLA com elastômero contendo 60% de partículas magnéticas. Frequência de excitação de 11,96 Hz.

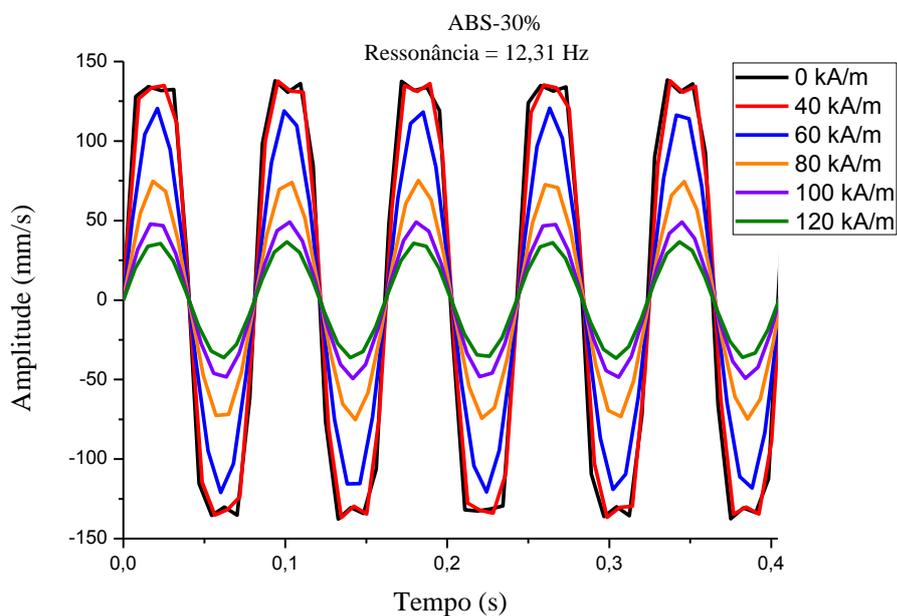


Figura 4.25 – Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga sanduíche com colmeia em ABS com elastômero contendo 30% de partículas magnéticas. Frequência de excitação de 12,31 Hz.

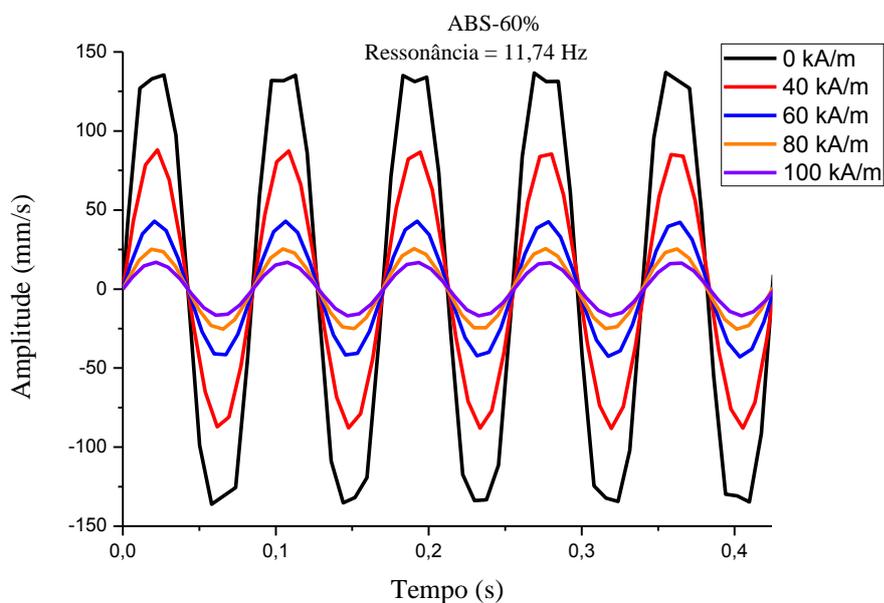


Figura 4.26 – Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga sanduíche com colmeia em ABS com elastômero contendo 60% de partículas magnéticas. Frequência de excitação de 11,74 Hz.

Novamente aqui, para as vigas contendo 60% em massa de partículas ferromagnéticas, o máximo campo magnético aplicado foi de 100 kA/m, conforme explicado anteriormente, devido ao fato de estas vigas se aderirem aos polos do ímã. E para as contendo 30%, o máximo campo foi de 120 kA/m. Uma vez que nos ensaios de vibração livre observou-se que campos mais elevados eram capazes de gerar respostas dinâmicas mais significativas, optou-se neste ensaio pela aplicação de campos superiores a 40 kA/m, variando de 20 em 20 kA/m.

Todas as vigas apresentaram redução em suas amplitudes de vibração à medida que o campo magnético teve sua intensidade aumentada, fato este observado também no trabalho desenvolvido por Chikh *et al.* (2016). Comparando-se as amplitudes das quatro vigas na ausência de campo aplicado e com o campo aplicado de 100 kA/m, observa-se o seguinte: Para a viga contendo PLA com 30% de partículas, na ausência de campo magnético, o valor de sua amplitude média foi de 134 mm/s, já com o campo de 100 kA/m, 67 mm/s, ou seja, uma redução de 50% na amplitude de vibração. Para a viga contendo PLA com 60%, esses valores foram, respectivamente, 134 mm/s e 13 mm/s, representando uma redução de aproximadamente 90%, ao passo que para a viga com ABS contendo 30% esses valores foram de 134 mm/s e 47 mm/s, respectivamente, gerando redução de aproximadamente, 65%. Por fim, para a viga com ABS e 60%, os respectivos valores foram de 134 mm/s e 16 mm/s, uma redução de 88% na amplitude de vibração. Todas as amplitudes de vibração na ausência de campo aplicado foram de 134 mm/s, uma vez que o *Shaker* foi ajustado para gerar essa amplitude nas vigas a ele engastadas. A maior redução porcentual na amplitude de vibração, sob campo magnético de 100 kA/m, foi para a viga contendo colmeia em PLA com 60% de partículas, seguida daquela contendo ABS com 60% de partículas, ou seja, novamente as maiores frações mássicas de partícula de ferro no elastômero apresentaram maior capacidade de alteração das propriedades dinâmicas das vigas sanduíche sob a incidência de um campo magnético a elas aplicado. A fração mássica de partículas de ferro no núcleo colmeia está diretamente relacionada à sua atração magnética aos polos do eletroímã. Atração esta capaz de atrair fortemente as vigas aos polos do ímã, conseqüentemente de diminuir suas amplitudes de vibração. Assim, quanto maior o campo magnético exercido sobre as vigas, maior sua atração magnética e menor sua amplitude de vibração, principalmente para as vigas contendo 60% em massa de partículas ferromagnéticas no núcleo se comparadas àquelas contendo 30%.

Os resultados anteriores se mostram significativos e muito importantes do ponto de vista prático. Pois uma vez iniciada a ressonância em uma estrutura tipo sanduíche com núcleo contendo partículas magnéticas, é possível aplicar-se a ela um campo magnético, o qual irá reduzir drasticamente a sua amplitude de vibração, bem como retardar os efeitos degradantes que uma ressonância pode causar, como por exemplo, o colapso da estrutura. Assim se ganha tempo para a realização de manobras de recuperação necessárias, bem como o aumento da vida útil de estruturas e componentes desenvolvidos a partir das configurações mostradas neste trabalho.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

5.1 CONCLUSÕES

Nesta tese, foi apresentado um roteiro experimental para a fabricação de novos modelos de viga tipo sanduíche, com núcleo colmeia preenchido por elastômero magneto reológico contendo partículas ferromagnéticas nas frações em massa de 30 e 60%, e lâminas fabricadas a partir de material compósito laminado. Além disso, avaliou-se a influência que diferentes intensidades de campo magnético exercem sobre as propriedades dinâmicas destes tipos de viga, sendo elas as frequências naturais, fatores de amortecimento e amplitude de vibração quando em ressonância, bem como a relação entre a posição de aplicação do campo magnético sobre estes parâmetros, além de se determinarem as propriedades reológicas do elastômero magneto reológico utilizado no preenchimento das colmeias.

As seguintes conclusões foram obtidas:

- Verificou-se que o silicone comercial é um meio rígido à ordenação das partículas ferromagnéticas na orientação imposta pelo campo magnético, logo o campo magnético não alterou de forma significativa as propriedades reológicas do elastômero utilizado no preenchimento das colmeias;

- ☑ O material de fabricação da colmeia mais efetivo do ponto de vista dinâmico, foi o PLA. Logo a disposição de viga mais rígida foi a que apresentou a melhor resposta dinâmica frente ao campo magnético;
- ☑ Nos ensaios de vibração livre, o campo magnético se mostrou mais eficaz na variação das propriedades dinâmicas dos modelos de viga sanduíche desenvolvidos quando posicionado em suas extremidades livres;
- ☑ Foram alcançadas variações significativas nos valores das frequências naturais, de modo que quando se aumentaram os valores do campo magnético, diminuíram-se os valores das frequências naturais;
- ☑ Os valores mais expressivos, para o campo magnético de 100 kA/m, foram alcançados para o eletroímã na extremidade livre da viga sanduíche com colmeia em PLA contendo 60% em massa de partículas ferromagnéticas, sendo a variação para a frequência natural correspondente a este campo de 40,35%, a variação alcançada para o fator de amortecimento de 191,03%, e, no ensaio de vibração forçada, o campo conseguiu baixar sua amplitude de vibração no tempo em até 90%.
- ☑ A simulação numérica foi validada e mostrou-se eficiente na determinação dos modos de vibração dos modelos de viga sanduíche, apresentando alta correlação com os resultados obtidos experimentalmente;
- ☑ Mostrou-se ser capaz de se alterarem as propriedades dinâmicas de estruturas tipo sanduíche, com as disposições apresentadas neste trabalho, para se evitar a ressonância ou se evitarem seus efeitos indesejados, apenas alterando-se o valor do campo magnético aplicado, sem a necessidade de se alterarem sua massa, rigidez ou geometria. Sendo estas últimas, as medidas mais tomadas quando se deseja alterar o comportamento dinâmico de uma estrutura.

5.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

Como sugestões para trabalhos futuros listam-se as seguintes ideias:

- ☑ Utilização de outros métodos para o cálculo do fator de amortecimento;
- ☑ Utilização de gel ou fluido magneto reológico ao invés do elastômero rígido;

- ☑ Substituição do ABS e PLA por materiais mais flexíveis que possam ser utilizados no processo de fabricação de uma impressora 3D, de modo a manter-se a técnica utilizada neste trabalho;
- ☑ Avaliar os efeitos ambientais no envelope de voo, como por exemplo, temperaturas de -60°C a 80°C ;
- ☑ Como uma segunda etapa deste trabalho inicial desenvolvido, sugere-se o estudo de técnicas e/ou aparatos experimentais para a aplicação de campo magnético em modelos reais de vigas sanduíche com núcleo em magneto reológico, principalmente no setor aeronáutico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIB, S.; NOUR, A.; BENKOUSSAS, B.; TAWFIQ, I.; DJEDID, T.; CHIKH, N. Numerical simulation of the nonlinear static behavior of composite sandwich beam with a magnetorheological elastomer core. **Composite Structures**, v. 139, p. 111-119, 2016.
- AGUIB, S.; NOUR, A.; DJEDID, T.; BOSSIS, G. & CHIKH, N. Forced transverse vibration of composite sandwich beam with magnetorheological elastomer core. **Journal of Mechanical Science & Technology**, v. 30, n. 1, 2016.
- AHAMED, R.; CHOI, S. B.; FERDAUS, M. M. A state of art on magneto-rheological materials and their potential applications. **Journal of Intelligent Materials and Structures**, v. 29, n. 10, p. 2051-2095, 2018.
- ALBERT, S. L. **Structure design concepts**. Washington D. C.: NASA SP-5039, 1967.
- ALLAHVERDIZADEH, A.; MAHJOOB, M. J.; ESHRAGHI, I. *et al.* On the vibration behavior of functionally graded electrorheological sandwich beams. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 70, p. 130-139, 2013.
- ALLEN, H. G. **Analysis and design of structural sandwich panels**. 1^a ed. Hungary: Pergamon Press, 1969.
- ALMEIDA, M. I. A. **Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção**. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2009.
- ANCELOTTI JR., A. C. **Efeitos da porosidade na resistência ao cisalhamento e nas propriedades dinâmicas de compósitos de fibra de carbono/resina epóxi**. 226 f. Dissertação de mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2006.
- APETRE, N. A. **Sandwich panels with functionally graded core**. 165 f. Dissertation (Doctor of Philosophy) – University of Florida, 2005.
- ASHBY, M. F. The properties of foams and lattices. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 364, p. 15-30, 2006.
- ASTM D792, **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

- AUSANIO, G.; HISON, C. L.; IANNOTI, V.; LANOTTE, L.; LANOTTE, L. Magneto-piezoresistance in elastomagnetic composites. **Journal of Applied Physics**, v. 110, p. 1-5, 2011.
- BAKER, A.; DUTTON, S.; KELLY, D. **Composite Materials for Aircraft Structures**. AIAA Education Series, Virginia, 2004.
- BEHROOZ, M.; WANG, X.; GORDANINEJAD, F. Modeling of a new semi-active/passive magnetorheological elastomer isolator. **Smart Materials and Structures**, v. 23, 045013, 2014.
- BELO, I. M. **Análise Eficiente de Compósitos Laminados Planos Utilizando-se a Formulação de Elementos Finitos Corrigida A-Priori sem os Efeitos do Travamento**. 123 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2006.
- BELLAN, C.; BOSSIS, G. Field dependence of viscoelastic properties of MR elastomers. **International Journal of Modern Physics B**, v. 16, p. 2447-2453, 2002.
- BERG, C. D.; EVANS, L. F.; KERMODE, P. R. Composite structure analysis of a hollow cantilever beam filled with electro-rheological fluid. **Journal of Intelligent Material System and Structures**, v. 7, n. 5, p. 495-502, 1996.
- BERTINI, A. A. **Análise do comportamento à flexão de painéis sanduíche com faces de argamassa armada e núcleo de espuma rígida de poliuretano derivado de óleo de mamona**. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1995.
- BETTS, C. **Structural integrity of open-cell aluminium foam sandwich panels for lightweight wing structures**. 178 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Imperial College London, 2013.
- BISHAY, P. L.; TAWFIK, M.; NEGM, H. M. Experimental and finite element models of an adaptive magnetorheological sandwich beam. In: **Proceedings of the 17th International congress on sound and vibration**, Cairo, p. 18-22, 2010.
- BORNASSI, S.; NAVAZI, H. M. Torsional vibration analysis of a rotating tapered sandwich beam with magnetorheological elastomer core. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 29, n. 11, p. 2406-2423, 2018.

