

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO MATERIAIS PARA ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS PARA ENGENHARIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Análise do Comportamento Dinâmico de
Vigas Sanduíche com Núcleo *Honeycomb*
Preenchido com Gel Magneto Reológico**

Autor: **Lucas Eduardo Ribeiro Faria**

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

Co-Orientador: **Prof. Dr. Guilherme Ferreira Gomes**

Itajubá, outubro de 2020.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO MATERIAIS PARA ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS PARA ENGENHARIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Análise do Comportamento Dinâmico de
Vigas Sanduíche com Núcleo *Honeycomb*
Preenchido com Gel Magneto Reológico**

Autor: Lucas Eduardo Ribeiro Faria

Orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos Ancelotti Junior

Co-Orientador: Prof. Dr. Guilherme Ferreira Gomes

Curso: Mestrado em Materiais para Engenharia

Área de Concentração: Não metais: Polímeros, Cerâmicas e Compósitos

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Materiais para Engenharia como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Materiais para Engenharia.

Itajubá, outubro de 2020.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO MATERIAIS PARA ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS PARA ENGENHARIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Análise do Comportamento Dinâmico de
Vigas Sanduíche com Núcleo *Honeycomb*
Preenchido com Gel Magneto Reológico**

Autor: **Lucas Eduardo Ribeiro Faria**

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

Co-Orientador: **Prof. Dr. Guilherme Ferreira Gomes**

Composição da Banca Examinadora

Prof Dr. Antônio Carlos Ancelotti Júnior, Presidente – IEM/UNIFEI

Prof. Dr. Guilherme Ferreira Gomes – IEM/UNIFEI

Prof Dr. Antônio Jose Faria Bombard – IFQ/UNIFEI

Prof Dr. Luiz Claudio Pardini – ITA

Itajubá, outubro de 2020.

“Uns confiam em carros outros
em cavalos, mas nós confiamos
no nome do Senhor nosso Deus”

Salmos 20:7

Agradecimentos

A Deus primeiramente pela saúde mental e física.

A minha amada esposa Jaene Faria por seu carinho, compreensão, paciência e principalmente por acreditar que essa dissertação seria possível, e a minha linda filha Liz Helena ao qual veio ao mundo enquanto essa dissertação estava sendo realizada, por me fazer um homem ainda mais feliz e realizado.

A minha família, meu pai Levi e minha mãe Luzia pelo apoio, incentivo, confiança e suas constantes intervenções a Deus pela minha vida. Aos meus irmãos Lísia, Lemuel e Larissa por me apoiarem em todo tempo.

Ao professor Ancelotti pela orientação, paciência e conhecimento transmitido, para que esse projeto fosse realizado.

Ao professor Guilherme pela ajuda durante a dissertação, sem a sua ajuda essa dissertação não seria possível. Meus sinceros agradecimentos.

Ao professor Bombard a ajuda concedida, que desde o começo deste trabalho sempre se mostrou otimista com os resultados que iríamos obter, e obrigado aos materiais cedidos para realização da dissertação.

Aos amigos e colegas do Núcleo de Tecnologia em Compósitos, pelas conversas, as ajudas e conhecimentos compartilhados.

Aos funcionários da Universidade Federal de Itajubá que diretamente ou indiretamente colaboraram no desenvolvimento e execução desse projeto.

Resumo

Com o avanço acelerado da tecnologia surge a necessidade de materiais com menor peso e maior resistência, assim estudos em novos materiais e técnicas de fabricação são necessárias. A indústria aeronáutica sempre está à frente em pesquisa de novos materiais, onde o fator “peso” é crucial, em contrapartida, aeronaves sofrem com problema de intensa vibrações mecânicas e a possibilidade de conseguir fazer o controle dessas vibrações é de suma importância para a estabilidade da aeronave e sua integridade estrutural. Para controle dessas intensas vibrações tem-se apontado os materiais inteligentes como possível recurso para controle de vibrações, pois é possível variar as frequências modais da estrutura através de excitações elétricas ou magnéticas. O objetivo desta dissertação é de realizar a análise do comportamento dinâmico sobre influência de vibrações em vigas sanduíche, que possuem núcleos em forma de colmeia (*honeycomb*), preenchidos por géis magneto reológicos e faces em material compósito. O desenvolvimento do trabalho possui uma análise experimental através de ensaios de vibrações livre e forçada para a determinação dos parâmetros modais das vigas construídas em função da intensidade de campo magnético aplicado, e uma análise estatística para determinar os fatores que mais impactaram nesse processo. Com os resultados obtidos, o emprego desses materiais se mostra promissores em estruturas, devido ao fato de alcançar reduções no valor das frequências naturais na ordem de 54%, aumento nos fatores de amortecimento de até 390% e diminuição na amplitude de vibração forçada de 40% em relação ao emprego de um campo magnético. Resultante da análise estatística mostrou que o fator que mais influenciou na resposta dos ensaios de vibração livre e forçada foi o gel. Na conclusão desta dissertação, se propõe novos modelos de vigas, já que são escassas na literatura trabalhos com núcleo *honeycomb* preenchido com gel magneto reológico.

Palavras-chave

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

Abstract

With the rapid advancement of technology comes the need for lighter weight and higher strength materials, so studies on new materials and manufacturing techniques are needed. The aeronautics industry is always at the forefront of researching new materials, where the weight factor is crucial. In contrast, aircraft suffer from intense mechanical vibration and the ability to control these vibrations is of paramount importance for stability of the aircraft and its structural integrity. To control these intense vibrations, intelligent materials have been pointed as a possible resource for vibration control, since it is possible to vary the modal frequencies of the structure through electrical or magnetic excitations. The objective of this dissertation is to analyze the dynamic behavior under the influence of vibrations in sandwich beams, which have honeycomb cores filled with rheological magnet gels and composite material skins. The development of the work has an experimental analysis through free and forced vibration tests to determine the modal parameters of the beams built according to the applied magnetic field intensity, and a statistical analysis to determine the factors that most impacted this process. With the results obtained, the use of these materials is promising in structures, due to the fact that they achieve reductions in the value of natural frequencies in the order of 54%, increase in damping factors of up to 390% and decrease in forced vibration amplitude of 40%. % in relation to the use of a magnetic field. Resulting from the statistical analysis showed that the factor that most influenced the response of free and forced vibration assays was the gel. In the conclusion of this dissertation, it is proposed new models of beams, since there are few studies in the honeycomb core filled with rheological magnet gel.

Keywords

Sandwich Beam, Honeycomb, Rheological Magneto Gel, Vibrations, Composites.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	i
LISTA DE FIGURAS	iii
SIGLAS	x
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – Considerações iniciais.....	1
1.2 – Objetivos	4
1.3 – Conteúdo do trabalho	5
CAPÍTULO 2	6
REVISÃO DA LITERATURA	6
2.1 – Materiais Compósitos.....	6
2.1.1 - Definições e Conceitos Básicos	6
2.1.2 – Compósitos Estruturais	8
2.1.3 – Painéis Sanduíches	10
2.2 – Materiais Inteligentes.....	14
2.2.1 – Definições e conceitos.....	14
2.2.2 – Fluido Magneto Reológico.....	17
2.2.3 – Propriedades dos Magnetos Reológicos	17
2.3 – Gel Magneto Reológico	19
2.3.1 – Elastômero Kraton G1650	19
2.3.2 – Argila Bentone SD-3	20
2.4 – Partícula Ferromagnética	21
2.4.1 – Partícula Ferromagnética Ferro Carbonilo	21
2.4.2 – Partícula Ferromagnética Atomet 1001	22
2.5 – Vibrações Mecânicas.....	22
2.5.1 – Definição e Conceito em Materiais Compósitos	22
2.5.2 – Ensaio de Vibração Mecânica.....	24
CAPÍTULO 3	26
MATERIAIS E METODOLOGIA	26
3.1 - Materiais	26
3.2 - Metodologia.....	28
3.2.1 – Confecção dos Modelos de Viga Sanduíche.....	29
3.2.3 – Ensaio de Vibração Mecânica.....	42

3.2.3.1 – Ensaio de Vibração Livre.....	43
3.2.3.2 – Ensaio de Vibração Forçada	45
CAPÍTULO 4	47
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	47
4.1 - Resultados do Ensaio de Vibração Livre.....	47
4.1.1 – Frequências Naturais.....	47
4.1.2 – Fatores de Amortecimento	59
4.2 – Resultados do Ensaio de Vibração Forçada.....	66
4.2.1 – Variação de Amplitude	67
4.3 - Análise Estatística.....	73
4.3.1 – Frequências Naturais.....	73
4.3.2 – Fatores de Amortecimento	76
4.3.3 – Variação de Amplitude	79
CAPÍTULO 5	82
CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	82
5.1 – Conclusões.....	82
5.2 – Perspectivas Futuras	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
APÊNDICE A	91
APÊNDICE B.....	97
INSTRUMENTAÇÃO	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema simplificado de um painel sanduíche: a) polimérico, b) colmeia, c) corrugado (Adaptado de Gagliardo, 2008).	2
Figura 2 - Classificação dos compósitos segundo características geométricas e espaciais das partículas (adaptado de Alves, 2017).	6
Figura 3 - Aeronave Boing 787 produzida com 50% de materiais compósitos (Adaptado de Griffiths, 2005).	8
Figura 4 - Compósito estrutural do tipo laminado (onde Θ é a orientação das fibras). (Adaptado de Faria, 2006).	9
Figura 5 - (a) Estrutura sanduíche de alma plena e (b) de alma vazada do tipo ondulada (Adaptado de Faria, 2006).	9
Figura 6 - Elementos constituintes de uma estrutura sanduíche (adaptado de Mata, 2014).	10
Figura 7 - Longarina do BMW i3 com <i>honeycomb</i> Fonte: Markus (2013).	12
Figura 8 - Atuador com liga de memória de forma submetido a um carregamento constante. Fonte Koomen (2015).	16
Figura 9 - Fluxograma das etapas de trabalho.	28
Figura 10 - a) Máquina <i>Ultimaker</i> ® utilizada b) Máquina em operação.	30
Figura 11 - Diferentes núcleos colmeia impressos em impressora 3D.	31
Figura 12 – Esquema do desenho dos núcleos <i>honeycomb</i> (a) quadrada (b) hexagonal.	32
Figura 13 – Balança de precisão.	33
Figura 14 – Agitador térmico.	34
Figura 15 – Géis preparado a) Gel 1, b) Gel 2, c) Gel 3 e d) Gel 4.	34
Figura 16 – Núcleo colmeia preenchido com géis magneto reológico.	35
Figura 17 – Disposição da montagem dos corpos de prova.	36
Figura 18 – Representação do processo VARTM. Fonte: Eloy <i>et al.</i> (2018).	37
Figura 19 – Misturador.	38
Figura 20 – Etapas do processo VARTM.	39
Figura 21 – Marcação dos corpos de prova a serem retirados da placa laminada.	40
Figura 22 – Corpos de provas cortados e lixados.	41
Figura 23 – Geometria do corpo de prova após serem lixadas.	41
Figura 24 – Martelo utilizado para excitar dinamicamente a viga e a placa de aquisição de sinais.	44

Figura 25 – Esquema experimental utilizado nos ensaios.....	46
Figura 26 - Espectro de frequência para a amostra CP1 com geometria quadrada, polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet.....	48
Figura 27 - Espectro de frequência para a amostra CP2 com geometria hexagonal, polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet.....	50
Figura 28 - Espectro de frequência para a amostra CP3 com geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética Atomet.	51
Figura 29 - Espectro de frequência para a amostra CP4 com geometria hexagonal, argila SD3 e partícula ferromagnética Atomet.	52
Figura 30 - Espectro de frequência para a amostra CP5 com geometria quadrada, polímero Kraton e partícula ferromagnética HS.....	53
Figura 31 - Espectro de frequência para a amostra CP6 com geometria hexagonal, polímero Kraton e partícula ferromagnética HS.....	54
Figura 32 - Espectro de frequência para a amostra CP7 com geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética HS.	55
Figura 33 - Espectro de frequência para a amostra CP8 com geometria hexagonal, argila SD3 e partícula ferromagnética HS.	56
Figura 34 – Variação das frequências naturais correspondentes ao primeiro modo de vibração em função do campo magnético aplicado.....	57
Figura 35 - Variação das frequências naturais correspondentes ao segundo modo de vibração em função do campo magnético aplicado.....	58
Figura 36 - Variação das frequências naturais correspondentes ao terceiro modo de vibração em função do campo magnético aplicado.....	58
Figura 37 – Resposta de velocidade no tempo para o CP8 com geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética HS, sem campo magnético aplicado.....	60
Figura 38 – Ajuste da curva de amplitude no tempo para a amostra CP8 de geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética HS, sem campo magnético aplicado.	61
Figura 39 - Variação dos fatores de amortecimento em relação ao campo magnético aplicado para o primeiro modo de vibração.	64
Figura 40 – Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga colmeia CP1 com geometria quadrada, polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet. Frequência de excitação de 20,14 Hz.	67

Figura 41 - Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga colmeia CP2 com geometria hexagonal, polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet. Frequência de excitação de 13,91 Hz.....	68
Figura 42 - Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga colmeia CP3 com geometria quadrada, polímero SD3 e partícula ferromagnética Atomet. Frequência de excitação de 13,91 Hz.....	68
Figura 43 -Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga colmeia CP4 com geometria hexagonal, polímero SD3 e partícula ferromagnética Atomet. Frequência de excitação de 13,54 Hz.....	69
Figura 44 - Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga colmeia CP5 com geometria quadrada, polímero Kraton e partícula ferromagnética HS. Frequência de excitação de 18,31 Hz.....	69
Figura 45 – Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga colmeia CP6 com geometria hexagonal, polímero Kraton e partícula ferromagnética HS. Frequência de excitação de 12,81 Hz.....	70
Figura 46 - Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga colmeia CP7 com geometria quadrada, polímero SD3 e partícula ferromagnética HS. Frequência de excitação de 11,71 Hz.....	70
Figura 47 - Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga colmeia CP8 com geometria hexagonal, polímero SD3 e partícula ferromagnética HS. Frequência de excitação de 12,81 Hz.....	71
Figura 48 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados do primeiro modo de frequência natural.	74
Figura 49 – Gráfico dos efeitos principais para o primeiro modo de frequência natural.	74
Figura 50 - Gráfico dos efeitos das interações para o primeiro modo de frequência natural.	75
Figura 51 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados de amortecimento.....	77
Figura 52 - Gráfico dos efeitos principais para o amortecimento.	77
Figura 53 - Gráfico dos efeitos das iterações para o amortecimento.....	78
Figura 54 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados da amplitude.	79
Figura 55 - Gráfico dos efeitos principais para a amplitude.....	80
Figura 56 - Gráfico dos efeitos das iterações para a amplitude.....	80
Figura 57 – Amplificador.	97

Figura 58 – Analisador de sinais.	98
Figura 59 – Balança.	99
Figura 60 – Conjunto de eletroímã-bobina.	100
Figura 61 – Fonte de tensão ou fonte de alimentação.	101
Figura 62 – <i>Gaussmeter</i>	102
Figura 63 – Gerador de função ou gerador de sinais.	103
Figura 64 – Máquina de corte.	104
Figura 65 – Martelo de impacto.	105
Figura 66 – Misturador.	106
Figura 67 – Paquímetro digital.	107
Figura 68 – <i>Shaker</i>	108
Figura 69 – Vibrômetro laser.	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do tecido de fibra de vidro.....	27
Tabela 2 - Propriedades da resina epóxi utilizada.	27
Tabela 3 - Valor de massa e volume dos núcleos <i>honeycomb</i> de acordo com software de desenho.	30
Tabela 4 - Massa dos núcleos impressos.	31
Tabela 5 – Dimensões dos núcleos <i>honeycomb</i>	32
Tabela 6 – Elementos e valores utilizados nas confecções dos géis.	33
Tabela 7 – Massa dos corpos de prova preenchidos com gel magneto reológico.	35
Tabela 8 – Medidas dos corpos de prova cortados e lixados.....	42
Tabela 9 – Massa dos corpos de prova depois de cortados e lixados.....	42
Tabela 10 - Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche CP1 de geometria quadrada polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet.	49
Tabela 11 - Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche CP2 de geometria hexagonal polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet.	50
Tabela 12 - Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche CP3 de geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética Atomet.	51
Tabela 13 - Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche CP4 de geometria hexagonal, argila SD3 e partícula ferromagnética Atomet.	52
Tabela 14 - Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche CP5 de geometria quadrada, polímero Kraton e partícula ferromagnética HS.	53
Tabela 15 - Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche CP6 de geometria hexagonal, polímero Kraton e partícula ferromagnética HS.	54
Tabela 16 - - Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche CP7 de geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética HS.	55

Tabela 17 - Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche CP8 de geometria hexagonal, argila SD3 e partícula ferromagnética HS.	56
Tabela 18 - – Variação da primeira frequência em ordem decrescente.....	59
Tabela 19 - Fatores de amortecimento obtidos pelos ajustes das curvas de amplitude no tempo para o CP1 com geometria quadrada, polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet.	62
Tabela 20 – Fatores de amortecimento obtidos pelos ajustes das curvas de amplitude no tempo para o CP2 com geometria hexagonal, polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet.	62
Tabela 21 – Fatores de amortecimento obtidos pelos ajustes das curvas de amplitude no tempo para o CP3 com geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética Atomet.	62
Tabela 22 – Fatores de amortecimento obtidos pelos ajustes das curvas de amplitude no tempo para o CP4 com geometria hexagonal, argila SD3 e partícula ferromagnética Atomet.	63
Tabela 23 – Fatores de amortecimento obtidos pelos ajustes das curvas de amplitude no tempo para o CP5 de geometria quadrada, polímero Kraton e partícula ferromagnética HS.	63
Tabela 24 – Fatores de amortecimento obtidos pelos ajustes das curvas de amplitude no tempo para o CP6 com geometria hexagonal, polímero Kraton e partícula ferromagnética HS.....	63
Tabela 25 – Fatores de amortecimento obtidos pelos ajustes das curvas de amplitude no tempo para o CP7 de geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética HS..	63
Tabela 26 - Fatores de amortecimento obtidos pelos ajustes das curvas de amplitude no tempo para o CP8 de geometria hexagonal, argila SD3 e partícula ferromagnética HS.64	
Tabela 27 – Variação dos fatores de amortecimento em ordem decrescente.....	65
Tabela 28 – Frequências de excitação de cada corpo de prova no ensaio de vibração forçada sem campo magnético aplicado.	67
Tabela 29 – Corpos de prova e respectivas variações de amplitude em ordem decrescente.....	72
Tabela 30 – Resumo dos fatores de entrada e resposta do delta de frequência natural, amortecimento e amplitude	73
Tabela 31 - Análise da variância para o primeiro modo de frequência natural.....	75

Tabela 32 - Sumário do modelo para o primeiro modo de vibração.	75
Tabela 33 - Análise da variância para o amortecimento.	78
Tabela 34 - Sumário do modelo para o amortecimento.....	78
Tabela 35 - Análise da variância para a amplitude.....	81
Tabela 36 - Sumário do modelo para a amplitude.....	81

SIGLAS

ABS – Acrilonitrila butadieno estireno

FCN – Frequência sob campo N

FMR – Fluido magneto-reológico

FSC – Frequência sem campo

GMR – Gel magneto-reológico

IEM – Instituto de Engenharia Mecânica

IFQ – Instituto de Física e Química

NTC – Núcleo de Tecnologia em Compósitos

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações iniciais

A tecnologia avança cada vez mais com uma velocidade incrível, e com esse avanço existe uma necessidade por novos conceitos de materiais e técnicas de fabricação. Materiais mais leves e com maior resistência aparecem como substitutos de materiais tradicionais que geralmente são mais pesados como por exemplo os materiais metálicos (ELOY *et al.*, 2018).

Materiais que são denominados compostos ou compósitos são definidos como um conjunto de dois ou mais materiais combinados de maneira multifásica, na confecção de um novo material que combina parcela das propriedades de cada material resultando em propriedades que nenhum dos componentes apresenta individualmente. A combinação produzida por dois diferentes materiais que resultam um terceiro com propriedades diferentes é uma ideia respectivamente simples e seu uso é historicamente documentado, na civilização egípcia por exemplo é conhecida que para reforçar tijolos para construções simples se usava palha picada. (MENDONÇA, 2005; VINSON & SIERAKOWSKI, 2002). Atualmente como exemplo bastante conhecido de material compósito é o concreto de cimento *Portland*, que é largamente usado na construção civil, obtido por um agregado de brita e areia ligada quimicamente pelo cimento e que compõem um corpo sólido.

Apesar de se tratar de um conceito antigo, o primeiro conhecimento de um compósito estrutural data de 1961, e no ano de 1949 que temos o advento das fibras de vidro, e assim teve início o desenvolvimento dos materiais compósitos modernos, principalmente polímeros reforçados por essas fibras. O avanço do desenvolvimento da alta tecnologia em materiais compósitos começou de forma expressiva na década de 1970, marcada pelo início da aplicação na área aeronáutica, área está em que é mais difundido o uso dos materiais compósitos. (PIGGOT, 2002; HARPER, 2000; TSAI, 1992). Uma propriedade importante dos materiais compósitos é a resistência mecânica, essa qualidade pode ser obtida por uma imensa combinação entre diferentes materiais, sendo que a cada diferente combinação temos um novo material em termos das propriedades únicas apresentadas, com essas possibilidades, tornam os compósitos uma alternativa muito importante para a indústria em geral, e principalmente para as indústrias aeronáuticas,

que já conta com casos de 50% de compósitos na estrutura de algumas aeronaves (GAY, 2003).

Com o avanço industrial, a necessidade que as indústrias passam a ter de novos materiais vem aumentando cada vez mais, materiais mais leves e resistentes surgem como solução aos materiais outrora empregados. Seguindo esse avanço, painéis sanduíche vem sendo visto como materiais preferíveis em inúmeras aplicações, principalmente na indústria aeronáutica onde o parâmetro crucial é o “peso”.

Diferentes materiais podem ser desenvolvidos fazendo a união de vários materiais distintos, e dentro dessas possibilidades temos os painéis sanduíches, podendo ser compostos ou simples. Nesse tipo de arranjo, compreende-se três camadas de materiais, duas placas mais finas sendo uma na parte superior e outra na parte inferior, que é normalmente chamada de faces. As lâminas podem ser isotrópicas, ortotrópicas ou anisotrópicas, e entre as faces, temos um núcleo, cuja densidade normalmente é menor que as faces, podendo ser uma espuma, um reticulado simples, uma geometria em forma de colmeia (*honeycomb*), dentre outras geometrias. A união entre essas camadas está diretamente ligada as propriedades finais da estrutura combinada agregando vantagens ao material. Uma ilustração deste tipo pode ser visualizada na Figura 1 abaixo.

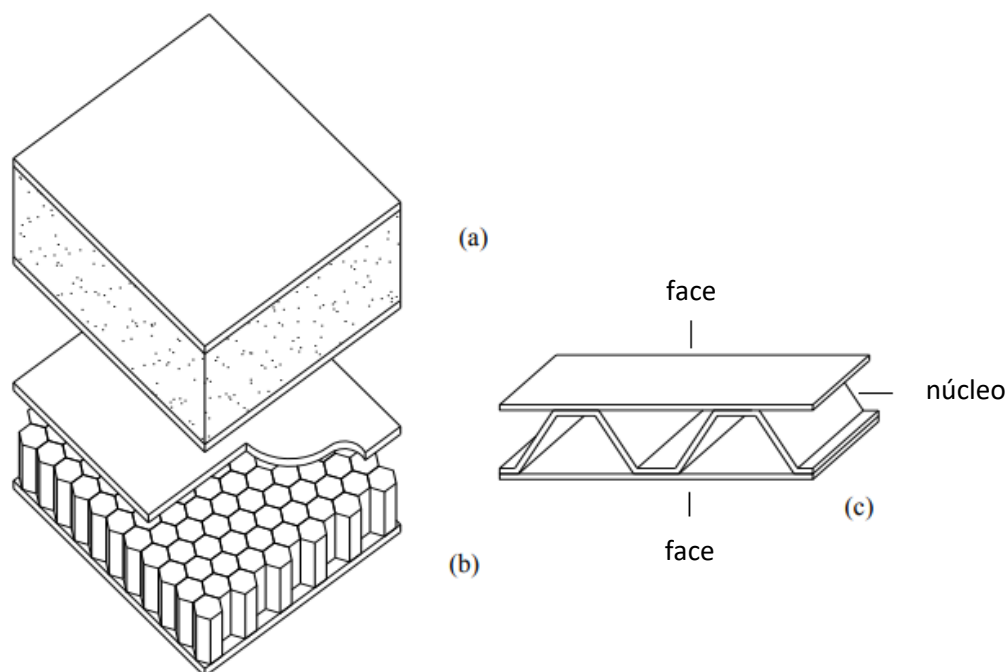


Figura 1 - Esquema simplificado de um painel sanduíche: a) polimérico, b) colmeia, c) corrugado (Adaptado de Gagliardo, 2008).

Uma estrutura sanduíche é capaz de atingir uma resistência a flexão, em certas condições, maiores que a de uma placa maciça, composta de mesmo material e densidade das duas faces sanduíche. A rigidez á flexão e ao cisalhamento em função das cargas requeridas da estrutura é fornecida pelas faces (GAGLIARDO, 2008). O núcleo possui funções importantes nessa classe de materiais, ela é responsável pela transferência de esforços de acordo com a distância adequada que separa as faces superior e inferior do material (BERTINI, 1995). O núcleo deve possuir uma rigidez adequada, para que as faces escorreguem uma em relação a outra. Além das funções estruturais já mencionadas, o núcleo garante isolamento térmico e acústico.

Os painéis sanduíches possuem elevadas relações rigidez/peso e resistência/peso, são estruturas relativamente fáceis de serem confeccionadas, uma vez que possuem peso próprio reduzido e são comumente pré-fabricados, ocasionando economia de tempo e de custos. Possuem uma excelente durabilidade, mesmo que em ambientes quimicamente agressivos e por permitirem a combinação de diferentes materiais, permitindo formas de complexibilidade maiores (DE ALMEIDA, 2009).

O uso de estruturas sanduíches nas diferentes indústrias tem se mostrado de grande potencialidade, é de suma importância o estudo de técnicas ao controle do campo de deformações e dos parâmetros modais destas estruturas quando são solicitadas dinamicamente.

As diferentes técnicas para o controle de vibração em estruturas baseiam-se na utilização de materiais inteligentes (*smart materials*). Os materiais inteligentes, são materiais que suas propriedades podem ser alteradas através de um estímulo externo, como por exemplo, temperatura, umidade, campo elétrico ou magnético, dentre outros (RUDDY *et al.*, 2012). Dentro os chamados materiais inteligentes se encontram o gel magneto-reológico (GMR).

GMR são compostos de partículas polarizáveis magneticamente suspensas em meio gelatinoso não magnético, controláveis através de um campo magnético externo. O GMR é de um grupo de material inteligente cujas propriedades mecânicas como o módulo elástico e o fator de perda podem ser alterados rapidamente e de forma reversível sob aplicação de um campo magnético (BELLAN & BOSSIS, 2002)

A utilização de uma matriz mais viscosa minimiza o problema encontrado nos fluído magneto-reológico (FMR), pois com a utilização do FMR tem-se o problema de perder suas propriedades funcionais reduzindo a vida útil da aplicação do material, usando o GMR tem-se o problema de sedimentação minimizado e conserva algumas

propriedades do FMR, como por exemplo, o maior intervalo de controle do material (NAYAK *et al.*, 2015).

Com o desenvolvimento da tecnologia e as grandes variedades de materiais compósitos possíveis, o desenvolvimento e as suas aplicações possuem um grande potencial, necessitando de estudos constantes para a elaboração e caracterização desses novos materiais.

Neste trabalho, diferentes configurações construtivas de vigas sanduíches foram avaliadas e caracterizadas em relação ao seu comportamento dinâmico. Para isto, realizou-se um planejamento de experimentos (*design of experiments*) em função dos parâmetros construtivos: i) geometria da colmeia, ii) tipo de gel do núcleo e iii) tipo de partícula ferromagnética. Ensaios experimentais foram realizados de modo a se obter a variação dos parâmetros modais (frequência natural e fator de amortecimento) em função do campo aplicado em diferentes intensidades. Dada a revisão da literatura realizada, compreende-se que este tipo de estudo, com núcleo em colmeia preenchido por GMR, é de caráter inovador, dada a deficiência de publicações científicas abordando esta disposição até a data de publicação desta dissertação.

1.2 – Objetivos

O objetivo geral deste estudo foi a fabricação de vigas sanduíche com faces em material compósito e núcleo colmeia preenchido com gel magneto-reológico, e os seus comportamentos dinâmicos quando submetidos a intensidades de campos magnético de 0, 60 e 100 kA/m. Assim, os objetivos específicos desta dissertação consistem em:

- Sugerir um novo modelo de viga sanduíche, com faces em material compósito e núcleo colmeia preenchido por gel magneto-reológico;
- Analisar a influência do material utilizado nas colmeias, assim como as suas geometrias, a comparação entre as partículas ferromagnéticas nos géis magneto-reológico e do campo magnético sobre os parâmetros modais dos modelos de vigas desenvolvidos;
- Realização de ensaios de vibração livre e vibração forçada sobre campo magnético;
- Realização de ajustes analíticos-experimentais para determinação do fator de amortecimento das vigas;

- Realização de um planejamento de experimentos (*design of experiments*) para identificar quais são os maiores fatores de impacto em cada ensaio realizado.

1.3 – Conteúdo do trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo finalizado com as referências bibliográficas o Apêndice A e Apêndice B. A seguir serão apresentados os assuntos correspondentes a cada capítulo.

No Capítulo 1, apresentou-se uma introdução sobre o assunto abordado na pesquisa, uma revisão da literatura sobre as principais pesquisas na área e para finalizar os objetivos desenvolvidos nessa dissertação.

No Capítulo 2, apresenta-se os principais conceitos sobre os materiais compósitos, como a caracterização de um painel sanduíche, os seus componentes e suas respectivas formas. Descrição sobre a classe dos materiais inteligentes (*smart materials*), são mencionados os materiais piezelétricos, as ligas com memória de forma, fluídos controláveis, gel magneto reológico, partículas ferromagnéticas vibração e ensaio de vibração em vigas sanduíches.

No Capítulo 3, descreve todo o plano que foi realizado o experimento, a fabricação dos painéis sanduíche e a caracterização de todos componentes. Os ensaios realizados no experimento, vibração livre e vibração forçada. Além disso, foi feito uma análise estatística utilizando o *Design of Experiments (DOE)*.

No Capítulo 4, apresenta os resultados obtidos em relação a metodologia descrita no Capítulo 3, fazendo a análise de como o campo magnético possui influência sobre as vigas, a geometria, o gel utilizado e a partícula ferromagnética empregada no núcleo colmeia sobre os parâmetros modais das vigas sanduíche. E a iteração dos elementos utilizados através da análise estatística.

As conclusões desta dissertação são apresentadas no Capítulo 5, na qual à comentários sobre os resultados de maior relevância, e as sugestões de trabalhos futuro.

No Apêndice A, os gráficos dos ajustes realizados para a determinação do amortecimento das vigas que foi submetido ao ensaio de vibração livre são apresentados.

Para finalizar, o Apêndice B possui todas as fotografias e especificações técnicas de todos os equipamentos utilizados nos ensaios experimentais.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 – Materiais Compósitos

2.1.1 - Definições e Conceitos Básicos

Com o passar do tempo novas classes de materiais foram aparecendo, dentre essas novas classes surgiu os materiais compósitos.

Entende-se como compósito um material multifásico onde os materiais constituintes devem ser distintos quimicamente proporcionando uma interface adequada, promovendo interação em suas propriedades. Materiais compósitos são aqueles que têm pelo menos dois componentes ou fases com propriedades físicas e químicas bem distintas na sua composição, essas fases distintas são chamadas usualmente de reforço e matriz (NETO & PARDINI, 2018)

Especificamente, os materiais compósitos são formados por no mínimo duas fases, a fase contínua que é chamada de matriz, na qual essa matriz envolve a segunda fase, chamada de fase dispersa ou simplesmente de carga. Com isso existem diferentes tipos de compósitos que podem ser classificados em três classes principais, agrupados de acordo com a natureza da matriz: compósitos de matriz metálica (CMM), compósitos de matriz polimérica (CMP) e compósitos de matriz cerâmica (CMC) (HULL, 1996). Segundo Alves (2017) outra classificação de compósitos pode ser dada de acordo com as características geométricas e espaciais das partículas na fase dispersa, que dependendo das orientações, serão influenciadas e as propriedades dos materiais serão correspondentes devido a essas orientações, conforme é ilustrado na Figura 2.

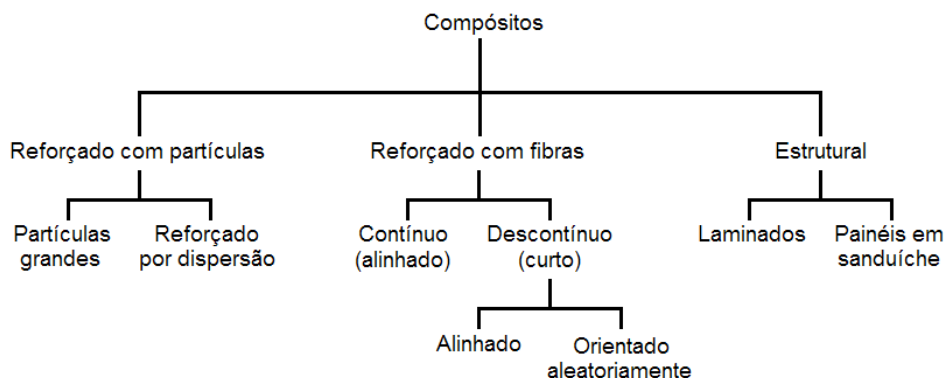


Figura 2 - Classificação dos compósitos segundo características geométricas e espaciais das partículas (adaptado de Alves, 2017).

Com o avanço da tecnologia surgiram novos tipos de compósitos chamados de materiais compósitos modernos. Esses materiais são definidos por duas fases, uma chamada de reforço, que é descontínua e rígida e a outra chamada de matriz que é mais fraca e menos rígida, algumas vezes é adicionada uma fase entre o reforço e a matriz chamada de interfase (DANIEL & ISHAI, 1994). A função da fase matriz é unir as fibras e transmitir as tensões, além de proteger as fibras do desgaste gerado pelo uso, já o reforço é constituído de fibras que são mais resistentes e rígidas, tendo como função principal suportar os carregamentos mecânicos (MENDONÇA, 2005; NETO & PARDINI, 2018).

Dentre os materiais compósitos temos os compósitos estruturais que são compostos normalmente tanto por materiais homogêneos como por materiais heterogêneos, cujas propriedades dependem não somente das propriedades dos materiais constituintes, mas também do projeto geométrico dos vários elementos estruturais. Os compósitos laminados e os painéis em sanduiche são dois dos tipos de compósitos estruturais mais comuns (NETO & PARDINI, 2018). As matrizes poliméricas utilizadas em compósitos com aplicações estruturais são classificadas principalmente em termoplásticas e termorrígidas. As termoplásticas podem ser recicláveis, por conseguinte, usadas novamente, pois ao serem aquecidas tornam-se maleáveis, e são endurecidas ao serem resfriadas, sendo este um processo que pode ser repetido. Já as matrizes termorrígidas apresentam o processo de cura e permanecem na forma que estão mesmo após serem aquecidas, ou seja, não se tornam maleáveis. Quando esse material é submetido a temperaturas excessivas o material irá degradar (DI BENEDETTO, 2019). Nos compósitos poliméricos estruturais, a interação física ou química ocorre entre o reforço fibroso e a matriz polimérica, gerando uma transferência de esforços mecânicos entre as fases constituintes. Geralmente, os elementos de reforço utilizados nestes materiais são dispostos na forma de fibras (tais como aramida, carbono ou vidro), as quais garantem transmissão adequada dos esforços aplicados na estrutura (REZENDE, COSTA, BOTELHO, 2011).