- BORNASSI, S.; NAVAZI, H. M.; HADDADPOUR, H. Edgewise bending vibration analysis of a rotating sandwich beam with magnetorheological elastomer core. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, v. 18, n. 11, p. 1-28, 2018.
- BORTOLUZZI, D. B. **Desenvolvimento de compósitos tridimensionais por meio de costura em compósitos de fibra de carbono/epóxi**. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Materiais para Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, 2017.
- BÖSE, H. Viscoelastic properties of silicone-based magnetorheological elastomers. **Journal of Modern Physics B**, v. 21, n. 29, p. 4790-4797, 2007.
- CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering: an Introduction**. 7^aed., Jhon Wiley & Sons, New York. 2007.
- CARLSON, J. D. Controlling vibration with magnetorheological fluid damping. **Sensors**, v. 19, p. 30-35, 2002.
- CARLSON, J. D.; JOLLY, M. R. MR fluid, foam and elastomer devices. **Mechatronics**, v. 10, p. 555-569, 2000.
- CHEN, L.; GONG, X. L.; JIANG, W. Q.; YAO, J. J.; DENG, H. X.; LI, W. H. Investigation on magnetorheological elastomers based on natural rubber. **Journal of Materials Science**, v. 42, p. 5483-5489, 2007.
- CHEN, L.; GONG, X. L.; LI, W. H. Microstructures and viscoelastic properties of anisotropic magnetorheological elastomers. **Smart Materials and Structures**, v. 16, p. 2645-2650, 2007a.
- CHEN, Y.; YUAN, F. G.; CONRAD, H. Damping characteristics of laminate composites containing electrorheological (ER) fluids. In: **Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Material**. Williamsburg, VA, p. 328-339, 1994.
- CHIKH, N.; NOUR, A.; AGUIB, S.; TAWFIQ, I. Dynamic analysis of the non-linear behavior of a composite sandwich beam with a magnetorheological elastomer core. **Acta Mechanica Solida Sinica**, v. 29, n. 3, p. 271-283, 2016.
- CHOI, W. J. **Dynamic Analysis of Magnetorheological Elastomer Configured Sandwich Structures**. 212 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – University of Southampton, 2009.
- CHOI, W. J.; XIONG, Y. P.; SHENOI, R. A. Vibration characteristics of sandwich beams with steel skins and magnetorheological elastomer cores. **Advances in Structural Engineering**, v. 13, n. 5, p. 837-844, 2010.

- CHOI, Y.; SPRECHER, A. F.; CONRAD, H. Vibration characteristics of a composite beam containing an electrorheological fluid. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 1, p. 91-104, 1990.
- CHUNG, J.; WASS, A. M. Compressive response of honeycomb under in-plane uniaxial static and dynamic loading, part 1: experiments. **AIAA Journal**, v. 40, p. 966-973, 2002.
- CORREIA, J. R. **Perfis Pultrudidos de Fibra de Vidro (GFRP). Aplicação de Vigas Mistas GFRP-Betão na Construção**. Dissertação (Mestrado em Construção) – Instituto Superior Técnico de Lisboa, 2004.
- CUI, X. Y.; LIU, G. R.; LI, G. Y.; ZHAO, X.; NGUYEN-THOI, T.; SUN, G. Y. A smoothed finite element method (SFEM) for linear and geometrically nonlinear analysis of plates and shells. **Comput Model Eng Sci**, v. 28, n. 2, p. 109-125, 2008.
- DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Materials**, Oxford University Press, 1994, 410 p.
- DE ALMEIDA, M. I. A. **Comportamento estrutural de painéis sanduíche compósitos para aplicações na indústria da construção**. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2009.
- DENG, H. X.; GONG, X. L.; Application of magnetorheological elastomer to vibration absorber. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, v. 13, p. 1938-1947, 2008.
- DENG, H. X.; GONG, X. L.; WANG, L. H. Development of an adaptive tuned vibration absorber with magnetorheological elastomer. **Smart Materials and Structures**, v. 15, N111, 2006.
- DIAB GROUP. **DIAB guide to core and sandwich**. Laholm, Sweden, 2012.
- DIGUET, G. **Huge magnetostriction of magneto-rheological composite**. Phd Thesis, University of Grenoble, 2010.
- DON, D. L.; COULTER, J. P. An analytical and experimental investigation of electrorheological material based adaptive beam structures. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 6, n. 6, p. 846-853, 1995.
- DONMEZ, B. **The Use of Shape Memory Alloys in Aerospace Applications**. Proceedings of AIAC-2007, Ankara, Turkey, 2007.

- DYNIWICZ, B.; BAJKOWSKI, J. M.; BAJER, C. I. Semi-active control of a sandwich beam partially filled with magnetorheological elastomer. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 60, n. 61, p. 695-705, 2015.
- EDMINISTER, J. A. **Eletromagnetismo: coleção Schaum**. 1ª ed., São Paulo, McGraw Hill, 1980.
- ELOY, F. S. **Análise do comportamento dinâmico de uma viga escalonada sobre apoios elásticos variáveis usando material compósito**. 183 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2014.
- ELOY, F. S.; GOMES, G. F.; ANCELOTTI JR., A. C.; CUNHA JR., S. S.; BOMBARD, A. J. F.; JUNQUEIRA, D. M. Experimental dynamic analysis of composite sandwich beams with magnetorheological honeycomb core. **Engineering Structures**, v. 176, p. 231-242, 2018.
- ESHAGHI, M.; SEDAGHATI, R.; RAKHEJA, S. Dynamic characteristics and control of magnetorheological/electrorheological sandwich structures: A state-of-the-art review. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 27, n. 15, 2003-2037, 2015.
- FANG, F. F.; CHOI, H. J.; JHON, M. S. Magnetorheology of soft magnetic carbonyl iron suspension with single-walled carbon nanotube additive and its yield stress scaling function. **Colloid Surf. A**, v. 351, p. 46-51, 2009.
- FARSHAD, M.; BENINE, A. Magnetoactive elastomer composites. **Polymer Testing**, v. 23, p. 347-353, 2004.
- FERREIRA, D. **Projeto e desenvolvimento de peça em compósito obtida em moldagem por transferência de resina para aplicação em telescópios**. 144 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Itajubá, 2016.
- FUCHS, A.; SUTRISNO, J.; GORDANINEJAD, F.; CAGLAR, M. B.; YANMING, L. Surface polymerization of iron particles for magnetorheological elastomers. **Journal of Applied Polymer Sciences**, v. 117, p. 934-942, 2010.
- FUKUSHIMA, J. C. **Desenvolvimento e caracterização de um elastômero magneto-reológico para aplicação em absorvedores de vibração mecânica**. 79 f. Dissertação

- (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Campus Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2016.
- FURUKAWA, M.; MITSUI, Y.; FUKUMARU, T.; KOJIO, K. Microphase-separated structure and mechanical properties of novel polyurethane elastomers prepared with ether based diisocyanate. **Polymer**, v. 2005, n. 46, p. 10817-10822, 2005.
- GAGLIARDO, D. P. **Análise de estruturas sanduíche: Parâmetros de projeto**. 171 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- GANDHI, M. V.; THOMSON, B. S.; CHOI, S. B. A new generation of innovative ultra-advanced intelligent composite materials featuring electro-rheological fluids: an experimental investigation. **Journal of Composite Materials**, v. 23, n. 12, p. 1232-1255, 1989.
- GARRIDO, M. A. J. **Composite sandwich panel floors for building rehabilitation**. 281 f. Thesis (Doctor in Civil Engineering) – Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, 2016.
- GAY, D.; HOA, S. V.; TSAI, S. W. **Composite Materials: Design and Applications**, 4^a ed., CRC Press, 2003, 523 p.
- GIBSON, R. F. **Principles of Composite Material Mechanics**. McGraw-Hill, 1994, 446 p.
- GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F. **Cellular Solids and Properties**, 2^a ed., Cambridge University Press, Cambridge, 1997.
- GINDER, J. M.; NICHOLAS, M. E.; ELIE, L. D.; *et al.* Magnetorheological elastomers: properties and applications. **Proceedings of SPIE 3675**, p. 131-138, 1999.
- GINDER, J. M.; SCHLOTTER, W. F.; NICHOLS, M. E. Magnetorheological elastomers in tunable vibration absorbers. **Proceedings of SPIE 2001**, p. 418-424, 2001.
- GONG, X. L.; ZHANG, X. Z.; ZHANG, P. Q. Fabrication and characterization of isotropic magnetorheological elastomers. **Polymer Testing**, v. 24, p. 669-676, 2005.
- GONG, X. L.; CHEN, L.; LI, J. F. Study of utilizable magnetorheological elastomers. **Journal of Modern Physics B**, v. 21, n. 29, p. 4875-4882, 2007.
- GÜNTHER, D.; BORIN, D. Y.; GÜNTHER, S.; ODENBACH, S. X-ray micro-tomographic characterization of field-structured magnetorheological elastomers. **Smart Materials and Structures**, v. 21, p. 1-7, 2012.

- HAIQING, G. ;KING, L. M. Vibration characteristics of sandwich beams partially and fully treated with electrorheological fluid. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 8, n.5, p. 401-413, 1997.
- HALL, A.; COATNEY, M.; BRADLEY, N.; YOO, J. H.; JONES, N.; WILLIAMS, B.; MYERS, O. Nondestructive damage detection of a magnetostrictive composite structure. In: **18th International Conference on Experimental Mechanics**, Brussels, Belgium, 2018.
- HARRIS, C. M.; PIERSON, A. G. **Harris' Shock and Vibration Handbook**. New York, Estados Unidos: Ed. McGraw Hill, 2002. 1568 p.
- HARVEY, J. A. **Smart Materials**. In: **Mechanical Engineers' Handbook**. Wiley, v.1, 3^a ed., 2006.
- HERRMANN, A. S.; ZAHLEN, P.; ZUARDY, I. Sandwich structures technology in commercial aviation. In: **Thomsen, O, Bozhevolnaya E., Lyckegaard A. (eds.) Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials**, p. 13-26, 2005.
- HEXCEL COMPOSITES. Hexcel's Composite Materials for the Aerospace Industry. **European Airshow Issue, Hexcel Composites**, Stamford, 1998.
- HU, G.; GUO, M.; LI, W.; DU, H.; ALICI, G. Experimental investigation of the vibration characteristics of a magnetorheological elastomer sandwich beam under non-homogeneous small magnetic fields. **Smart Materials and Structures**, v. 20, p. 1-7, 2011.
- HU, Y.; WANG, Y. L.; GONG, X. L.; GONG, X. Q.; ZHANG X. Z.; JIANG, W. Q.; ZHANG P. Q.; CHEN, Z. Y. New magnetorheological elastomers based on polyurethane/si-rubber hybrid. **Polymer Testing**, v. 24, n. 3, p. 324-329, 2005.
- IRAZU, L.; ELEJABARRIETA, M. J. Magneto-dynamic analysis of sandwiches composed of a thin visco-elastic magnetorheological layer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 28, n. 30, p. 3106-3114, 2017.
- JHA, A. K. **Free vibration analysis of sandwich panel**. 77 f. Thesis (Master of Technology in Mechanical Engineering) – Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, 2007.
- JOHNSON, C. D. & KIENHOLZ, D. A. Finite element prediction of damping in structures with constrained viscoelastic layers. **AIAA journal**, v. 20, n. 9, p.: 1284-1290, 1982.

- JOLLY, M. R.; BENDER, J. W.; CARLSON, J. D. Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 10, n. 1, p. 5-13, 1999.
- JONES, R. M. **Mechanics of composite materials**, 2^a ed., Taylor & Francis, 1999, 554 p.
- JOSHI, S. B. Vibration study of magnetorheological fluid filled sandwich beams. **International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering**, v. 2, n. 2, p. 100-104, 2012.
- JUNQUEIRA, D. M. **Tubo para prótese de membro inferior utilizando estrutura de travessas rígidas**. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2018.
- KALLIO, M. **The elastic and damping properties of magnetorheological elastomers**. 149 f. PhD Thesis, Tampere University of Technology, Tampere, 2005.
- KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials**, 2^a ed., CRC Press, 2006, 473 p.
- KELLER, T.; ROTHE, J.; DE CASTRO, J.; OSEI-ANTWI, M. GRFP-balsa sandwich bridge deck: concept, design, and experimental validation. **Journal of Composites for Construction**, v. 18, n. 2, 04013043, 2014.
- KOO, J. H.; DAWSON, A.; JUNG, H. J. Characterization of actuation properties of magnetorheological elastomers with embedded hard magnetic particles. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 23, n. 9, p.1049-1054, 2012.
- KOOMEN, T. J. **General Control Framework for Shape Memory Alloy Based Actuators: A Phase Transformation Approach**. 105 f. Thesis (Master of Science in Mechanical Engineering) – Delft University of Technology, Delft, 2015.
- KOZLOWSKA, J.; BOCZKOWSKA, A.; CZULAK, A.; PRZYBYSZEWSKI, B.; HOLECZEK, K.; STANIK, R.; GUDE, M. Novel MRE/CFRP sandwich structures for adaptive vibration control. **Smart Materials and Structures**, v. 25, p. 1-15, 2016.
- KWON, S. H.; LEE, J. H.; CHOI, H. J. Magnetic particle filled elastomeric hybrid composites and their magnetorheological response. **Materials**, v. 11, n. 1040, p. 1-22, 2018.
- LARA-PIETRO, V.; PARKIN, R.; JACKSON, M.; SILBERSCHMIDT, V.; KESY, Z. Vibration characteristics of MR cantilever sandwich beams: experimental study. **Smart Materials and Structures**, v. 19, p. 1-9, 2010.

- LARES, A. **Insert Design and Manufacturing for Foam-Core Composite Sandwich Structures**. 165 p. Thesis (Master of Applied Science) – Carleton University, Ottawa, Ontario, 2012.
- LEDOUX, A. **Theory of Piezoelectric Materials and Their Applications in Civil Engineering**. 49 f. Thesis (Master of Engineering in Civil and Environmental Engineering) – Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2011.
- LEE, C. Y.; CHENG, C. C. Dynamic characteristics of sandwich beam with embedded electro-rheological fluid. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 9, n. 1, p. 60-68, 1998.
- LENDLEIN, A.; KELCH, S. Shape-memory Polymers. **Angewandte Chemie International**, 2002.
- LENDLEIN, A.; LANGER, R. Biodegradable, elastic shape-memory polymers for potential biomedical applications. **Science**, 2002.
- LENDLEIN, A.; KELCH, S.; KRATZ, K. Shape-memory Polymers. **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**, 2005.
- LENG, J.; LIU, Y.; DU, S.; Dynamic characteristics of a beam specimen featuring electrorheological fluids. **Experimental Mechanics**, v. 37, p. 1-4, 1997.
- LI, Y.; LI, J.; LI, W.; DU, H. A state-of-the-art review on magnetorheological elastomer devices. **Smart Materials and Structures**, v. 23, p. 1-24, 2014.
- LIU, C.; QIN, H.; MATHER, P. T. Review of progress in shape-memory polymers. **Journal of Materials Chemistry**, v. 16, 2007.
- LOKANDER, M. **Performance of magnetorheological rubber materials**. 54 f. PhD Thesis, KTH, Stockholm, p. 1543-1558, 2004.
- LORD CORPORATION, **MRF-140CG Magneto-Rheological Fluid**, USA, disponível em www.lordfulfillment.com/upload/DS7012.pdf, acesso em 20/05/2018, 2008.
- LU, G.; YU, T. **Energy Absorption of Structures and Materials**. 1ª ed., Woodhead Publishing Ltd., 2003.
- MALMIERCA, M. A.; MORA-BARRANTES, I.; POSADAS, P.; GONZÁLEZ-RIMÉNEZ, A.; MARCOS-FERNANDEZ, A.; RODRÍGUEZ, A.; IBARRA, L.; VALENTÍN, J. L. Polímeros con memoria de forma: Un nuevo horizonte para los elastómeros. *Revista de Plásticos Modernos*, v. 104, n. 671, p. 104-111, 2012.

- MARCH, H. W. Effects of shear deformation in the core of a flat rectangular sandwich panel – 1. Buckling under compressive end loads, 2. Deflection under uniform transverse load. **U. S. Forest Products Laboratory Report 1583**, 1948.
- MASTOWSKI, M.; ZABORSKI, M. Elastomeric composites with magnetorheological and magnetic properties containing nano-sized iron oxide. **Nanomagnetism**, One Central Press, p. 30-52, 2014.
- MCCORMACK, T. M.; MILLER, R.; KESLER, O.; GIBSON, L. J. Failure of sandwich beams with metallic foam cores. **International Journal of Solids and Structures**, v. 38, p. 4901-4920, 2001.
- MEGHA, S.; KUMAR, S.; D'SILVA, R. Vibration analysis of magnetorheological elastomer sandwich beam under different magnetic fields. **Journal of Mechanical Engineering and Automation**, v. 6, p. 75-80, 2016.
- MIKHASEV, G. I.; ALTENBACH, H.; KORCHEVSKAYA, E. A. On the influence of the magnetic field on the eigenmodes of thin laminated cylindrical shells containing magnetorheological elastomer. **Composite Structures**, v. 113, p. 186-196, 2014.
- MOLES, N. **Actively Controllable Hydrodynamic Journal Bearing Design Using Magnetorheological Fluids**. 266 f. Dissertation (Doctor of Philosophy) – Graduate Faculty of the University of Akron, 2015.
- MORGADO, P. L.; LANTADA, A. D.; MARTÍNEZ, I. R.; RAMOS, A. J.; RIESCO, J. L. H.; YUSTOS, H. L.; GARCIA, J. M. Polímeros com memoria de forma em el desarrollo de dispositivos médicos. **8º Congresso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica – CIBIM8**, 2007.
- NAMBUDIRY, M. P. V. **Tailoring Magnetic, Mechanical and Dielectric Properties of Magnetorheological Elastomers Based on Natural Rubber and Iron by Magnetic Field Assisted Curing for Possible Applications**. 180 f. Ph.D. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Physics, Cochin University of Science & Technology, India, 2015.
- NAVAZI, H. M.; BORNASSI, S.; HADDADPOUR, H. Vibration analysis of a rotating magnetorheological tapered sandwich beam. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 122, p. 308-317, 2017.

- NAYAK, B.; DWIVEDY, S. K.; MURTHY, K. S. R. K. Multi-frequency excitation of magnetorheological elastomer-based sandwich beam with conductive skins. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, v. 47, p. 448-460, 2012.
- NAYAK, B.; DWIVEDY, S. K.; MURTHY, K. S. R. K. Dynamic stability of magnetorheological elastomer based adaptive sandwich beam with conductive skins using FEM and the harmonic balance method. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 77, p. 205-216, 2013.
- NAYAK, B.; DWIVEDY, S. K.; MURTHY, K. S. R. K. Dynamic stability of a rotating sandwich beam with magnetorheological elastomer core. **European Journal of Mechanics A/Solids**, v. 47, p. 143-155, 2014.
- NAYAK, B.; DWIVEDY, S. K.; MURTHY, K. S. R. K. Fabrication and characterization of magnetorheological elastomer with carbon black. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 26, n. 7, p. 830-839, 2015.
- NI, Y.; YING, Z.; CHEN, Z. Magneto-rheological elastomer (MRE) based composite structures for micro-vibration control. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, v. 9, p. 345-356, 2010.
- NIU, M. **Composite Airframe Structures**. 2^a ed., Conmiliti Press Ltd., 500 p., 1996.
- OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. **Shape Memory Materials**. Ed., London: Cambridge University Press, ISBN 0-521-44487-X, 1998.
- PEI, Q.; ROSENTHAL, M.; STANFORD, S.; PRAHLAD, H. Multiple-degrees-of-freedom electroelastomer roll actuators. **Smart Materials and Structures**, v. 13, p. 86-92, 2004.
- PHANI, S. A.; VENKATRAMAN, K. Damping characteristics of electro-rheological fluid sandwich beams. **Acta Mechanica**, v. 180, p. 195-201, 2005.
- PÖSSINGER, T. **Experimental Characterization, Modeling and Simulation of Magneto-Rheological Elastomers**. Thesis (Doctor of Philosophy) – École Polytechnique, Université Paris-Saclay, 2015.
- POYNOR, J. C. **Innovative designs for magneto-rheological dampers**. MSc Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA. 2001.
- QI, S.; YU, M.; FU, J.; LI, P. D.; ZHU, M. Creep and recovery behaviors of magnetorheological elastomer based on polyurethane/epoxy resin IPNs matrix. **Smart Materials and Structures**, v. 25, 015020, 2016.

- RAHMAN, M.; ONG, Z. C.; JULAI, S. *et al.* A review of advances in magneto rheological dampers: their design optimization and applications. **Journal of Zhejiang University: Science A**, v. 18, p. 991-1010, 2017.
- RAJAMOCHAN, V. RAKHEJA, S.; SEDAGHATI, R. Vibration analysis of partially treated multi-layer beam with magnetorheological fluid. **Journal of Sound and Vibration**, v. 329, p. 3451-3469, 2010.
- RAMAMOORTHY, M.; RAJAMOCHAN, V.; AK, J. Vibration analysis of a partially treated laminated composite magnetorheological fluid sandwich plate. **Journal of Vibration and Control**, v. 22, n. 3, p. 869-895, 2016.
- REDDY, J. N. **Theory and Analysis of elastic plates and shells**, CRC Press, Taylor and Francis, 2007.
- REWABHAI, S. H. **Design and Development of Magneto Rheological Fluid Base Damper**. 204 f. Thesis (Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering) – Gujarat Technological University, Ahmedabad, 2017.
- RIGBI, Z.; JILKEN, L. The response of an elastomer filled with soft ferrite to mechanical and magnetic influences. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 37, p. 267-276, 1983.
- RODRIGUES, L. E. M. J. **Fundamentos da engenharia aeronáutica com aplicações ao projeto SAE-Aerodesign: Estabilidade e Estruturas**. 1ª Ed., Edição do Autor, 2014, 208 p.
- RODRIGUES, S. B. A. **Espumas com memória de forma: estudo das suas propriedades e aplicações ligadas à saúde**. 72 p. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2012.
- RUDDY, C.; AHEARNE, E.; BYRNE, G. A review of magnetorheological elastomers: properties and applications. **Advanced Manufacturing Science (AMS) Research**. http://www.ucd.ie/mecheng/ams/news_items/Cillian%20Ruddy.pdf Acesso em 26 de julho de 2017, v. 20, 2012.
- SAENZ, E. **Fatigue and Fracture of Foam Cores Used in Sandwich Composites**. 202 f. Thesis (Master of Science) – Florida Atlantic University, Boca Raton, Florida, 2012.
- SAINSBURY, M. G. & ZHANG, Q. J. The Galerkin element method applied to the vibration of damped sandwich beam. **Comput Struct**, v. 71, p.239–256, 1999.

- SAINSBURY, M. G. & EWINS, D. J. Vibration analysis of a damped machinery foundation structure using the dynamic stiffness coupling technique. **J Eng Ind Trans ASME**, v. 96, n. 3, p.1000–1005, 1974.
- SCHEERBAUM, N.; HINZ, D.; GUTFLEISH, O.; MÜLLER, K. H.; SCHULTZ, L. Textured polymer bonded composites with Ni-Mn-Ga magnetic shape memory particles. **Acta Materialia**, v. 55, p. 2707-2713, 2007.
- SHIGA, T.; OKADA, A.; KURAUCHI, T. Magnetoviscoelastic behavior of composite gels. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 58, n. 4, p. 787-792, 2003.
- SHUMACHER, G.; MURRA, I.; WANG, L.; LAXANDER, A.; O’LEARY, O. J.; HEROLD, M. Multidisciplinary design optimization of a regional aircraft wing box. **AIAA**, p. 5406-5416, 2002.
- SILVEIRA, M. E.; FRANCELLO, E. A. O uso de otimização numérica no projeto de blanks soldados. **Ciencia y Engenharia/ Science and Engineering Journal**, v. 24, n.1, p. 9-19, 2015.
- SOARES, B. A. R. S. **Estruturas sanduíche com utilização de núcleos de cortiça**. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2007.
- SOUZA, J. C. S. **Caracterização Experimental e Modelagem de Estruturas Usando Materiais Viscoelásticos para o Controle Passivo de Vibrações**. 153 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, 2015.
- SÖYLEMEZ, B. **Design and Analysis of a Linear Shape Memory Alloy Actuator**. 221 f. Thesis (Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering) – The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 2009.
- STEWART, B. B. **Application of magnetorheological dampers in motorcycle rear swing arms suspension**. Cullowee, NC: Western California University, 2015.
- SUN, Q.; ZHOU, J. X.; ZHANG, L. An adaptive beam model and dynamic characteristics of magnetorheological materials. **Journal of Sound and Vibration**, v. 261, p. 465-481, 2003.
- SYPECK, D.; WADLEY, H. Cellular metal truss core sandwich structures. **Advanced Engineering Materials**, v. 4, p. 759-764, 2002.

- SYPECK, D. Cellular truss core sandwich structures. **Applied Composite Materials**, v. 12, p. 229-246, 2005.
- TAUCHERT, T. R. Propagation of Stress Waves in Woven-Fabric Composites. **Journal of Composite Materials**, v.5, p. 456-465, 1971.
- TIAN, T. F.; LI, W. H.; ALICI, G.; DU, H.; DENG, Y. M. Microstructure and magnetorheology of graphite based MR elastomers. **Rheologica Acta: an international journal of rheology**, v. 50, p. 825-836, 2011.
- TIAN, T. F.; ZHANG, X. Z.; LI, W. H.; ALICI, G.; DING, J. Study of PDMS based magnetorheological elastomers. **Journal of Physics**, Conference series 412, 012038, p. 1-8, 2013.
- TROLIER-MCKINSTRY, S. **Chapter 3: Crystal Chemistry of Piezoelectric Materials**, in: **Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications**, p. 39-56, 2008.
- VARGA, Z.; FILIPCSEI, G. Smart composites with controlled anisotropy. **Polymer**, v. 46, p. 7779-7787, 2005.
- VINSON, J. R., SIERAKOWSKI, R. L. **The Behavior of Structures Composed of Composite Materials**, 2^a ed., Waterloo, Ontario: Dordrecht, 1987, 396 p.
- VINSON, J. R. Sandwich Structures. **Applied Mechanics Review**, v. 54, n. 3, p. 201-214, 2001.
- VINSON, J. R. Sandwich structures: past, present, and future. In: **Thomsen, O, Bozhevolnaya E., Lyckegaard A. (eds.) Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials**, Springer, Dordrecht, p. 3-12, 2005.
- WAYMAN, C. M.; DUERING, T. W.; MELTON, K. N. **An Introduction to Martensite and Shape Memory, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys**. London: Butterworth-Heinemann, 1990.
- WEBER, F.; DISTL, H. Amplitude and frequency independent cable damping of Sutong Bridge and Russky Bridge by magnetorheological dampers. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 22, p. 237-254, 2015.
- WEI, M.; SUN, L.; HU, G. Vibration characteristics of electrorheological elastomer sandwich beams. **Smart Materials and Structures**, v. 20, n. 5, 2011.
- WEI, M.; SUN, L.; HU, G. Dynamic properties of an axially moving sandwich beam with magnetorheological fluid core. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 9, n. 2, p. 1-9, 2017.

- WICKS, N.; HUTCHINSON, J. W. Optimal Truss Plates. **International Journal of Solids and Structures**, v. 38, p. 5165-5183, 2001.
- WILLIAMS, D.; LEGGETT, D. M. A.; HOPKINS, H. G. Flat sandwich panels under compressive end loads. **A. R. C., R & M**, 1941.
- WORSFOLD, M. The effect of corrosion on the structural integrity of commercial aircraft structure. **Published in RTO MP-18**, v. 3, p. 1-10, 1998.
- YALCINTAS, M.; COULTER, J. P. Analytical modeling of electrorheological material based adaptive beams. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 6, n. 4, p. 488-497, 1995.
- YALCINTAS, M.; COULTER, J. P.; DON, D. L. Structural modeling and optimal control of electrorheological material based adaptive beams. **Smart Materials and Structures**, v. 4, n. 3, p. 207, 1995.
- YALCINTAS, M.; DAI, H. Magnetorheological and electrorheological materials in adaptive structures and their performance comparison. **Smart Materials and Structures**, v. 8, n. 5, p. 560-573, 1999.
- YALCINTAS, M.; DAI, H. Vibration suppression capabilities of magneto-rheological materials based adaptive structures. **Smart Materials and Structures**, v.13, n. 1, p. 1-11, 2004.
- YANG, I. H.; YOON, J. H.; JEONG, J. E.; JEONG, U. C.; KIM, J. S.; CHUNG, K. H.; OH, J. E. Magnetic-field-dependent shear modulus of a magnetorheological elastomer based on natural rubber. **J. Korean Phys. Soc.**, v. 62, p. 220- 228, 2013.
- YILDIRIM, T.; GHAYESH, M. H.; LI, W.; ALICI, G. Nonlinear dynamics of a filamentotrically excited beam with a central magneto-rheological elastomer patch: An experimental investigation. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 106, p. 157-167, 2016.
- YILDIRIM, T.; GHAYESH, M. H.; LI, W.; ALICI, G. Experimental nonlinear dynamics of a geometrically imperfect magneto-rheological elastomer sandwich beam. **Composite Structures**, v. 138, p. 381-390, 2016.
- YING, Z.; NI, Y. Advances in structural vibration control application of magneto-rheological visco-elastomer. **Theoretical & Applied Mechanics Letters**, v. 7, p. 61-66, 2017.
- YOSHIKAWA, S.; FARREL, M.; WARKENTIN, D.; JACQUES, R.; SAARMAA, E. Monolithic piezoelectric actuators and vibration dampers with interdigitated electrodes.

Proceedings SPIE 6th International Symposium on Smart Structures and Materials, 1999.

- YU, M.; DONG, X.; CHOI, S. B. *et al.* Human simulated intelligent control of vehicle suspension system with MR dampers. **Journal of Sound and Vibration**, v. 319, p. 753-767, 2009.
- YUNLIANG, D. Optimum design of sandwich constructions. **Composite Structures**, v. 25, n. 1, p. 51-68, 1987.
- YUNUS, N. A.; MAZLAN, S. A.; CHOI, S. B.; IMADUDDIN, F.; AZIZ, S. A. A.; KHAIRI, M. H. A. Rheological properties of isotropic magnetorheological elastomers featuring an epoxidized natural rubber. **Smart Materials and Structures**, v. 25, 107001, 2016.
- ZAHLEN, A. S.; ZUARDY, P. C.; HERRMAN, I. Sandwich Structures Technology in Commercial Aviation. **Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials**, v. 7, p. 13-26, 2005.
- ZAJAC, P.; KALETA, J.; LEWANDOWSKI, D.; *et al.* Isotropic magnetorheological elastomers with thermoplastic matrices: structure, damping properties and testing. **Smart Materials and Structures**, v. 19, pp. 7.
- ZANATTA, R. <https://avacao.org/article/materiais-compositos>, 24/05/2012, acesso em 07/11/2014.
- ZENKERT, D. **The Handbook of Sandwich Construction**. Engineering Materials Advisory Service Ltd. 1997.
- ZHOU, G.; HILL, M.; LOUGHLAN, J. Damage characteristics of composite honeycomb sandwich panels in bending under quasi-static loading. **Journal of Sandwich Structures and Materials**, v. 8, n. 1, p. 55-90, 2006.
- ZHOU, G. Y.; WANG, Q. Magnetorheological elastomer-based smart sandwich beam with nonconductive skins. **Smart Materials and Structures**, v. 14, p. 1001-1009, 2005.
- ZHOU, G. Y.; WANG, Q. Use of magnetorheological elastomer in an adaptive sandwich beam with conductive skins. Part II: magnetoelastic loads in conductive skins. **International Journal of Solids and Structures**, v. 43, p. 5386-5402, 2006a.
- ZHOU, G. Y.; WANG, Q. Use of magnetorheological elastomer in an adaptive sandwich beam with conductive skins. Part II: dynamic properties. **International Journal of Solids and Structures**, v. 43, p. 5403-5420, 2006.