Com esse avanço da tecnologia proporcionou o conhecimento sobre os materiais compósitos que foram capazes de prover as novas necessidades sobrevindas do desenvolvimento. A consolidação dos materiais compósitos se deu as suas devidas vantagens quando são comparados aos materiais convencionais, como redução de peso e alta resistência mecânica. Com os seus grandes benefícios para o desenvolvimento de novos materiais e suas novas aplicações em diferentes áreas, como a aeronáutica, automobilística, naval, civil, eólica, de equipamentos esportivos, estruturas ortopédicas,

entre outras. A indústria aeronáutica militar conseguiu reduzir o peso de suas aeronaves em cerca de 30% devido ao uso de materiais compósitos poliméricos em substituição aos materiais metálicos (KAW, 2006).

Como exemplo desse avanço tecnológico tem-se a aeronave ilustrada na Figura 3, que possui asas e fuselagem feitas em materiais compósitos reforçados com fibra de carbono, considerando que os materiais compósitos representaram cerca de 50% do peso estrutural da aeronave e proporcionaram uma economia de combustível de 20%, consequentemente a emissão de poluentes foi reduzida (GRIFFITHS, 2005).

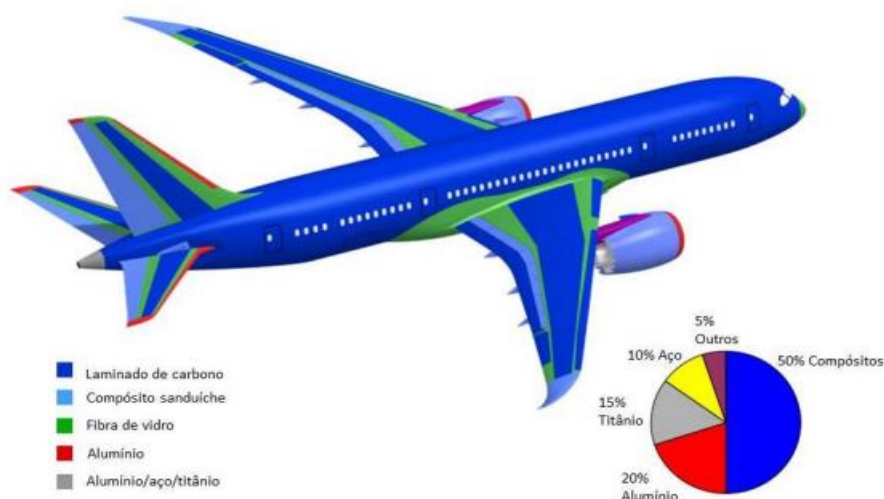


Figura 3 - Aeronave Boeing 787 produzida com 50% de materiais compósitos (Adaptado de Griffiths, 2005).

Com esses conceitos de materiais compósitos e com o progresso tecnológico, a necessidade por materiais com maior resistência mecânicas, mais leves e resistentes, partindo dessa tendência, os painéis sanduíches vêm sendo o material com maior preferência em diversas aplicações.

2.1.2 – Compósitos Estruturais

Um compósito estrutural é composto tanto por materiais homogêneos como por materiais compósitos cujas propriedades dependem não somente das propriedades dos materiais constituintes, mas também do projeto geométrico dos vários elementos estruturais (GAGLIARDO, 2008). Existem dois tipos básicos de compósito estrutural: compósito estrutural laminar (também chamado de laminado) e compósito estrutural do

tipo sanduíche. Os compósitos estruturais laminados são constituídos por um empilhamento de camadas (lâminas) ligadas entre si, com as fibras orientadas em diferentes direções como ilustrado na Figura 4. Um laminado típico é constituído por várias lâminas, frequentemente idênticas, variando suas orientações para melhor atender os requisitos de projeto ou fabricação.

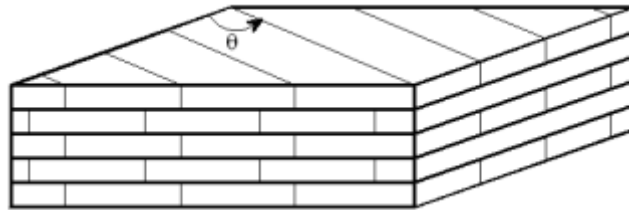


Figura 4 - Compósito estrutural do tipo laminado (onde Θ é a orientação das fibras). (Adaptado de Faria, 2006).

As várias combinações de orientações, espessuras e materiais de cada lâmina que compõe o laminado fazem com que o comportamento deste material possua características diferentes das observadas em cada lâmina individual. Uma abordagem extremamente interessante, neste contexto de estudo, é a análise macromecânica de um compósito, na qual é possível realizar a modelagem do comportamento dinâmico da estrutura laminada, supondo-se conhecidas as propriedades mecânicas e o comportamento individual de cada lâmina. Os compósitos estruturais do tipo sanduíches, como mostrado na Figura 5, são formados por lâminas fibrosas mais resistentes e um núcleo constituído de um material menos denso, que proporciona rigidez contra o cisalhamento ao longo dos planos perpendiculares às faces e resiste às deformações perpendiculares ao plano da face (NETO & PARDINI, 2018).

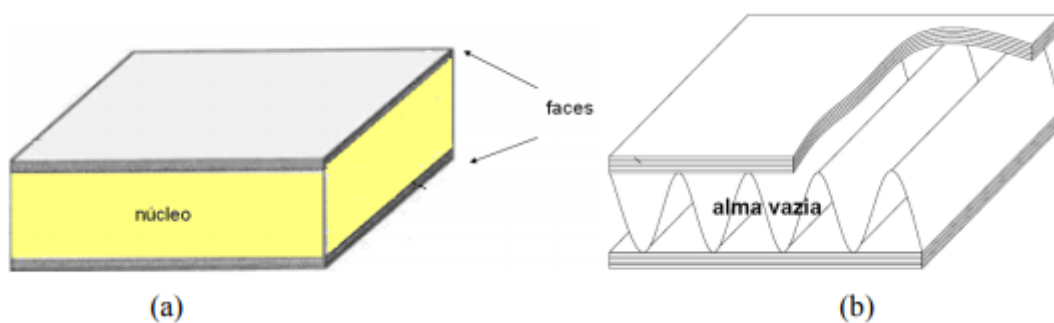


Figura 5 - (a) Estrutura sanduíche de alma plena e (b) de alma vazia do tipo ondulada (Adaptado de Faria, 2006).

O núcleo de um material compósito do tipo sanduíche é comumente chamado de alma ou recheio. Existem dois tipos de almas: cheias e vazadas (ou vazias). Os materiais mais utilizados para almas cheias são madeiras celulares, diversas espumas celulares, resinas carregadas de microesferas ocas de vidro denominadas espumas sintáticas, plásticos etc. Os principais materiais utilizados nas almas vazadas, essencialmente na forma de colmeia de abelhas (alvéolos hexagonais) e perfis são: ligas metálicas leves, papel Kraft (com ou sem resina), papel poliamida etc. (FARIA, 2006). É importante salientar que, como as estruturas de engenharia estão sujeitas a perturbações estáticas e/ou dinâmicas que causam vibrações e ruído, os materiais compósitos do tipo sanduíche contendo um núcleo viscoelástico constitui-se numa alternativa bastante viável para aumentar o amortecimento das estruturas laminadas do tipo sanduíche (DE LIMA *et al.*, 2009).

2.1.3 – Painéis Sanduíches

Compreende-se que painéis sanduíche são estruturas com uma combinação de elementos estruturais tipo placa fina ou espessa com adesão entre as faces, através de uma camada de ligação que garanta a transferência de forças entres eles, um adesivo, como mostra a Figura 6 (MATA *et al.*, 2014).

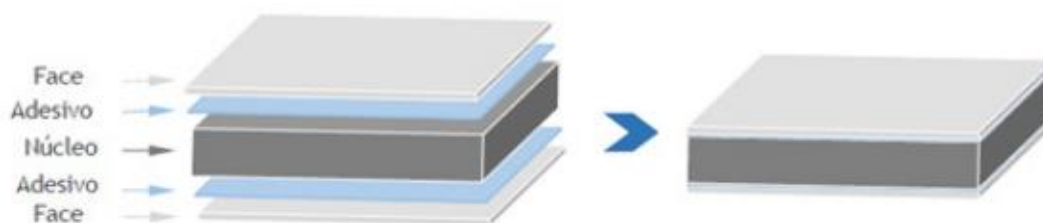


Figura 6 - Elementos constituintes de uma estrutura sanduíche (adaptado de Mata, 2014).

Desta combinação temos o resultado de uma estrutura com elevada rigidez específica, tornando esta solução muito popular em aplicações de alto desempenho. Do ponto de vista tecnológico estas estruturas também são vantajosas pelos aspectos térmicos e acústicos, dependendo da combinação de materiais utilizados (MOURA *et al.*, 2005).

Apesar de constituída por partes diferentes, este tipo de estrutura funciona essencialmente como um todo. O afastamento das faces leva a um aumento do momento de inércia da estrutura, o que provoca um aumento na rigidez da mesma. Assim, com o

um aumento praticamente insignificante no peso da estrutura, com a utilização de um núcleo entre as faces oferece um aumento na rigidez muito significativo (MOURA *et al.*, 2005).

Os painéis sanduíche são uma união de diferentes materiais, podendo estes serem compostos ou simples. Mas antes de qualquer análise, é importante salientar que o principal objetivo de uma estrutura sanduíche, do tipo chapa, é combinar o aumento de resistência com o aumento da sua espessura. Com o aumento da espessura da chapa para o dobro iria provocar um aumento do peso da estrutura para o dobro consecutivamente. No entanto, a adição de uma camada de baixo peso entre as faces da estrutura irá provocar o desejável aumento da rigidez geral da estrutura a um custo diminuindo o aumento de peso (MATA *et al.*, 2014).

Combinando diferentes tipos de materiais para as faces e o núcleo, podemos obter diferentes tipos de materiais com estruturas sanduíche para uma dada solicitação.

Neste tipo de disposição, notam-se três camadas de materiais, duas placas finas, sendo uma superior e outra inferior, popularmente conhecidas por face, podendo estas ser isotrópicas, ortotrópicas ou anisotrópicas, e por um núcleo, 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 (ELOY *et al.*, 2018).

O *honeycomb* consiste em uma sequência de células, formadas por lâminas de material de pequena espessura unidas umas às outras. As geometrias formadas são hexagonais, semelhantes às colmeias de abelha na qual encontramos na natureza. Os primeiros usos para esse tipo de estrutura foram em ornamentos de papel fabricados pelos chineses há cerca de 2000 anos (BITZER, 1997). Porém, como material estrutural, as cadeias celulares se apresentaram como núcleo de estruturas “sanduíche” apenas por volta de 1845, em aplicações como: construção de pontes de núcleo tubular, móveis, entre outros. Foi somente ao fim da Segunda Guerra Mundial que a tecnologia de adesivos permitiu a produção do *honeycomb* inteiramente de alumínio. Devido às características de alta absorção de impacto e baixo peso desse tipo de material, segundo Bitzer (1997), a grande maioria das aeronaves modernas voando atualmente possuem componentes *honeycomb* em suas bordas de asa, flaps, aerofólios, elevadores, assoalhos, painéis laterais, entre outros. Além da indústria aeronáutica, o *honeycomb* possui aplicações na área automobilística, como por exemplo, na Figura 7 no moderno BMW i3, carro elétrico

fabricado em compósito de fibra de carbono e *honeycomb* nas longarinas para a absorção de impacto. A estrutura *honeycomb* também está presente em carros de corrida, equipamentos esportivos e militares, cascos de navio, trens bala, veículos espaciais, na construção civil, entre outros.



Figura 7 - Longarina do BMW i3 com *honeycomb* Fonte: Markus (2013).

A tecnologia atual permite desenvolvimento de estruturas *honeycomb* para atender a diversas especificações. A seleção envolve propriedades mecânicas e resistências específicas como à umidade, temperatura e impacto. Para aplicações estruturais, em geral é utilizado o *honeycomb* metálico de alumínio ou o não-metálico Nomex® (fibra de aramida em resina fenólica curada a quente). Os processos de fabricação de *honeycomb* comerciais mais comuns são os de expansão e corrugação conforme Figura 7. O primeiro consiste no empilhamento de folhas de material que são aderidas em faixas lineares. Em seguida, o aglomerado é cortado em blocos e expandidos por tração, tomando assim o formato de cadeia hexagonal conhecido. Já no segundo método, o material passa por rolos corrugadores e as folhas conformadas são empilhadas e intercaladas com material adesivo que será curado em forno. Esse método é trabalhoso e, portanto, mais caro, contudo, permite a fabricação de estruturas com maior densidade de células. Em ambos os processos, os lados dos hexágonos que ligam uma lâmina a outra constituem paredes de espessura dupla (duas vezes a espessura da folha) ligadas por uma cola de resistência diferente do material. A manufatura dos *honeycomb* metálico e não-metálico se difere quanto à maneira que a geometria final é alcançada. Núcleos metálicos mantêm a forma expandida por deformação plástica nas regiões não aderidas. Os filmes

não metálicos, porém, necessitam ser mergulhados em resina (usualmente fenólica ou de poliamida), passando por sucessivos períodos de banho e cura em forno até que a massa específica final é obtida e a forma determinada (ASPRONE *et al.*, 2013).

As faces, conforme Group (2019), são painéis utilizados em vigas sanduíche com o objetivo de resistirem ao impacto e providenciar tensão e força de compressão. São de espessura fina, porém fortes e duras, anexadas ao núcleo que é leve e espesso. Nas vigas sanduíche sujeitas à flexão, são as faces que irão carregar as cargas de compressão e flexão no plano, e quando elas ficam mais longes, é acrescentada uma rigidez mais compatível à estrutura.

Segundo Group (2019) as faces atribuem as tensões de tração e compressão nas vigas, e os materiais mais comumente usados são: aço, aço inoxidável e alumínio, podendo ser utilizados também, plásticos reforçados com fibra ou vidro. Sendo esses últimos configurados para atender determinadas propriedades mecânicas, anisotrópicas, bom acabamento superficial, entre outras.

Segundo Karlsson e Astrom (1996), enquanto no núcleo os materiais mais utilizados podem ser madeira, *honeycomb* e espuma de polímero expandido, os materiais mais comumente usados nas faces são: metal laminado e polímeros com fibra adicionada.

Eloy *et al.* (2018), afirma que o material utilizado como face em vigas sanduíche, pode ser qualquer material estrutural desde que sua lâmina seja de pequena espessura. Nenhum ajuntamento de material é descartado para ser usado como face (KARLSSON & ASTROM, 1996).

O autor afirma que os materiais utilizados nas faces podem ser divididos em compósitos poliméricos com fibras e outros materiais. Sendo que os primeiros, em condições específicas, podem ser laminados diretamente no núcleo. Mas também existe a opção que pode ser aplicada em qualquer material: fabricar a face separadamente e depois aplicá-la ao núcleo. Para os polímeros com fibra adicionada, esta é reforçada com qualquer vidro, carbono e aramida. De acordo com a solicitação do desempenho, esse reforço da fibra é utilizado para que as faces tenham alto nível de desempenho e um diferencial de fabricação.

A espessura da face não altera a resistência da viga sanduíche. Jen e Chang (2009), analisaram três tipos de vigas sanduíches com *honeycomb* de alumínio com espessuras de faces diferentes, aplicando testes de fadiga por flexão e observando se a espessura da face alterava a resistência da viga. Eles concluíram que as faces mesmo em espessuras

diferentes não alteram a resistência da viga à fadiga. O que causou mais falha nas estruturas, foi o descolamento do adesivo que liga a interface da face com o núcleo.

Lenzi, Matias e Risson (2017), analisaram vigas de madeira laminada com face de fibras de vidro e compararam se a utilização dessa face acarretava um aumento na rigidez das vigas de madeira. Os autores chegaram ao resultado que a utilização das faces de fibra de vidro foi capaz de aumentar a resistência da viga à flexão simples se comparada às vigas que não tinham sido aplicados nenhum tipo de face. Concluíram que as faces de fibra de vidro podem ser utilizadas como uma contribuição estrutural para vigas de madeira.

Cheloni (2018), analisou compósitos sanduíche com face laminadas de 3 e 5 camadas de tecido de fibra de vidro e com núcleo de resina epóxi, quanto o seu desempenho estático e em fadiga de flexão. O autor analisou a resina epóxi isoladamente e depois em forma de sanduíche com a fibra de vidro. Chegando ao resultado que 5 camadas de fibra podem alterar a vida do compósito sanduíche para maiores ciclos com deslocamentos menores, porém sem diferença para deslocamentos maiores.

2.2 – Materiais Inteligentes

2.2.1 – Definições e conceitos

Materiais inteligentes são materiais que se comportam com respostas reversíveis diante vários tipos de estímulos, sendo assim, muito úteis para diversas aplicações.

Incluso na classe dos chamados materiais inteligentes, deparamos com os piezelétricos, eletro-resistivos, magneto-resistivos, eletro reológicos, magneto reológicos, termo-sensíveis e ligas com memória de forma. As respostas destes materiais frente aos estímulos a eles aplicados como imposição de temperatura, campos de tensão, diferença de potencial ou de um campo eletromagnético, são de interesse nas áreas da mecânica, elétrica, magnética e térmica (FUKUSHIMA, 2016).

Materiais inteligentes tais como os piezelétricos, eletro reológicos, magneto-reológicos, 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. (ELOY *et al.*, 2018).

Materiais piezelétricos são cada vez mais estudados por se tornarem materiais incomuns com propriedades muito específicas e interessantes. Esses materiais têm a

habilidade 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).

Os materiais ou ligas com memória de forma são materiais que tem capacidade de voltar a sua forma original antes de uma determinada deformação, ou seja, se os tais materiais forem submetidos a cargas que o fazem deformarem plasticamente sobre uma determinada temperatura, eles irão se recuperar completamente a sua forma inicial ao serem submetidas a uma temperatura mais elevada. Quando recupera a sua forma, esses materiais podem produzir um deslocamento ou uma força como uma função da temperatura. Devido a este efeito singular de retornar ao estado original após uma grande deformação inelástica (aproximadamente 8%) é conhecido então como Efeito de Memória de Forma (WAYMAN *et al.*, 1990). Um exemplo para uma liga com memória de forma é exemplificado na Figura 8, onde um arame confeccionado de uma liga com memória de forma é submetido a uma carga constante a partir de uma massa acoplada com peso m , na qual gere um alongamento no arame de dL . Quando o circuito se fecha e a corrente I alimenta o sistema, a liga de memória de forma se aquece. À medida que a liga alcança a temperatura T de início de formação da austenita (A_s), a estrutura cristalina do material causa à contração do fio. Quando chega ao fim da formação austenita (A_f) a transformação na microestrutura da liga é completa, neste ponto o fio contrai o seu comprimento de um valor dL . Quando o circuito é aberto novamente, o fio lentamente resfria-se, assim a temperatura do fio atinge a temperatura de início de formação de martensita (M_s), o mesmo começa a alongar-se lentamente devido à massa por ele suspensa. Quando a temperatura chega ao fim da formação de martensita (M_f), a transformação é completa e o fio retorna ao seu comprimento original L_0 (KOOMEN, 2015).

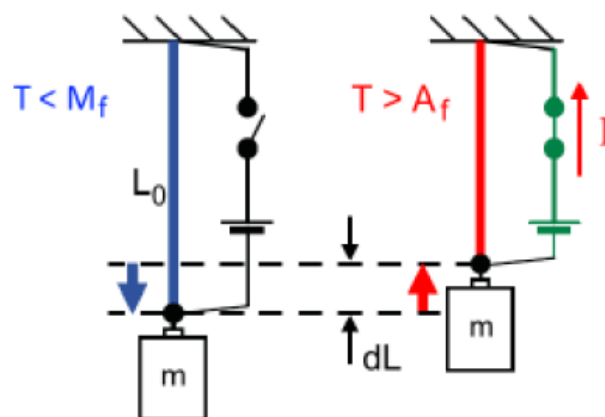


Figura 8 - Atuador com liga de memória de forma submetido a um carregamento constante. Fonte Koomen (2015).

Materiais que são conhecidos como fluidos controláveis são definidos como fluídos 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 esses três podem ser classificados como sendo 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 habilidade 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 suspensas 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 habilidade de transição do estado líquido para um estado viscoelástico ou sólido dentro de milissegundos, em resposta a um campo magnético aplicado, ao invés de um campo elétrico (MOLES, 2015).

2.2.2 – Fluido Magneto Reológico

Como foi visto no tópico anterior, os fluidos magneto reológicos tem a habilidade de transição do seu estado líquido para um estado viscoelástico ou sólido em resposta a um campo magnético aplicado.

Desenvolvido em 1951 por Jacob Rabinow, os fluidos magneto reológicos têm sido empregados em dispositivos para controle semiativo e têm as propriedades que podem ser controladas para reduzir de forma otimizada as respostas de sistemas em grande escala, tais como pontes e construções (CHOI, 2009).

Os fluidos magneto reológicos podem ser usados onde as vibrações controladas e a dissipação de energia de impactos são requeridas. Estes fluidos estão sendo desenvolvidos para serem usados em suspensões automotivas (CARLSON & JOLLY, 2000), fundações de construções e pontes (CHOI, 2009).

Genç e Phulé (2002), afirmam que diferentes tipos de cerâmica, metal e ligas de base, podem ser utilizados para preparar fluidos magneto reológicos, desde que suas partículas sejam de multidomínio magnético e apresentem pouca coercividade magnética. Porque assim que o campo for retirado, o fluido é capaz de voltar ao seu estado desmagnetizado em milissegundos (ASLAM *et al.*, 2006). Ao se aplicar um campo magnético, as partículas do fluido ficam magnetizadas e comportam-se como pequenos ímãs. A energia dessa interação é minimizada quando elas são ordenadas ao longo do campo magnético e para quebrar a estrutura formada é necessária uma tensão de cisalhamento ou uma diferença de pressão (GENÇ & PHULÉ, 2002).

Os fluidos magnetos reológicos podem ser divididos em duas classes, e fazemos essa divisão dependendo do diâmetro de suas partículas, ferrofluidos, são os que contém as partículas da ordem de nanômetros, fluidos magneto reológico, são os que contém as partículas da ordem de micrometros (MOLES, 2015).

2.2.3 – Propriedades dos Magnetos Reológicos

Os magnetos reológicos modificam seu desempenho reológico ao serem submetidos a um campo magnético. Sua reação às partículas ferromagnéticas é momentânea e fácil, gerando estruturas colunares e coincidentes às linhas de concentração magnética. Estas são capazes de limitar a mobilidade do fluido magneto reológico e, onde houver concentração magnética, haverá dificuldades para o fluido

percorrer. A energia utilizada para atravessar essas estruturas aumentará conforme a magnitude do campo magnético (CRIVELLARO, 2008).

O aumento da tensão de escoamento que ocorre conforme o aumento do campo não é uniforme, uma vez que as partículas do fluido são ferromagnéticas, e a sua magnetização não ocorre linearmente (GINDER & DAVIS, 1994).

Essa modificação de desempenho é caracterizada pela sua mudança de estado, de viscoso para semissólido quando exposto à um campo magnético (TUSSET, 2008). Conforme Genç (2002), a viscosidade dos magnetos reológicos muda em uma escala de $10^5 - 10^6$ vezes em um pequeno intervalo de tempo ao serem submetidos ao campo magnético. Sendo essa mudança de estado completamente alterada quando há a remoção do campo magnético. As partículas unidas pelo campo são capazes de resistir a uma certa tensão de cisalhamento sem se romper, caracterizando o material como sólido. Ao ultrapassar o valor crítico de tensão, a estrutura se quebra e volta ao seu estado viscoso. O tempo de resposta dos fluidos magneto reológicos é de 10 a 20 ms dependendo do design do circuito magnético do dispositivo. O fluido representa uma das interfaces eletromecânicas mais rápidas para utilizações mecânicas (GENÇ & PHULÉ, 2002).

Fatores que influenciam nas características reológicas, estabilidade e redispersibilidade do fluido magneto reológico são, além das partículas magnéticas, os aditivos anticorrosivos, os surfactantes e os fluidos base (GENÇ, 2002).

Conforme Jolly, Bender e Carlson (1999), os fluidos magneto reológicos podem ser observados conforme suas propriedades magnéticas, reológicas, mecânicas e de adequação.

As propriedades reológicas desses fluidos dependem: da concentração e da densidade das partículas, tamanho das partículas e sua forma de distribuição, capacidade de carregar o fluido, aditivos acrescentados, campo aplicado, temperatura, entre outros. Já as propriedades magnéticas podem ser importantes para fornecer informações sobre a formação de estruturas de partículas do fluido. Existem muitos dispositivos baseados em fluidos magneto reológicos, no qual o fluido apresenta maior relutância magnética ao ser inserido em um circuito magnético (JOLLY *et al.*, 1999).

A capacidade desse fluido de obter uma ampla faixa de viscosidade, atua de forma eficiente no controle de vibrações (BOSSIS *et al.*, 2002) e transferência de torque (GENÇ & PHULÉ, 2002). Aslam, Xiong-Liang e Zhong-Chao (2006), afirmam que, quanto a estabilidade, os fluidos magneto reológicos, no qual a sua viscosidade se

assemelha à pasta, podem ser mais convenientes para o controle de vibrações sísmicas durante um período maior do que aqueles que apresentam uma menor viscosidade.

Os magnetos reológicos com alta concentração/o de ferrofluidos podem ser controlados pela adição de micropartículas de ferro, para serem utilizados conforme a aplicação necessária como vedações rotativas e vibrações (MARINICÁ *et al.*, 2016).

Bornassi e Navazi (2018), concluíram que ao se alterar a quantidade de concentração magnética pode-se controlar as frequências naturais e os fatores de perda de um sistema. Os fatores de perda se elevam ao aumentar a concentração magnética e depois decrescem ao atingir seu valor máximo, com isso pode-se obter um valor ótimo de campo magnético ao se ter o fator de perda máximo para uma viga sanduíche. Os autores afirmam também que a espessura da camada do material magneto reológico influencia mais no fator de perda do que na frequência natural e quanto menor as camadas elásticas e da largura da viga sanduíche, há aumento nas frequências naturais e minimização dos fatores de perda.

2.3 – Gel Magneto Reológico

2.3.1 – Elastômero Kraton G1650

O polímero Kraton G apareceu pela primeira vez em 1989, patenteado por Dale L. Handlin Jr., e é caracterizado como um gel de formação rápida, alterável termicamente, que pode ser utilizado para preencher cabos a temperaturas específicas. São copolímeros feitos para resistirem a raios ultravioletas, elevadas temperaturas e estabilidade de processamento (KRATON, 2019).

A estrutura desse copolímero é composta quimicamente por um termoplástico rígido (poliestireno) e dois elastômeros, sendo os mais comuns destes: poli (butadieno) e poli (etileno/butileno), o primeiro é encontrado na primeira geração da série Kraton D que é o S-B-S, já o segundo é da segunda geração da série Kraton G, os S-EB-S (KRATON POLYMERS, 2019).

O nome “Kraton G” é o nome comercial dos copolímeros em bloco de estireno de segunda geração com um bloco intermediário hidrogenado de estireno-etileno/butileno-estireno (SEBS) ou estireno-etileno/propileno-estireno (SEPS). Ele é utilizado na fabricação de compostos macios e resistentes (KRATON, 2019).

Os polímeros Kraton do tipo G resistem melhor à deterioração causada por: oxigênio, ozônio e luz UV, são mais coesos e mantêm sua estrutura intacta a

temperaturas mais elevadas que os do tipo D. Os polímeros Kraton G da série G1600, tem a arquitetura composta por triblocos puros ou têm porcentagem alta de triblocos, apresentados na forma de pó. (KRATON POLYMERS, 2019).

O Kraton G tem a vantagem de resistir mais à oxidação, às intempéries e a solventes, temperatura de serviço mais elevada e mais equilíbrio de processamento. Também, são mais estáveis às oxidações em altas temperaturas e taxas de cisalhamento. (KRATON POLYMERS, 2019).

Koo (2012), comparou dois tipos de elastômeros: os elastômeros dielétricos termoplásticos, que são os copolímeros em bloco SEBS, e os elastômeros dielétricos homopolímeros convencionais, que são os acrílicos e silicones.

O autor conclui que ambos os elastômeros se diferem devido ao aspecto da nanoestrutura pois os copolímeros (SEBS) tem sua nanoestrutura bem mais precisa por conta da sua estrutura molecular se comparado aos homopolímeros, se distinguem também por sua lembrança de forma pois, devido à sua nanoestrutura, os elastômeros dielétricos termoplásticos têm o efeito de lembrança de forma impulsionada por ligação cruzada física, enquanto dos homopolímeros o efeito é por ligação cruzada a produtos químicos. Se diferem ainda, principalmente, pela sua atuação elétrica, no qual os SEBS têm coeficientes eletrostritivos (capacidade de mudar de forma com a aplicação de um campo elétrico) mais significativos que os elastômeros convencionais.

2.3.2 – Argila Bentone SD-3

Argila bentone SD-3 é um aditivo reológico derivado orgânico de uma argila hectorita. É altamente eficiente e projetada para o uso em sistemas de revestimento com uma ampla gama de polaridades de solventes. O desenvolvimento reológico completo e a granulometria da moagem podem ser obtidos de pigmentos durante a produção. Na moagem, as forças de cisalhamento normalmente necessárias para dispersar completamente os pigmentos são suficientes para a completa dispersão e gelificação do aditivo reológico bentone SD-3.

O nível de aditivo a ser usado em um sistema específico depende do grau de espessamento reológico e suspensão de pigmentos desejados. Os níveis usados são normalmente de 0,2 a 1,0% em peso de toda a fórmula. A alta eficiência do aditivo geralmente permite uma redução do nível de uso em comparação com as porções orgânicas convencionais.

O desempenho ideal obtido pela argila bentone SD-3 em sistemas que contêm solventes aromáticos ou misturas de solventes aromáticos/alifáticos são: sistemas de cura ácida, tintas acrílicas, adesivos, tintas de manutenção, tintas marinhas e pinturas a óleo (ELEMENTIS).

2.4 – Partícula Ferromagnética

Sendo o mais importante dos comportamentos magnéticos, o ferromagnetismo está presente nos materiais como ferro, cobalto e níquel. É uma ocorrência do nível quântica, sendo perceptível somente quando há a possibilidade dos momentos magnéticos de um material se comunicarem e se ajustarem paralelamente. Por exemplo, um pedaço de ferro aparenta não possuir nenhum tipo de magnetização, porém, ao ser aplicado um campo magnético externo a ele, sua propriedade magnética aparece (WEIZENMANN, 2010).

2.4.1 – Partícula Ferromagnética Ferro Carbonilo

Partícula ferromagnética ferro carbonilo (CIP) é uma forma altamente pura de pó de ferro com pureza de 99,5%. É fabricado usando o processo de termólise controlada e é por isso que é altamente puro com propriedades eletromagnéticas elevadas. No processo de purificação, impurezas como carbono, oxigênio e nitrogênio são reduzidos. A sua partícula possui forma regular com tamanho inferior a 5 microns. O CIP é uma matéria-prima essencial para moldagem por injeção de metal (MIM), pois a granulometria única do CIP facilita a composição em altas cargas. Proporciona alta densidade, excelente resistência e uma excelente qualidade de textura da superfície sinterizada. O formato irregular da partícula esférica do CIP gera uma alta capacidade de fluxo e facilita a alta precisão de tamanho na parte final (BASF).

Existe muitas aplicações em que o pó fino de ferro está sendo utilizado, no campo da engenharia, alimentos e produtos farmacêuticos. Também é utilizado na fabricação de ferramentas diamantadas, absorção de radar, tintas metálicas e componentes elétricos.

A Industrial Metal Powders (2019) afirma que a produção em graus finos de CIP, exibe excelente comportamento magnético. Esses pós finos de ferro suprimem as correntes parasitas e mantém o comportamento magnético estável. Isso leva a uma forte interação dos pós de ferro com o vetor do campo magnético das ondas eletromagnéticas, o que os torna um excelente absorvedor de frequências eletromagnéticas.

2.4.2 – Partícula Ferromagnética Atomet 1001

A partícula ferromagnética Atomet 1001 é o aço em pó, podendo sofrer compressão, atomizado em água, o qual foi feito para ser utilizado exclusivamente na metalurgia. Apresenta uma alta capacidade de compactação, maior dureza e tração. Conforme o fabricante, a fabricação do pó é realizada com níveis e resíduos baixíssimos, além de ser o pó com os atributos mecânicos e dinâmicos melhores entre as peças forjadas em pó (RIO TINTO, 2019).

Eloy *et al.* (2018), comparou vigas sanduíche preenchidas com dois elastômeros magneto reológicos, sendo um preenchido com 30% de partícula ferromagnética do tipo Atomet 1001, e outro com a mesma partícula, porém, numa saturação de 60%. Ele observou que ao se colocar as partículas ferromagnéticas numa matriz de silicone, esta melhora a sua resistência ao cisalhamento por conta do acréscimo de sua massa específica. Porém, não houve alteração na rigidez de ambos os elastômeros ao se aplicar um campo magnético, isso ocorreu devido a rigidez elevada do próprio silicone no qual as partículas ferromagnéticas estavam inseridas, e ao se aplicar um campo magnético, as partículas não conseguiam se mover em sua direção.

2.5 – Vibrações Mecânicas

2.5.1 – Definição e Conceito em Materiais Compósitos

Vibração se define como um movimento qualquer que é contínuo. Como por exemplo: um avião quando está em turbulência, edifícios muito altos que se movimentam pela força do vento ou de um terremoto, o movimento da corda de um violão (Rao, 2007).

Thomsom (1993), afirma que ao se analisar a vibração de um corpo, esta é associada aos movimentos oscilatórios e às forças referentes ao corpo. Se um corpo possui massa e elasticidade, ele pode vibrar. Assim, a grande parte das estruturas apresentam vibração e isso deve ser considerado ao projetá-las.

A vibração intercala energia potencial com energia cinética e, para isso, o sistema deve ser capaz de armazenar tanto uma quanto a outra. Ao transmitir algum desses dois tipos de energia para um elemento de massa do sistema vibratório através do movimento, pelo deslocamento ou velocidade inicial, ocorre vibração livre. Nessa, haverá troca de energia potencial e cinética, sendo que, se tratar de um sistema conservador, a

soma das energias será constante em qualquer momento. Teoricamente, esse sistema vibraria para sempre, porém, na realidade, sempre haverá algum amortecimento ou atrito do meio, o qual ocorrerá perda de energia durante o movimento, até que o sistema pare completamente. O movimento transitório no sistema ocorre quando é dada apenas uma excitação inicial (ou excitação transitória) no qual a oscilação dissipa em todos os sistemas práticos (RAO, 2007).

A vibração pode ser tanto a causa de falhas de um sistema e apresentar riscos às pessoas, como ser utilizada para melhorar a eficiência e a qualidade de processos. A vibração é a principal causa de falhas de grande parte dos elementos e sistemas mecânicos e estruturais. Por isso, a necessidade de se entender o comportamento vibratório desses sistemas, para a elaboração de um projeto seguro. Entre outros exemplos de falhas causadas por vibrações estão: falhas estruturais em aeronaves, falhas da lâmina e do disco em turbinas a vapor e a gás, desgaste de peças como engrenagens e rolamentos causado por vibrações nas máquinas, falhas em pontes, edifícios e represas causadas por movimentos oscilatórios do solo em terremotos. Como uma aplicação útil, as vibrações podem ser utilizadas em: bate-estacas, máquinas de lavar roupa, brocas dentárias, compactadores, peneiras, teste vibratório de materiais, entre outros.

Um sistema oscilatório é um sistema dinâmico, o qual depende: das excitações aplicadas e de suas características (massa, rigidez, amortecimento). Esse sistema é analisado conforme sua resposta à excitação, através de modelagem matemática, derivação das equações de movimento, solução dessas equações e interpretação dos resultados da resposta. Sendo essa resposta dependente do tempo (RAO, 2007).

Caracterizar os níveis de deslocamento causados por vibrações é uma questão não resolvida porque depende do conhecimento da rigidez, amortecimento e influência de um sobre o outro, principalmente para materiais inteligentes. A consequência dessa questão são problemas industriais, principalmente nas indústrias espacial e aeroespacial (AGUIB *et al.*, 2016).

Segundo Thomsom (1993), todos sistemas que possuem movimentos oscilatórios podem ser amortecidos. Se esse amortecimento é pequeno, não influencia nas frequências naturais do sistema, e assim não é considerado no cálculo das frequências naturais. Porém, o amortecimento é importante para restringir a amplitude de oscilação.