APÊNDICE A

CURVAS DE AJUSTES REALIZADOS PARA A DETERMINAÇÃO DO FATOR DE AMORTECIMENTO

Conforme discutido no subcapítulo 4.4.2, os ajustes foram realizados utilizando-se a equação analítica apresentada pela equação (4.2). Como são muitos os ajustes realizados, colocou-se no capítulo 6 somente um exemplo de um ajuste realizado para a determinação do fator de amortecimento dos modelos de viga em função do campo magnético aplicado.

Neste Apêndice, são apresentadas as figuras contendo os ajustes realizados em função do campo magnético aplicado em cada posição, extremidade e centro, para cada disposição de viga tipo sanduíche.

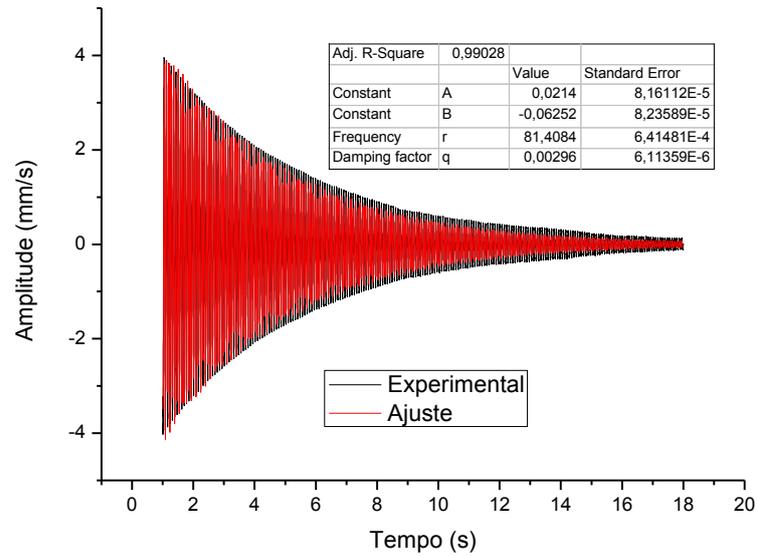


Figura A.1 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas na ausência de campo magnético aplicado.

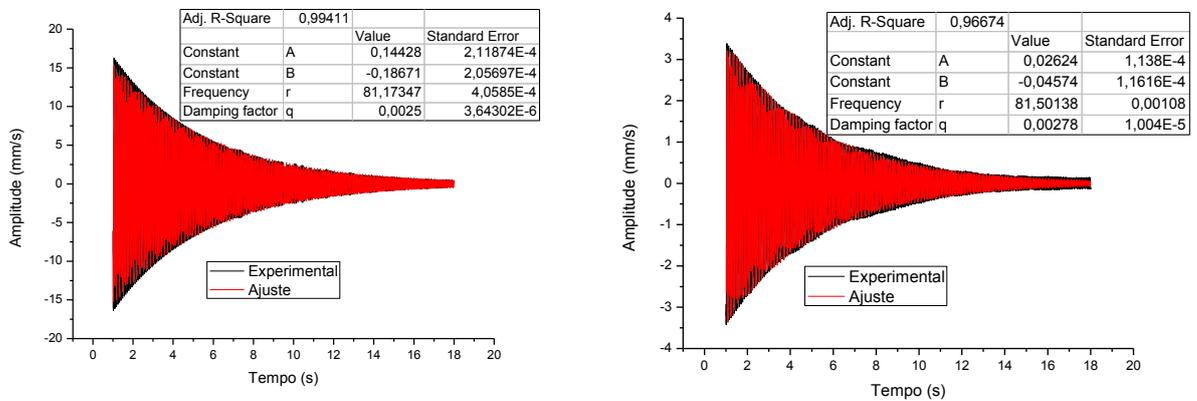


Figura A.2 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 20 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

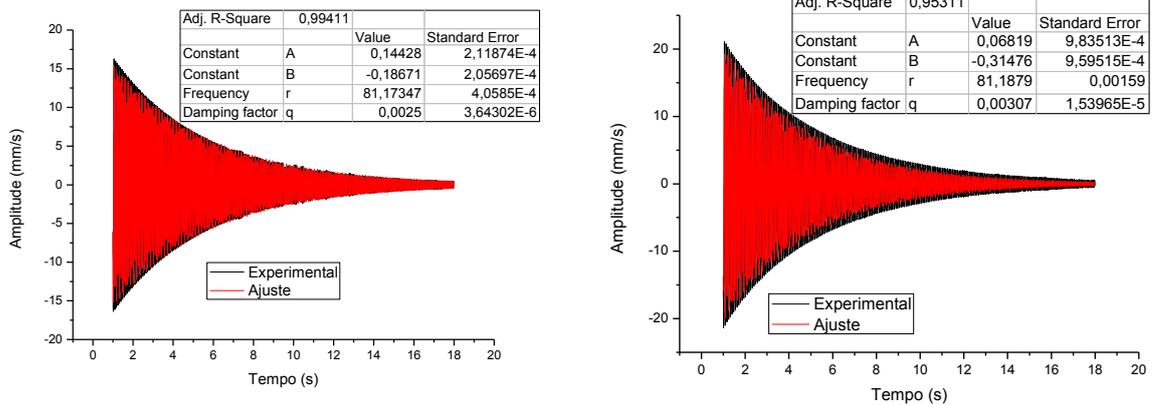


Figura A.3 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 30 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

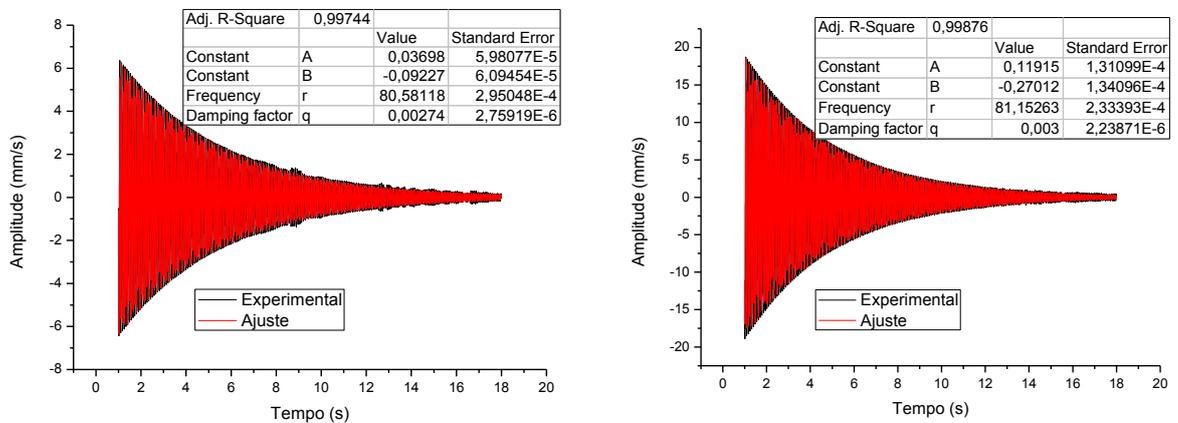


Figura A.4 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 40 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

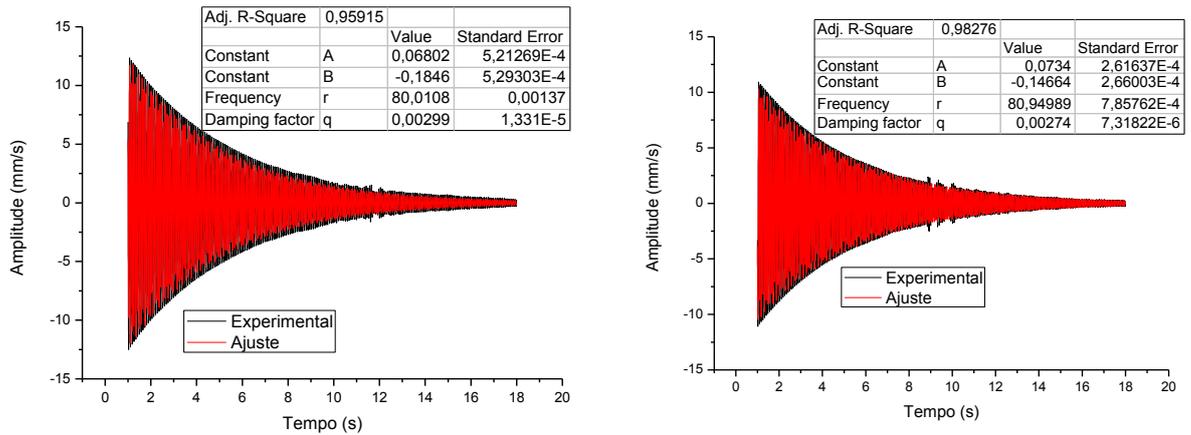


Figura A.5 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 50 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

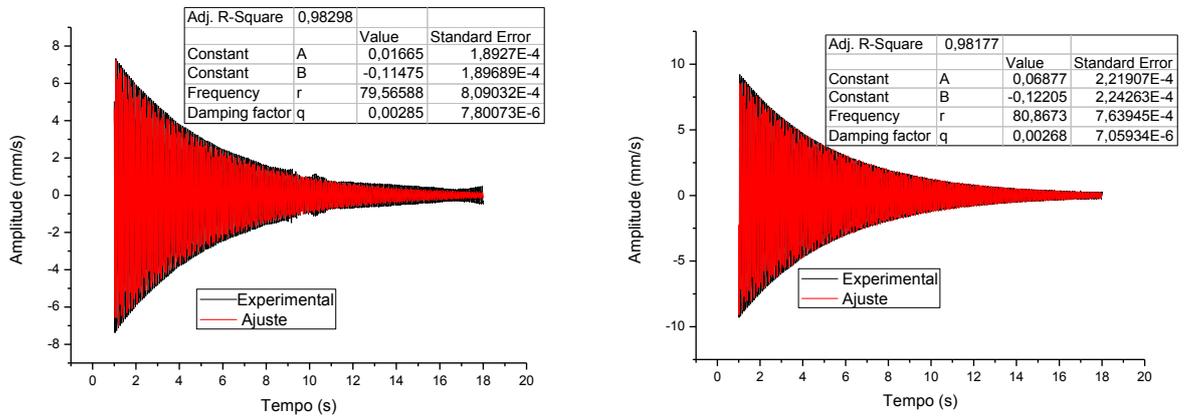


Figura A.6 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 60 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

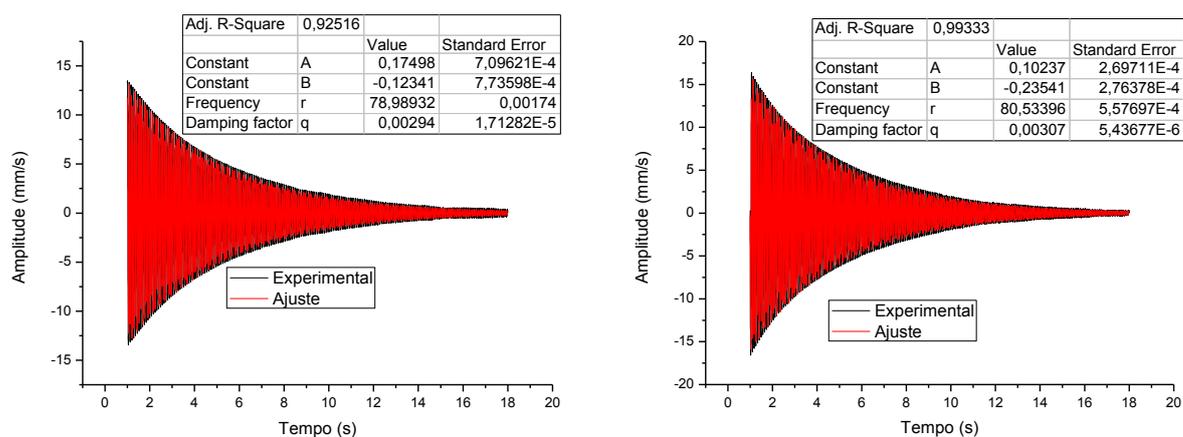


Figura A.7 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 70 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

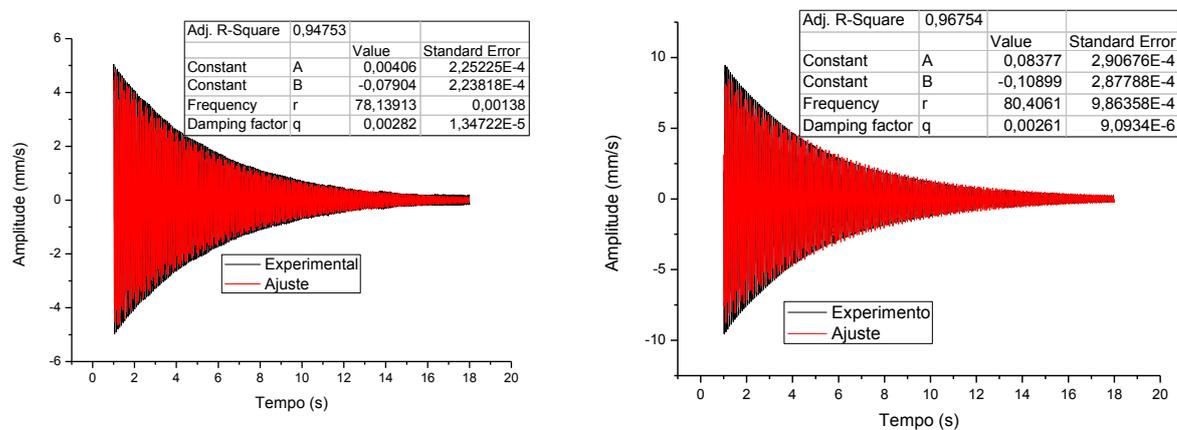


Figura A.8 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 80 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

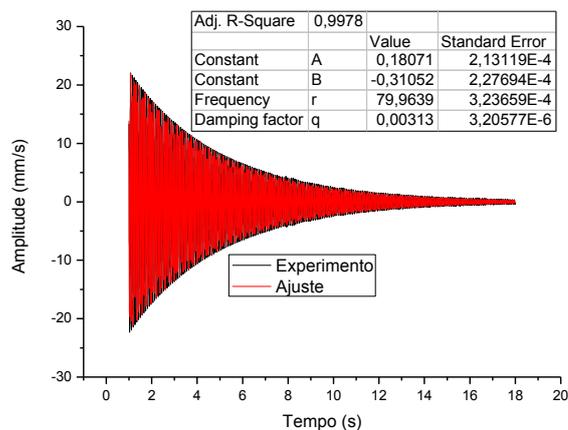
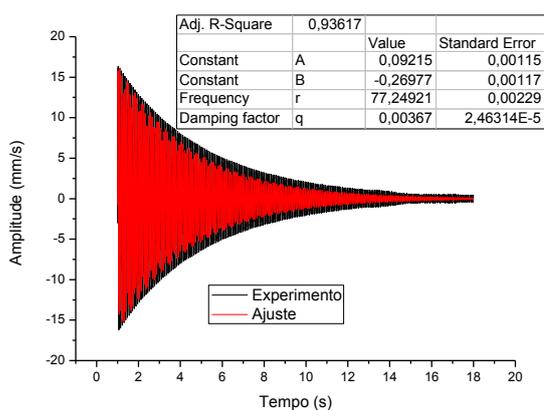


Figura A.9 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 90 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

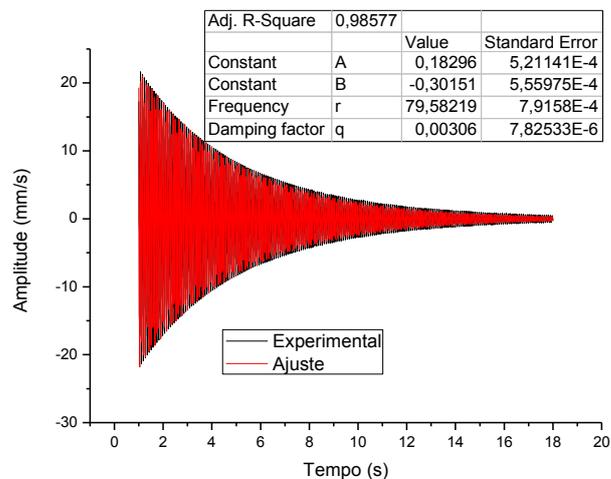
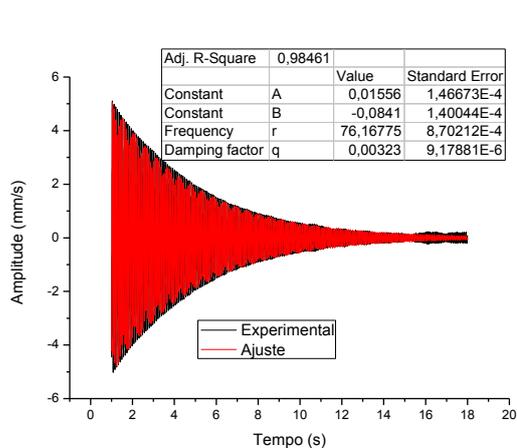


Figura A.10 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 100 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

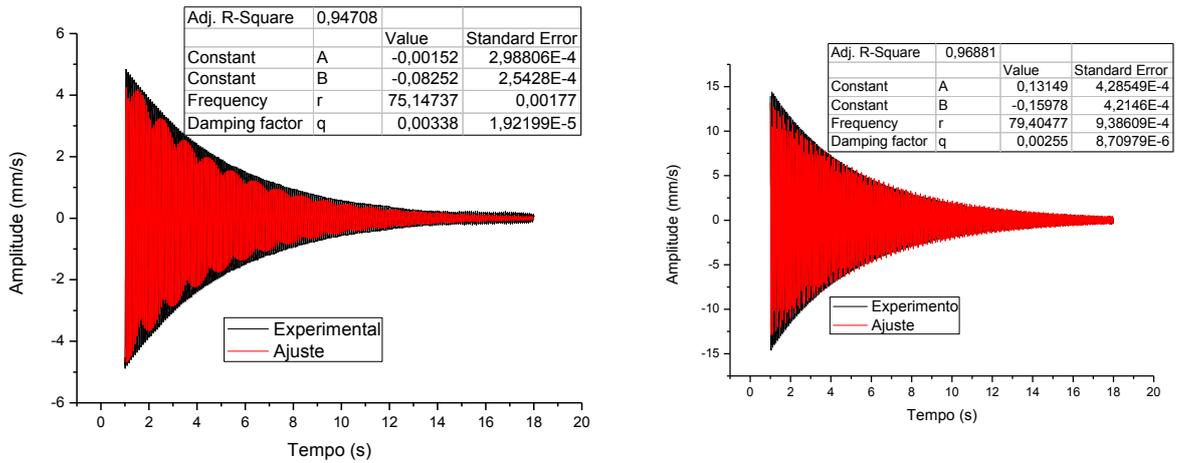


Figura A.11 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 110 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

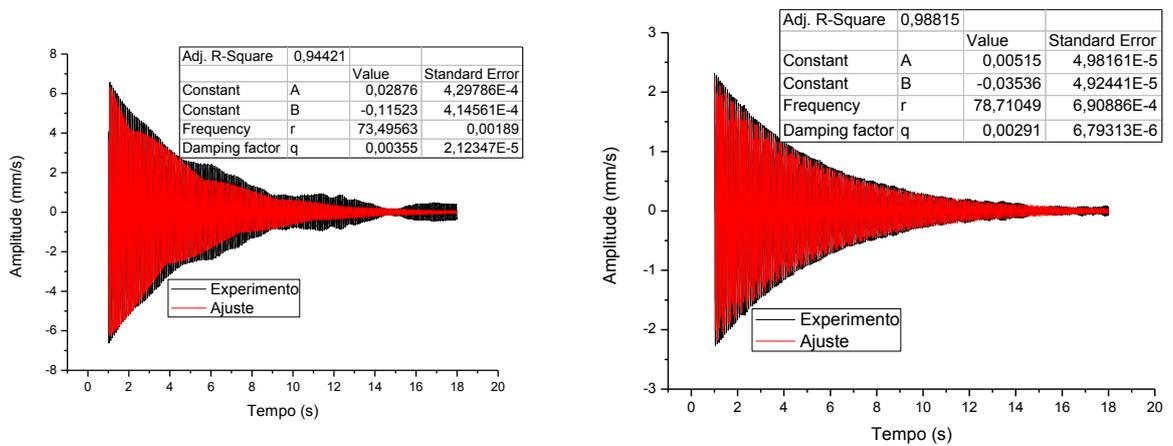


Figura A.12 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 30% em massa de partículas sob campo de 120 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

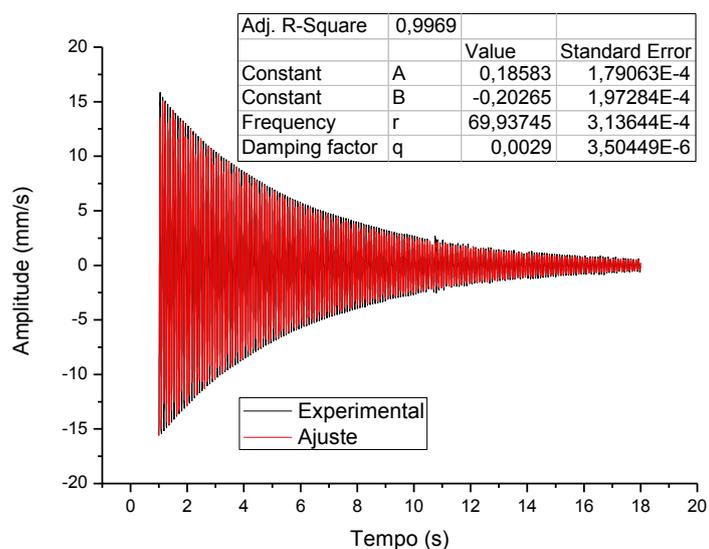


Figura A.13 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas na ausência de campo magnético aplicado.

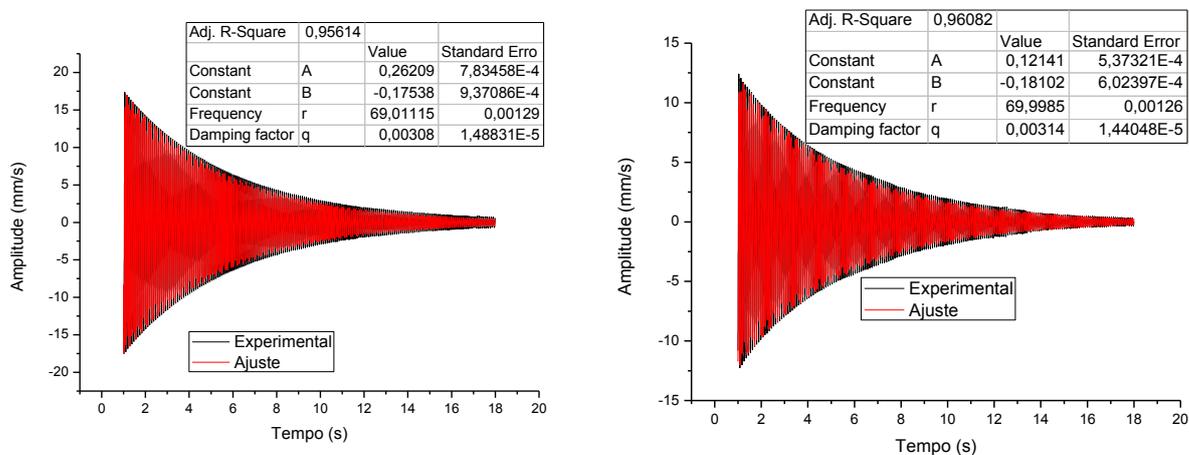


Figura A.14 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 20 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

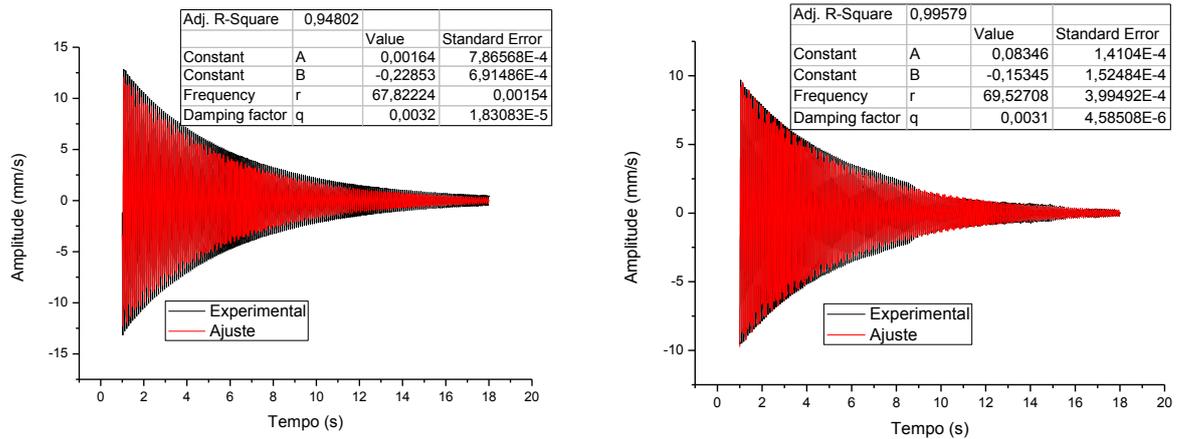


Figura A.15 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 30 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

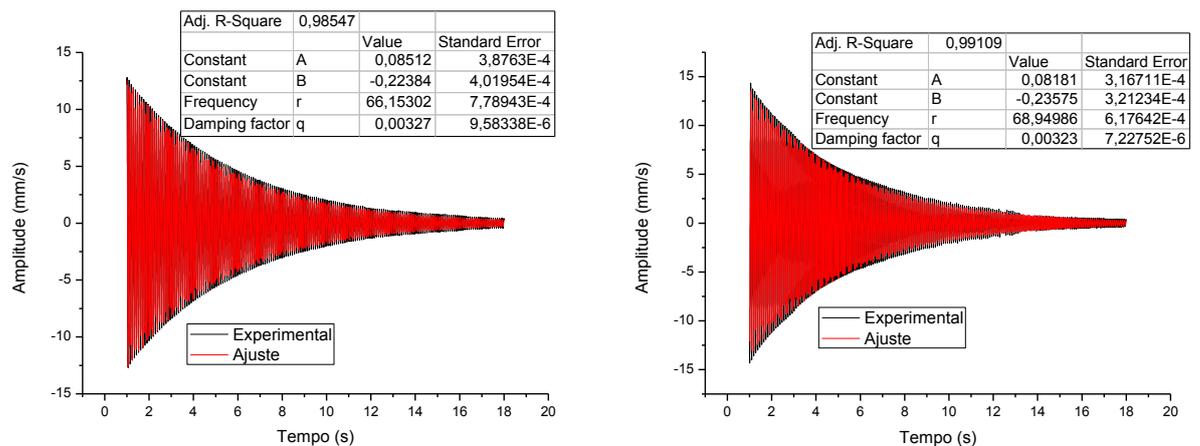


Figura A.16 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 40 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

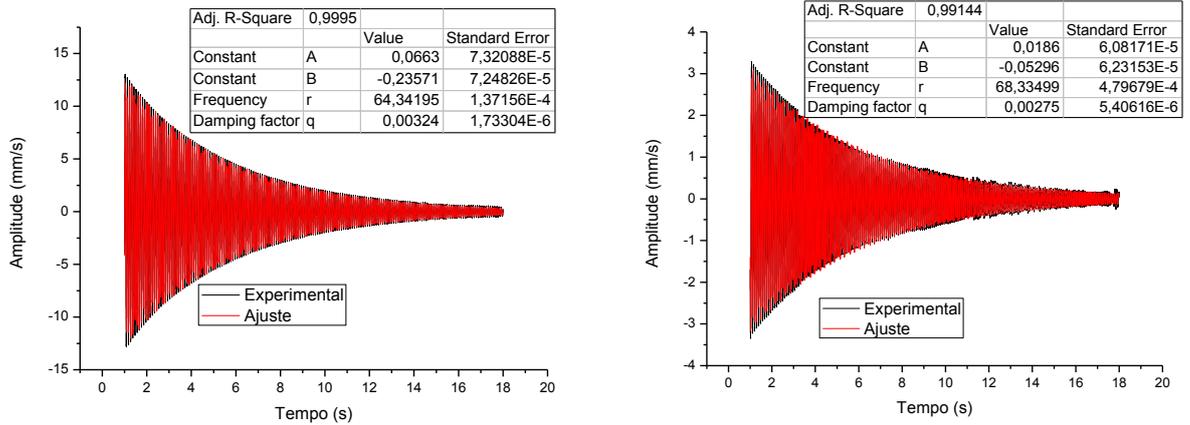


Figura A.17 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 50 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

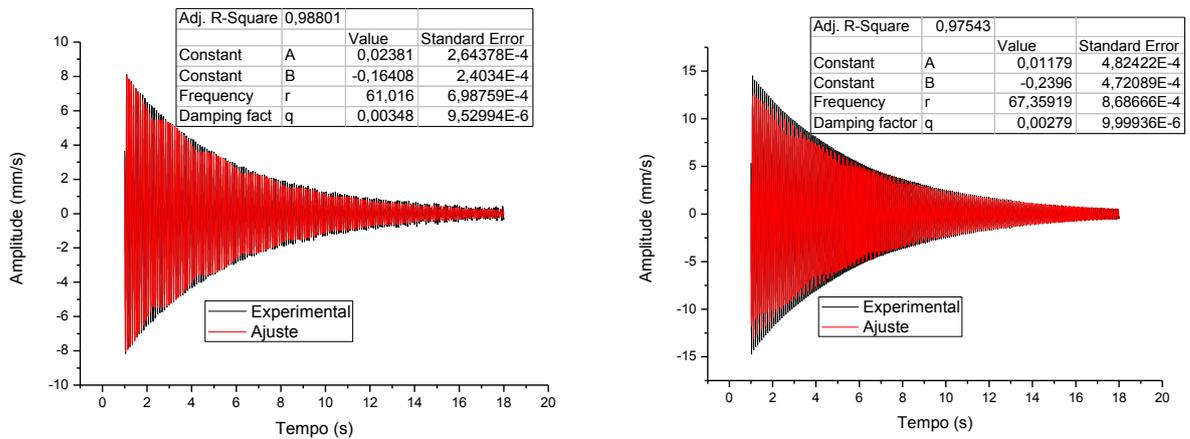


Figura A.18 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 60 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