Os graus de liberdade do sistema representam a quantidade de coordenadas que é preciso ter para realizar um movimento. Uma partícula que possui três graus de liberdade, sob um movimento geral no espaço, é uma partícula livre. Já um corpo rígido

que possui três componentes posicionais e três ângulos que definem sua orientação, tem seis graus de liberdade. Assim, um corpo elástico terá graus de liberdade infinitos, pois precisará de infinitos números de coordenadas. Porém, para se ter uma diminuição nos problemas de vibração dos corpos elásticos, deve-se considerar partes de seus corpos como rígidas, para que então seus graus de liberdade sejam finitos (THOMSOM, 1993).

Yeh (2013), fez uma análise característica da vibração de placas sanduíches retangulares amortecidas com elastômero magneto reológico e chegou aos seguintes resultados: um campo magnético é capaz de mudar a rigidez da placa sanduíche, sendo as frequências naturais e os fatores de perda modal controláveis ao serem submetidas a diferentes quantidades de campos magnéticos; quanto maior a camada de núcleo do magneto reológico, haverá mudanças na rigidez do sistema, então as frequências naturais e os fatores de perda modal também podem ser controlados pela espessura do núcleo; a aplicação de diferentes campos magnéticos podem alterar as características viscoelásticas dos magneto reológicos, causando efeitos no comportamento de vibração nas placas.

Aguib *et al.* (2016), analisaram experimental e numericamente a resposta vibratória de uma viga sanduíche de elastômero magneto reológico com e sem a influência de diversas correntes, sob uma excitação harmônica de um campo magnético. Os testes foram realizados numa viga que continha uma taxa de 30% do magneto reológico através das micropartículas de ferro com um controle inteligente para amortecer as vibrações. As características que determinaram as propriedades de amortecimento e previsão de resposta à vibração da viga com o elastômero magneto reológico foram: a dependência de frequência e o campo magnético de seu comportamento viscoelástico.

Os autores chegaram às seguintes conclusões: ao ocorrer vibrações, mesmo em grandes amplitudes, a viga se estabilizava rapidamente sob a influência de campo magnético, a rigidez é aumentada sem perder suas características de amortecimento do elastômero ao se acrescentar uma camada deste carregado com partículas de ferro em um campo magnético, a rigidez do elastômero é aumentada devida a influência das cargas de ferro, ao se criar uma força de atração entre as partículas.

2.5.2 – Ensaio de Vibração Mecânica

O Laboratório de Integração e Testes (LIT) (2019), afirma que ensaios de vibração servem para uma análise da qualidade mecânica de produtos e equipamentos, avaliando sua resistência, durabilidade e resposta dinâmica às solicitações.

As vibrações podem ser classificadas conforme duas classes: vibrações livres e vibrações forçadas. A vibração livre ocorre quando o sistema vibra sob ação de forças que são ligadas a ele próprio e não há existência de forças externas, vibrando em suas frequências naturais. Já a vibração forçada é quando ocorre excitação de forças externas, se essa excitação for instável, o sistema vibrará na frequência da excitação. Porém, se essa excitação coincidir com alguma frequência natural do sistema, uma ressonância é executada acarretando grandes oscilações (THOMSOM, 1993).

Para o autor, em um sistema que possui vibração livre há o desejo de se conhecer sua frequência natural de vibração. Esse sistema é caracterizado como conservador, no qual o amortecimento não tem quase nenhuma influência na sua frequência natural, porém, o efeito do amortecimento é percebido por diminuir a amplitude da vibração com o tempo. Quando um sistema é submetido a uma vibração forçada, ele deve vibrar na mesma frequência que a da excitação, neste caso a ressonância precisa ser impedida e deve-se usar amortecedores para evitar grandes amplitudes.

Eloy *et al.* (2018), realizou dois ensaios de vibração em vigas sanduíche preenchidas com elastômero magneto reológico: ensaio de vibração livre e ensaio de vibração forçada. O ensaio de vibração livre foi realizado para vários valores diferentes de concentração magnética com o objetivo de adquirir as frequências naturais e os fatores de amortecimento das vigas. Para a realização desse ensaio, foi-se restringido os movimentos da viga, através de engaste, em um dos seus limites e assim sua rigidez de apoio foi aumentada, pondo-a em vibração ao se executar um impulso perpendicular à fixação da viga, coincidente à sua linha neutra. O ensaio de vibração forçada, foi realizado com objetivo de medir a influência da concentração magnética sobre a amplitude vibração das vigas, ainda mais em uma circunstância de ressonância.

O autor concluiu que no ensaio de vibração livre, as características dinâmicas das vigas foram mais influenciadas pela concentração magnética quando esta se localizava nas suas extremidades livres e que para impedir a ressonância e suas consequências não desejáveis, não há obrigação de mudar a massa, rigidez ou geometria das vigas, mas apenas modificar a quantidade de campo magnético aplicado.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E METODOLOGIA

A parte experimental do trabalho consta de duas etapas: A primeira diz respeito à confecção dos modelos de viga sanduíche com faces em material compósito e núcleo *honeycomb* preenchido com gel magneto-reológico e a segunda etapa refere-se à determinação experimental dos parâmetros modais dessas vigas. A seguir, ambas as etapas são descritas, incluindo os processos utilizados, os materiais e os equipamentos envolvidos. Todos os dados técnicos dos equipamentos utilizados estão contidos no Apêndice B dessa dissertação.

3.1 - Materiais

Nesta seção são apresentados os materiais utilizados na obtenção para confecção das vigas sanduíche e suas propriedades.

Para a fabricação do núcleo das colmeias, foi utilizado o material ABS (acrilonitrila butadieno estireno). Segundo o fabricante as propriedades do ABS são 2,05 GPa, coeficiente de Poisson 0,38 e massa específica 1,2 g/cm³.

Na confecção dos GMR foram utilizados diferentes materiais para a sua produção, géis com propriedades diferentes para o preenchimento das células das colmeias.

Os géis selecionados apresentam uma boa maleabilidade para serem aplicados nos honeycomb, o primeiro gel denominado de G1, foi produzido com o copolímero tribloco poliestireno-b-poliétileno polipropileno-b-poliestireno, comercialmente conhecido como Shell Kraton G-1650 e óleo mineral (PAO), o segundo gel denominado G2 foi produzida utilizando a argila organomodificada SD3 e óleo mineral (PAO). Foram utilizados dois tipos de partículas de pó ferromagnético, a primeira partícula foi ferro carbonilo (CIP) do tipo HS com diâmetro das partículas de aproximadamente 2µm, cujo fornecedor é a BASF SE©, a segunda partícula denominada Atomet, cujo fornecedor foi a Quebec Metal Powders®, possui diâmetro de aproximadamente 50µm, resistência a tração de 245MPa e é composto de grafite e o pó ATOMET 1001, sinterizado a 1120°C por 30 minutos, conforme informações do fabricante, ele é constituído de carbono, oxigênio, enxofre, manganês e ferro.

Neste trabalho as faces foram fabricadas a partir de material compósito, sendo o reforço o tecido bidirecional de fibra de vidro, e a matriz a resina epóxi da fabricante

Barracuda Advanced Composites, em sistema resina/endurecedor (Barracuda AMPREG 21/Barracuda A21 FAST).

O tecido de fibra de vidro apresenta fibras orientadas a 0° e a 90°. As fibras possuem direções chamadas de urdume e trama, sendo que, as fibras orientadas a 0° é o urdume e 90° é a trama. O reforço utilizado no tecido do compósito é produzido pela empresa Texiglass, produzida com o fio 34/4, isto é, quatro fios entrelaçados com titulação de 34 g/k, cada. A Tabela 1 apresenta as propriedades deste tecido de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante, citado por Bortoluzzi (2017).

Tabela 1 - Propriedades do tecido de fibra de vidro.

Propriedade	Valor	Unidade
Massa específica do filamento	2,54	g/cm ³
Carga de ruptura teórica	6,80	kgf
Alongamento	2,80	mm
Tex	136	g/km
Linhas / Fio	4	-
Filamentos / linha	250	-
Nº de Filamentos	1000	-
Diâmetro do fio	0,25	mm

A utilização da resina foi escolhida devido as suas excelentes propriedades mecânicas após sua cura, tanto em temperatura ambiente, quanto em altas temperaturas (*Datasheet Huntsman*), além de ser apropriada para processos de laminação manual e infusão a vácuo.

A Tabela 2 fornece os dados fornecidos pelo fabricante e as respectivas propriedades da resina Araldite® LY 5052 (parte A) com o endurecedor Aradur® 5052 (parte B), da empresa Huntsman. de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante, retiradas de Bortoluzzi (2017).

Tabela 2 - Propriedades da resina epóxi utilizada.

Propriedade	Valor	Unidade
Tempo de gel à 25°C	450 – 500	Mín.
Viscosidade à 25°C	600 – 700	cP [mPa s]
Transição vítrea (Tg)	114 – 122	°C

Resistência a 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

Na presente dissertação a parte experimental foi constituída de duas etapas conforme apresenta o fluxograma da Figura 9.

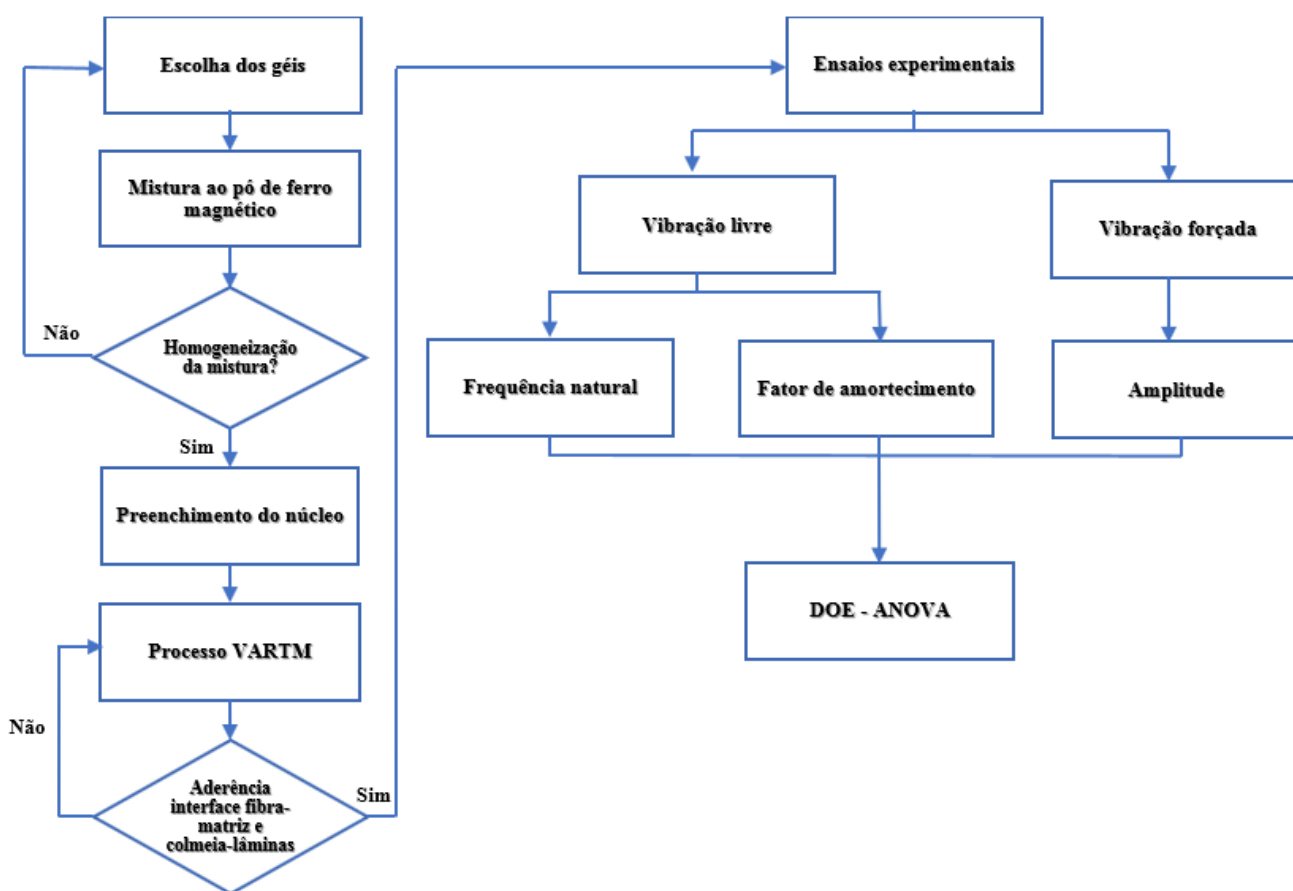


Figura 9 - Fluxograma das etapas de trabalho.

A etapa 1 foi realizada com a confecção dos modelos de viga sanduiche com faces de material compósito e núcleo das colmeias preenchido pelos géis magneto reológico e a etapa 2 foi constituída à determinação experimental dos parâmetros modais dessas vigas e análise estatística.

Assim que foi escolhido os géis para estudo, foram feitas as misturas de dois diferentes pós ferro magnético em dois respectivos géis, sendo um gel com 40% de partículas ferro magnéticas HS em polímero Kraton e Argila, e 40% de partículas ferro magnéticas Atomet em polímero Kraton e Argila. Estando as misturas adequadas, partiu-se para o preenchimento das cavidades dos oito núcleos colmeias, sendo quatro colmeias na forma quadrada e quatro colmeias na forma hexagonal, ressaltando que o preenchimento foi feito 3 dias após a confecção dos géis, e nesses três dias foram monitoradas os pesos das amostras para ver se houve variação da sua massa. Assim que as cavidades foram preenchidas partimos para a fabricação da viga sanduíche, utilizando o processo de infusão de resina a vácuo – VARTM. Para tal procedimento foi utilizada resina epóxi reforçada por tecido bidirecional de fibra de vidro nas lâminas, sendo que a própria resina epóxi das lâminas serviu como adesivo entre os núcleos colmeia e o tecido. Assim que o processo de infusão de resina a vácuo foi finalizado, aguardou-se o tempo necessário de cura da resina epóxi para que a bolsa de vácuo fosse desmoldada. Sendo feito apenas uma infusão, foi obtida uma placa com as oito vigas sanduíche, sendo necessário, o corte da placa para a retirada dos modelos de viga desenvolvidos. De modo visual, foi analisada a distribuição de resina sobre as fibras, bem como a adesão entre as lâminas e o núcleo.

Assim que todos os corpos de prova a serem estudados nessa dissertação foram retirados, partiu-se para a análise experimental de vibrações, na qual constou com ensaio de vibração livre e vibração forçada, além de determinada às propriedades reológicas das amostras da mistura dos géis com o pó ferromagnético.

Todas as etapas estão detalhadamente descritas, incluindo os processos utilizados, os materiais e os equipamentos que foram empregados. Dados técnicos dos equipamentos envolvidos estão contidos no Apêndice B desta dissertação.

3.2.1 – Confecção dos Modelos de Viga Sanduíche

A confecção dos modelos de viga que foram ensaiadas foram realizadas no Núcleo de Tecnologia em Compósitos – NTC da UNIFEI.

As colmeias primeiramente foram desenhadas em um software de desenho para que tanto a colmeia de núcleo quadrada quanto a de núcleo hexagonal possuíssem massa e volume bem próximos, conforme Tabela 3 mostra os valores estipulados pelo software de desenho.

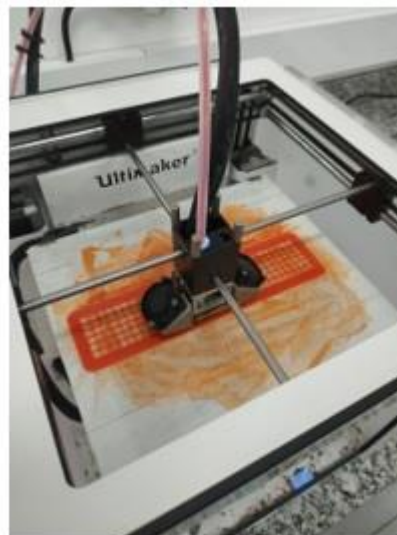
Tabela 3 - Valor de massa e volume dos núcleos *honeycomb* de acordo com software de desenho.

	<i>Honeycomb</i> Quadrada	<i>Honeycomb</i> Hexagonal
Massa (g)	2,73	2,73
Volume (mm ³)	2674,64	2677,48

Em seguida com as colmeias foram confeccionadas em uma impressora 3D *Ultimaker*®, conforme Figura 10, pertencente ao Núcleo de Tecnologia em Compósitos – NTC da Universidade Federal de Itajubá. E pela utilização desse material é devido ao fato de ser um processo relativamente novo e muito promissor, além do fato de que o material utilizado para impressão é amplamente usado em impressões 3D, o que favorece a continuidade de seu emprego. A impressão 3D consiste em um processo no qual se obtém o modelo desejado, por meio da deposição sucessiva de camadas de material. Para a utilização é necessário o desenho tridimensional do objeto que deseja confeccionar. Se for comparada com outras técnicas de fabricação de peças em três dimensões, a impressora 3D é vista como uma técnica mais simples de ser utilizada. Na Figura 11 os núcleos impressos na impressora 3D *Ultimaker*®, os dois núcleos foram fabricados a partir do ABS, o da esquerda com núcleo quadrado, e o da direita com núcleo hexagonal.



a)



b)

Figura 10 - a) Máquina *Ultimaker*® utilizada b) Máquina em operação.

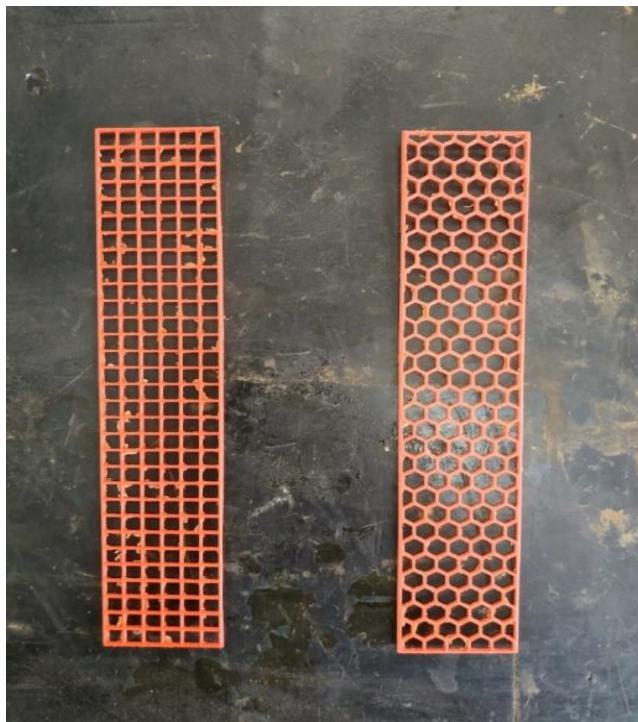


Figura 11 - Diferentes núcleos colmeia impressos em impressora 3D.

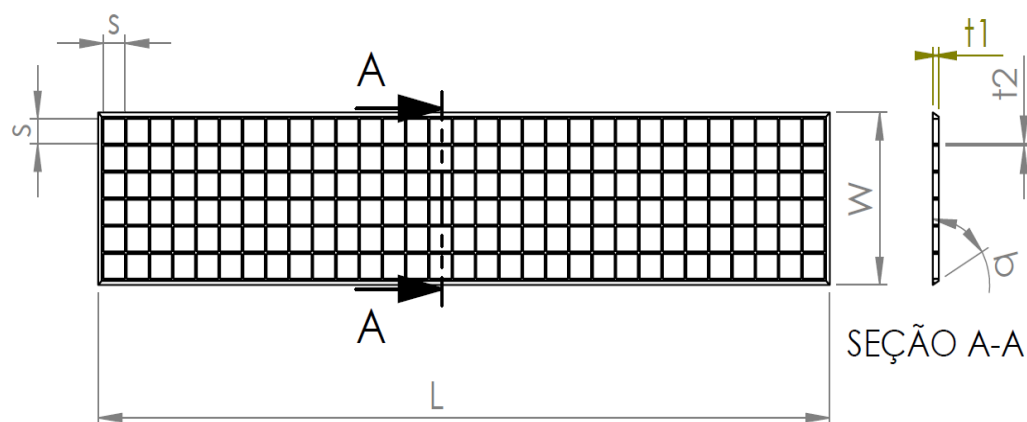
Foram fabricados 8 núcleos, sendo 4 com geometria quadrada e 4 com geometria hexagonal. Todas as vigas foram pesadas após a sua confecção, a Tabela 4 mostra a massa das vigas, juntamente com sua média, variância e desvio padrão, e elas foram classificadas da seguinte forma CP1, CP3, CP5 e CP7 para as de geometria quadrada, e CP2, CP4, CP6 e CP8 as de geometria hexagonal.

Tabela 4 - Massa dos núcleos impressos.

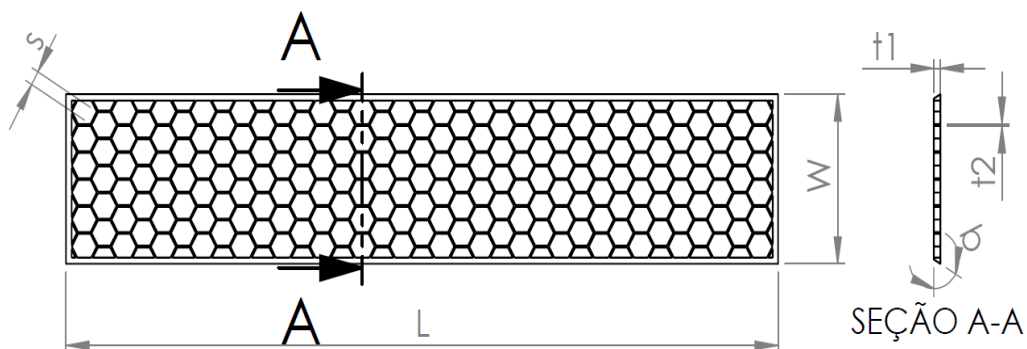
Corpo de prova	Geometria	Massa (g)	Média	Variância	Desvio Padrão
CP1	Quadrada	2,92	2,85	0,01	0,09
CP2	Hexagonal	2,91			
CP3	Quadrada	2,90			
CP4	Hexagonal	2,87			
CP5	Quadrada	2,91			
CP6	Hexagonal	2,84			
CP7	Quadrada	2,70			
CP8	Hexagonal	2,73			

Para os núcleos dos corpos de prova CP1, CP3, CP5 e CP7 foram preenchidos com um tipo de gel e um tipo partícula ferro magnético, e conseqüentemente os núcleos das amostras CP2, CP4, CP6 e CP8 seguiu-se da mesma forma. Os respectivos géis e partículas que cada corpo de prova foi preenchido será mostrado assim que indicado como os géis foram confeccionados mais abaixo. O desenho e as dimensões dos núcleos

confeccionados tanto para a geometria quadrada quanto para geometria hexagonal estão presentes na Figura 12 e Tabela 5 a seguir.



(a)



(b)

Figura 12 – Esquema do desenho dos núcleos *honeycomb*(a) quadrada (b) hexagonal.

Tabela 5 – Dimensões dos núcleos *honeycomb*.

Geometria	Núcleo	L (mm)	s (mm)	W(mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	b (mm)
Quadrada	ABS	202,00	6,00	39,50	1,75	0,50	30°
Hexagonal	ABS	202,00	3,60	39,50	1,85	0,45	30°

Assim que foram definidos os núcleos, partimos para a preparação dos GMR para o preenchimento dos núcleos das colmeias.

Todos os elementos que foram utilizados para preparação dos géis foram pesados na balança de precisão do laboratório de reologia do Instituto de Física e Química – IFQ da UNIFEI, conforme Figura 13.

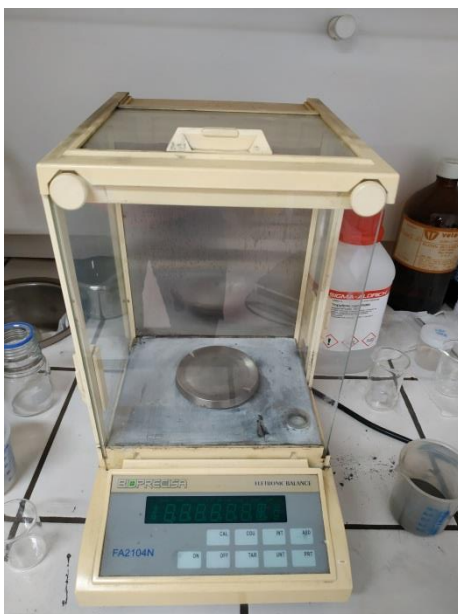


Figura 13 – Balança de precisão.

A Tabela 6 a seguir mostra os elementos e os valores utilizados para a confecção de cada gel.

Tabela 6 – Elementos e valores utilizados nas confecções dos géis.

Gel 1				
Fe HS	SD3	C4H6O3	MP1100	PAO
94,2754g	0,6430g	0,2595g	1,7706g	21,2933g
Gel 2				
Fe ATOMET	SD3	C4H6O3	MP1100	PAO
94,2357g	0,6405g	0,2689g	1,7504g	21,3191g
Gel 3				
Fe HS		Kraton		PAO
94,2223g		0,7193g		21,2113g
Gel 4				
Fe ATOMET		Kraton		PAO
94,4361g		0,7260g		21,6183g

A mistura do pó ferromagnético dos respectivos géis foi feita de forma manual durante 10 minutos até a completa homogeneização da amostra, sendo que o gel 1 e o gel 2 foram feitos a homogeneização no agitador térmico conforme na Figura 14, a uma temperatura de aquecimento de 90° Celsius.

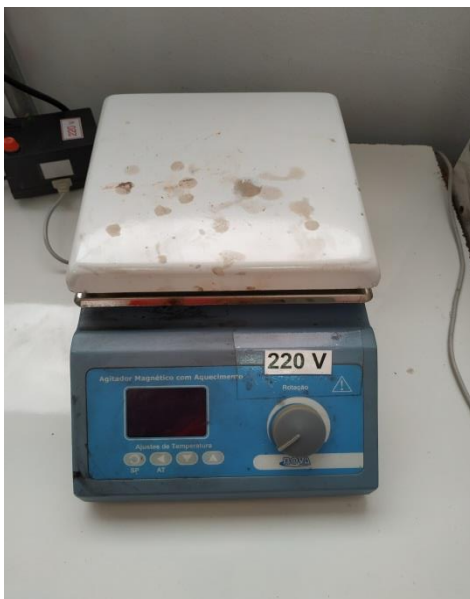
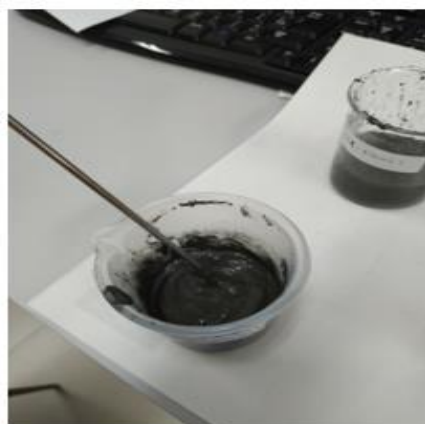


Figura 14 – Agitador térmico.

Depois da mistura dos géis com o pó ferromagnético até sua completa homogeneização obtemos as amostras conforme ilustrado na Figura 15.



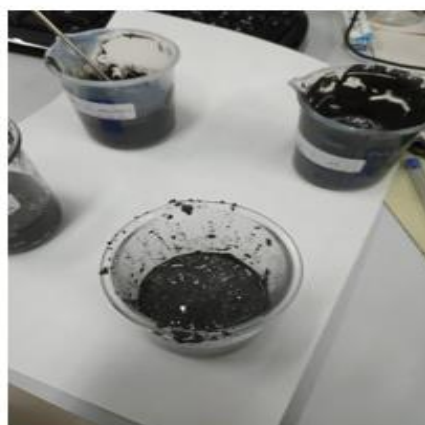
a)



b)



c)



d)

Figura 15 – Géis preparado a) Gel 1, b) Gel 2, c) Gel 3 e d) Gel 4.

Com os géis já preparados, foram realizados os preenchimentos das cavidades do reticulado com os géis ferromagnéticos. O preenchimento se deu de forma manual com o auxílio de uma espátula metálica, de modo que os géis fossem bem compactados no interior das cavidades e de modo a não deixar nenhuma porosidade no interior do reticulado. Os corpos de prova CP1 e CP2 foram preenchidas com gel Kraton e partícula Atomet, CP3 e CP4 foram preenchidas com argila SD3 e partícula Atomet, CP5 e CP6 foram preenchidas com gel Kraton e partícula HS e os CP7 e CP8 foram preenchidas com argila SD3 e partícula HS. A forma final dos núcleos colmeia preenchidos com os géis magneto reológico é ilustrada na Figura 16.

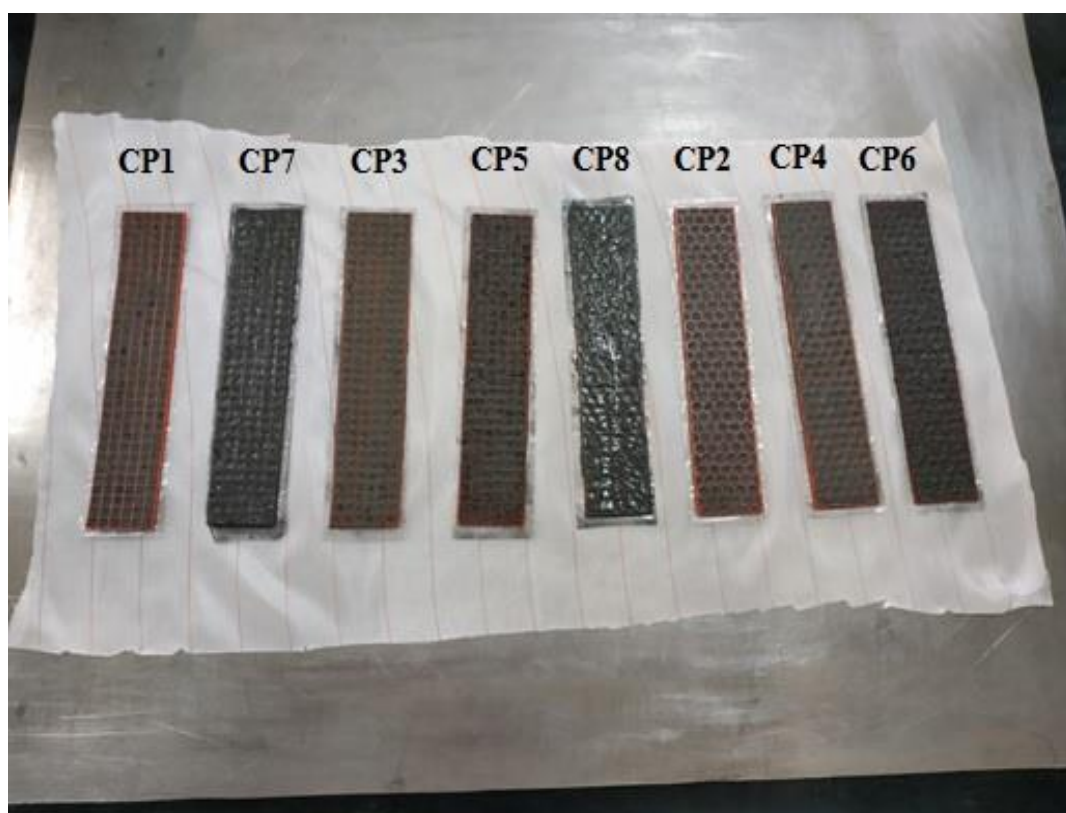


Figura 16 – Núcleo colmeia preenchido com géis magneto reológico.

Após a mistura manual e o preenchimento das colmeias, foram pesadas as amostras com o intuito de manter a massa dos corpos de prova mais homogêneo possível. A Tabela 7 mostra a massa dos corpos de prova preenchido com os GMR.

Tabela 7 – Massa dos corpos de prova preenchidos com gel magneto reológico.

Corpo de prova	Massa (g)
CP1	29,6638
CP2	29,6713
CP3	29,5994
CP4	29,6405
CP5	29,6662

CP6	29,4136
CP7	29,5192
CP8	29,4028

Com as colmeias devidamente preenchidas e pesadas, partimos para a etapa de confecção da placa, inicialmente, com a ajuda de uma régua e um pincel marcador, foram desenhados no tecido de fibra de vidro dois retângulos de 35 cm de comprimento (no sentido do comprimento a 0°) por 30 de largura. Esses retângulos que foram cortados, 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 retângulo 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 de tecido, logo em seguida os núcleos colmeias e por fim, mais uma camada de tecido de fibra de vidro. Dessa forma, após a infusão da resina nas lâminas, a placa pode 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 17.

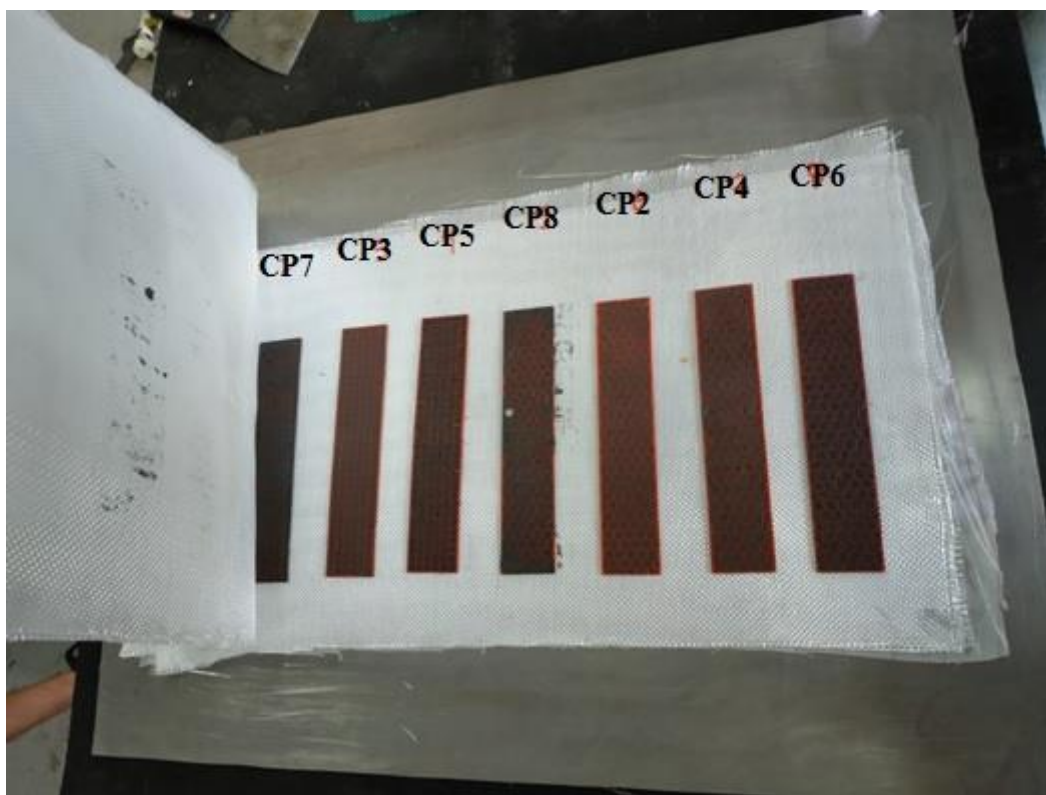


Figura 17 – Disposição da montagem dos corpos de prova.

Assim que foi montado o esquema de laminação, o próximo passo foi a infusão da resina no tecido de vidro. O procedimento utilizado foi a Moldagem por Transferência de Resina Assistida a Vácuo (VARTM), que consiste em um processo onde a resina é transferida para o interior das fibras por meio de um gradiente de pressão desenvolvido no interior de uma bolsa de vácuo, onde se encontra os núcleos preenchidos envolto pelo tecido de fibra de vidro. Conforme mostrado na Figura 18.