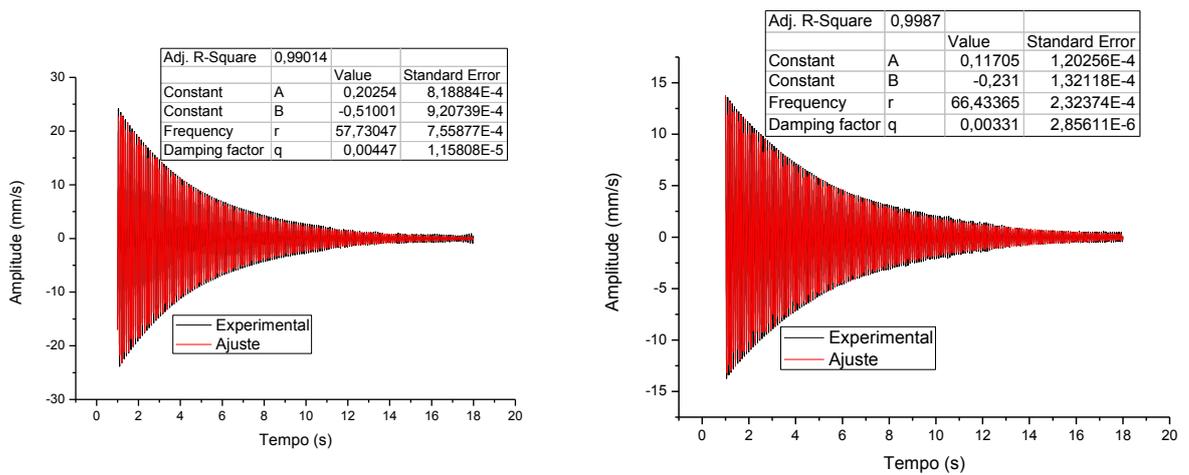


Figura A.19 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 70 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

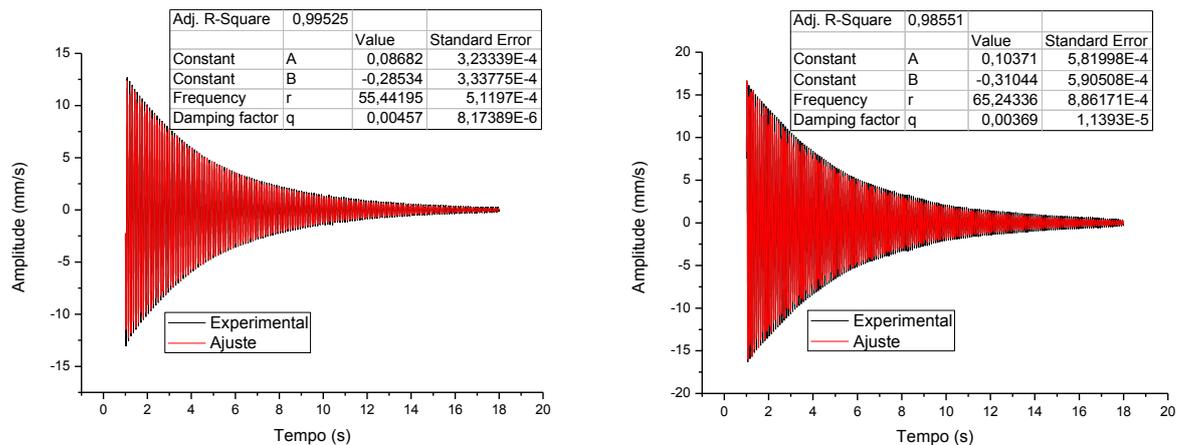


Figura A.20 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 80 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

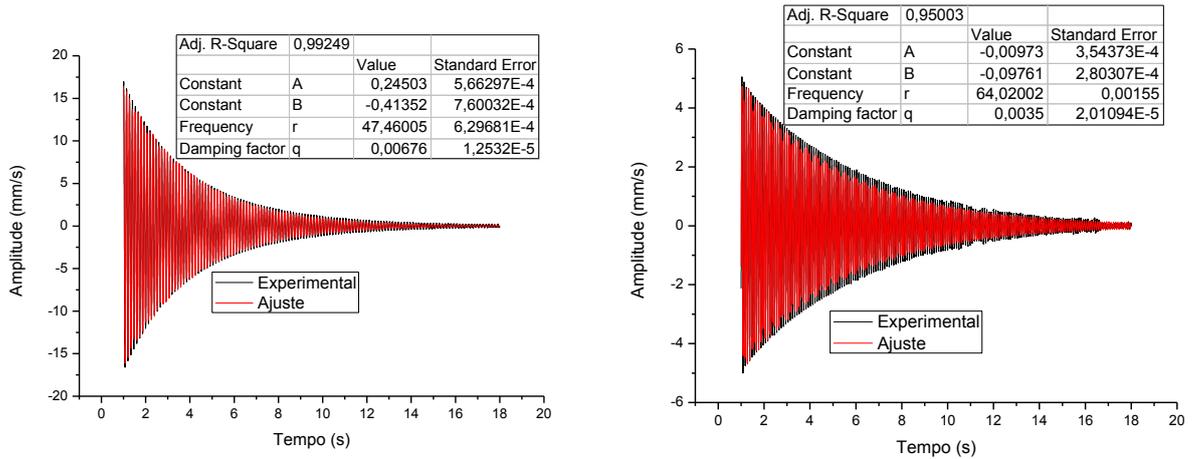


Figura A.21 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 90 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

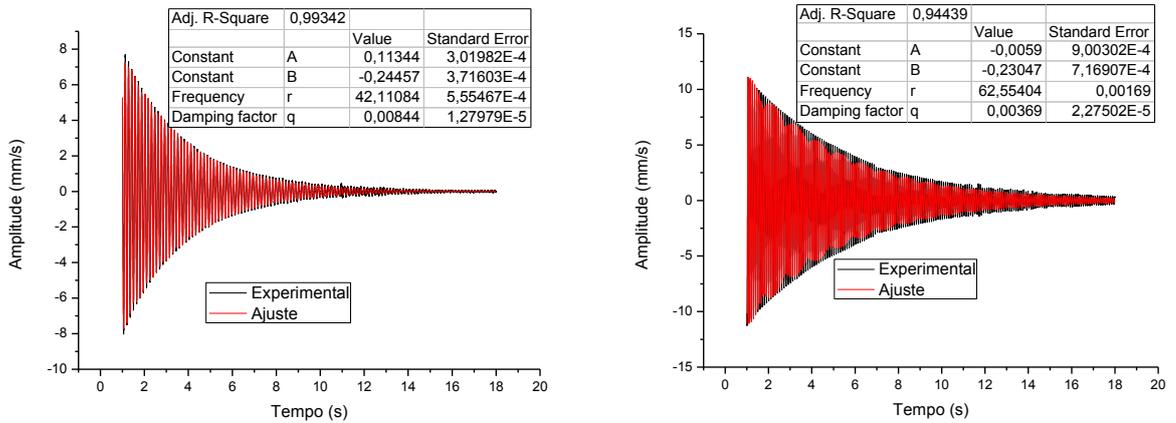


Figura A.22 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com PLA contendo 60% em massa de partículas sob campo de 100 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

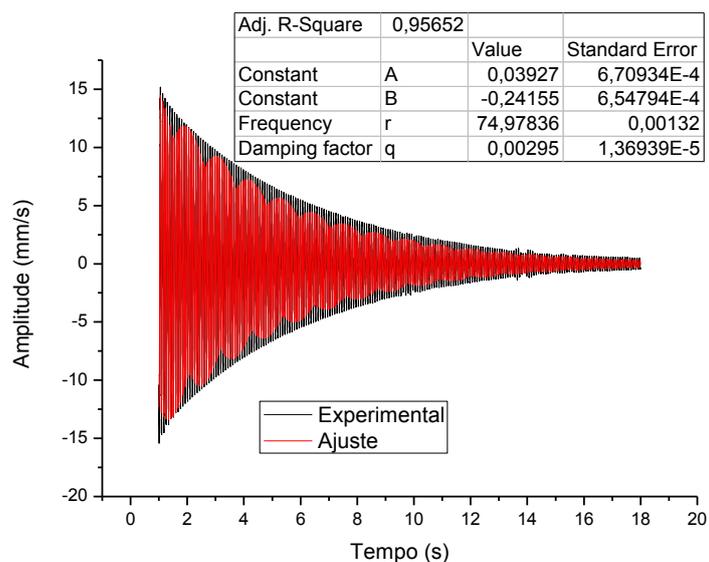


Figura A.23 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas na ausência de campo magnético aplicado.

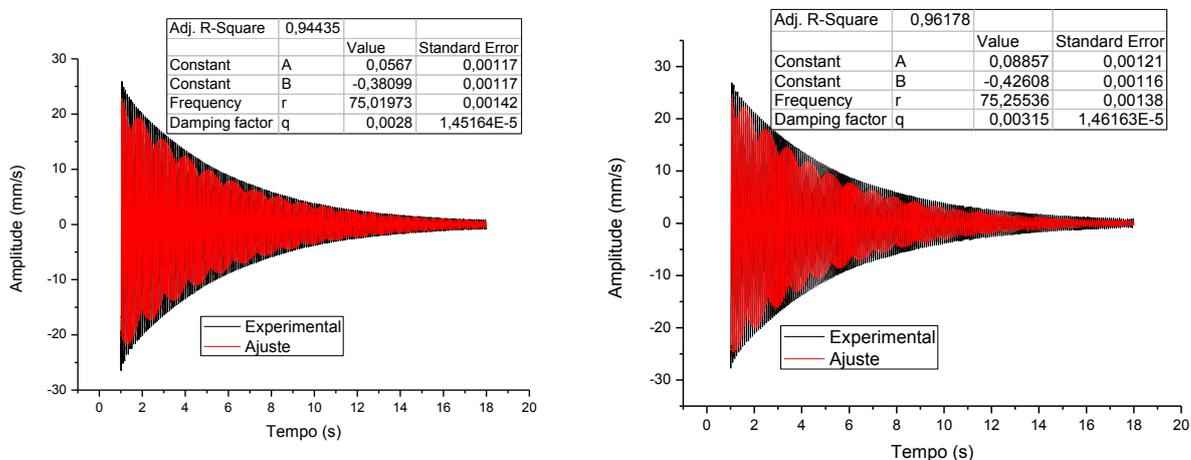


Figura A.24 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 20 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

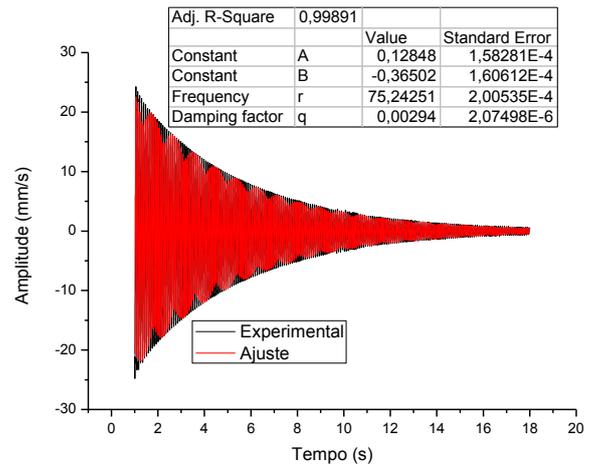
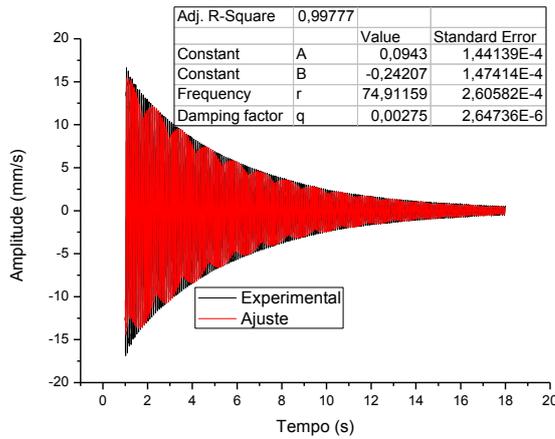


Figura A.25 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 30 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

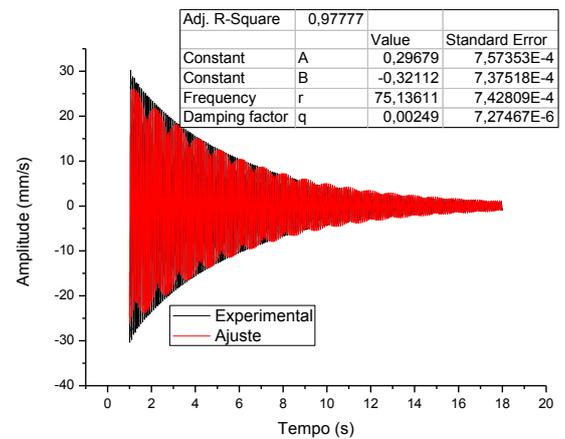
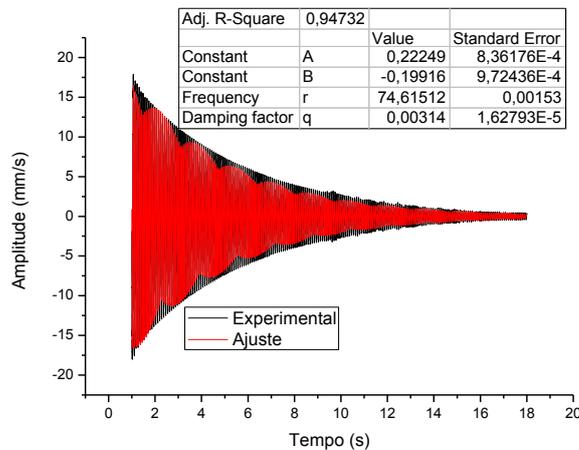


Figura A.26 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 40 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

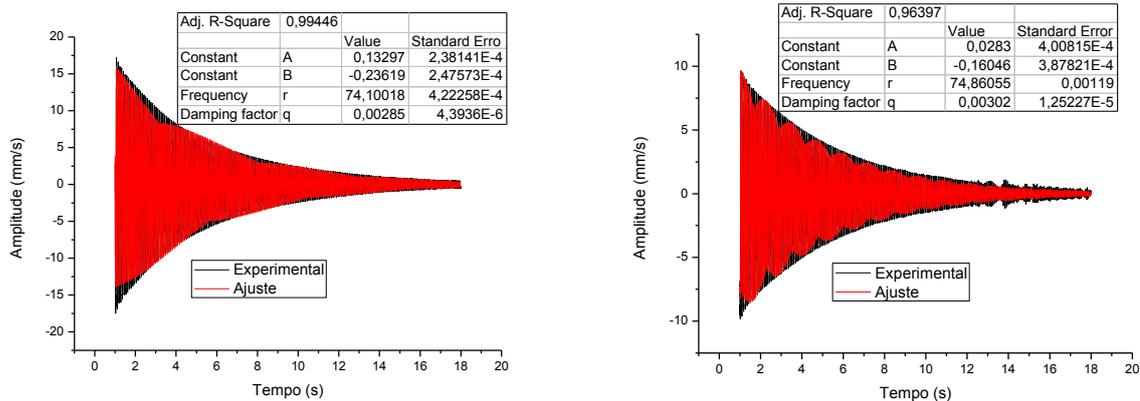


Figura A.27 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 50 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

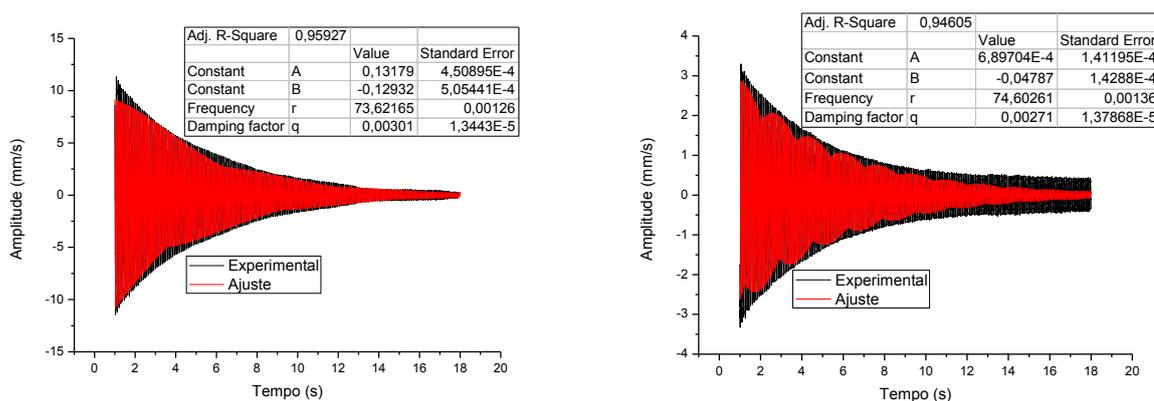


Figura A.28 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 60 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

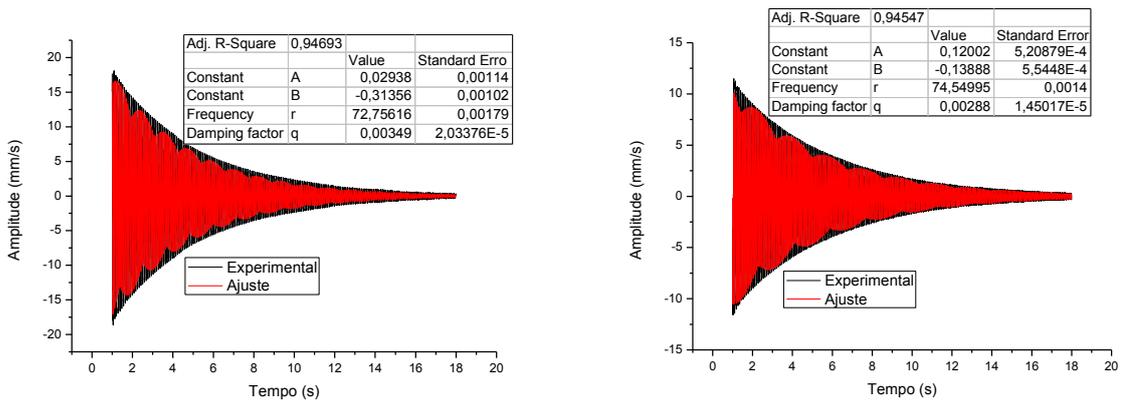


Figura A.29 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 70 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

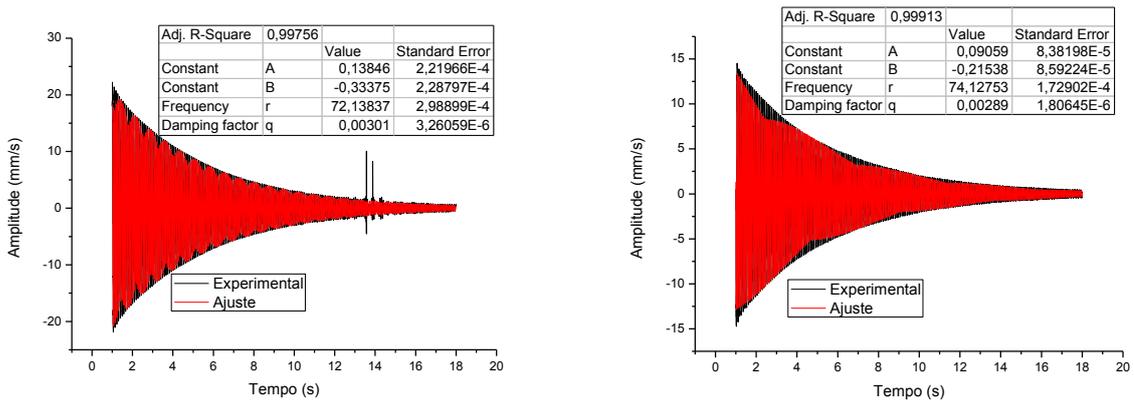


Figura A.30 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 80 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

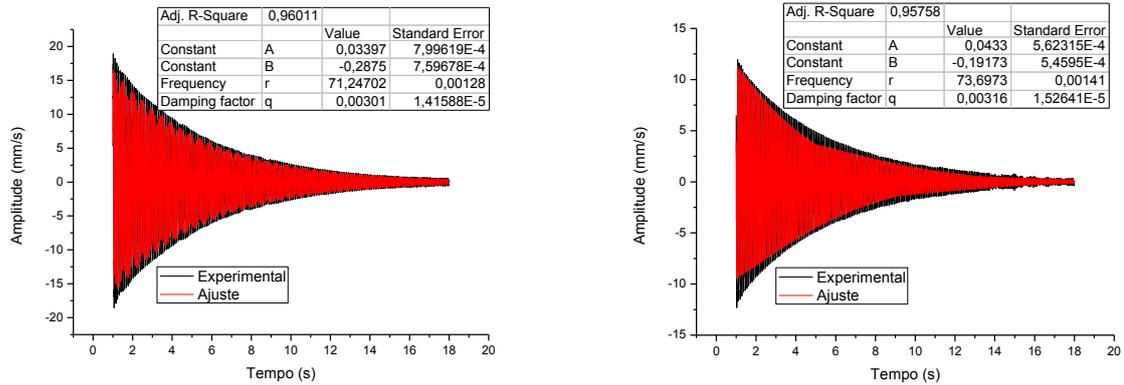


Figura A.31 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 90 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

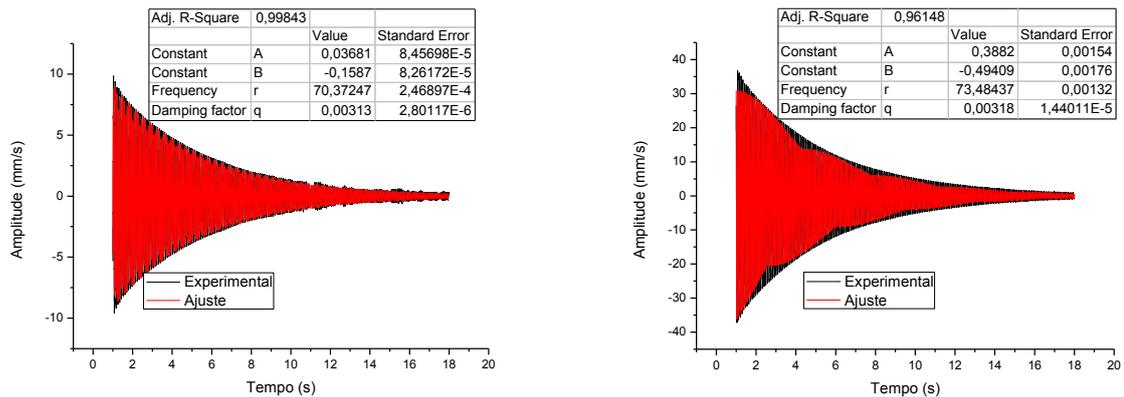


Figura A.32 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 100 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

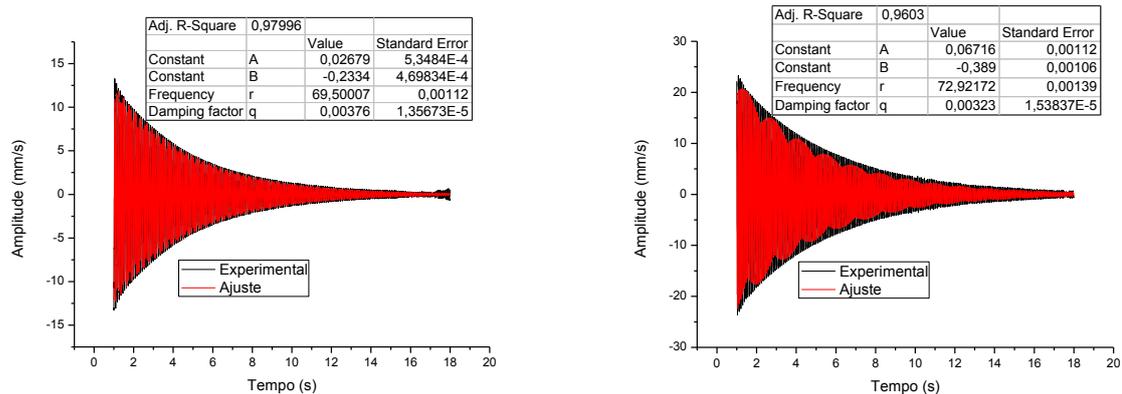


Figura A.33 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 110 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

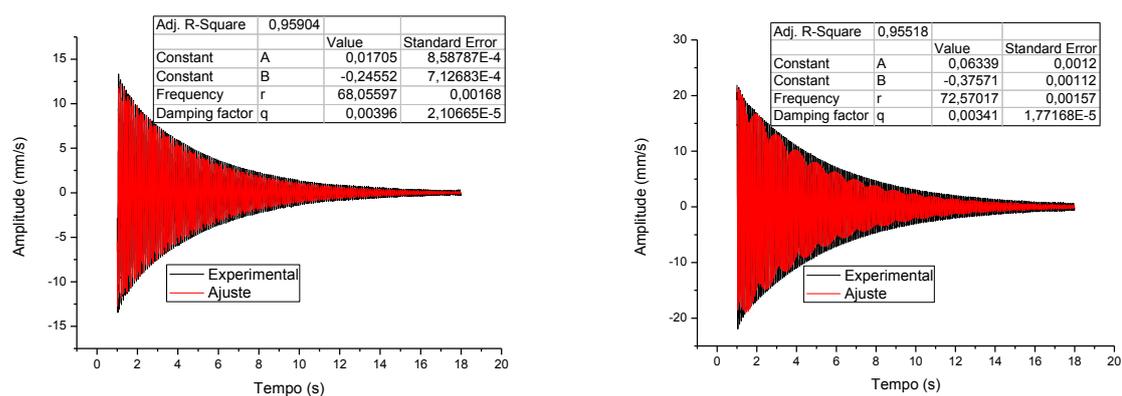


Figura A.34 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 30% em massa de partículas sob campo de 120 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

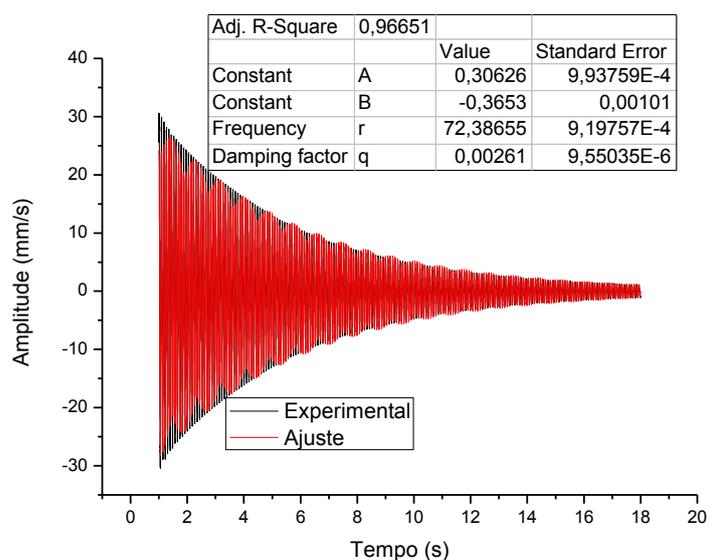


Figura A.35 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas na ausência de campo magnético aplicado.

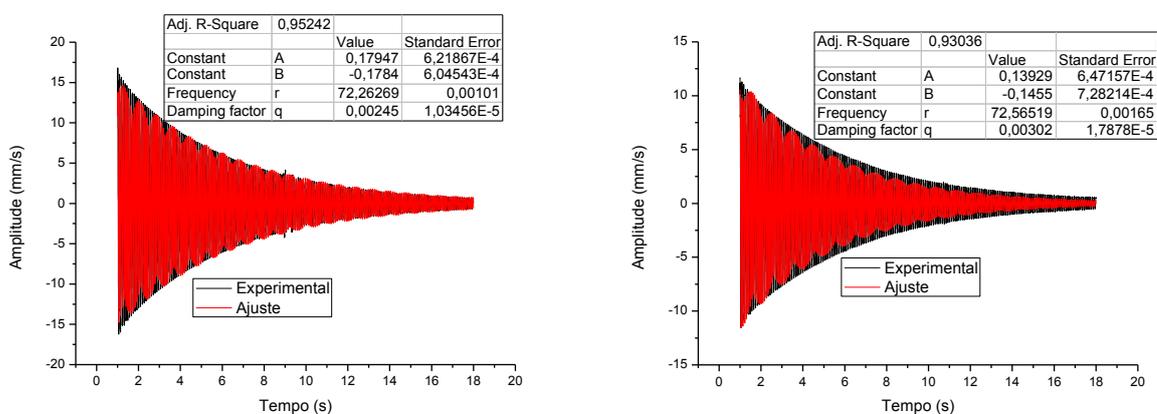


Figura A.36 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 20 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

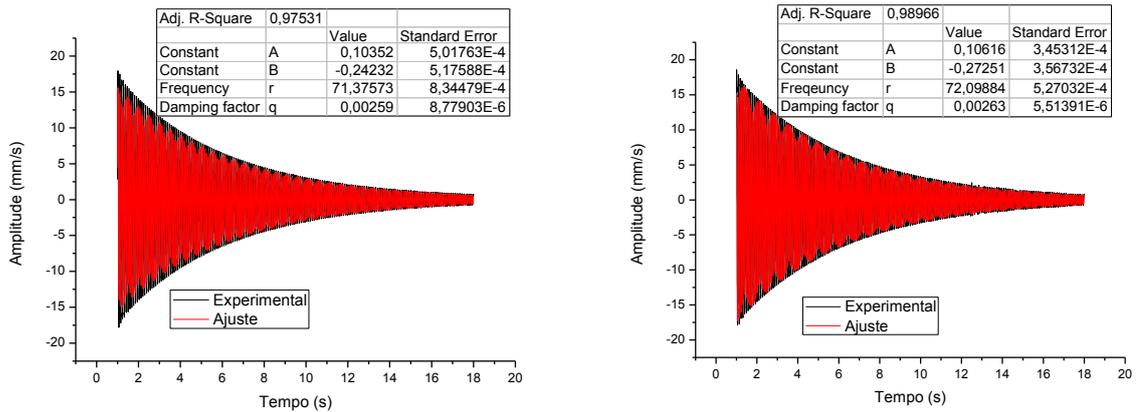


Figura A.37 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 30 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

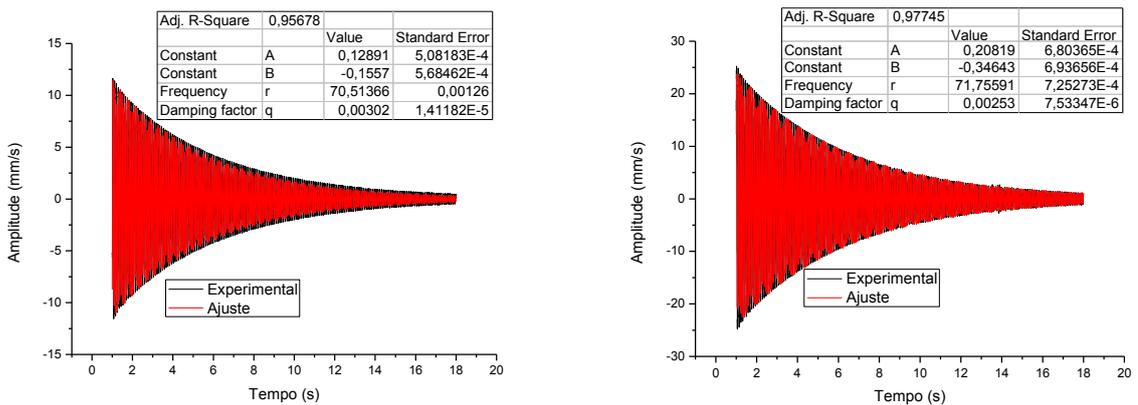


Figura A.38 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 40 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