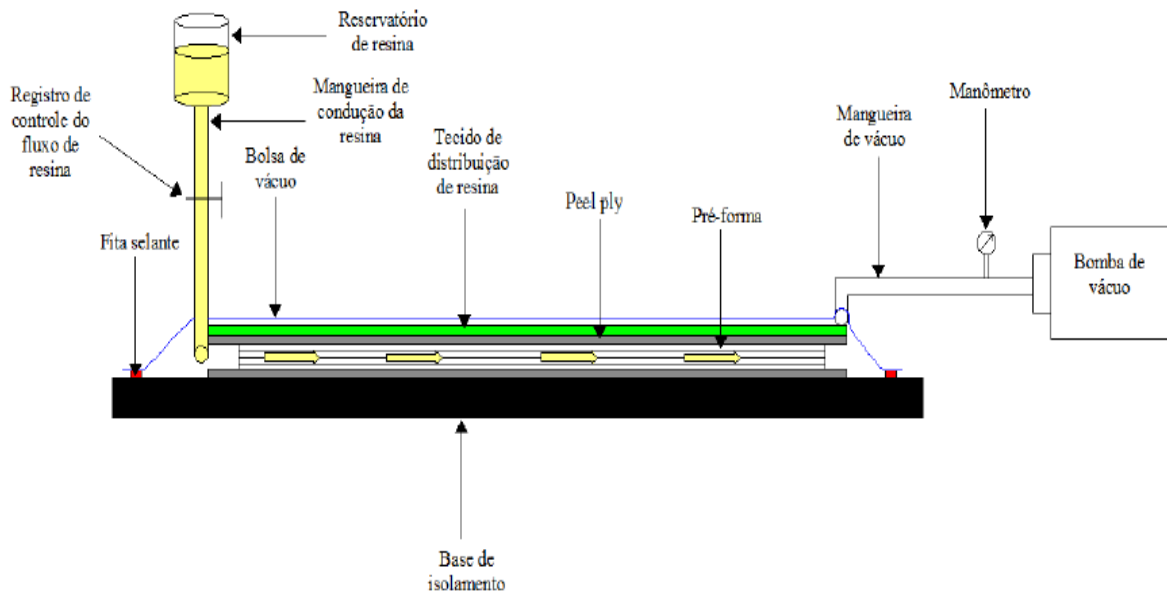


Figura 18 – Representação do processo VARTM. Fonte: Eloy *et al.* (2018).

Primeiramente, foi passado sobre uma superfície metálica que neste caso é o nosso ferramental, um desmoldante (acetona), pois a sua função é ajudar na hora da desmoldagem do laminado. Próximo passo foi colocar uma camada de *peel ply*, que é um tecido fino e poroso cuja função é dar um bom acabamento superficial ao material. Foram colocadas as lâminas do tecido de fibra de vidro sobre a camada de *peel ply*, já com os núcleos colmeia envolvida na disposição desejada. Sobre a pré-forma, colocou novamente outra camada de *peel ply* para acelerar e facilitar o movimento da resina sobre as fibras, e sobre eles uma rede de plástico, cuja função é a distribuição da resina. Após esse arranjo foram colocados os dutos em forma de espiral, nas extremidades da placa, sendo um duto responsável pela entrada e destruição da resina no interior da bolsa de vácuo, e o outro, responsável pela sucção e consequente saída de excesso de resina. Em seguida a toda montagem foi coberto por um plástico para a formação de bolsa a vácuo,

de modo que esse plástico teve suas bordas vedadas por um selante de bordas da marca 3M®, que foi colocado entre o plástico e a base de isolamento.

Assim que a bolsa foi fechada, o próximo passo foi conectar uma mangueira externa a um dos dutos a um funil que iria conter a resina a pressão atmosférica, outra mangueira foi conectada no outro duto e em uma bomba de vácuo, cujas especificações estão presentes no Apêndice B ao final dessa dissertação.

Logo após a preparação, a resina foi preparada, sendo misturados 100 gramas de Araidite LY 5052 com 38 gramas de Aradur 5052, tal como indicado pelo fabricante. A quantidade necessária dessas duas partes é uma função da área ou do peso do reforço e do volume de fibras desejado. Os componentes da resina foram misturados por 5 minutos com o auxílio de um misturador elétrico Figura 19, com uma rotação de 540 rpm, até a completa homogeneização da mistura.



Figura 19 – Misturador.

Após toda preparação, partiu-se 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 entrada do fluxo da resina. Quando a bomba de vácuo foi ligada, o gradiente de pressão inserido a resina começou a ser movimentada sobre a pré-forma. O tempo total da infusão foi de aproximadamente 20 minutos. As imagens da Figura 20 ilustram as etapas do processo.

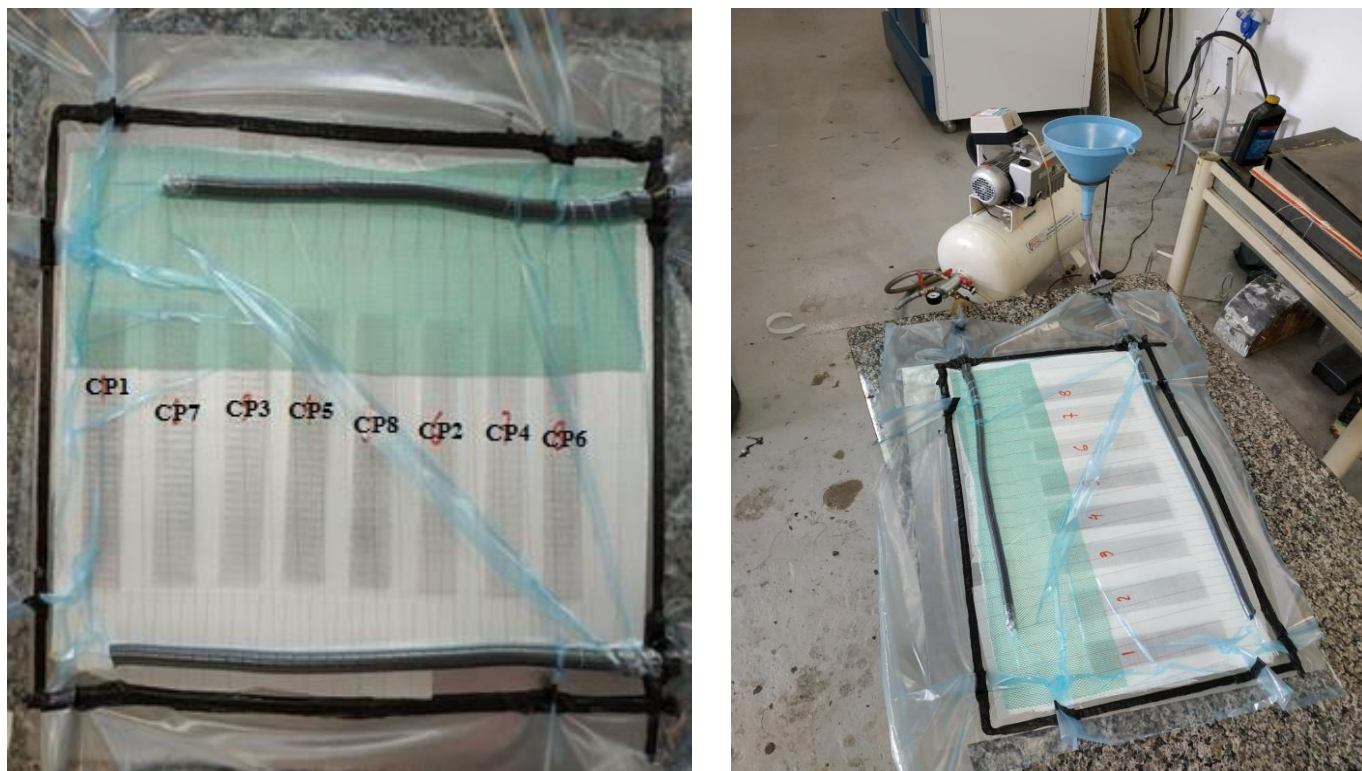


Figura 20 – Etapas do processo VARTM.

Após o término do processo de infusão da resina sobre as lâminas, aguardaram-se 24 horas para à cura completa da resina epóxi à temperatura ambiente, depois de passado esse tempo, a bolsa a vácuo foi desmoldada. Assim que a placa foi desmoldada,

por meio de marcadores, foram marcadas as dimensões dos corpos de prova que foram retirados, como ilustrado na Figura 21.

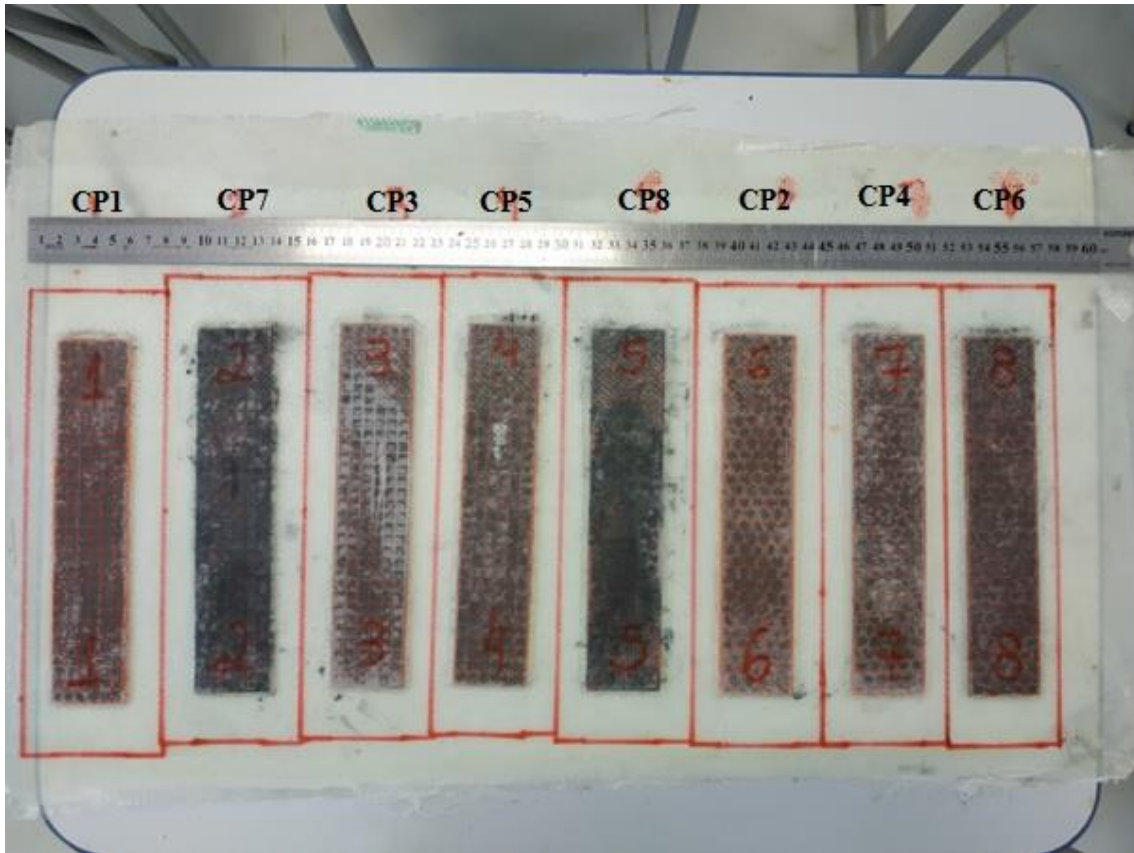


Figura 21 – Marcação dos corpos de prova a serem retirados da placa laminada.

A placa foi cortada na máquina de corte do Núcleo de Tecnologia em Compósitos (NTC) na Universidade Federal de Itajubá, resultando assim oito corpos de prova.

Com os corpos de prova cortados foram levados até a lixa para acertar as suas medidas a fim de obtermos uma homogeneidade das dimensões e das massas dos núcleos colmeia. A Figura 22 mostra os corpos de prova cortados e lixados.

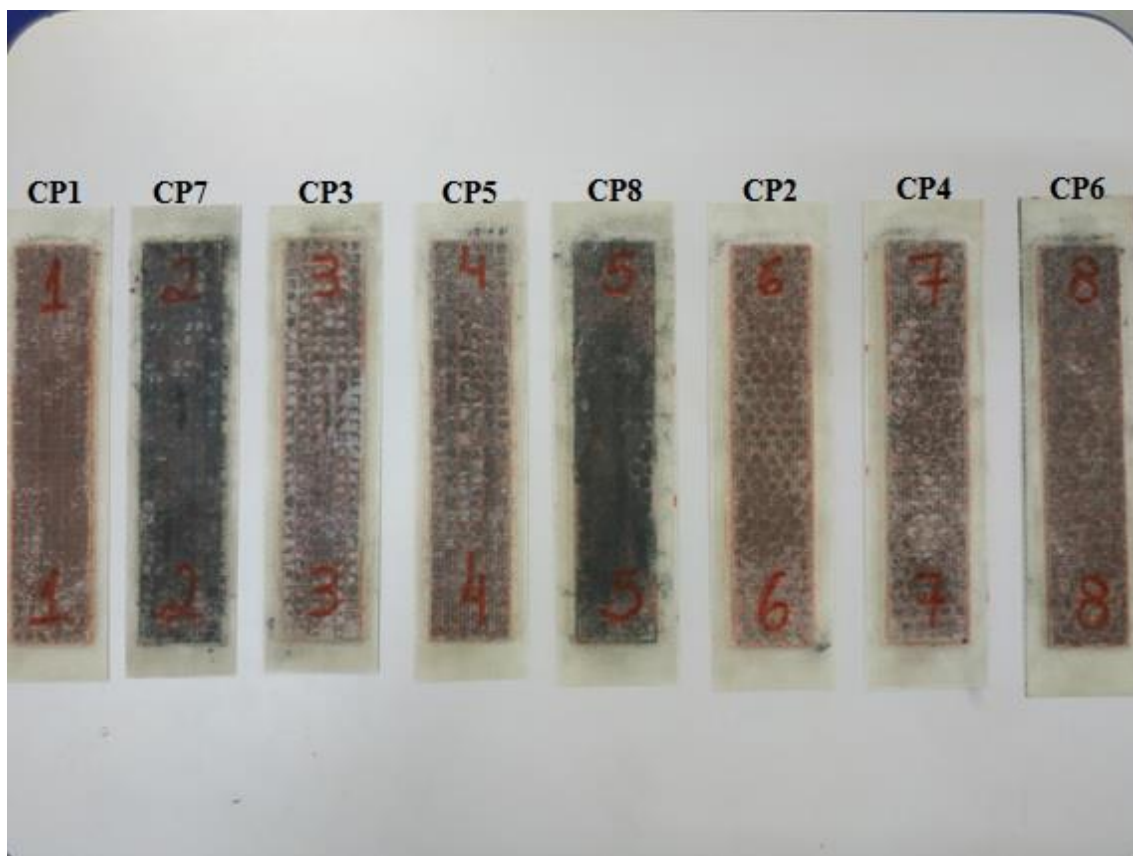


Figura 22 – Corpos de provas cortados e lixados.

Após o corte da placa, os corpos de prova possuem as dimensões mostradas na Figura 23, e as suas respectivas medidas encontram-se na Tabela 8.

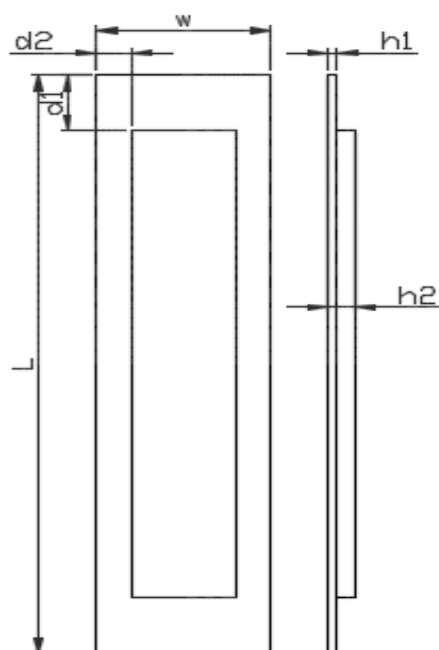


Figura 23 – Geometria do corpo de prova após serem lixadas.

Tabela 8 – Medidas dos corpos de prova cortados e lixados.

		Medidas (mm)					
		L	w	d1	d 2	h 1	h 2
Corpo de prova	CP1	241,50	57,80	20,00	8,80	1,20	3,15
	CP2	240,40	56,60	22,60	10,00	1,25	3,10
	CP3	237,90	57,50	19,00	9,00	1,15	3,25
	CP4	243,30	56,70	22,70	10,70	1,30	3,20
	CP5	245,20	62,40	20,90	8,50	1,20	3,15
	CP6	247,50	60,20	24,90	8,40	1,15	3,25
	CP7	246,40	59,90	19,00	8,20	1,25	3,20
	CP8	252,10	60,70	21,70	10,90	1,20	3,10

Assim que os corpos de prova foram cortados e lixados, foram pesados para obterem homogeneidade em suas massas afim de serem levadas ao ensaio de vibração.

Tabela 9 – Massa dos corpos de prova depois de cortados e lixados.

Massa dos corpos de prova								
Corpos de prova	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7	CP8
Massa (g)	45,52	45,44	45,52	45,55	45,58	45,35	45,53	45,46

Pode-se observar que nas Figuras 22 e 23 existe uma borda ou uma margem além da largura e do comprimento do núcleo colmeia. Essa borda extra foi deixada como uma margem de segurança contra a delaminação das lâminas quando as vigas estiverem carregadas estática ou dinamicamente. Na Figura 23, W é a largura, L o comprimento, h2 a espessura maior (junto ao núcleo) e h1 a espessura menor (junto as bordas) das vigas sanduíche, d1 é a distância ao longo do comprimento, da extremidade do núcleo colmeia à extremidade da viga sanduíche, ao passo que d2 é a distância ao longo da largura, desde a lateral do núcleo colmeia a lateral da viga sanduíche.

Os núcleos com formato em hexagonal apresentaram espessura menor que os de formato quadrado, assim sendo que para chegarmos em um bom acabamento superficial dos corpos de prova foi necessário lixarem-se os materiais de modo a se obter a massa aproximada, assim não foi possível a obtenção das mesmas dimensões em todos os núcleos colmeia.

3.2.3 – Ensaio de Vibração Mecânica

O ensaio de vibrações foram divididos em duas etapas, a primeira sendo o ensaio de vibração livre, que assim obtém-se as frequências naturais e os fatores de amortecimento dos corpos de prova para os valores aplicados de campo magnético, e a

segunda etapa sendo o ensaio de vibração forçada, com o objetivo de quantificar quão efetivo se torna o campo magnético sobre a amplitude de vibração dos corpos de prova.

Foram realizados no Laboratório de Vibrações Mecânicas do Instituto de Engenharia Mecânica – IEM da UNIFEI os ensaios de vibração mecânica. Esse experimento tem a incumbência de mostrar experimentalmente as propriedades dinâmicas dos corpos de prova que são as vigas sanduíche com seus núcleos preenchidos com gel magneto reológico, com o intuito de avaliar o efeito que o campo magnético exerce sobre suas propriedades dinâmicas quando aplicado a essas vigas.

Foram analisadas as oito vigas sanduíche, sendo quatro com núcleo colmeia em forma quadrada (destas, cada núcleo preenchido com um tipo de gel) e outras quatro com núcleo colmeia em forma hexagonal (da mesma forma que a quadrada, cada núcleo sendo preenchido com um tipo de gel diferente).

3.2.3.1 – Ensaio de Vibração Livre

No laboratório tivemos como objetivo diante do ensaio de vibração livre o intuito de determinar as frequências naturais das vigas sanduíche com núcleo colmeia preenchido com gel ferromagnético, sob a influência de vários níveis de campo magnético aplicados as vigas por meio de ímãs, sendo que a determinação dessas frequências é de essencial importância para a ciência do comportamento de uma estrutura quando solicitada dinamicamente.

A condição de contorno utilizada para a realização desse ensaio foi a engastada-livre, que constitui que um lado da viga tem os seus movimentos limitados (seis graus de liberdade restringidos), e por meio de um engaste num suporte bem fixado, a qual é colocada em oscilação diante da aplicação de um impulso no plano perpendicular ao plano de fixação da viga, na altura da sua linha neutra. Todas as vigas foram engastadas a 18 mm da extremidade.

Por meio de um martelo de impacto conectado a uma placa de aquisição de sinais fora aplicado o impulso (Figura 24), excitando dinamicamente a viga. Com isso a viga entra em movimento, e o vibrômetro laser capta o sinal deste movimento, para isso o vibrômetro tem que estar no mesmo plano de aplicação da força para transmissão e aquisição dos sinais. O vibrômetro laser foi usado devido ao fato de não entrar em contato com o corpo de prova, assim não tendo influência sobre a massa e nem favorecendo a

dissipação do campo magnético aplicado sobre a viga. Foi colocado na ponta da viga uma fita adesiva favorecendo assim a captura do seu movimento.



Figura 24 – Martelo utilizado para excitar dinamicamente a viga e a placa de aquisição de sinais.

Foi utilizado um eletroímã para a geração do campo magnético, que consta de duas bobinas ligadas a uma fonte de tensão, na qual se torna possível variar a intensidade de campo magnético por meio da alteração dos valores de tensão e corrente. Os corpos de prova foram posicionadas no espaço livre entre terminais do eletroímã, os quais possuem uma área de secção transversal de 30 x 30 mm², a distância entre os terminais do eletroímã foi de 30 mm. Através do *Gaussmeter* fazia a medição da intensidade do campo magnético aplicado através da variação da corrente elétrica e da tensão na fonte, captando a intensidade do campo com a ponta do sensor do *Gaussmeter* que ficava em contato com a superfície da viga. O eletroímã ficou posicionado na extremidade livre do núcleo, e não na extremidade livre da viga, pois o material magneto reológico encontra-se no interior do núcleo, e a viga possui borda extra para se evitar a delaminação, e nessa borda não possui o material magneto reológico.

As configurações do equipamento foram com os seguintes parâmetros 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 *Resoluti-on* 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.

3.2.3.2 – Ensaio de Vibração Forçada

Com os ensaios de vibração forçada é possível mostrar o nível de efetividade da aplicação de um campo magnético sobre as vigas sanduíche confeccionadas neste trabalho, principalmente quando se entra em estado de ressonância. O fenômeno de ressonância ocorre quando um corpo é excitado dinamicamente de modo a vibrar em uma de suas frequências naturais ou em uma frequência muito próxima delas. O fenômeno de ressonância faz com que o corpo ou estrutura aumente a sua amplitude de vibração de maneira exagerada, o que pode levar ao seu colapso ou causar avarias à estrutura.

O intuito deste ensaio é o de introduzir as vigas sanduíche a serem sujeitas nas suas frequências de vibrações naturais fundamentais, e cada viga será excitada na sua primeira frequência natural, e analisar a variação do módulo de vibração e sua intensidade através do campo magnético aplicado.

Realizando esse experimento, foi usado um equipamento chamado *Shaker*, esse equipamento é capaz de induzir uma vibração a um corpo a ele acoplado. *Shakers* são geralmente utilizados em ensaios de fadiga, análise modal e ensaios de vibração de um modo em geral, pois ele transmite um impulso a um corpo por meio de várias funções.

Para esse ensaio de vibração forçada foi necessário utilizar os seguintes equipamentos: *Shaker*, gerador de funções, amplificador, analisador de sinais, computador, vibrômetro laser, eletroímã e fonte de tensão. Foi-se escolhido o tipo de função no gerador de funções, que no qual foi escolhido uma função senoidal. O sinal chega ao amplificador através do gerador de funções, o qual irá amplificar o sinal elétrico recebido e transmitira ao *Shaker*, que de acordo com a função senoidal de excitação faz com que a viga sanduíche vibre. A viga foi posicionada entre o eletroímã, no vão livre de 30 mm no qual a viga fica livre para vibrar. Por meio do amplificador, foi permitido conter a amplitude de vibração da viga. Os equipamentos utilizados neste ensaio estão ilustrados na Figura 25 abaixo.

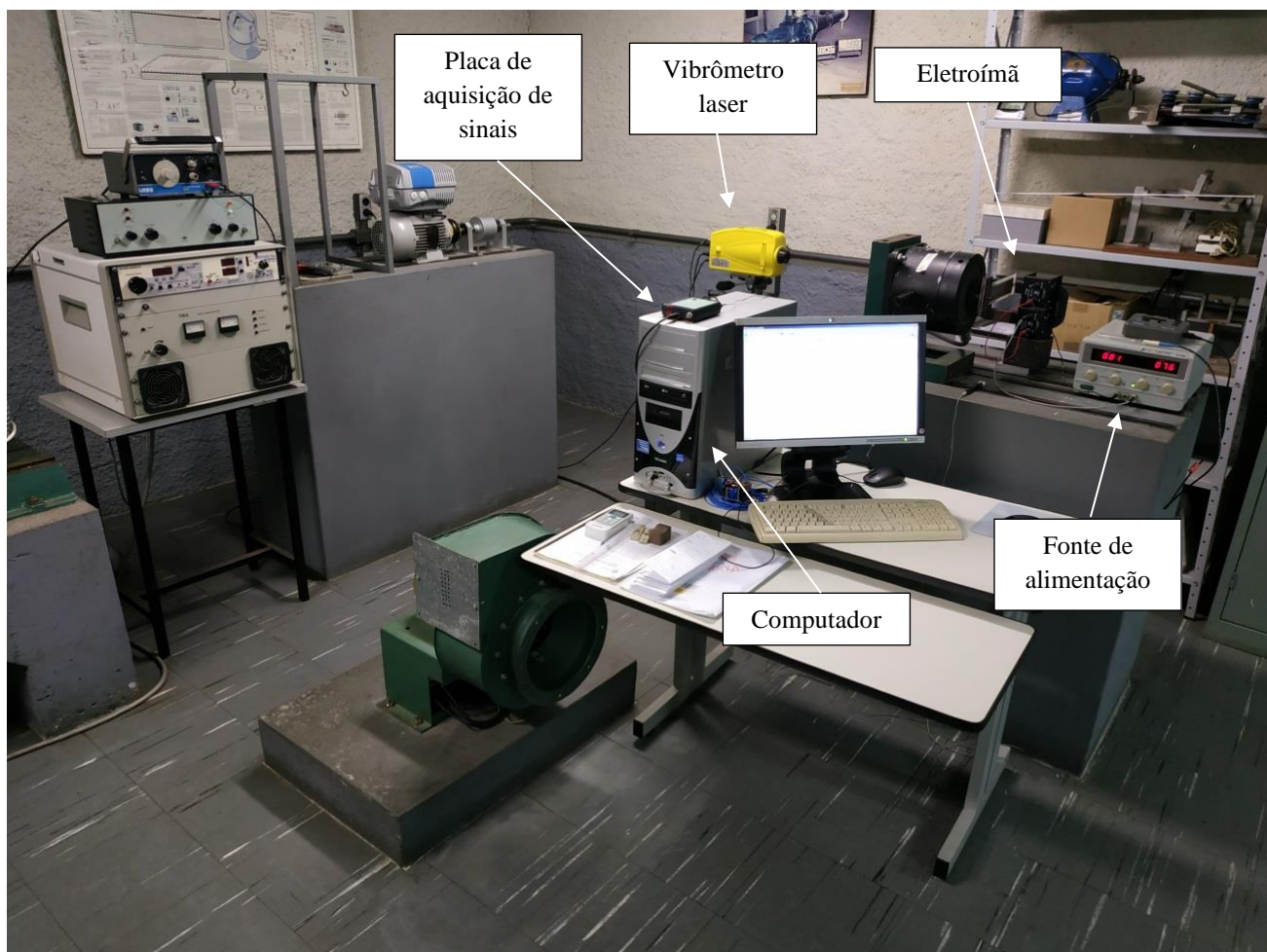


Figura 25 – Esquema experimental utilizado nos ensaios.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos nos ensaios de vibração livre, vibração forçada, ajustes realizados para a determinação do fator de amortecimento, resultados para frequências naturais, em vibração forçada a variação de amplitude e análise de DOE para o experimento realizado.

4.1 - Resultados do Ensaio de Vibração Livre

Foram realizados os ensaios de vibração livre no laboratório e proporcionaram como objetivo a determinação das frequências naturais e dos fatores de amortecimento das vigas tipo sanduíche com núcleo colmeia preenchido por géis magneto reológico, cujo desenvolvimento foi descrito nos capítulos anteriores desta dissertação. O conhecimento desses parâmetros é crucial para este tipo de estrutura quando são solicitadas dinamicamente.

O apoio utilizado no ensaio de vibração livre foi a engastada-livre e os equipamentos utilizados no experimento foram mostrados na Figuras 25. Os resultados para as frequências naturais obtidos experimentalmente e os fatores de amortecimento obtidos no ensaio serão descritos a seguir.

4.1.1 – Frequências Naturais

Conhecer as frequências naturais dos modelos de viga tipo sanduíche é de suma importância, pois o ensaio posterior a este é o ensaio de vibração forçada, assim torna-se importante o conhecimento aproximado dos valores das frequências naturais dos corpos de prova, para se ensaiar os corpos de prova na condição de ressonância. Em uma situação real de aplicação destes tipos de estruturas, é necessário no projeto os valores de frequências naturais para se evitar o fenômeno de ressonância. Com isso, o objetivo dessa dissertação é verificar a influência do campo magnético sobre as frequências naturais dos corpos de prova confeccionada.

Todas as frequências naturais obtidas através do ensaio de vibração serão apresentadas em Hertz (Hz). Os campos magnéticos aplicados foram de intensidade de 60kA/m e 100kA/m. A princípio determinou-se o valor da frequência natural para cada corpo de prova sem aplicação do campo magnético, e a partir daí o campo começou a ser

incrementado. Assim, para cada valor de campo magnético, determinou-se um espectro de frequência. A Figura 26 apresenta os espectros de frequências para o corpo de prova com núcleo em geometria quadrada e gel 4 (Polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet) para cada corpo de prova ensaiado com campo aplicado na extremidade das vigas. Para cada espectro de frequência foi realizado uma média de três aquisições.

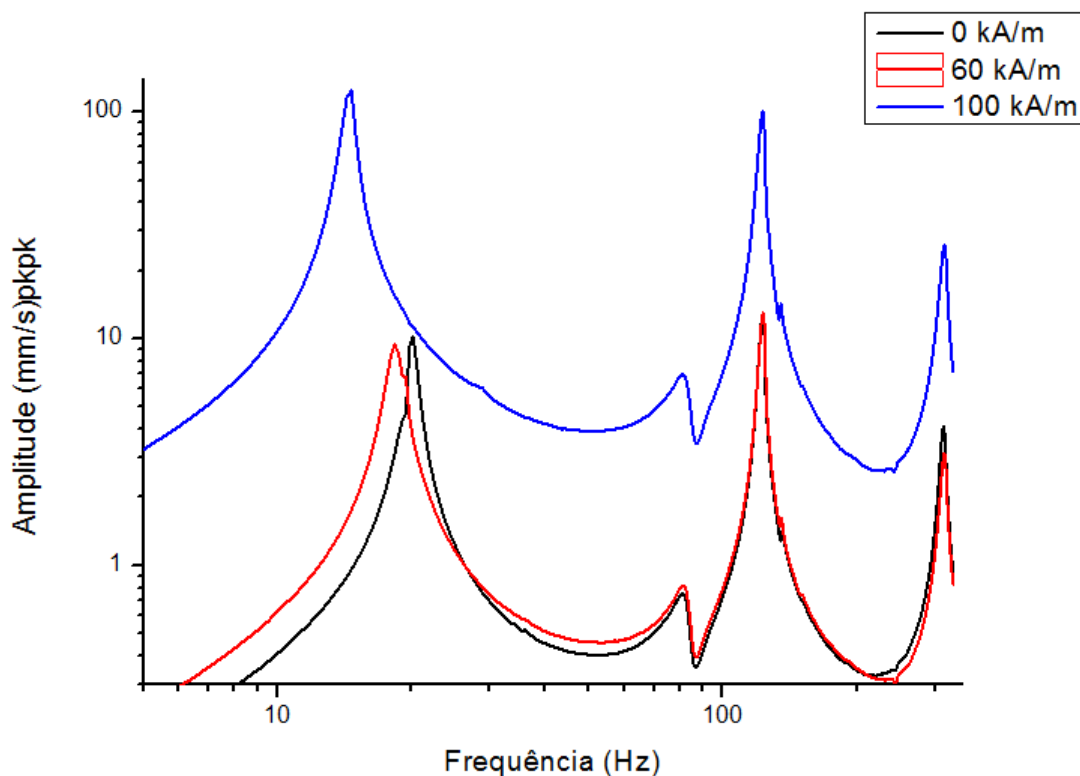


Figura 26 - Espectro de frequência para a amostra CP1 com geometria quadrada, polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet.

O campo magnético máximo aplicado nos ensaios foi de 100 kA/m para todos os modelos de viga sanduíche. Os valores aplicados nos campos foram de 60 kA/m e 100 kA/m e foi observado que com campos maiores de 100 kA/m as vigas aderiram-se aos polos do ímã, e por isso de se optar por um campo máximo de 100 kA/m. O valor de 60 kA/m foi utilizado como um valor intermediário, para que se possa analisar entre os valores mínimo e máximo.

A Tabela 10 apresenta os valores das frequências naturais obtidas no ensaio de vibração livre sem campo aplicado e com campo de 100kA/m aplicado para os espectros

de frequência da Figura 26, com ímã posicionado na extremidade livre da viga, bem como a variação das frequências sob a aplicação do campo a partir da frequência natural sem campo aplicado, conforme Equação 1.

$$\text{Variação (\%)} = \left(\frac{FSC - FCN}{FSC} \right) \times 100 \quad (1)$$

Na Equação 1, o FSC é o valor de frequência natural sem campo magnético aplicado e FCN é o valor da frequência natural sob a aplicação de um campo n, onde n é o campo aplicado de 100 kA/m, assim a Equação 1 é válida para as Tabelas de 10 a 17.

Tabela 10 - Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche CPI de geometria quadrada polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet.

		Frequência (Hz)			Variação (%)		
		1° Modo	2° Modo	3°Modo	1° Modo	2° Modo	3°Modo
Campo (kA/m)	0	20,14	122,68	314,20	0,00	0,00	0,00
	60	18,31	123,34	315,30	9,09	-0,54	-0,35
	100	14,64	123,41	316,40	27,31	-0,60	-0,70

A Figura 27 mostra os espectros de frequência para a viga sanduíche com núcleo geometria hexagonal e gel 4 (polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet). A Tabela 11 apresenta os valores de frequências naturais sem campo magnético aplicado e com os respectivos campos de 60 kA/m e 100 kA/m aplicados.

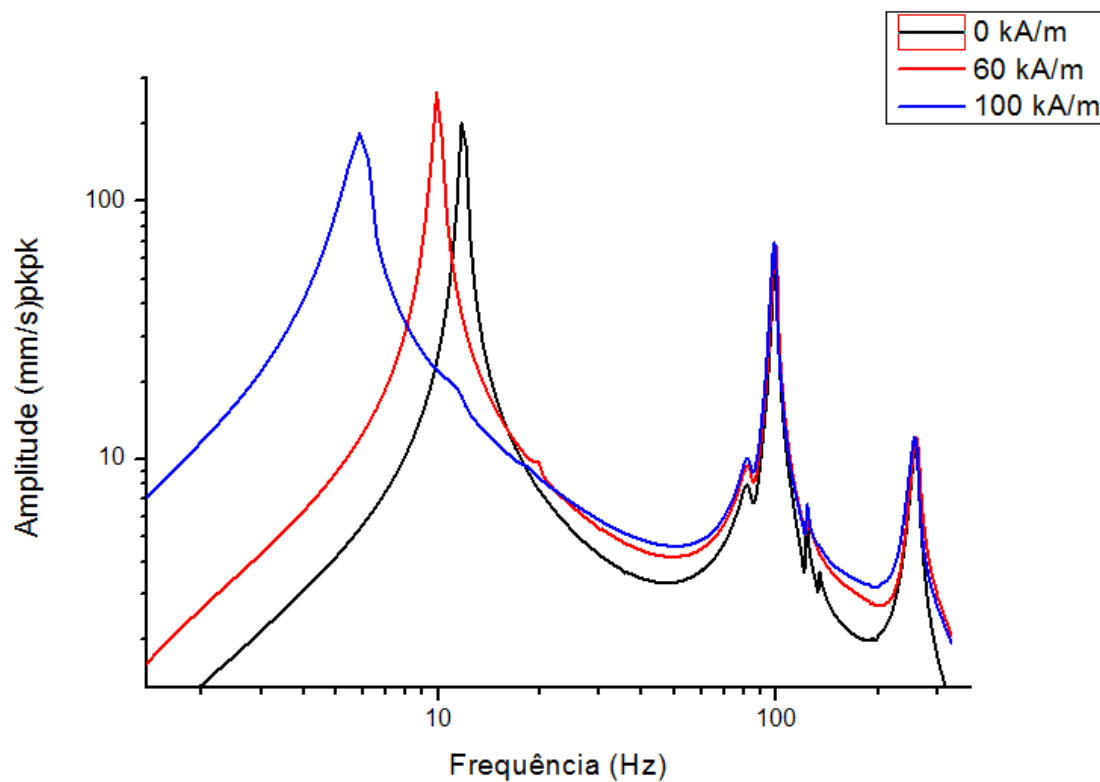


Figura 27 - Espectro de frequência para a amostra CP2 com geometria hexagonal, polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet.

Tabela 11 - Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche CP2 de geometria hexagonal polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet.

		Frequência (Hz)			Variação (%)		
		1° Modo	2° Modo	3°Modo	1° Modo	2° Modo	3°Modo
Campo (kA/m)	0	13,91	99,60	239,50	0	0	0
	60	12,08	100,84	244,99	13,16	-1,24	-2,29
	100	7,69	100,34	246,45	44,72	-0,74	-2,90

A Figura 28 mostra os espectros de frequência para a viga sanduíche com núcleo geometria quadrada e gel 2 (argila SD3 e partícula ferromagnética Atomet). A Tabela 12 apresenta os valores de frequências naturais e com campo magnético.

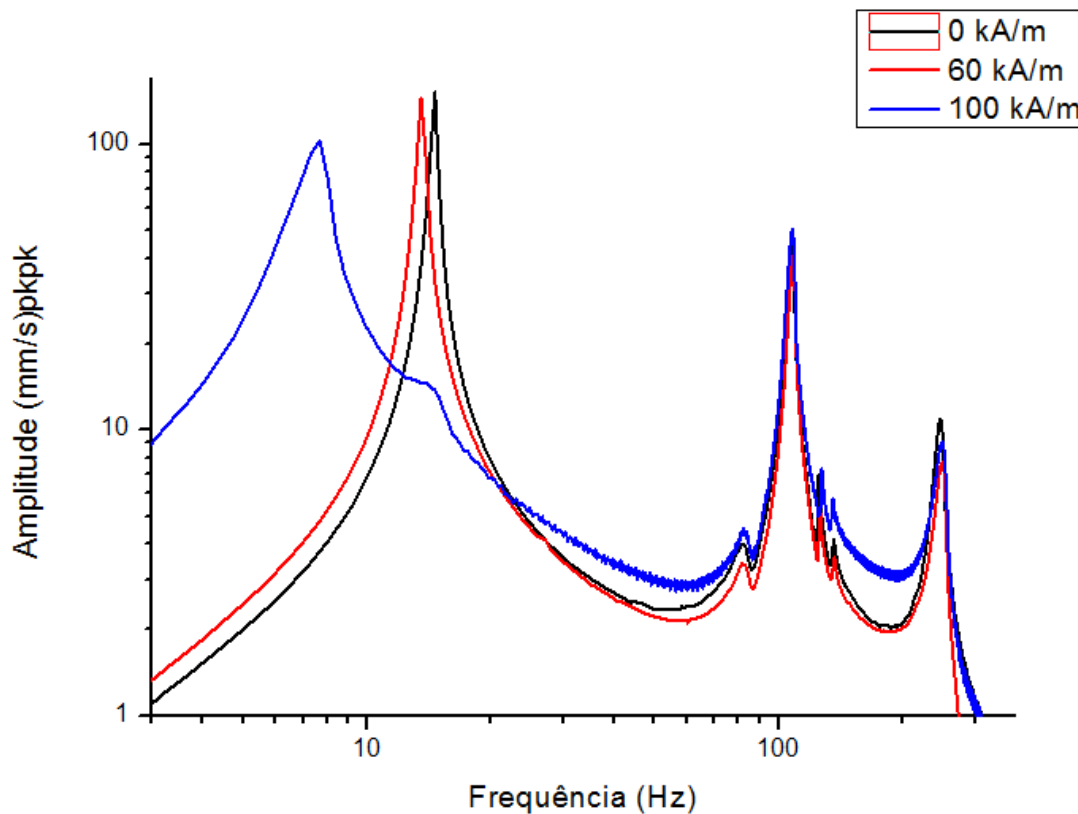


Figura 28 - Espectro de frequência para a amostra CP3 com geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética Atomet.

Tabela 12 - Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche CP3 de geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética Atomet.

		Frequência (Hz)			Variação (%)		
		1° Modo	2° Modo	3°Modo	1° Modo	2° Modo	3°Modo
Campo (kA/m)	0	14,64	108,03	247,55	0	0	0
	60	13,55	108,39	251,29	7,45	-0,33	-1,51
	100	7,66	108,10	251,22	47,68	-0,06	-1,48

A Figura 29 mostra os espectros de frequência para a viga sanduíche com núcleo geometria hexagonal e gel 2 (argila SD3 e partícula ferromagnética Atomet). A Tabela 13 apresenta os valores de frequências naturais e com campo magnético.

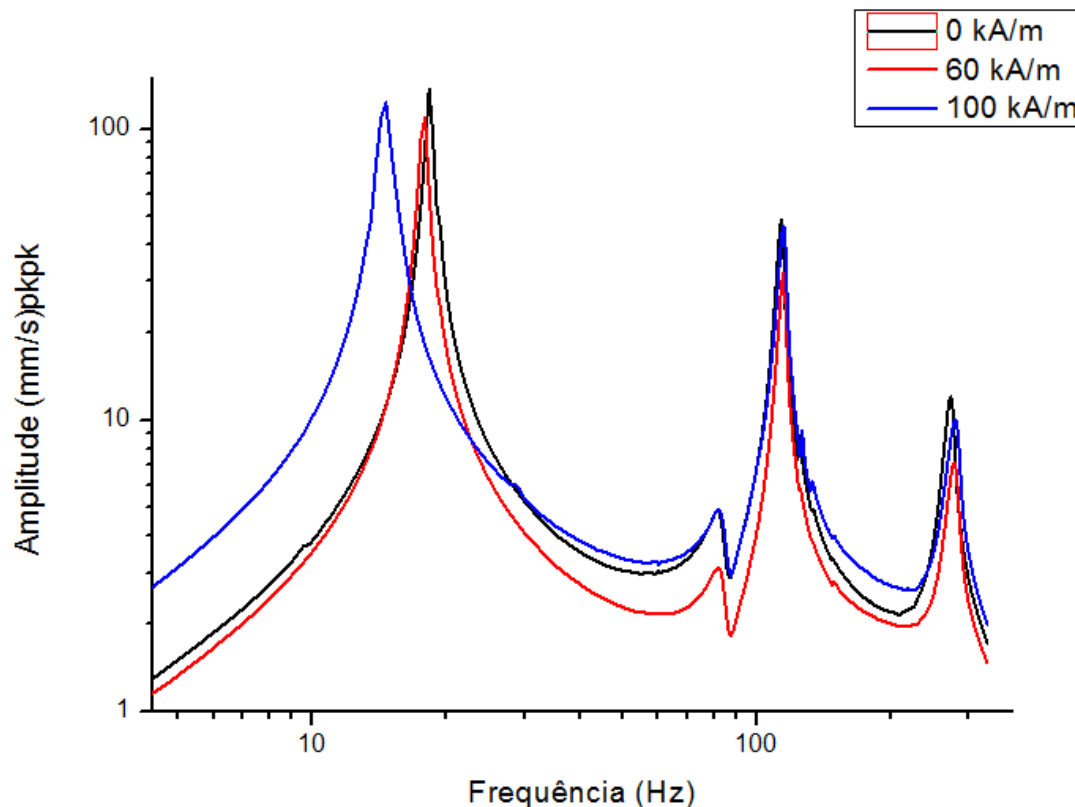


Figura 29 - Espectro de frequência para a amostra CP4 com geometria hexagonal, argila SD3 e partícula ferromagnética Atomet.

Tabela 13 - Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche CP4 de geometria hexagonal, argila SD3 e partícula ferromagnética Atomet.

		Frequência (Hz)			Variação (%)		
		1° Modo	2° Modo	3°Modo	1° Modo	2° Modo	3°Modo
Campo (kA/m)	0	13,54	96,31	219,72	0	0	0
	60	12,08	96,52	220,82	10,78	-0,22	-0,50
	100	6,59	96,67	227,05	51,33	-0,37	-3,34

A Figura 30 mostra os espectros de frequência para a viga sanduíche com núcleo geometria quadrada e gel 3 (polímero Kraton e partícula ferromagnética HS). A Tabela 14 apresenta os valores de frequências naturais e com campo magnético

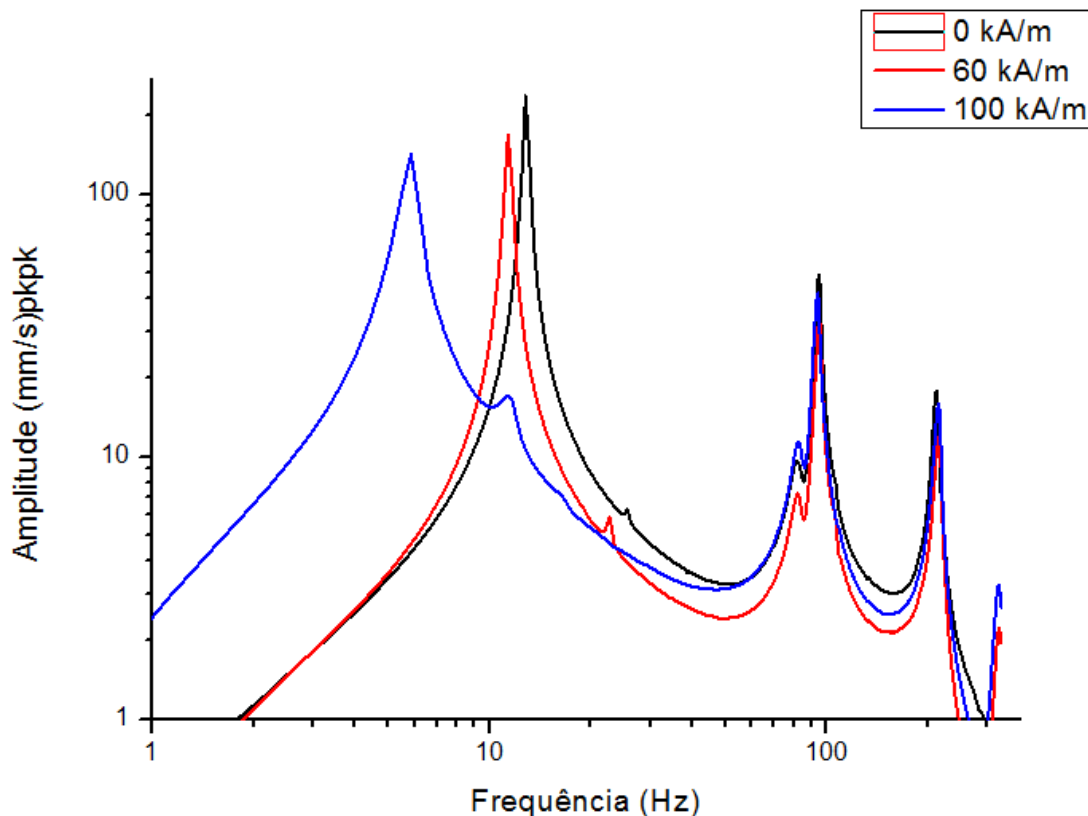


Figura 30 - Espectro de frequência para a amostra CP5 com geometria quadrada, polímero Kraton e partícula ferromagnética HS.

Tabela 14 - Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche CP5 de geometria quadrada, polímero Kraton e partícula ferromagnética HS.

		Frequência (Hz)			Variação (%)		
		1° Modo	2° Modo	3°Modo	1° Modo	2° Modo	3°Modo
Campo (kA/m)	0	18,31	113,52	274,65	0	0	0
	60	17,94	114,62	277,48	2,02	-0,97	-1,03
	100	14,64	114,99	281,61	20,04	-1,29	-2,53

A Figura 31 mostra os espectros de frequência para a viga sanduíche com núcleo geometria hexagonal e gel 3 (polímero Kraton e partícula ferromagnética HS). A Tabela 15 apresenta os valores de frequências naturais e com campo magnético

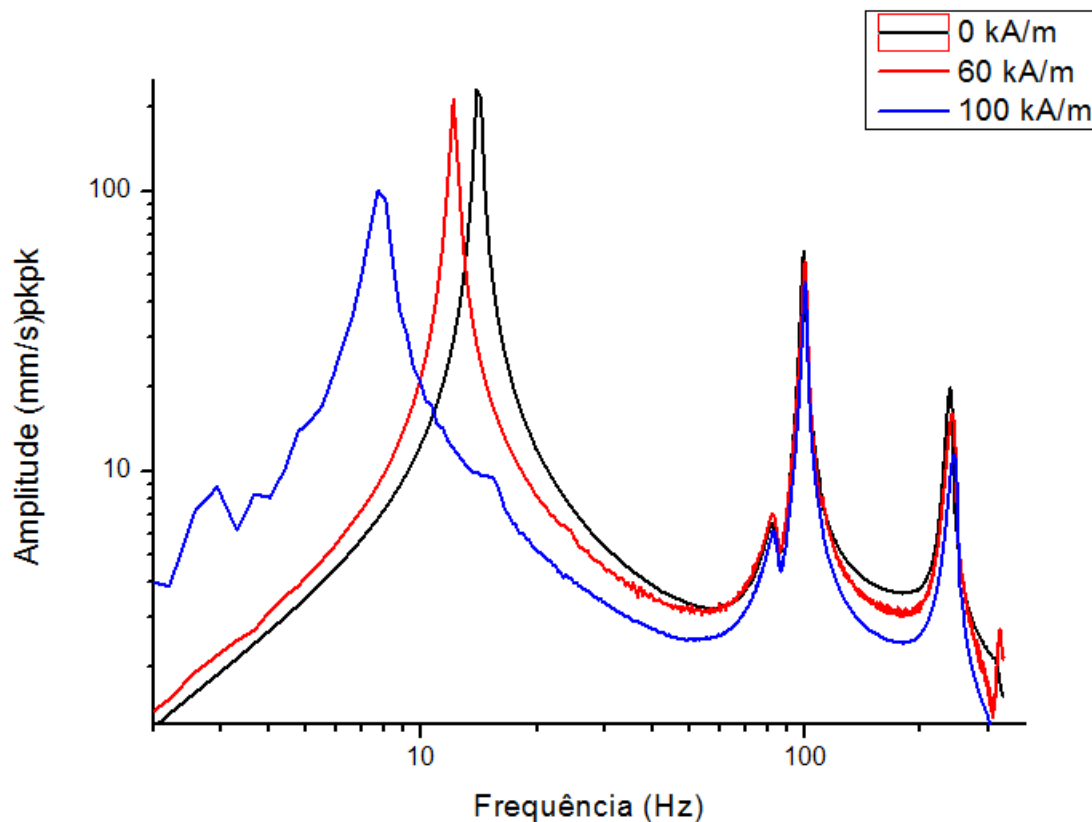


Figura 31 - Espectro de frequência para a amostra CP6 com geometria hexagonal, polímero Kraton e partícula ferromagnética HS.

Tabela 15 - Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche CP6 de geometria hexagonal, polímero Kraton e partícula ferromagnética HS.

		Frequência (Hz)			Variação (%)		
		1° Modo	2° Modo	3°Modo	1° Modo	2° Modo	3°Modo
Campo (kA/m)	0	12,81	80,56	199,21	0	0	0
	60	12,08	80,93	200,31	5,70	-0,46	-0,55
	100	8,05	80,20	201,04	37,16	0,45	-0,92

A Figura 32 mostra os espectros de frequência para a viga sanduíche com núcleo geometria quadrada e gel 1 (argila SD3 e partícula ferromagnética HS). A Tabela 16 apresenta os valores de frequências naturais e com campo magnético.

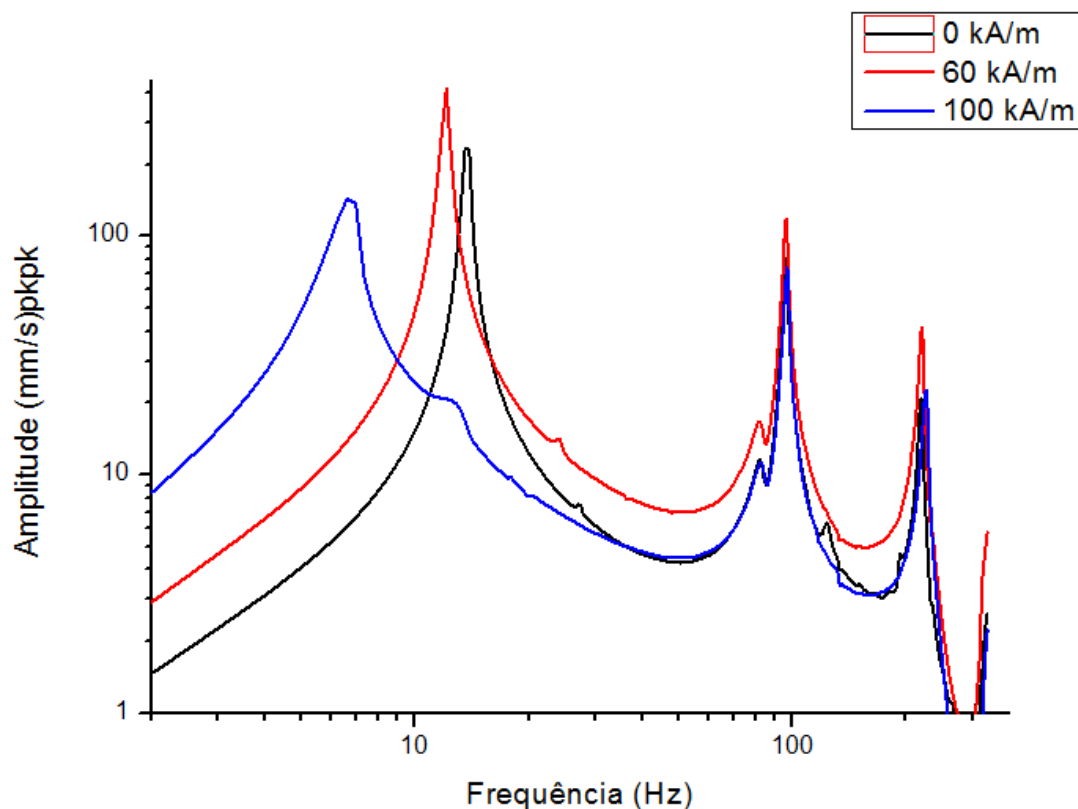


Figura 32 - Espectro de frequência para a amostra CP7 com geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética HS.

Tabela 16 - - Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche CP7 de geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética HS.

		Frequência (Hz)			Variação (%)		
		1° Modo	2° Modo	3°Modo	1° Modo	2° Modo	3°Modo
Campo (kA/m)	0	11,71	99,24	260,37	0	0	0
	60	9,89	99,60	261,84	15,54	-0,36	-0,56
	100	5,85	98,51	257,44	50,04	0,74	1,13

A Figura 33 mostra os espectros de frequência para a viga sanduíche com núcleo geometria hexagonal e gel 1 (argila SD3 e partícula ferromagnética HS). A Tabela 17 apresenta os valores de frequências naturais e com campo magnético.

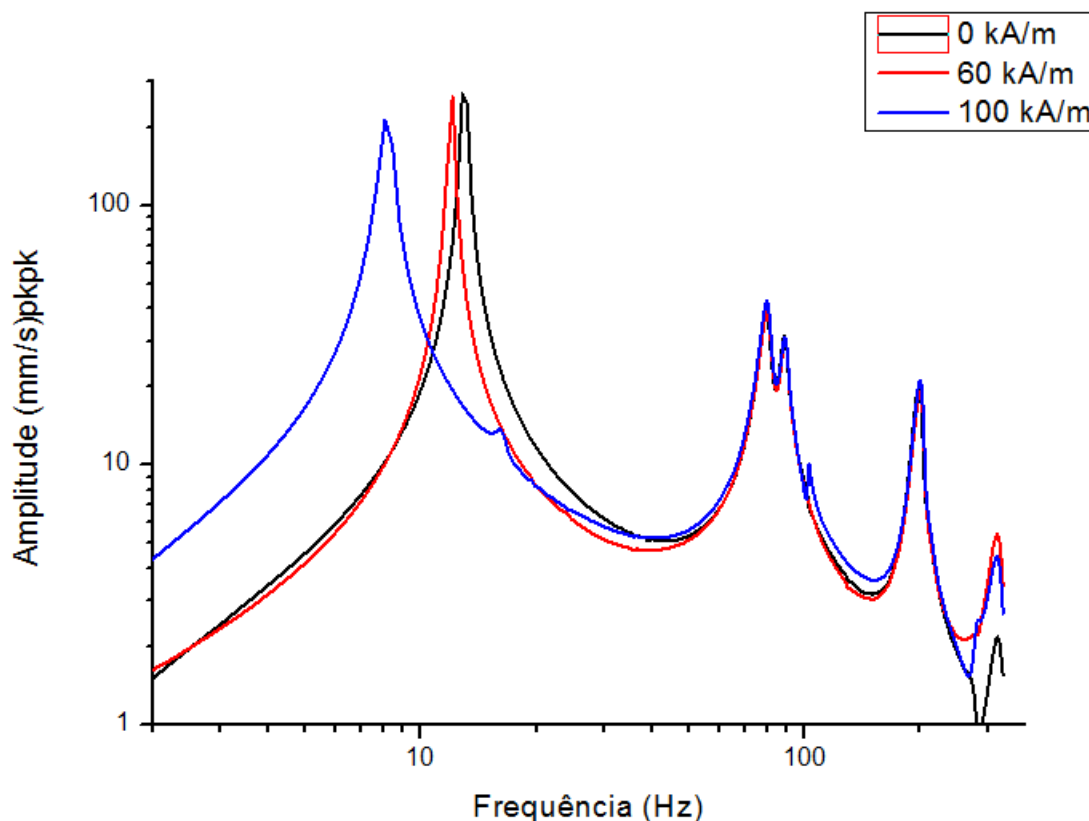


Figura 33 - Espectro de frequência para a amostra CP8 com geometria hexagonal, argila SD3 e partícula ferromagnética HS.

Tabela 17 - Frequências naturais e suas variações a partir do campo magnético para a viga sanduíche CP8 de geometria hexagonal, argila SD3 e partícula ferromagnética HS.

		Frequência (Hz)			Variação (%)		
		1° Modo	2° Modo	3°Modo	1° Modo	2° Modo	3°Modo
Campo (kA/m)	0	12,81	94,84	212,76	0	0	0
	60	11,35	94,65	214,23	11,40	0,20	-0,69
	100	5,85	94,48	214,59	54,33	0,38	-0,86

Analisando as Figuras 26 a 33 podemos concluir que houve variação nas frequências naturais de todas as configurações de vigas tipo sanduíche modificando a intensidade do campo magnético. Com o aumento da intensidade do campo magnético, os valores das frequências naturais relacionadas ao primeiro modo de vibração diminuíram. Foram observados nos trabalhos de outros autores a diminuição nos valores das frequências naturais das vigas sanduíche com núcleo reológico quando a intensidade do campo magnético é aumentada, Eloy *et al.* (2018), Irazu & Elejabarrieta (2017), Magha *et al.* (2016), Hu *et al.* (2011) e Lara-Pietro (2010). Quando um campo magnético

é aplicado em estrutura sanduíche magneto reológica sobre o fenômeno de vibração, outros fenômenos além da mudança das propriedades reológicas do material estão envolvidos a indução por correntes parasitas ou lâminas condutoras ou forças magnéticas devido à natureza magnética do núcleo ou das lâminas (SODANO *et al.*, 2006). A consequência de cada um dos efeitos sobre o resultado dinâmico do ensaio de vibração sobre a viga será diferente dependendo das propriedades geométricas e físicas de como cada viga será confeccionada, e da dinâmica do campo magnético inserido sobre a viga (IRAZU e ELEJABARRIETA, 2017). Analisando o segundo e terceiro modo de vibração, o fato que ocorreu no primeiro modo não foi observado, fato semelhante ocorrido no trabalho publicado por Eloy *et al.* (2018). O comportamento das frequências naturais em função do campo magnético aplicado é mostrado nos gráficos das Figuras 34 a 36 abaixo.

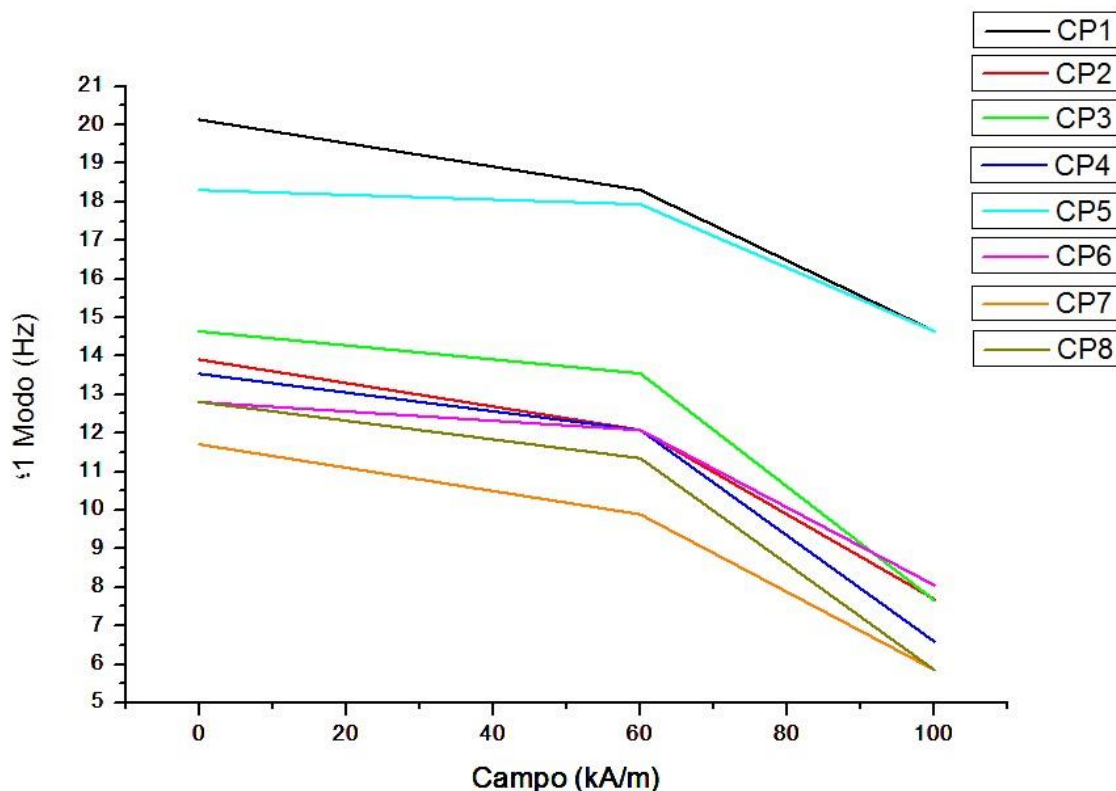


Figura 34 – Variação das frequências naturais correspondentes ao primeiro modo de vibração em função do campo magnético aplicado.

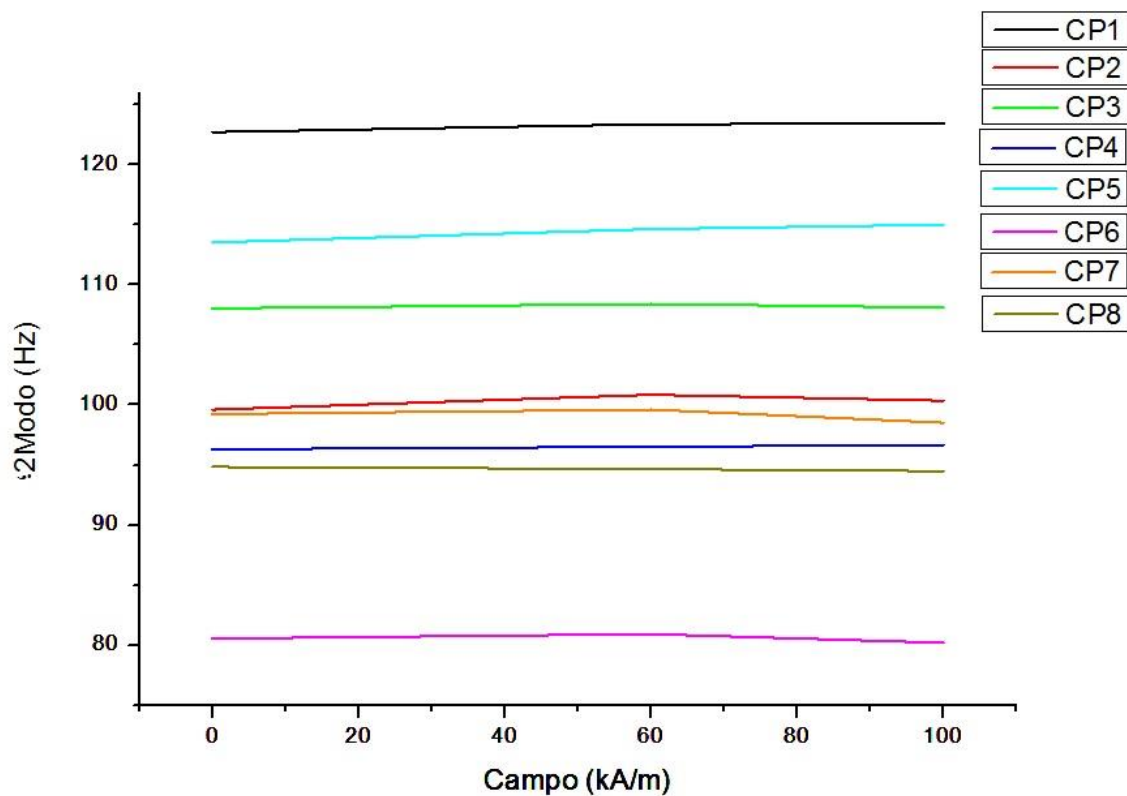


Figura 35 - Variação das frequências naturais correspondentes ao segundo modo de vibração em função do campo magnético aplicado.

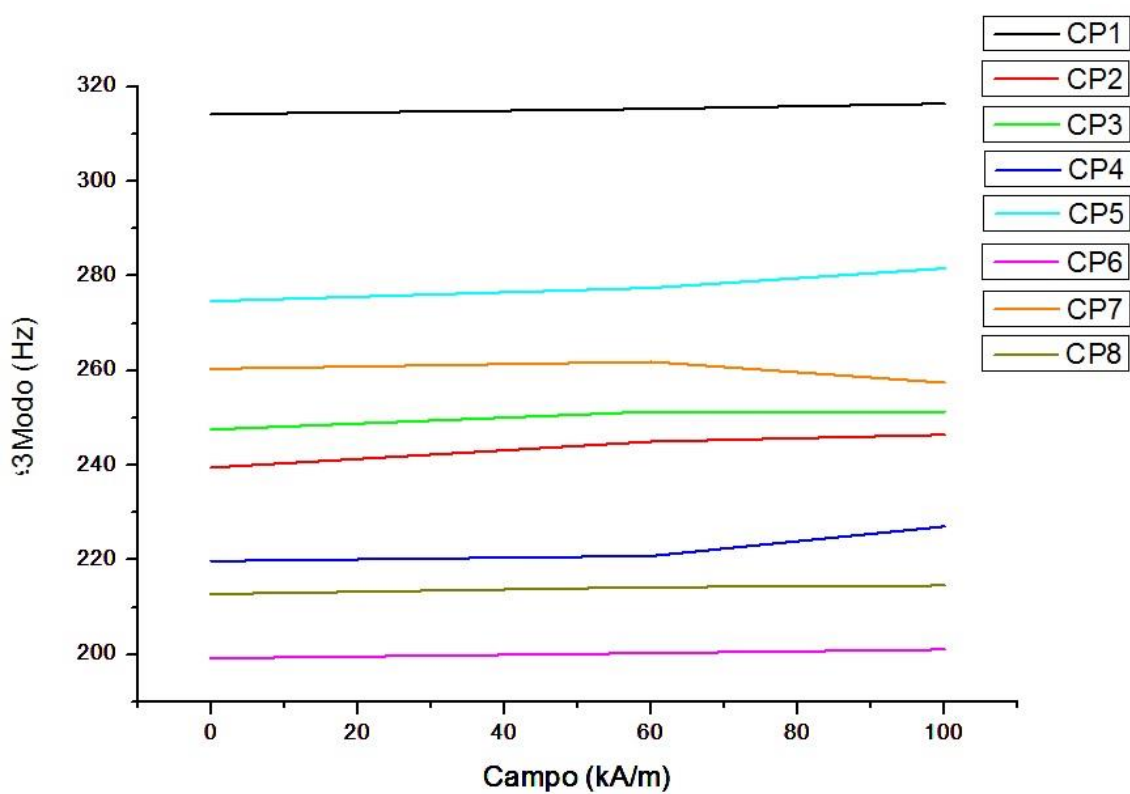


Figura 36 - Variação das frequências naturais correspondentes ao terceiro modo de vibração em função do campo magnético aplicado.

Como observado nos gráficos acima, a alteração nos valores das frequências naturais estão relacionadas a atração magnética das partículas presentes nos géis pelo campo magnético. As partículas sofrem influência da força que foi gerada pelo campo, assim sendo atraídas aos polos do ímã, conseqüentemente fazendo a oscilação dos corpos diminuírem.

As figuras 34, 35 e 36 deixam claro que o modo de vibração que foi mais influenciado foi o primeiro, diminuindo os seus valores com o aumento do campo magnético. As frequências referentes ao segundo e terceiro modos de vibração, praticamente não houve variação em seus valores. A Tabela 18 mostra em ordem decrescente os corpos de prova que sofreram maior variação da primeira frequência em relação ao campo magnético aplicado de 100 kA/m.

Tabela 18 - – Variação da primeira frequência em ordem decrescente.

Corpo de prova	Varição (%)
CP8	54,33
CP4	51,33
CP7	50,04
CP3	47,68
CP2	44,72
CP6	37,16
CP1	27,31
CP5	20,04

4.1.2 – Fatores de Amortecimento

Quando realizado o ensaio de vibração livre, foram obtidos os resultados das velocidades de deslocamento em função do tempo. Na Figura 37 é exemplificado uma curva de velocidade pelo tempo. Através dessas respostas na forma gráfica, foi possível determinar os fatores de amortecimento das vigas sanduíche em função do campo magnético aplicado, que se apresenta a seguir.

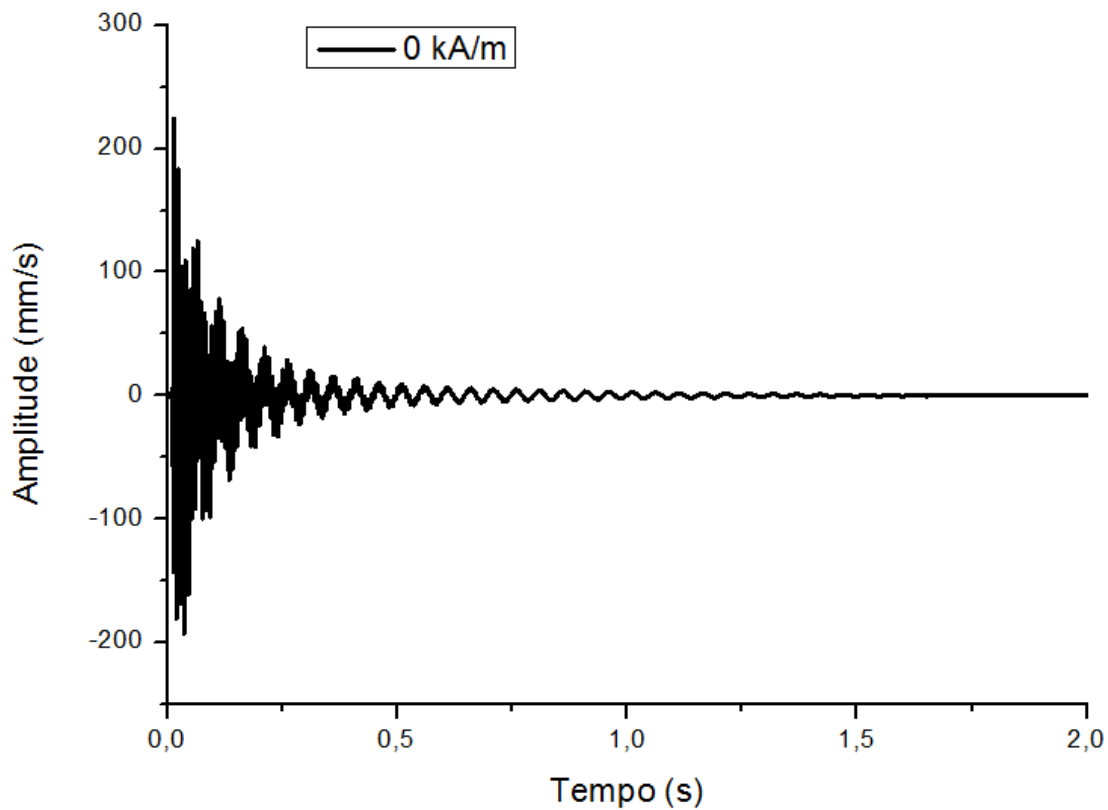


Figura 37 – Resposta de velocidade no tempo para o CP8 com geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética HS, sem campo magnético aplicado.