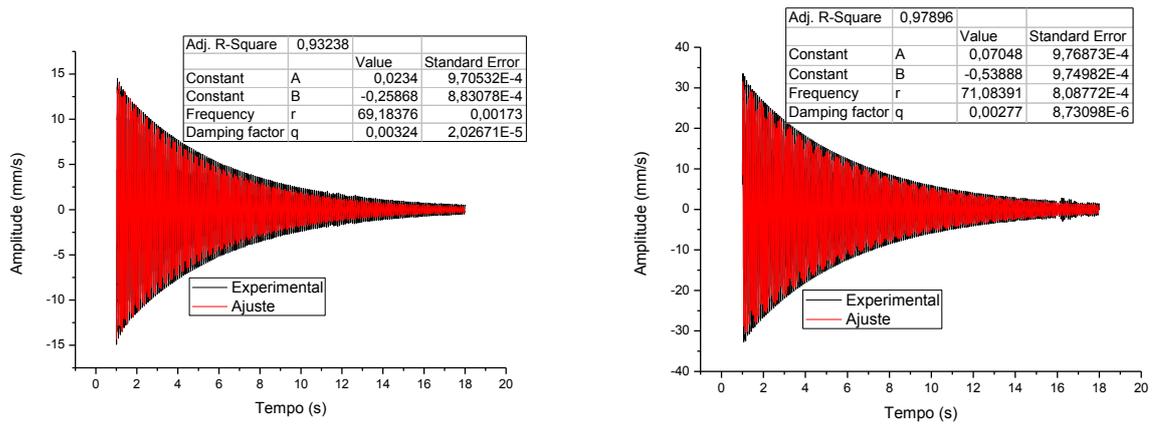


Figura A.39 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 50 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

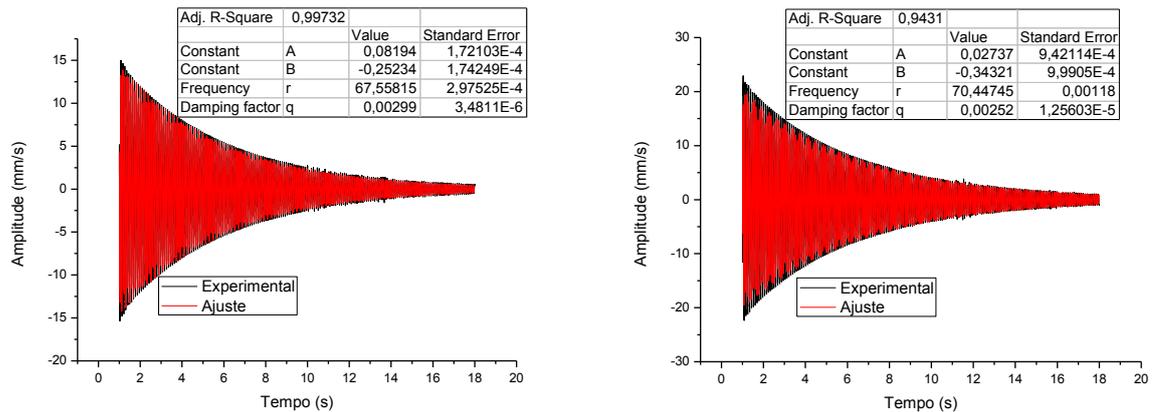


Figura A.40 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 60 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

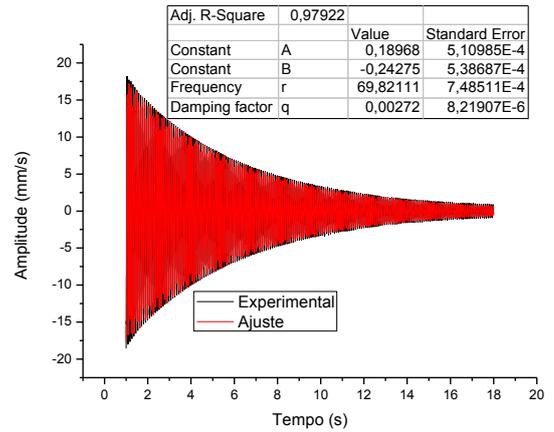
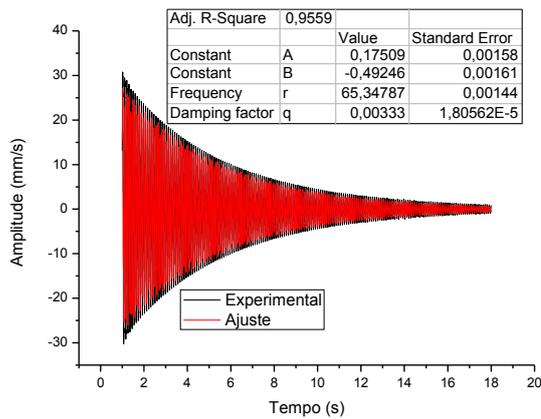


Figura A.41 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 70 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

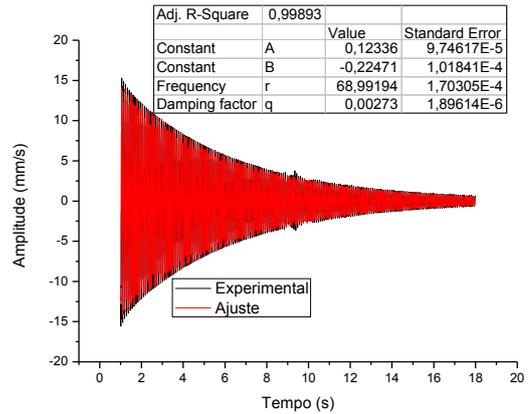
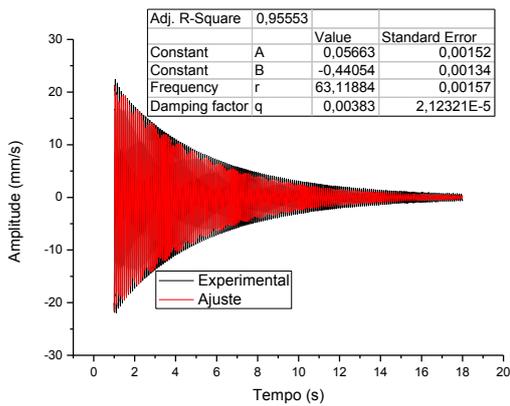


Figura A.42 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 80 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

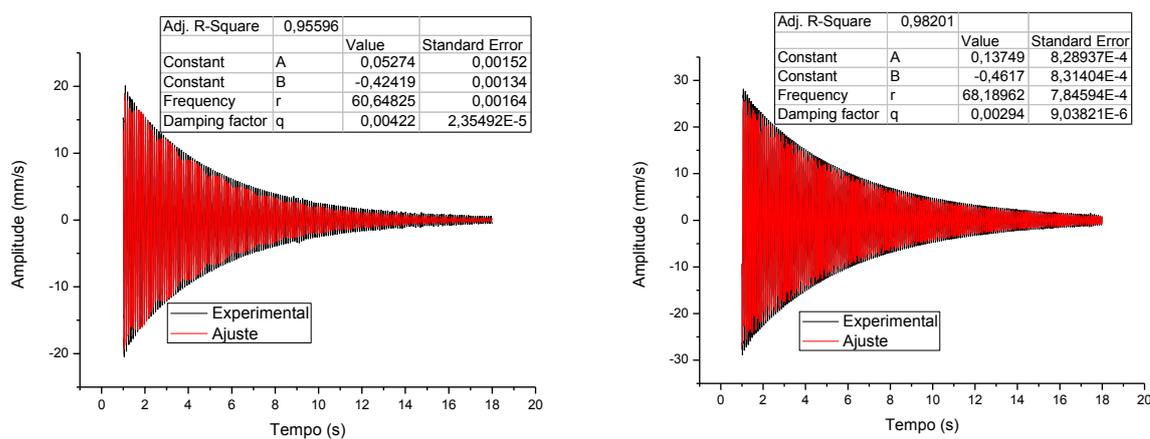


Figura A.43 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 90 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

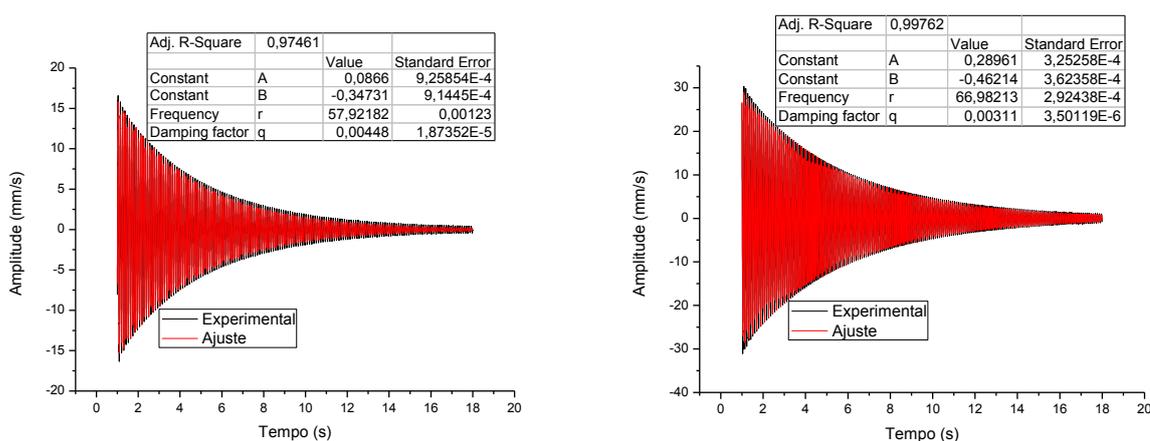


Figura A.44 – Ajuste realizado para a viga sanduíche com ABS contendo 60% em massa de partículas sob campo de 100 kA/m, com ímã na extremidade (figura à esquerda) e com ímã no centro (figura à direita).

APÊNDICE B

INSTRUMENTAÇÃO

➤ Amplificador

Descrição: Amplificador Brüel & Kjaer

Modelo: 2712

Limitador de corrente: 2 a 15 A rms

Impedância de saída: Alta e baixa

Ganho de amplificação: 1 a 10. O ganho utilizado neste trabalho foi de 5



Fotografia B.1 – Amplificador.

➤ **Analisador de Sinais**

Descrição: Analisador de sinais Brüel & Kjær

Modelo: Modelo PHOTON+

Características: 4 entradas e uma saída



Fotografia B.2 – Analisador de sinais.

➤ **Balança utilizada no ensaio de massa específica**

Descrição: Balança SHIMADZU

Modelo: AY 220

Capacidade de pesagem: 220 g



Fotografia B.3 – Balança.

➤ **Conjunto eletroímã-bobina**

Descrição: Bobinas Cidepe

Modelo: EQ170D

Características: Bobina de 900 espiras com limite de corrente de 4ª



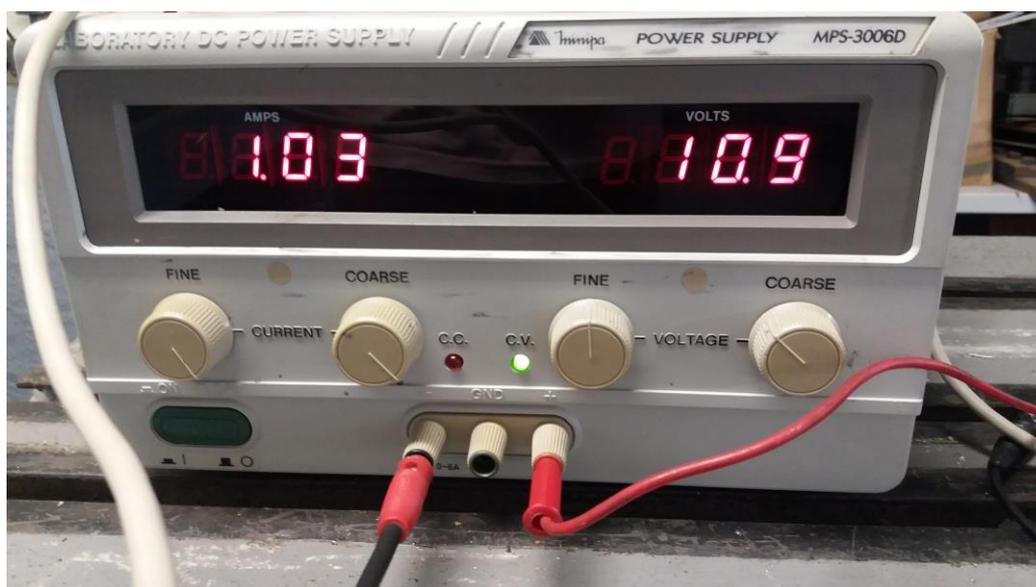
Fotografia B.4 – Conjunto eletroímã-bobina.

➤ **Fonte de Tensão**

Descrição: Fonte de Tensão Minipa

Modelo: MPS-3006D

Características: Dois *displays*, comutável para tensão ou corrente, capaz de fornecer duas saídas com tensão de 0 a 30V DC e corrente de 0 a 6A DC



Fotografia B.5 – Fonte de tensão ou fonte de alimentação.

➤ **Gaussmeter**

Descrição: MAGNET-PHYSIK

Modelo: FH 54

Características: Sonda de efeito Hall



Fotografia B.6 – Gaussmeter.

➤ Gerador de Função

Descrição: Gerador de função LABO

Modelo: gf-03

Tipos de função: Onda senoidal, Dente de serra e onda quadrada

Fator multiplicativo: 1 a 10 k

Ajuste da escala: 1 a 10 Hz



Fotografia B.7 – Gerador de função ou gerador de sinais.

➤ **Máquina de corte**

Descrição: Máquina de corte Norton

Modelo: Clipper TR 201E

Potência: 900 W



Fotografia B.8 - Máquina de corte.

➤ **Martelo**

Descrição: Martelo de impacto Brüel & Kjær

Modelo: 8204

Sensibilidade: 22,7 mV/N

Força máxima: 890 N



Fotografia B.9 – Martelo de impacto.

➤ **Microscópio óptico**

Descrição: Microscópio óptico Olympus®

Modelo: BX41M-LED

Iluminação: Refletida

Graduação: 25 mm

Graduação fina por rotação: 100 μm

Graduação mínima 1 μm

Altura máxima da amostra: 65 mm



Fotografia B.10 – Microscópio óptico.

➤ **Misturador mecânico**

Descrição: Agitador mecânico FISATOM

Modelo: 713D

Características: Dois eixos de acionamento, rotação regulável de até 5000 rpm.



Fotografia B.11 - Misturador.

➤ **Paquímetro digital**

Descrição: Paquímetro digital - DIGIMESS

Modelo: 100.178 BL

Resolução: 0,01 mm

Capacidade: 200 mm



Fotografia B.12 – Paquímetro utilizado.

➤ **Reômetro**

Descrição: Reômetro ANTON PAAR

Modelo: MCR-301

Cela magnetoreológica: MRD-180 1T

Sistema utilizado: *Plate-plate* 20mm, com *gap* de 1,35 mm



Fotografia B.13 – Reômetro.

➤ ***Shaker***

Descrição: *Shaker* Brüel & Kjaer

Modelo: 4808

Faixa de frequência: 5 Hz a 10 kHz



Fotografia B.14 – *Shaker*.

➤ **Vibrômetro**

Descrição: Vibrômetro OMETRON

Modelo: VQ-500-D

Faixa de frequência: 0,5 Hz à 22 kHz

Faixa de medição: 20 mm/s, 100 mm/s e 500 mm/s

Melhor resolução: $0,02 \mu\text{m/s}/(\text{Hz}^{0,5})$



Fotografia B.15 – Vista frontal do vibrômetro laser.