Com o intuito de determinar o fator de amortecimento das curvas com proximidade da Figura 37, foi confeccionado um ajuste pelo método dos mínimos quadrados não linear. Foi utilizado uma solução analítica como resposta dada por Harris e Pierson (2002), *apud* Souza (2015). A Equação 2 se refere à equação em deslocamento e a Equação 3, em velocidade, da vibração livre de um sistema com um grau de liberdade, assumindo fatores de amortecimento menores que 1.

$$y(t) = e^{-\zeta\omega_n t} [A \cos(\omega_d t) + B \sin(\omega_d t)] \quad (2)$$

$$\dot{y}(t) = -\zeta\omega_n \left[\frac{A \cos(\omega_d t) + B \sin(\omega_d t)}{e^{\zeta\omega_n t}} \right] - \left[\frac{A\omega_d \sin(\omega_d t) - B\omega_d \cos(\omega_d t)}{e^{\zeta\omega_n t}} \right] \quad (3)$$

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

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (4)$$

Junto a um aplicativo computacional a Equação 4 foi incrementada, no qual os valores utilizados nas constantes e o valor do fator de amortecimento tiveram seus valores iniciais inseridos pelo usuário. A Figura 38 representa um ajuste confeccionado para o exemplo da Figura 37, assim como os quatro parâmetros da resposta analítica que foram apresentadas, sendo eles constantes arbitrárias A e B, o fator de amortecimento ajustado é representado pela letra r . Adj. R-Square na tabela da Figura 38 é o coeficiente de determinação que foi obtido pelo aplicativo computacional, pois indica o ajuste do modelo estatístico ou, no caso, da Equação 3 com os dados ou a curva experimental obtida no ensaio de vibração livre. A nomenclatura R^2 é o coeficiente de determinação que será apresentado nas figuras abaixo.

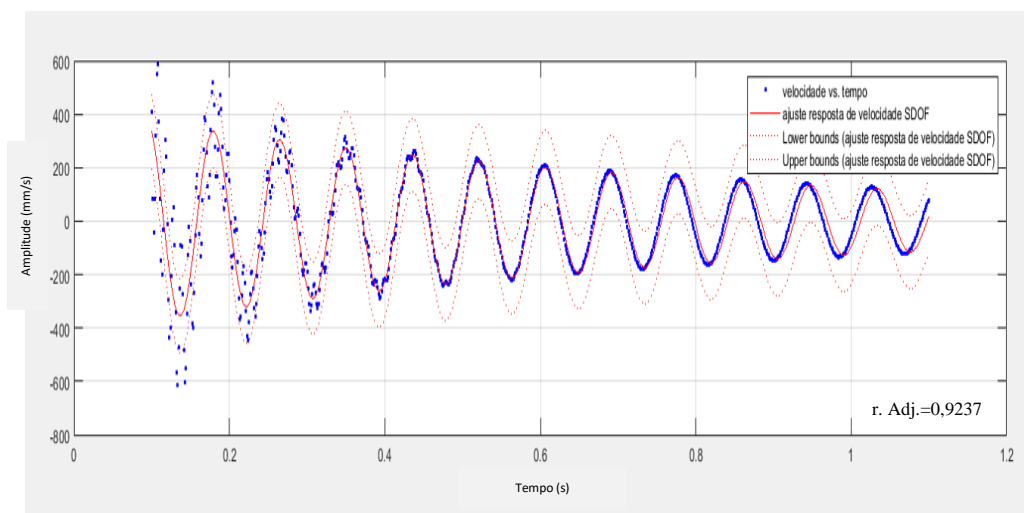


Figura 38 – Ajuste da curva de amplitude no tempo para a amostra CP8 de geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética HS, sem campo magnético aplicado.

Analisando a Figura 38, o valor do fator de amortecimento ζ é de 0,01627 ao passo que o ajuste realizado teve um coeficiente de determinação R^2 de 0,92, sendo que representa uma forte relação entre a curva obtida experimentalmente e o ajuste que foi realizado. Todos os ajustes realizados para as demais curvas dos ensaios de vibração livre citados no subitem 5.2.1.1 estão presentes no Apêndice A no fim dessa dissertação, sendo que são muitos gráficos para serem inseridos no corpo dessa dissertação. Os valores do fator de amortecimento ζ e do coeficiente de determinação R^2 para todos os ajustes realizados estão presentes nas Tabelas de 19 a 26. Nas tabelas a coluna de *Varição (%)* foi retirada da Equação 1 fazendo a troca dos valores de cada frequência pelo valor do fator de amortecimento.

Pode-se observar que as tabelas possuem bons valores de R^2 , garantindo que os ajustes realizados são confiáveis e as curvas ajustadas são eficientes para representar as curvas experimentais. Vale ressaltar que os valores obtidos para os fatores de amortecimento são valores aproximados, adquiridos a partir de um ajuste, ou seja, a partir de um modelo teórico analítico.

Tabela 19 - Fatores de amortecimento obtidos pelos ajustes das curvas de amplitude no tempo para o CP1 com geometria quadrada, polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet.

		Fator de amortecimento (ζ)	Coefficiente de determinação (R^2)	Varição (%)
Campo (kA/m)	0	0,02377	0,2970	0,00
	100	0,03152	0,5709	-32,604

Tabela 20 – Fatores de amortecimento obtidos pelos ajustes das curvas de amplitude no tempo para o CP2 com geometria hexagonal, polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet.

		Fator de amortecimento (ζ)	Coefficiente de determinação (R^2)	Varição (%)
Campo (kA/m)	0	0,01508	0,8763	0,00
	100	0,04700	0,7558	-211,671

Tabela 21 – Fatores de amortecimento obtidos pelos ajustes das curvas de amplitude no tempo para o CP3 com geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética Atomet.

		Fator de amortecimento (ζ)	Coefficiente de determinação (R^2)	Varição (%)
Campo (kA/m)	0	0,01622	0,8128	0,00
	100	0,07959	0,7660	-390,691

Tabela 22 – Fatores de amortecimento obtidos pelos ajustes das curvas de amplitude no tempo para o CP4 com geometria hexagonal, argila SD3 e partícula ferromagnética Atomet.

		Fator de amortecimento (ζ)	Coefficiente de determinação (R^2)	Varição (%)
Campo (kA/m)	0	0,01744	0,7711	0,00
	100	0,07331	0,7732	-320,356

Tabela 23 – Fatores de amortecimento obtidos pelos ajustes das curvas de amplitude no tempo para o CP5 de geometria quadrada, polímero Kraton e partícula ferromagnética HS.

		Fator de amortecimento (ζ)	Coefficiente de determinação (R^2)	Varição (%)
Campo (kA/m)	0	0,01758	0,8025	0,00
	100	0,03052	0,8832	-73,606

Tabela 24 – Fatores de amortecimento obtidos pelos ajustes das curvas de amplitude no tempo para o CP6 com geometria hexagonal, polímero Kraton e partícula ferromagnética HS.

		Fator de amortecimento (ζ)	Coefficiente de determinação (R^2)	Varição (%)
Campo (kA/m)	0	0,01422	0,9052	0,00
	100	0,03394	0,9195	-138,678

Tabela 25 – Fatores de amortecimento obtidos pelos ajustes das curvas de amplitude no tempo para o CP7 de geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética HS.

		Fator de amortecimento (ζ)	Coefficiente de determinação (R^2)	Varição (%)
Campo (kA/m)	0	0,01627	0,8410	0,00
	100	0,05996	0,7813	-268,531

Tabela 26 - Fatores de amortecimento obtidos pelos ajustes das curvas de amplitude no tempo para o CP8 de geometria hexagonal, argila SD3 e partícula ferromagnética HS.

		Fator de amortecimento (ζ)	Coefficiente de determinação (R^2)	Varição (%)
Campo (kA/m)	0	0,01457	0,9237	0,00
	100	0,05175	0,8569	-255,182

Como pode ser observado nas Tabelas 19 a 26, como as frequências naturais interage com o campo magnético aplicado, o mesmo ocorre com o fator de amortecimento.

Na Figura 39 é mostrado de forma abreviada as informações que estão inseridas nas tabelas citadas que tem como referência a variação do fator de amortecimento ζ dos corpos de prova com o aumento do campo magnético aplicado.

O fator de amortecimento que foi ilustrado na Figura 39 conforme o campo magnético foi sendo aumentado para os oito corpos de prova, essa figura nota-se o aumento significativo do fator de amortecimento para o corpo de prova CP3 que possui geometria quadrada, argila SD3 e partícula ferromagnética Atomet e para o corpo de prova CP4 que possui geometria hexagonal, argila SD3 e partícula ferromagnética Atomet. Para o corpo de prova CP1 que possui geometria quadrada, polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet notou-se um pequeno aumento nos valores dos fatores de amortecimento com o aumento do campo magnético.

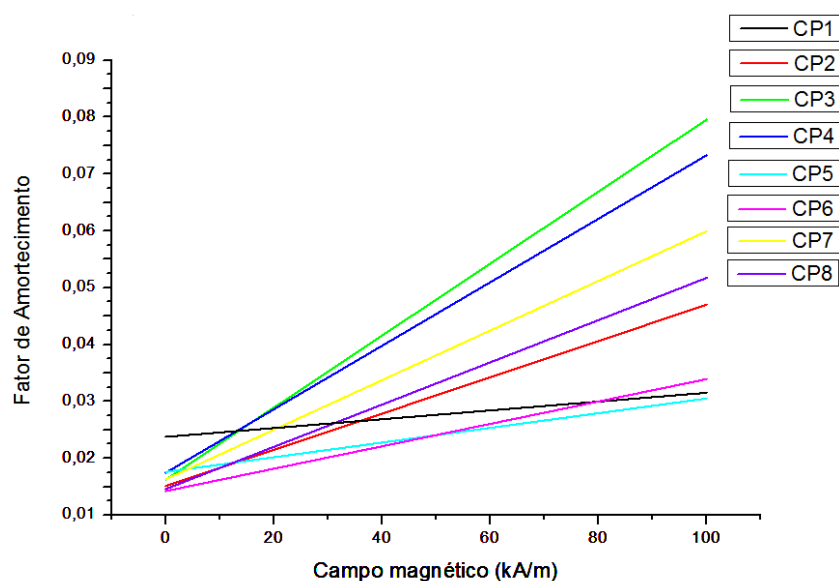


Figura 39 - Variação dos fatores de amortecimento em relação ao campo magnético aplicado para o primeiro modo de vibração.

A Tabela 27 mostra a variação dos fatores de amortecimento em ordem decrescente.

Tabela 27 – Variação dos fatores de amortecimento em ordem decrescente.

Corpo de prova	Varição (%)
CP3	-390
CP4	-320
CP7	-268
CP8	-255
CP2	-211
CP6	-198
CP5	-73
CP1	-32

Considerando-se a Figura 39 e Tabela 27 mostra que o comportamento do fator de amortecimento com o aumento do campo magnético para os corpos de prova CP1 foi bem mais baixo comparado aos outros corpos de prova, isso se deve ao fato de que o ajuste da curva para esse corpo de prova ficou abaixo dos 60%, resultando uma resposta abaixo do esperado. Mas os demais corpos de prova obtiveram um ajuste de curva acima de 75%, mostrando uma boa relação entre o ajuste realizado e a curva obtida experimentalmente.

Para se ter um direcionamento em relação a ordem de grandeza para os fatores de amortecimento em relação a encontrada na literatura, foram encontrados materiais compósitos obtidos a partir de fibra de vidro e de carbono. Valores de amortecimento que variam foram encontrados em trabalhos, Eloy *et al.* (2018) mostra que o fator de amortecimento obteve uma variação de 0,0029 para 0,0084 para compósito tipo sanduíche com colmeia em PLA contendo 60% de partículas magnéticas com resina epóxi e fibra de carbono com 6000 filamentos por cabo de urdume e trama, o trabalho de Ancelotti Jr. (2006), mostra que a variação de amortecimento foi-se de 0,0063 a 0,0075 para compósitos de resina epóxi e fibra de carbono, com uma deposição de 16 camadas de tecido bidirecional de fibra de carbono (0°, 90°). Tauchert (1971), obteve fatores de amortecimento de 0,0054 para um compósito de fibra de carbono (0°,90°) com uma matriz em resina fenólica. Os fatores de amortecimento encontrados na literatura são valores muito pequenos, pois a fibra de carbono tem uma contribuição expressivamente rígida e de baixa capacidade de amortecimento. A associação da fibra de vidro ao trabalho é exatamente para aumentar a capacidade de amortecimento das vigas sanduíches, pois os corpos de prova confeccionados com fibra de vidro mostraram maior variação de

amortecimento se comparado aos confeccionados com fibra de carbono. Comparando com a literatura a variação de amortecimento com fibra de vidro obteve uma variação maior que o dobro do que a variação de amortecimento publica por Eloy *et al.* (2018) que foram confeccionadas com fibras de carbono, isso mostra a veracidade das fibras de vidro na capacidade de amortecimento.

Assim com os resultados apresentados, podemos concluir que com o campo magnético aplicado é possível aumentar o amortecimento de vigas sanduíche com núcleo colmeia preenchido com gel magneto reológico. Com o aumento da intensidade do campo magnético, as partículas são mais bem atraídas umas às outras, fazendo assim que o movimento oscilatório das partículas sejam reduzidas, com isso, reduzindo a amplitude de oscilação da viga, contudo o amortecimento em função de sua oscilação tem uma relação direta e exclusiva do campo magnético. Analisando a Equação 4 é possível tirar algumas relações a frequência natural amortecida ω_d e o fator de amortecimento ζ . Analisando-se esta equação com a Figura 39, pode-se confirmar que os parâmetros são inversamente proporcionais pois a frequência amortecida diminui com o aumento do campo, e o fator de amortecimento aumenta. Pode-se dizer que as vigas têm uma tendência que o fator de amortecimento é uma propriedade diretamente proporcional ao campo magnético.

O estudo nos dá uma compreensão de que pode ser aplicado em projetos que necessitem de respostas rápidas as propriedades de amortecimento de vigas em um curto espaço de tempo, assim, pode causar à estrutura uma maior resistência à fadiga.

4.2 – Resultados do Ensaio de Vibração Forçada

Será apresentado nesse subcapítulo os resultados obtidos nos ensaios de vibração forçada. Com a ajuda de um *Shaker*, as vigas foram engastadas ao equipamento e excitadas dinamicamente em suas frequências de ressonância. A frequência de estimulação das oito vigas sanduíches que foram ensaiadas estão presentes na Tabela 28. Essa frequência de estimulação é referente ao primeiro modo de vibração das vigas que foram engastadas ao *Shaker*, na ausência de um campo magnético aplicado. Assim, com o avanço do ensaio, a frequência que estimulava a viga era mantida e apenas o campo magnético foi alterado, resultando assim o efeito do campo sobre uma viga em ressonância.

Tabela 28 – Frequências de excitação de cada corpo de prova no ensaio de vibração forçada sem campo magnético aplicado.

Corpo de prova	Frequência de Ressonância (Hz)
CP1	20,14
CP2	13,91
CP3	14,64
CP4	13,54
CP5	18,31
CP6	12,81
CP7	11,71
CP8	12,81

4.2.1 – Variação de Amplitude

A variação da amplitude de vibração é mostrada nas Figuras 40 a 47, dada em mm/s pelo tempo, em segundos, em relação ao campo magnético aplicado.

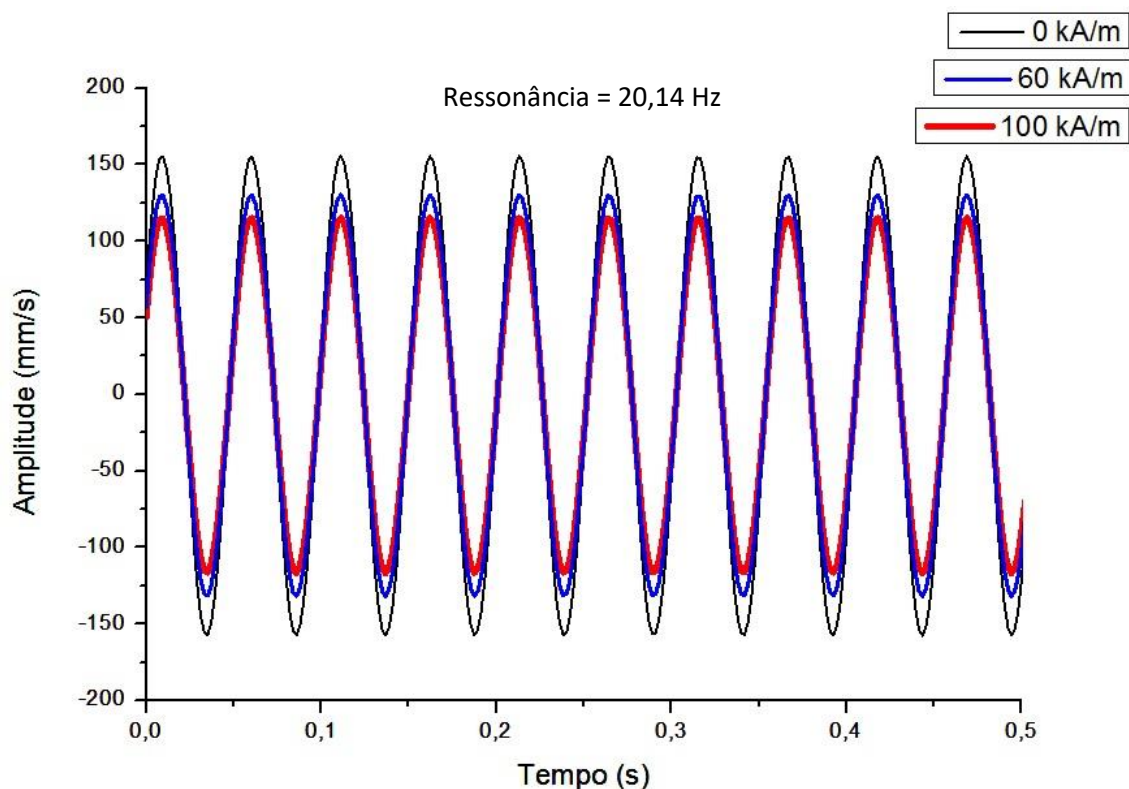


Figura 40 – Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga colmeia CP1 com geometria quadrada, polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet. Frequência de excitação de 20,14 Hz.

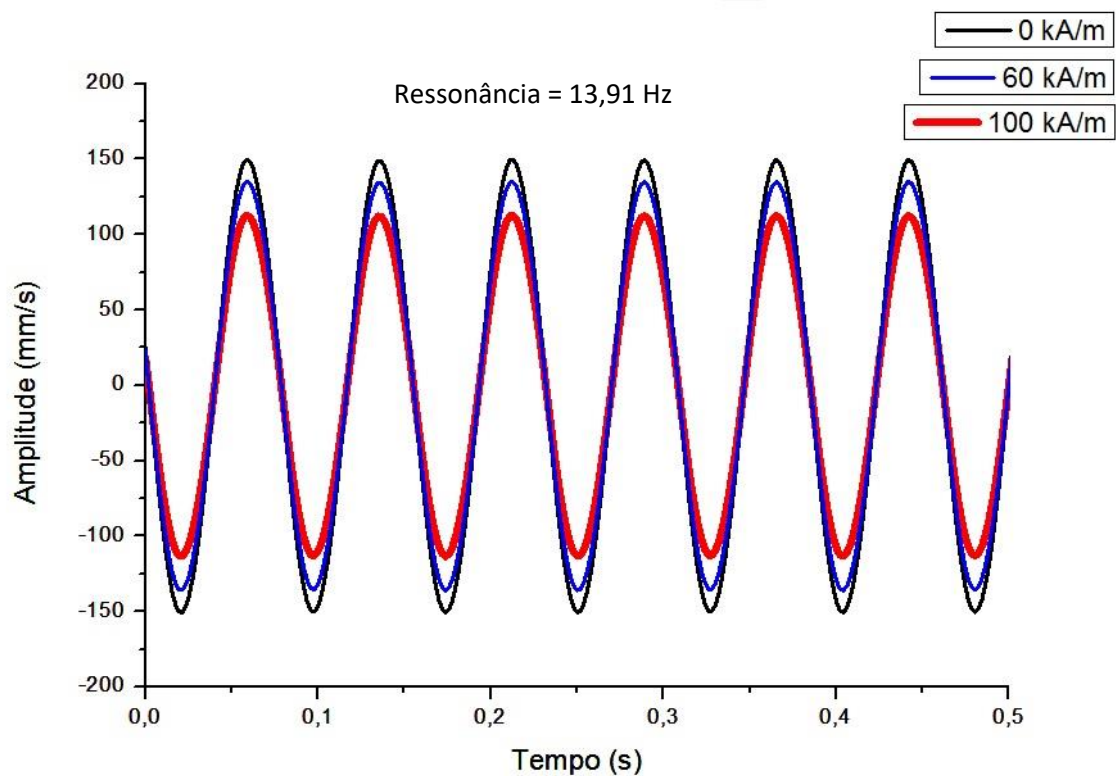


Figura 41 - Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga colmeia CP2 com geometria hexagonal, polímero Kraton e partícula ferromagnética Atomet. Frequência de excitação de 13,91 Hz.

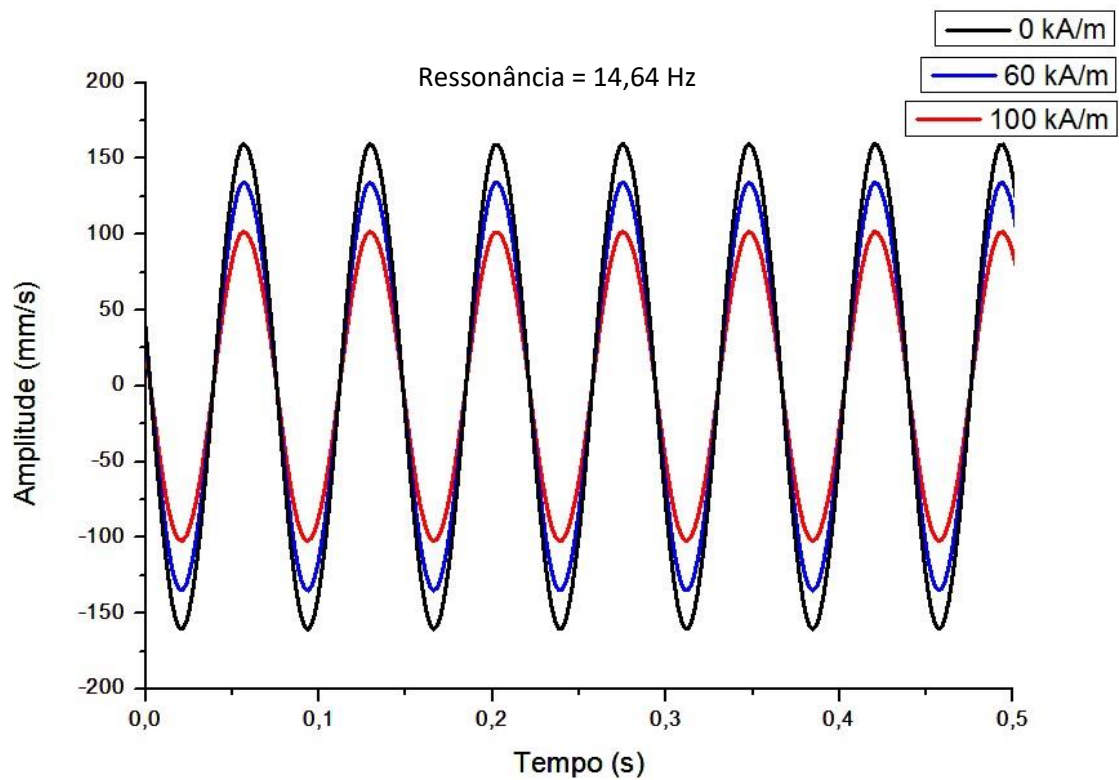


Figura 42 - Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga colmeia CP3 com geometria quadrada, polímero SD3 e partícula ferromagnética Atomet. Frequência de excitação de 13,91 Hz

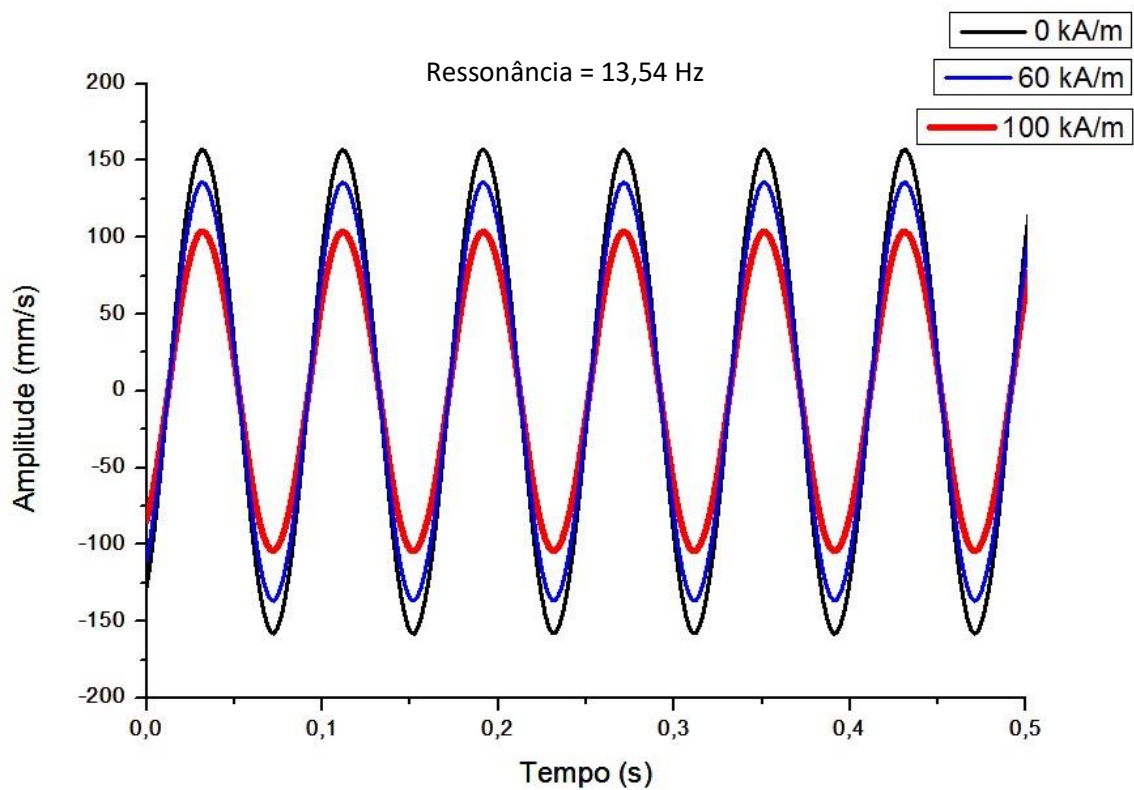


Figura 43 - Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga colmeia CP4 com geometria hexagonal, polímero SD3 e partícula ferromagnética Atomet. Frequência de excitação de 13,54 Hz.

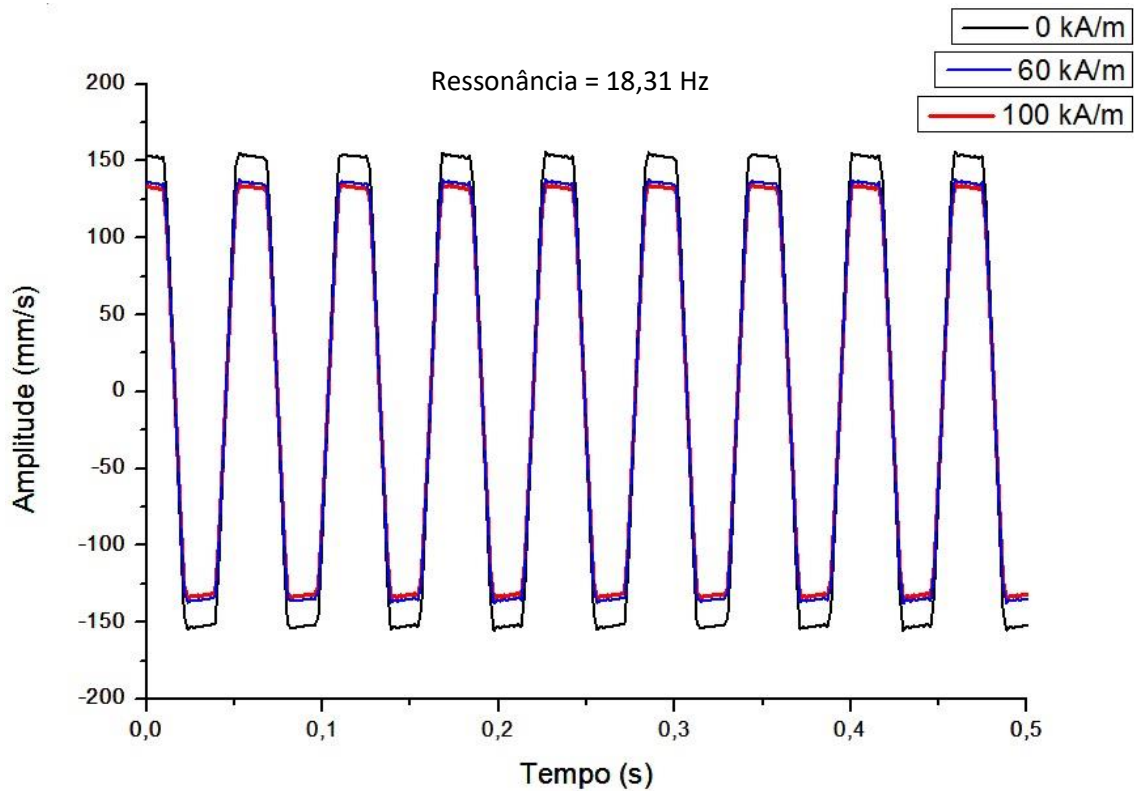


Figura 44 - Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga colmeia CP5 com geometria quadrada, polímero Kraton e partícula ferromagnética HS. Frequência de excitação de 18,31 Hz.

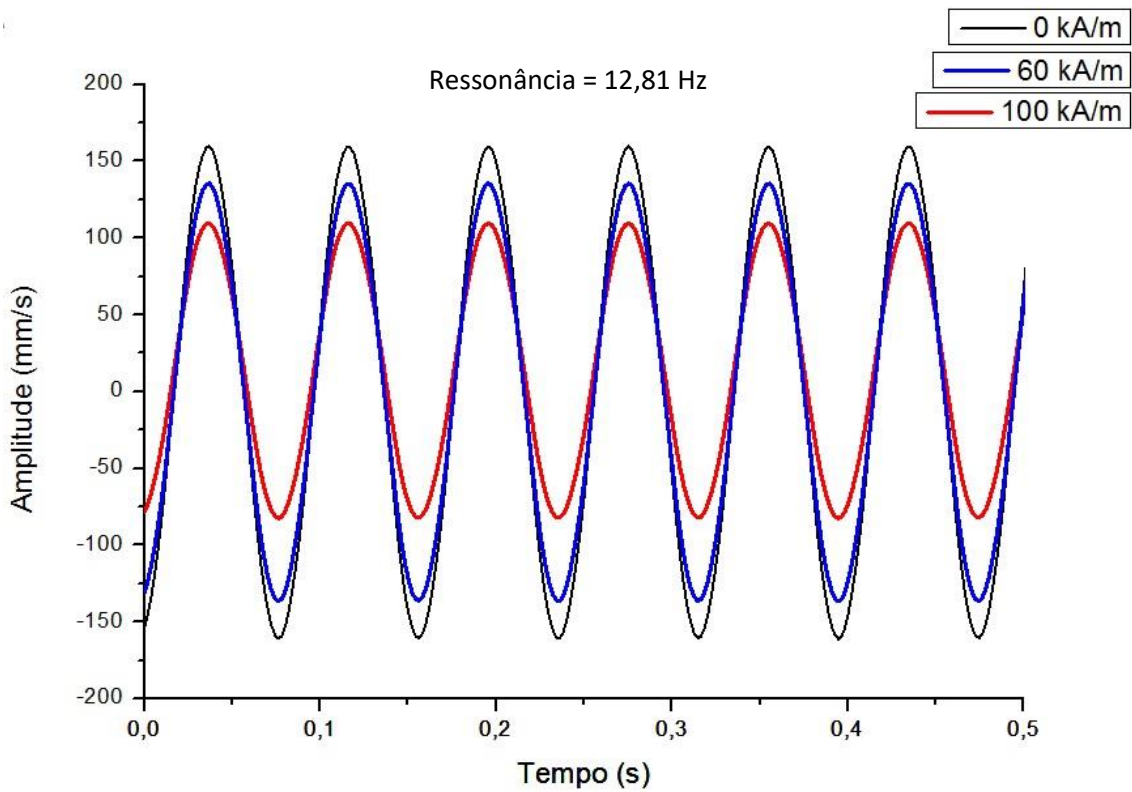


Figura 45 – Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga colmeia CP6 com geometria hexagonal, polímero Kraton e partícula ferromagnética HS. Frequência de excitação de 12,81 Hz.

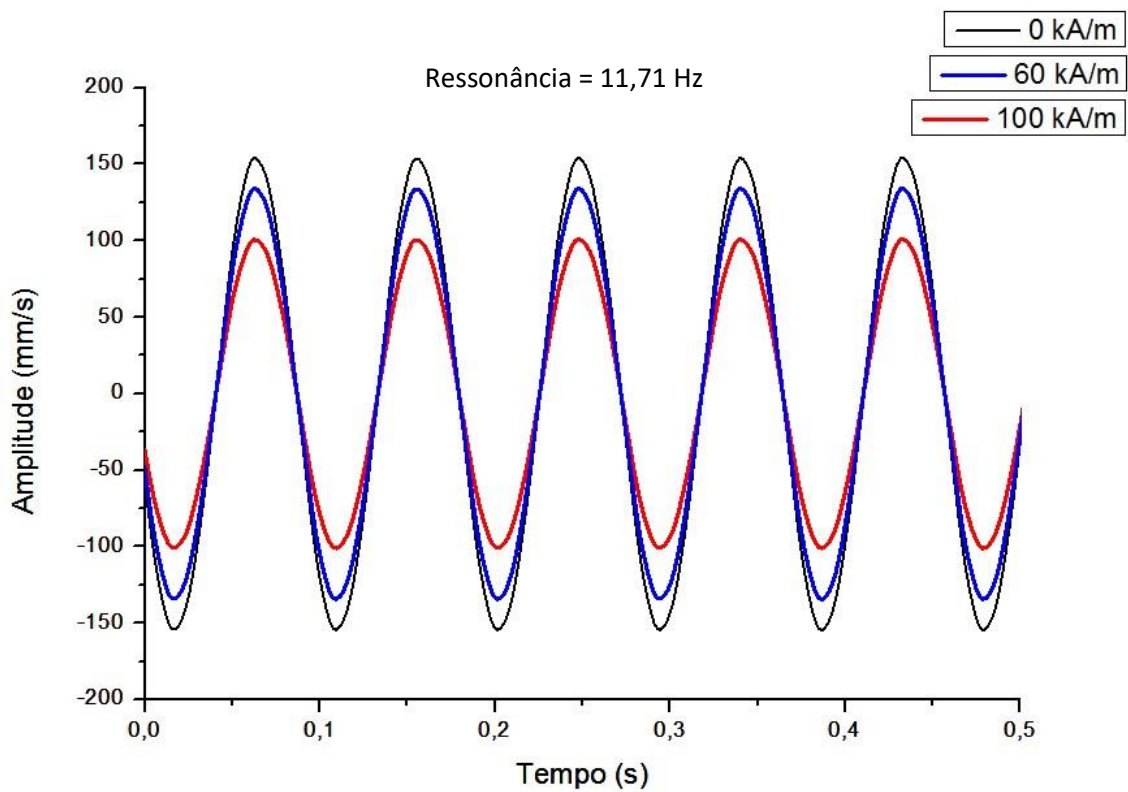


Figura 46 - Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga colmeia CP7 com geometria quadrada, polímero SD3 e partícula ferromagnética HS. Frequência de excitação de 11,71 Hz.

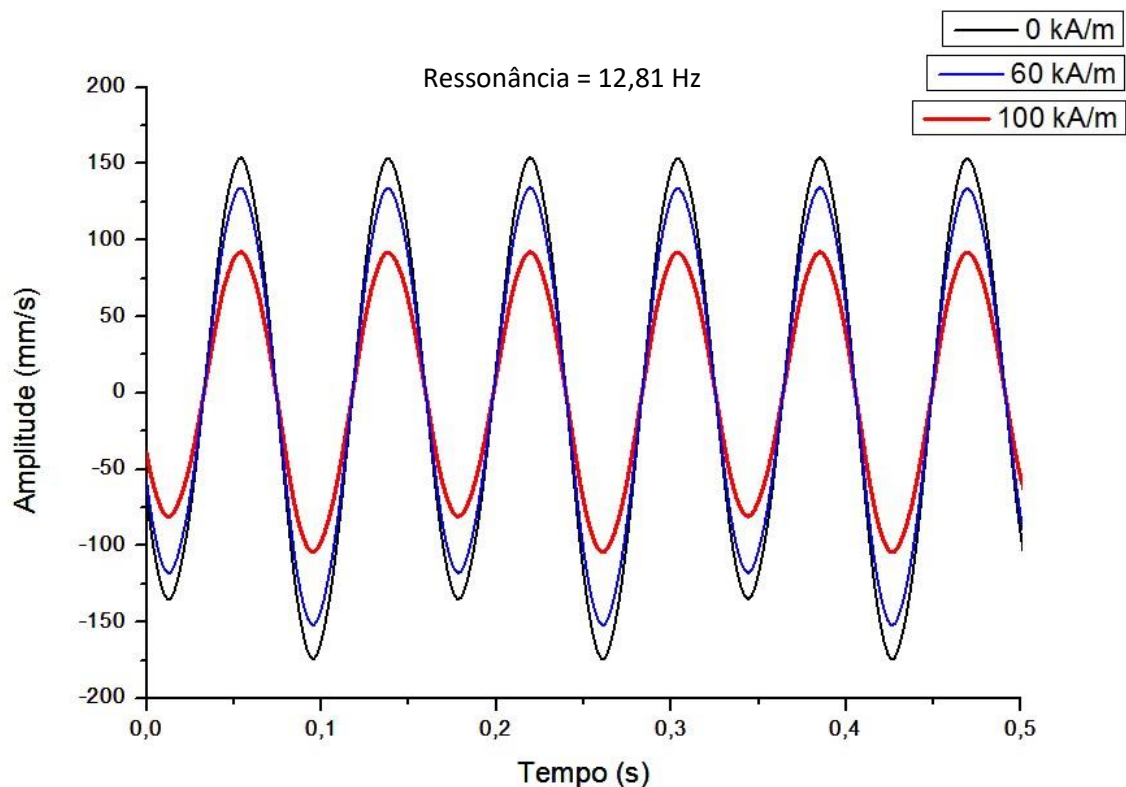


Figura 47 - Variação da amplitude de vibração pelo tempo para a viga colmeia CP8 com geometria hexagonal, polímero SD3 e partícula ferromagnética HS. Frequência de excitação de 12,81 Hz.

Como foi observado houve redução nas amplitudes de vibração quando se aumentou a intensidade do campo magnético, esse mesmo fenômeno foi observado no trabalho escrito por Eloy *et al.* (2018) e Chikh *et al.* (2016). Fazendo a comparação entre as amplitudes dos oito corpos de prova na ausência de campo e com campo aplicado de 100 kA/m, nota-se o seguinte: O corpo de prova 1 (CP1) na ausência de campo magnético, obteve amplitude média de 155 mm/s, quando o campo de 100 kA/m foi aplicado obteve amplitude média de 115 mm/s, uma redução de 25,81% na amplitude de vibração. O corpo de prova 2 (CP2) na ausência de campo magnético, obteve amplitude média de 149 mm/s, quando o campo de 100 kA/m foi aplicado obteve amplitude média de 112 mm/s, uma redução de 24,83% na amplitude de vibração. O corpo de prova 3 (CP3) na ausência de campo magnético, obteve amplitude média de 160 mm/s, quando o campo de 100 kA/m foi aplicado obteve amplitude média de 101 mm/s, uma redução de 36,88% na amplitude de vibração. O corpo de prova 4 (CP4) na ausência de campo magnético, obteve amplitude média de 157 mm/s, quando o campo de 100 kA/m foi aplicado obteve amplitude média de 103 mm/s, uma redução de 34,39% na amplitude de vibração. O corpo de prova 5 (CP5) na ausência de campo magnético, obteve amplitude média de 156

mm/s, quando o campo de 100 kA/m foi aplicado obteve amplitude média de 135 mm/s, uma redução de 13,46% na amplitude de vibração. O corpo de prova 6 (CP6) na ausência de campo magnético, obteve amplitude média de 159 mm/s, quando o campo de 100 kA/m foi aplicado obteve amplitude média de 103 mm/s, uma redução de 35,22% na amplitude de vibração. O corpo de prova 7 (CP7) na ausência de campo magnético, obteve amplitude média de 154 mm/s, quando o campo de 100 kA/m foi aplicado obteve amplitude média de 100 mm/s, uma redução de 35,06% na amplitude de vibração. O corpo de prova 8 (CP8) na ausência de campo magnético, obteve amplitude média de 154 mm/s, quando o campo de 100 kA/m foi aplicado obteve amplitude média de 92 mm/s, uma redução de 40,26% na amplitude de vibração. As amplitudes de vibração na ausência de campo foram selecionadas de acordo com frequência de ressonância do ensaio de vibração livre, e as amplitudes selecionadas do gráfico gerado por cada frequência de ressonância. A maior redução porcentual na amplitude de vibração na qual foi utilizado um campo de 100 kA/m foi o corpo de prova CP8 que constitui de uma geometria hexagonal, polímero SD3 e partícula ferromagnética HS seguida do corpo de prova CP3 que constitui de uma geometria quadrada, polímero SD3 e partícula ferromagnética Atomet. A Tabela 29 a seguir apresenta os corpos de prova e suas respectivas variações de amplitude em ordem decrescente.

Tabela 29 – Corpos de prova e respectivas variações de amplitude em ordem decrescente.

Corpo de prova	Varição (%)
CP8	40,26
CP3	36,88
CP6	35,22
CP7	35,06
CP4	34,39
CP1	25,81
CP2	24,83
CP5	13,46

Entre os cinco primeiros corpos de prova que obtiveram melhores resultados em relação a redução da amplitude de vibração, quatro (CP1, CP3, CP7 e CP4) foram confeccionados com o polímero SD3 em sua composição.

Todos os resultados que foram obtidos nos ensaios de vibração com campo aplicado se mostram significativos, pois assim que é iniciada a ressonância de uma estrutura que possua núcleo preenchido com partículas magnéticas é possível aplicar a ela um campo magnético afim de reduzir a sua amplitude de vibração, possibilitando retardar

os efeitos degenerativos causados por sua ressonância, como exemplo, o colapso da estrutura. Com isso se ganha vida útil há estrutura e tempo para realização de recuperação necessárias antes de algum colapso catastrófico.

4.3 - Análise Estatística

Neste subcapítulo visa apresentar os resultados da análise de significância dos fatores de entrada que influenciam a frequência natural, amortecimento e variação da amplitude. Este procedimento será feito utilizando-se a metodologia do DOE (Design of Experiments).

A forma adotada de analisar as variáveis de influência constituíram das respostas obtidas nos ensaios de vibração livre e forçada. Consistiu-se em um planejamento de experimentos por meio de análise fatorial de 2 níveis, que tem como resultado $2^3=8$ experimentos, na qual foi montado a Tabela 30, que se segue abaixo.

Tabela 30 – Resumo dos fatores de entrada e resposta do delta de frequência natural, amortecimento e amplitude

Experimento	Geometria	Gel	Partícula	$\Delta f_1(\%)$	$\Delta \zeta(\%)$	$\Delta A(\%)$
1	quadrada	Kraton	Atomet	27,31	-32,60	25,81
2	hexagonal	Kraton	Atomet	44,72	-211,67	24,83
3	quadrada	SD3	Atomet	47,68	-390,69	36,88
4	hexagonal	SD3	Atomet	51,33	-320,36	34,39
5	quadrada	Kraton	HS	20,04	-73,61	13,46
6	hexagonal	Kraton	HS	37,16	-138,68	35,22
7	quadrada	SD3	HS	50,04	-268,53	35,06
8	hexagonal	SD3	HS	54,33	-255,18	40,26

Os resultados obtidos neste subcapítulo são relacionados a análise estatística dos ensaios realizados.

4.3.1 – Frequências Naturais

Os resultados mostrados a seguir são referentes as variáveis de influência da frequência natural com base no ensaio realizado de vibração livre.

As Figuras 48 a 50 representa os gráficos de Pareto dos efeitos combinados quando os corpos de prova foram submetidos a campos de 100kA/m.

A Figura 48 a seguir mostra o gráfico de Pareto dos efeitos do primeiro modo de frequência natural, Figura 49 o gráfico dos efeitos principais para o primeiro modo de

frequência natural, Figura 50 o gráfico dos efeitos das interações para o primeiro modo de frequência natural.

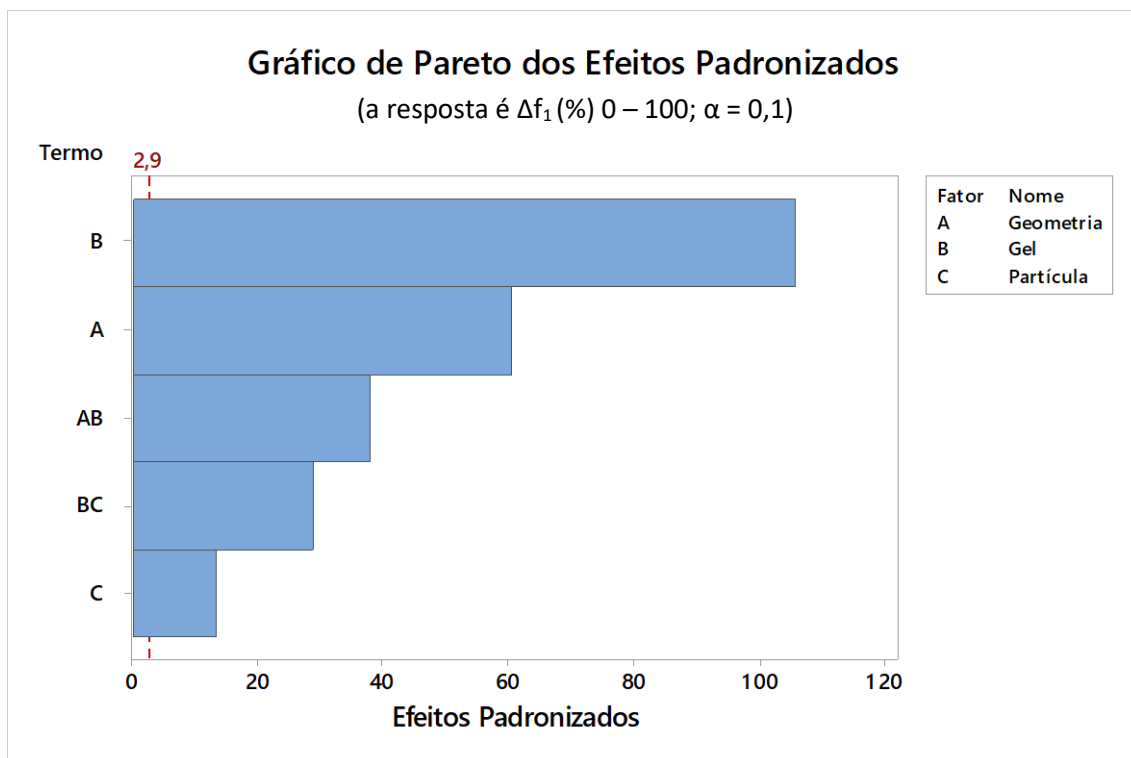


Figura 48 – Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados do primeiro modo de frequência natural.

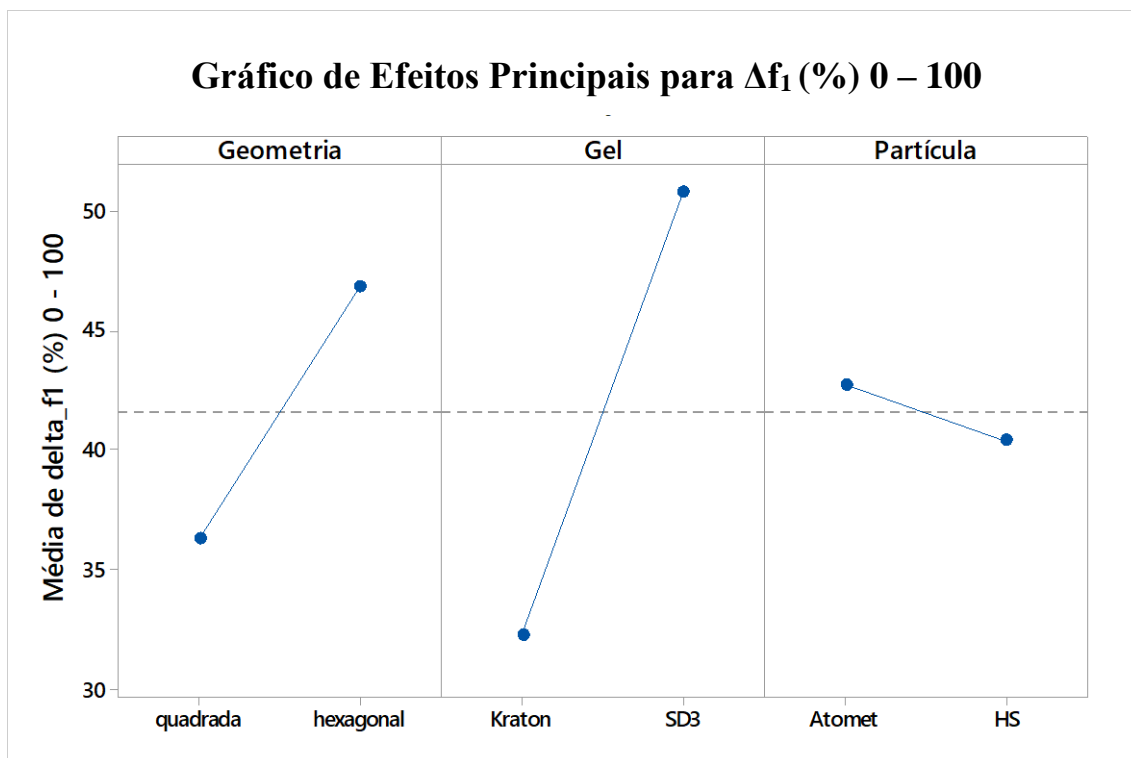


Figura 49 – Gráfico dos efeitos principais para o primeiro modo de frequência natural.

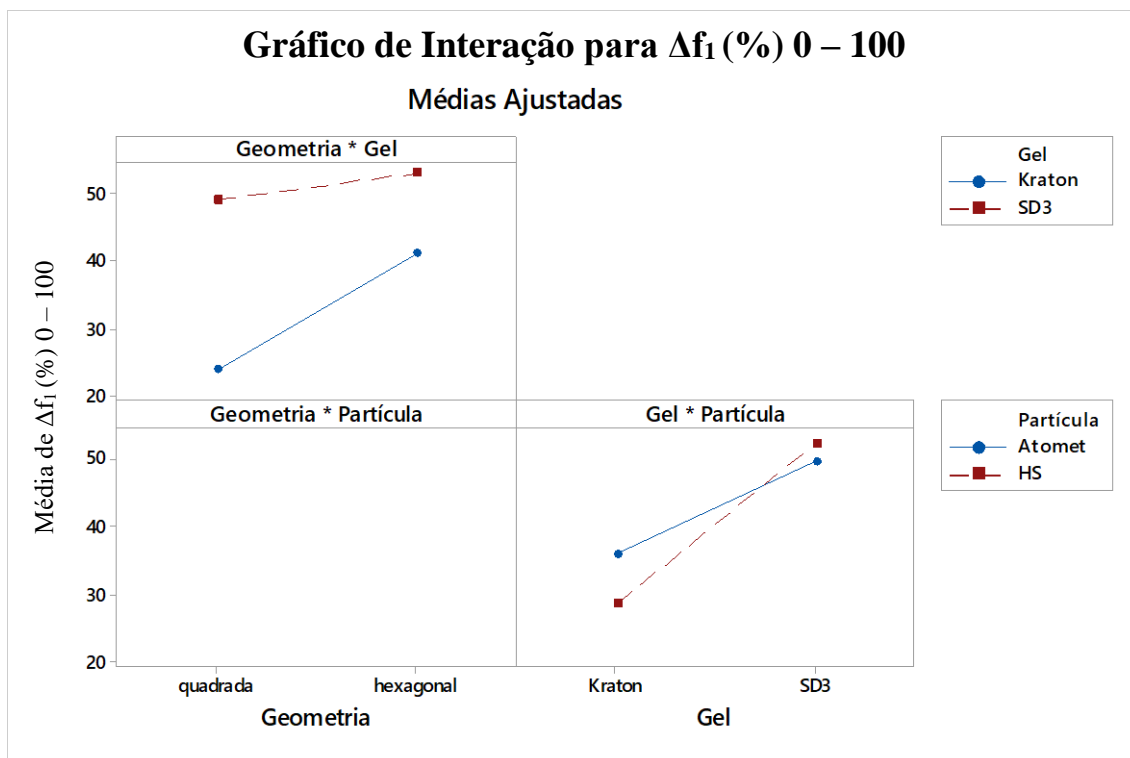


Figura 50 - Gráfico dos efeitos das interações para o primeiro modo de frequência natural.

A Tabela 31 mostra a análise da variância referente ao primeiro modo de vibração.

Tabela 31 - Análise da variância para o primeiro modo de frequência natural.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	5	1063,11	212,623	3467,68	0,000
Linear	3	923,85	307,949	5022,36	0,000
Geometria	1	225,36	225,357	3675,36	0,000
Gel	1	687,31	687,307	11209,36	0,000
Partícula	1	11,18	11,182	182,37	0,005
Interações de 2 fatores	2	139,27	69,634	1135,67	0,001
Geometria*Gel	1	88,29	88,290	1439,93	0,001
Gel*Partícula	1	50,98	50,978	831,40	0,001
Erro	2	0,12	0,061		
Total	7	1063,24			

A Tabela 32 mostra o sumário do modelo para o primeiro modo de vibração.

Tabela 32 - Sumário do modelo para o primeiro modo de vibração.

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,247620	99,99%	99,96%	99,82%

A Equação 5 representa a regressão em unidades não codificada.

$$\Delta f_l = 41,5766 + 5,3075 \text{ Geometria} + 9,2690 \text{ Gel} - 1,1823 \text{ Partícula} \quad (5) \\ - 3,3221 \text{ Geometria} \times \text{Gel} + 2,5243 \text{ Gel} \times \text{Partícula}$$

Os resultados para o segundo e terceiro modo de vibração foram desconsiderados devido a não ter resultados satisfatórios na variação de frequência com o aumento do campo magnético, diferente do primeiro modo de vibração, que obteve excelentes respostas.

Os resultados conferidos nos gráficos de Pareto, dos efeitos individuais das variáveis e os efeitos das interações, são analisados de acordo com as retas geradas no gráfico, sendo que os efeitos mais significativos são aqueles cujas retas apresentam maior inclinação. É possível observar na Figura 49 que o gel pode ser uma variável com influência significativa, pois a média da variação Δf_l , que corresponde a variação da frequência, apresenta grande inclinação. O mesmo ocorre para a variável geometria, que exerce uma influência significativa na variação da frequência. A variável partícula se mostrou a que menos exerceu influência sobre a viga sanduíche, contudo quando analisamos a Figura 50 notamos paralelismo entre geometria e gel, mas entre gel e partícula se mostrou um resultado significativo.

Podemos concluir que para os efeitos principais, gel e geometria se mostraram muito significativos e para o resultado das interações, gel e partícula exerce uma significância na variação da frequência.

4.3.2 – Fatores de Amortecimento

Os resultados mostrados a seguir são referentes as variáveis de influência aos fatores de amortecimento com base no ensaio realizado de vibração livre.

As Figuras 51 a 53 representa os gráficos de Pareto dos efeitos combinados quando os corpos de prova foram submetidos a campos de 100kA/m.

A Figura 51 a seguir mostra o gráfico de Pareto dos efeitos do amortecimento quando aplicado um campo de 100kA/m ao corpo de prova. Figura 52 o gráfico dos efeitos principais para o amortecimento, Figura 53 o gráfico dos efeitos das interações para o amortecimento das vigas.

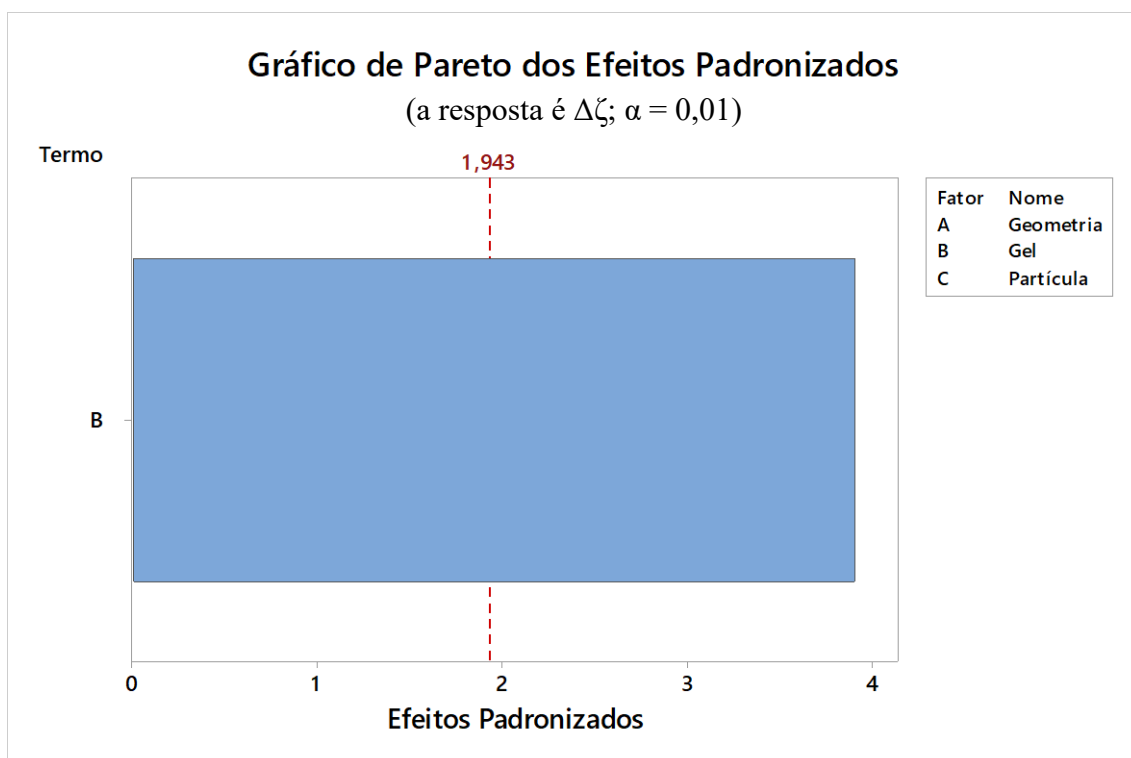


Figura 51 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados de amortecimento.

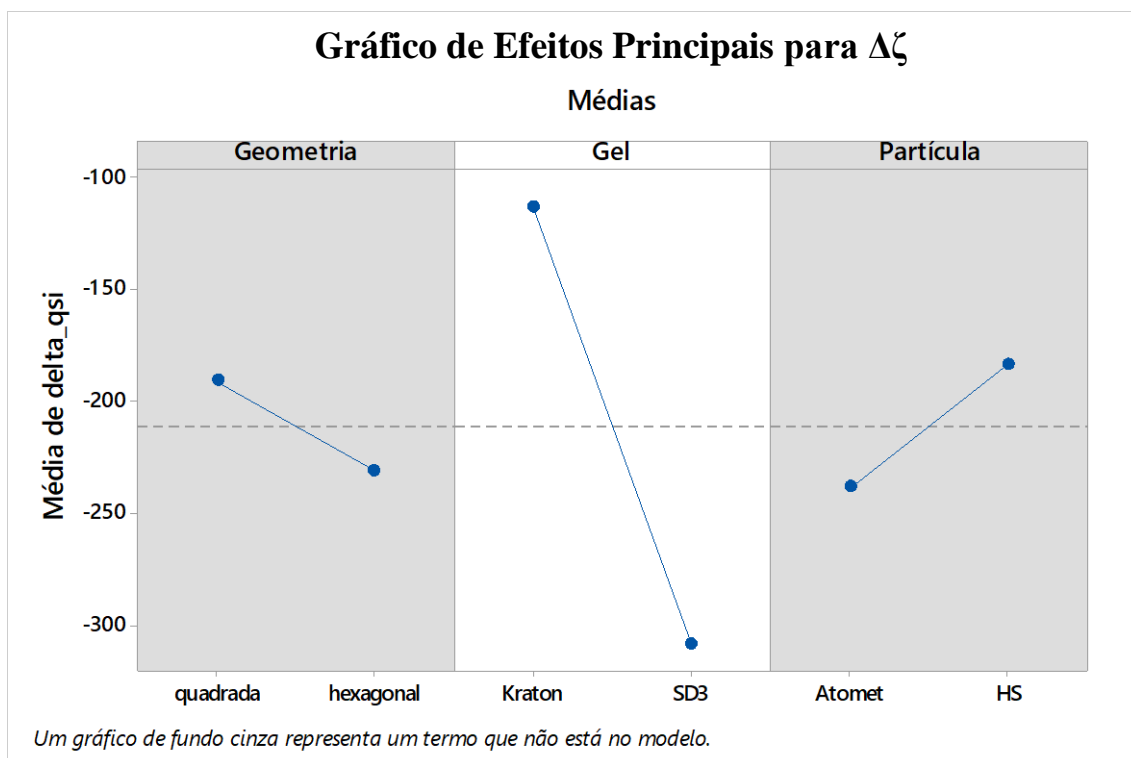


Figura 52 - Gráfico dos efeitos principais para o amortecimento.

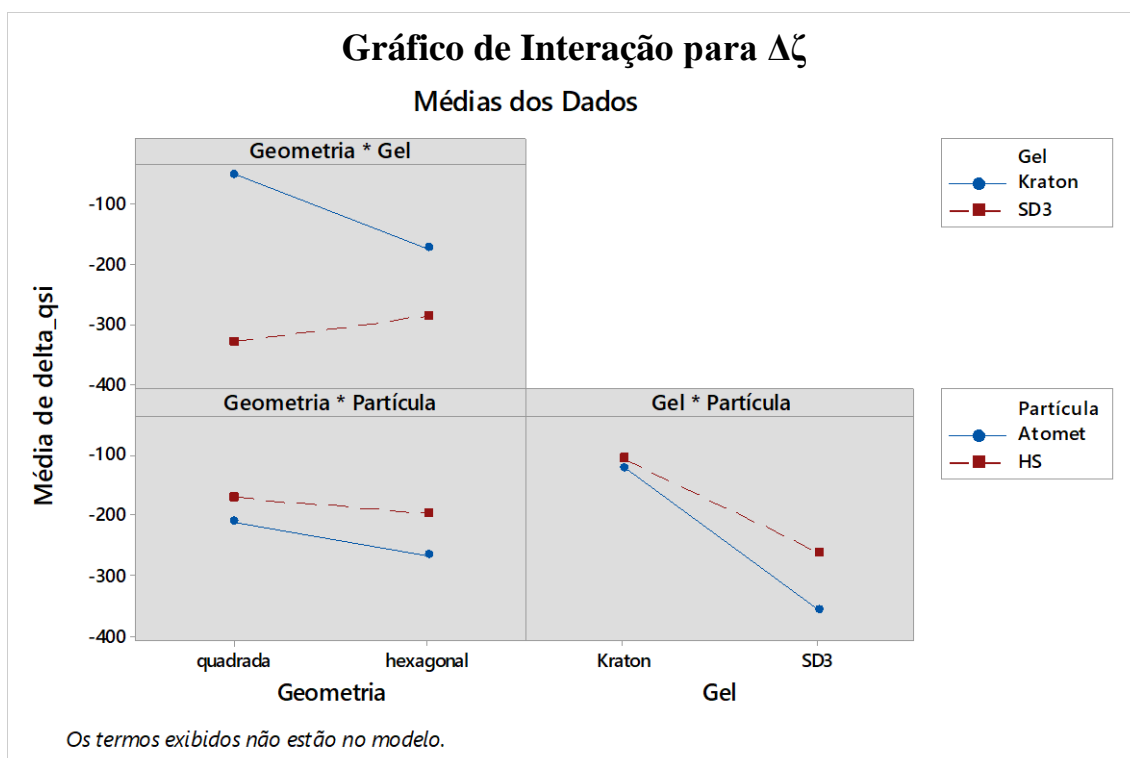


Figura 53 - Gráfico dos efeitos das iterações para o amortecimento.

A Tabela 33 mostra a análise da variância referente ao amortecimento.

Tabela 33 - Análise da variância para o amortecimento.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	1	75699	75699	15,27	0,008
Linear	1	75699	75699	15,27	0,008
Gel	1	75699	75699	15,27	0,008
Erro	6	29742	4957		
Total	7	105441			

A Tabela 34 mostra o sumário do modelo para o amortecimento.

Tabela 34 - Sumário do modelo para o amortecimento.

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
70,4054	71,79%	67,09%	49,85%

A Equação 6 representa a regressão em unidades não codificada.

$$\Delta\zeta = -211,4 - 97,3 \text{ Gel} \quad (6)$$

É possível observar na Figura 52 que o gel é a única possível variável com influência significativa, pois a média da variação de $\Delta\zeta$, que corresponde a variação de amortecimento, apresenta grande inclinação. As variáveis partícula e geometria não exerceram influência sobre a viga sanduíche para o amortecimento, e quando analisamos a Figura 53 notamos que não há interação sobre os resultados que trouxeram significância para o experimento. Podemos concluir que para o amortecimento nas vigas sanduíche apenas uma variável se mostrou significativa que foi o gel.

4.3.3 – Variação de Amplitude

Os resultados mostrados a seguir são referentes as variáveis de influência a variação de amplitude com base no ensaio realizado de vibração forçada.

As Figuras 54 a 56 representa os gráficos de Pareto dos efeitos padronizados quando os corpos de prova foram submetidos a campos de 100kA/m.

A Figura 54 a seguir mostra o gráfico de Pareto dos efeitos da variação da amplitude quando aplicado um campo de 100kA/m ao corpo de prova. Figura 55 o gráfico dos efeitos principais para a variação da amplitude, Figura 56 o gráfico dos efeitos das interações para a variação da amplitude das vigas.

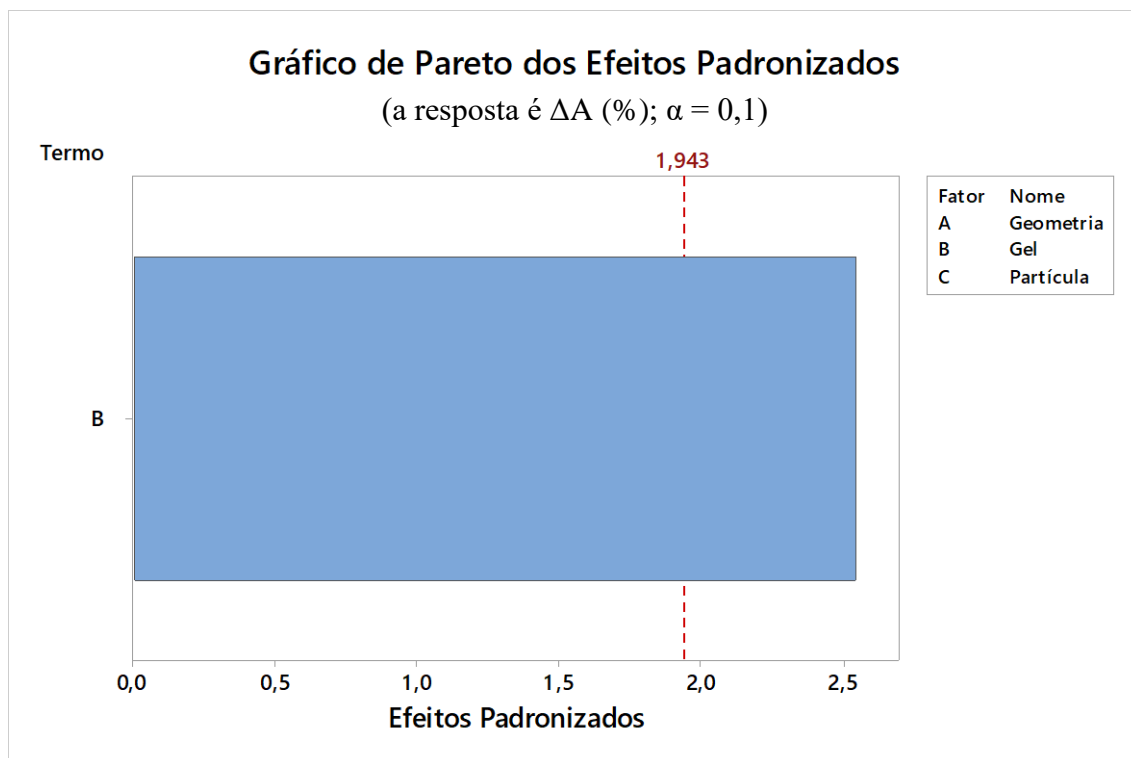


Figura 54 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados da amplitude.

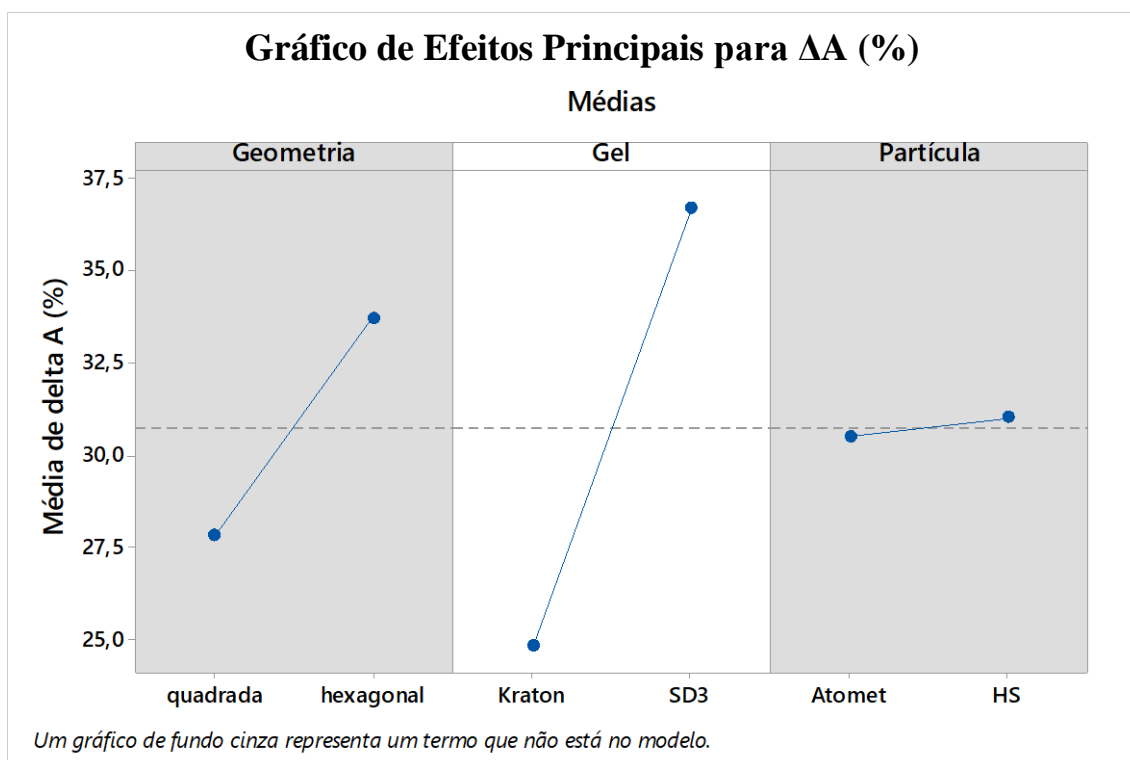


Figura 55 - Gráfico dos efeitos principais para a amplitude.

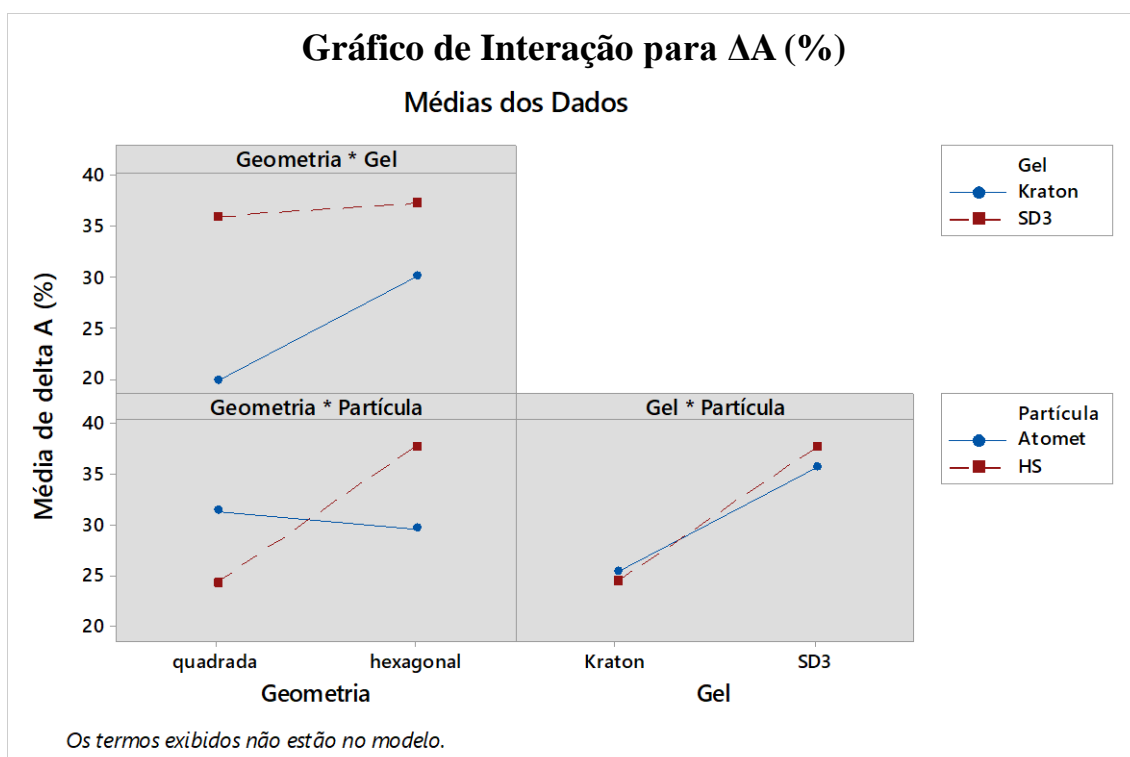


Figura 56 - Gráfico dos efeitos das interações para a amplitude.

A Tabela 35 mostra a análise da variância referente a variação de amplitude.

Tabela 35 - Análise da variância para a amplitude.

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	1	279,4	279,36	6,48	0,044
Linear	1	279,4	279,36	6,48	0,044
Gel	1	279,4	279,36	6,48	0,044
Erro	6	258,8	43,14		
Total	7	538,2			

A Tabela 36 mostra o sumário do modelo para o amortecimento.

Tabela 36 - Sumário do modelo para a amplitude.

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
6,56796	51,91%	43,89%	14,50%

A Equação 7 representa a regressão em unidades não codificada.

$$\Delta A = 30,74 + 5,3=91 \text{ Gel} \quad (7)$$

Novamente, é possível observar na Figura 55 que o gel é a única possível variável com influência significativa, pois a média da variação de ΔA , que corresponde a variação da amplitude, apresenta grande inclinação. As variáveis partícula e geometria não exerceram influência sobre a viga sanduíche para a variação da amplitude, e quando analisamos a Figura 53 notamos que não há interação sobre os resultados que trouxeram significância para o experimento. Podemos concluir que para a variação de amplitude nas vigas sanduíche apenas uma variável se mostrou significativa que foi o gel.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

5.1 – Conclusões

Na dissertação apresentada, foi exibido um plano experimental para a fabricação de novos modelos de viga tipo sanduíche, uma com o seu núcleo em duas formas distintas de colmeia preenchido por dois tipos géis magneto reológico contendo dois tipos de partículas ferromagnéticas, e outra em forma de lâminas fabricadas a partir de material compósito laminado. Consistiu-se em avaliar a resposta que diferentes intensidades de campo magnético desempenham sobre as propriedades dinâmicas destes tipos de vigas, constituindo em frequências naturais, fatores de amortecimento e amplitude de vibração quando a viga entra em ressonância.

Sendo assim, foi evidenciado as seguintes conclusões:

- ✓ Alterações expressivas foram alcançadas nos valores das frequências naturais, chegando a valores de 54,33%, despontando que diminuindo os valores de frequências naturais à medida que aumentaram os valores de campo magnético;
- ✓ Significativo resultado do fator de amortecimento, obtendo valores de -390% de variação mostrando que o fator de amortecimento aumenta à medida que o campo magnético aumenta, tendo eles uma relação diretamente proporcional;
- ✓ Relevante diminuição da amplitude causada pelo aumento do campo magnético com valores que chegam a 40,26%;
- ✓ Verificou-se através de análise estatística que o gel foi a variável que mais apresentou significância nos resultados de vibração livre e forçada;
- ✓ A capacidade de alterarem as propriedades dinâmicas de estrutura sanduíche foi altamente eficaz, com as variações apresentadas neste trabalho, a fim de evitar a ressonância e conseqüentemente seus efeitos indesejados, somente modificando o valor do campo magnético aplicado, não havendo a necessidade de se alterarem sua geometria, massa ou rigidez. Composto estas propriedades as medidas mais usadas quando a necessidade de modificar o comportamento dinâmico de uma estrutura.

5.2 – Perspectivas Futuras

Para trabalhos futuros, como sugestão, segue as ideias:

- ✓ O fator de amortecimento sendo calculado por outro método;
- ✓ A utilização de outros tipos de gel ou fluido magneto reológico, de modo a manter-se a técnica utilizada nessa dissertação;
- ✓ Empregar-se outros tipos de partículas ferromagnéticas;
- ✓ Alteração dos desenhos geométricos da *honeycomb* e do material produzido no processo de fabricação por manufatura aditiva (impressora 3D).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Robinson Antônio Aparecido, **Desenvolvimento e caracterização de compósitos cerâmicos e cerâmico-poliméricos destinados a restauração de monumentos históricos fabricados em esteatito (pedra-sabão)**. 172f. Dissertação (Mestrado – Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de São João del-Rei, 2017. Disponível em: <<https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppmec/Dissertacao%202017-Robinson%20Alves.pdf>>. Acesso em: 10 outubro 2019.

AGUIB, Salah et al. Forced transverse vibration of composite sandwich beam with magnetorheological elastomer core. **Journal Of Mechanical Science And Technology**, [s.l.], v. 30, n. 1, p.15-24, jan. 2016. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s12206-015-1202-y>.

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.

ASLAM, Muhammad; XIONG-LIANG, Yao; ZHONG-CHAO, Deng. Review of magnetorheological (MR) fluids and its applications in vibration control. **Journal Of Marine Science And Application**. Harbin, p. 17-29. set. 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.

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.

BITZER, T. **Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing**. Springer Netherlands, 1997.

BORNASSI, Saeed; NAVAZI, Hossein M. Torsional vibration analysis of a rotating tapered sandwich beam with magnetorheological elastomer core. **Journal Of Intelligent Material Systems And Structures**, [s.l.], v. 29, n. 11, p.2406-2423, 7 maio 2018. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389x18770864>.

BORTOLUZZI, D. B. **Desenvolvimento de compósitos tridimensionais por meio de costura em compósitos de fibra de carbono/epóxi**. 129 f. Dissertação (Ciências em Materiais para Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/681>>. Acesso em: 05 junho 2019.

BOSSIS, G. et al. Magnetorheological fluids. **Journal Of Magnetism And Magnetic Materials**. [s.i.], p. 224-228. 2002.

CARLSON, J. D.; JOLLY, M. R. MR fluid, foam and elastomer devices. **Mechatronics**, v. 10, p. 555-569, 2000.

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 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.

CRIVELLARO, Claudio. **Controle robusto de suspensão semi-ativa para caminhonetes utilizando amortecedores magneto-reológicos**. 2008. 174 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3152/tde-09022009-140556/en.php>>. Acesso em: 02 maio 2019.

DALE, L. Handlin JR. **Kratong thermoplastic elastomergel filling composition for cables**. EUA Patente nº 4,798,853, 17 jan. 1989. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/66/61/ad/d34bf6e266505d/US4798853.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2019.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Materials**. Oxford University Tress. 1994.

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.

DE LIMA, A.M.G.; DIACENCO, A. A.; CÔRREA, E. O. **Finite Element Modeling of Composite Sandwich Plates with Viscoelastic Layers**. In: 20th International Congress of Mechanical Engineering (COBEM), Gramado, RS, 2009

DI BENEDETTO, R. M. **Estudo da absorção de energia no impacto e pós-compressão do compósito commingled fibra de carbono/poliamida 6 por um modelo de regressão múltipla**. 127f. Tese (Ciências em Materiais para Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1936>>. Acesso em: 15 agosto 2019.

ELOY, F. S.; GOMES, G. F.; ANCELOTTI JR., A. C.; DA 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.

ELOY, F. S.; GOMES, G. F.; ANCELOTTI JR., A. C.; DA CUNHA JR, S. S.; BOMBARD, A. J. F.; JUNQUEIRA, D. M. A numerical-experimental dynamic of

composite sandwich beam with magnetorheological elastomer honeycomb core. **Composite Structures**, v. 209, p. 242-257, 2019.

ELOY, F. S. **Estudo do comportamento dinâmico de vigas sanduíche com núcleo honeycomb preenchido com elastômero magneto reológico**. 184f. Tese (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1784>>. Acesso em: 10 outubro 2019.

FARIA, A.W. **Modelagem por Elementos Finitos de Placas Compostas dotadas de Sensores e Atuadores Piezoelétricos: implementação computacional e avaliação numérica**. 106f. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, 2006. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15025>>. Acesso em: 22 agosto 2019.

FUKUSHIMA, J. C. **Desenvolvimento e caracterização de um elastômero magneto-reológico para aplicação em absorvedores de vibração mecânica**. 79f. Dissertação (Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2016.

GAGLIARDO, D. P. **Análise de estruturas sanduíche: Parâmetros de projeto**. 171f. Dissertação (Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, 2008.

GAY, D. **Composite Materials: Design and Applications**. [S.l.]: CRC Press, 2003.

GENÇ, Seval. **Synthesis and properties of magnetorheological (mr) fluids**. 2002. 183 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, University Of Pittsburgh, Pittsburgh, 2002. Disponível em: <<http://d-scholarship.pitt.edu/8924/1/genc12-20.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2019.

GENC, Seval; PHULÉ, Pradeep P. Rheological properties of magnetorheological fluids. **Smart Materials and Structures**, Pittsburgh, n. 11, p.140-146, 6 fev. 2002.

GRIFFITHS, R. **Boung Sets Pace for Composite Usage in Large Civil Aircraft**. High Performance Composites, 2005. Disponível em: <www.compositesworld.com/articles/boeing-sets-pace-for-composite-usage-in-large-civil-aircraft>. Acesso em: 04 setembro 2018.

GROUP, Diab. **Guideline to Core and Sandwich**. Disponível em: <<http://diabgroup.com/en-GB/Products-and-services>>. Acesso em: 05 junho 2019.

HARPER, C. **Modern plastic handbook**. [S.l.]: McGraw-Hill Professional, 2000.

HARRIS, C. M.; PIERSON, A. G. **Harris' Shock and Vibration Handbook**. New York, Estados Unidos: Ed. McGraw Hill, 2002. 1568 p.

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.

HULL, D., CLYNE, T. W. **An Introduction to Composite Materials**. 2nd ed. Cambridge solid state science series, Cambridge University Press: New York, NY, 1996.

IRAZU, L.; ELEJABARRIETA, M. J. Magneto-dynamic analysis of sandwiches composed of a thin viscoelastic magnetorheological layer. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 28, n. 30, p. 3106-3114, 2017.

JACOB Rabinow. **Magnetic fluid torque and force transmitting device**. EUA Patente nº 2,575,360. 20 nov. 1951. Disponível em: <<https://patentimages.storage.googleapis.com/2a/8a/72/6de1d5978b8ad1/US2575360.pdf>>. Acesso em: 08 maio 2019.

JEN, Yi-Ming; CHANG, Li-yen. Effect of thickness of face sheet on the bending fatigue strength of aluminum honeycomb sandwich beams. **Engineering Failure Analysis**, [s.l.], v. 16, n. 4, p.1282-1293, jun. 2009. Elsevier BV. <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.08.004>>. Acesso em: 25 março 2019.

JOLLY, Mark R.; BENDER, Jonathan W.; CARLSON, J. David. Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids. **Journal Of Intelligent Material Systems And Structures**, [s.l.], v. 10, n. 1, p.5-13, jan. 1999. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389x9901000102>.

KARLSSON, Kicki F.; ASTROM, B. Tomas. Manufacturing and applications of structural sandwich components. **Composites Part A**, Grã-bretanha, p.97-111, fev. 1996.

KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials**. CRC Press. 2006.

KOO, Chong Min. **Electroactive Thermoplastic Dielectric Elastomers as a New Generation Polymer Actuators, Thermoplastic Elastomers**, Prof. Adel El-Sonbati (Ed.), ISBN: 978-953-51-0346-2, InTech, 2012. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/thermoplastic-elastomers/electroactive-thermoplastic-dielectricelastomers-as-a-new-generation-polymer-actuators>>. Acesso em: 04 junho 2019.

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.

KRATON. **KRATON™ G (SEBS E SEBS OE)**. 2019. Disponível em: <http://www.kraton.com/br/products/KRATON_G.php>. Acesso em: 09 maio 2019.

KRATON POLYMERS, **Kraton Polymers: Processing Guide**. Houston, 2019. 24 p.

KRATON POLYMERS. **Kraton Polymers: de Modificação de Termoplásticos**. Houston, 2019. 20 p.

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.

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.

LENZI, Fernanda; MATIAS, Paloma de Oliveira; RISSON, Adriano Vieira. análise da utilização de fibras de vidro em vigas de madeira laminada colada submetidas à flexão simples. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, [s.l.], v. 14, n. 1, p.124-141, 9 out. 2017. Universidade Federal de Goiás. <http://dx.doi.org/10.5216/reec.v14i1.44320>.

LIT, Laboratório de Integração e Testes. **Teste de Vibração**. 2019. Disponível em: <https://www.lit.inpe.br/pt-br/teste_de_vibracao>. Acesso em: 16 maio 2019.

MARINICĂ, Oana. Nano-micro composite magnetic fluids: Magnetic and magneto rheological evaluation for rotating seal and vibration damper applications. **Journal Of Magnetism And Magnetic Materials**. [s.i.], p. 134-143. 2016.

MATA, HÉLDER T. C. “**Estudo de Estruturas Sandwich Hidroformadas Constituídas por Núcleo de Espumas Metálicas**”, Tese de Doutorado, FEUP, Porto, 2014.

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.

MENDONÇA, P. T. R. **Materiais Compostos & Estruturas-Sanduíche: Projeto e Análise**. Manole. 2005.

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.

MOURA, M.F. DE S. F.; MORAIS, A.M.B.; MAGALHÃES, A.G. **Materiais compósitos: materiais, fabricação e comportamento mecânico**. Edições técnicas. Publindústria, 2005.

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.

NETO, F.L., PARDINI, L.C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia [livro eletrônico]**. 2. Ed. São Paulo: Blucher, 2018. 418 p.

PEREIRA, RUI J B, Phd - “**Análise estrutural de vigas sandwich de alumínio-aglomerado de cortiça**”, Aveiro, 2014.

PIGOOT, M. R. **Load bearing fibre composites**. [S.1.]: Kluwer Academic Publishes, 2002. 496 p.

RAO, Singiresu S.. **Vibration of Continuous Systems**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 737 p.

REZENDE, M.C.; COSTA, M.L.; BOTELHO, E.C. **Compósitos estruturais - tecnologia e prática**. 1. ed. São Paulo: ArtLiber, 2011. 396 p.

RIO TINTO. **Atomet 1001**. Disponível em: <http://www.qmp-powders.com/rtecontent/document/ATOMET_1001-Brochure.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2019.

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 15 de maio de 2019, v. 20, 2012.

SODANO, H. A.; LLOYD, J.; INMAN, D. J. An experimental comparison between several active composite actuators for power generation. **Smart Materials and Structures**, v. 15, p. 1-5, 2006.

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.

TAUCHERT, T. R. Propagation of Stress Waves in Woven-Fabric Composites. **Journal of Composite Materials**, v.5, p. 456-465, 1971.

THOMSON, William T.. **Theory of Vibration with Applications**. 4. ed. Santa Barbara, California: Chapman & Hall, 1993. 558 p.

TSAI, S. W. **Theory of composites design. Think composites**. [S.1.] Palo Alto, 1992.

TUSSET, Ângelo Marcelo. **Controle ótimo aplicado em modelo de suspensão veicular não-linear controlada através de amortecedor magneto-reológico**. 2008. 174 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/15395/000681038.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 02 maio 2019.

VINSON, J. R., SIERAKOWSKI, R. L. **The Behavior of Structures Composed of Compo-site Materials**, 2ª ed., Waterloo, Ontario: Dordrecht, 2002.

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.

WEIZENMANN, Antonio. **Acoplamento Dipolar entre Partículas Ferromagnéticas**. 2010. 88 f. Tese (Doutorado) - Curso de Física, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/94706>>. Acesso em: 24 maio 2019.

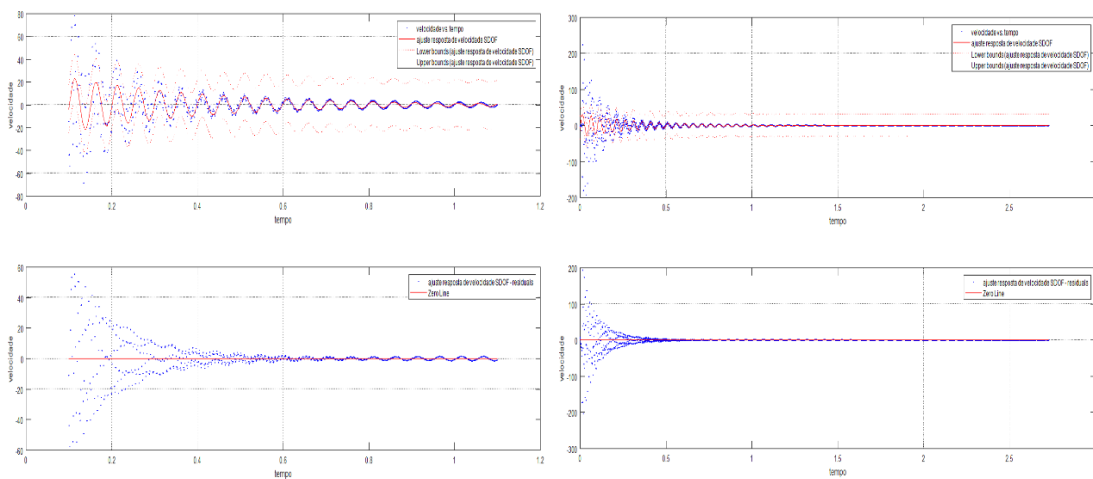
YEH, Jia-yi. Vibration analysis of sandwich rectangular plates with magnetorheological elastomer damping treatment. **Smart Materials And Structures**, [s.l.], v. 22, n. 3, p.035010-035018, 4 fev. 2013. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/22/3/035010>.

APÊNDICE A

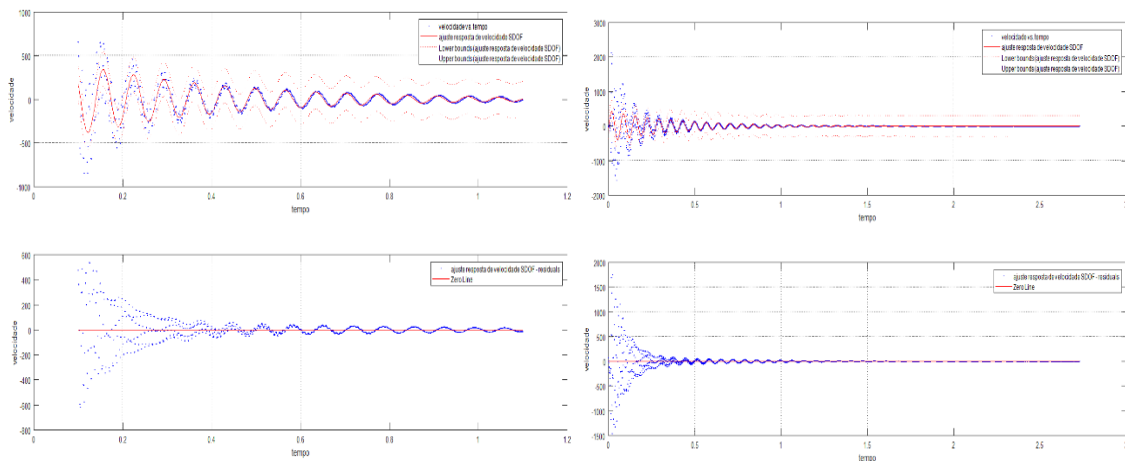
Curvas que foram realizados os ajustes para a determinação do fator de amortecimento

De acordo com o subcapítulo 6.2.1, foram realizados os ajustes da equação analítica representada pela Equação 3. Foram bastantes ajustes realizados e foi representado no Capítulo 4 apenas um exemplo de um ajuste para a determinação do fator de amortecimento dos corpos de prova em função do campo magnético aplicado. São apresentados nesse Apêndice as Figuras com os ajustes realizados em função do campo magnético.

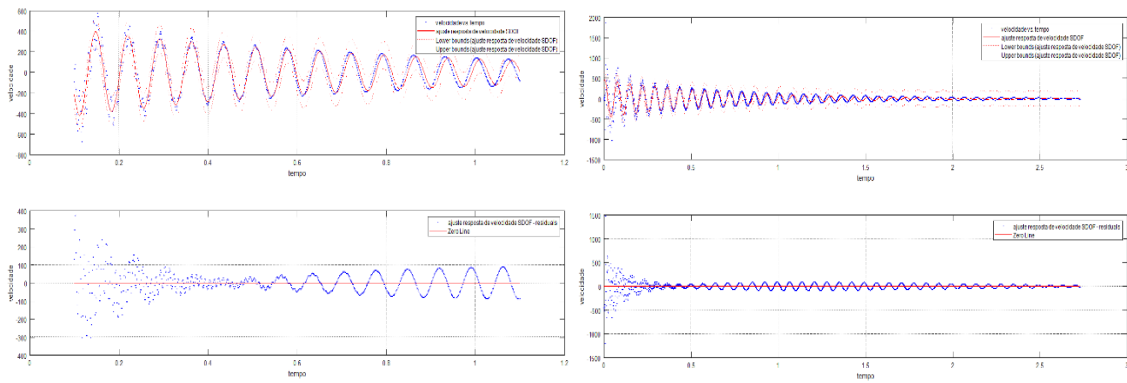
CP1 com campo $b=0$



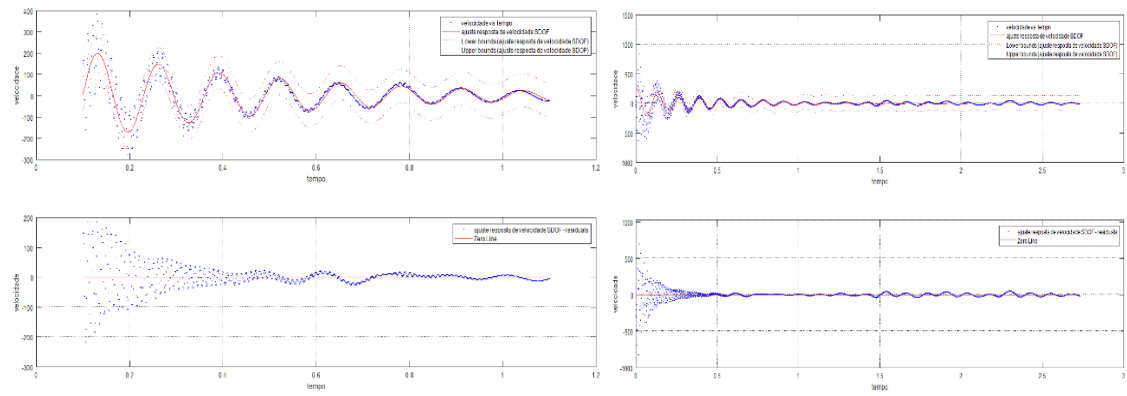
CP1 com campo $b=100$



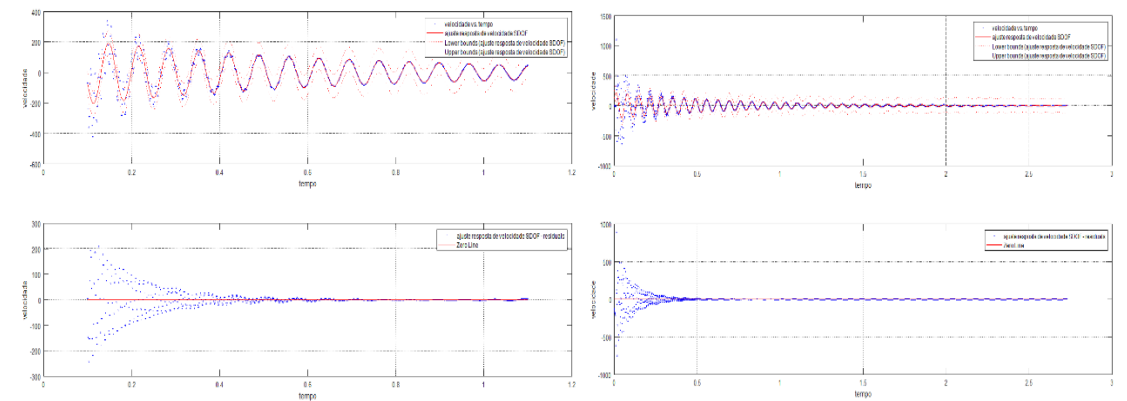
CP2 com campo b=0



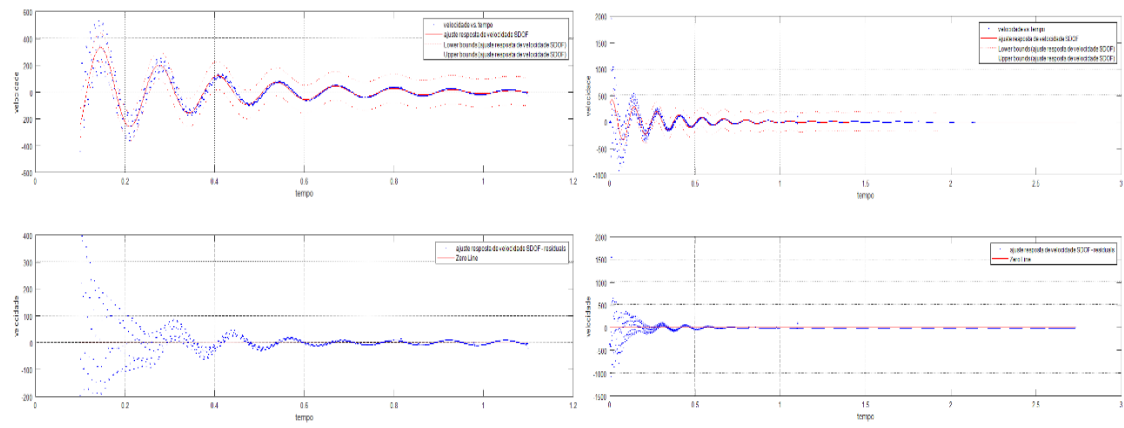
CP2 com campo b=100



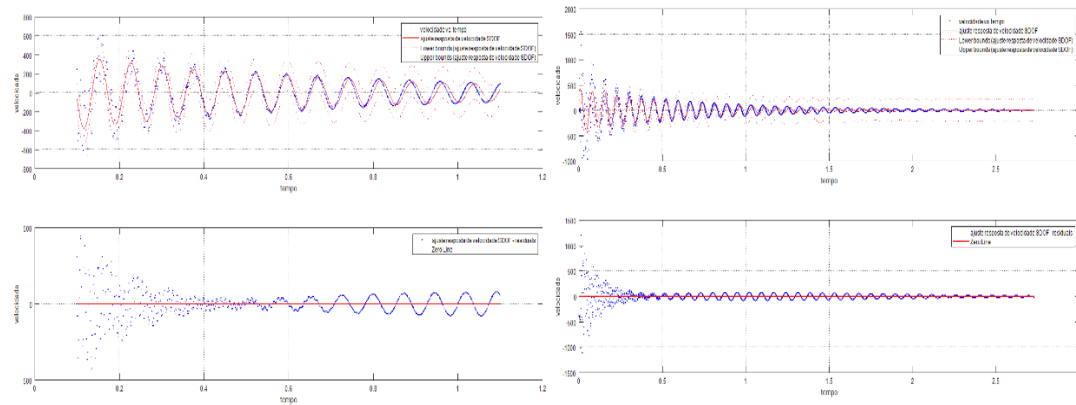
CP3 com campo b=0



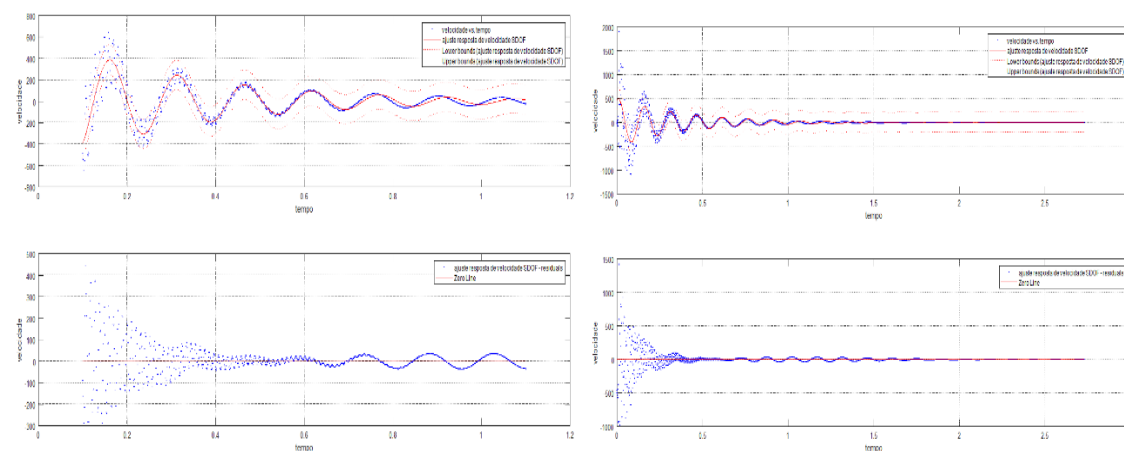
CP3 com campo b=100



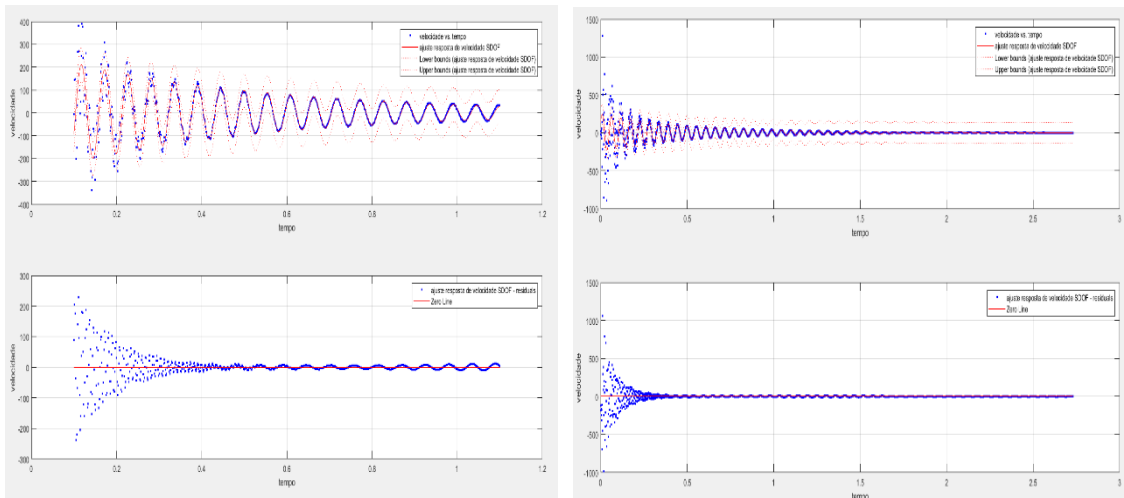
CP4 com campo b=0



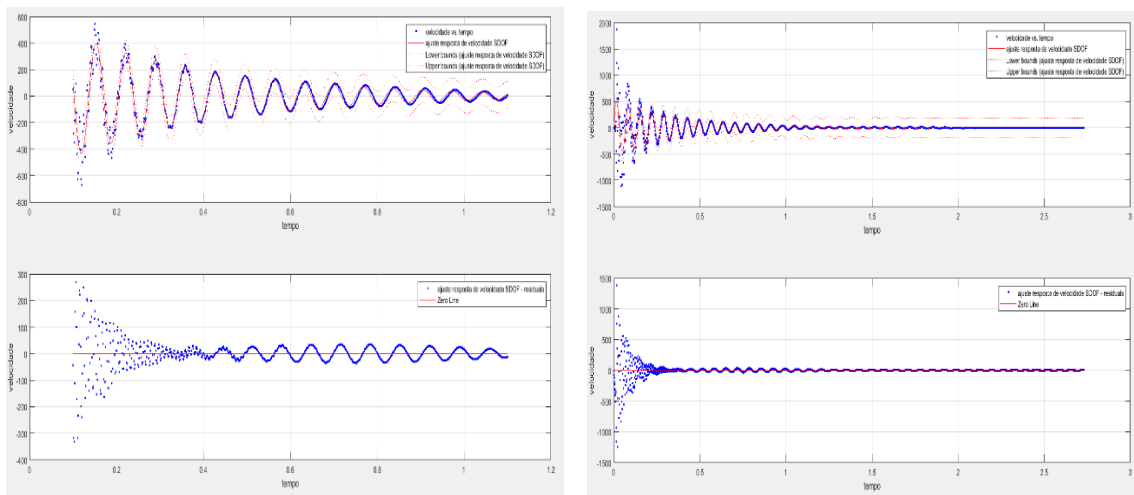
CP4 com campo b=100



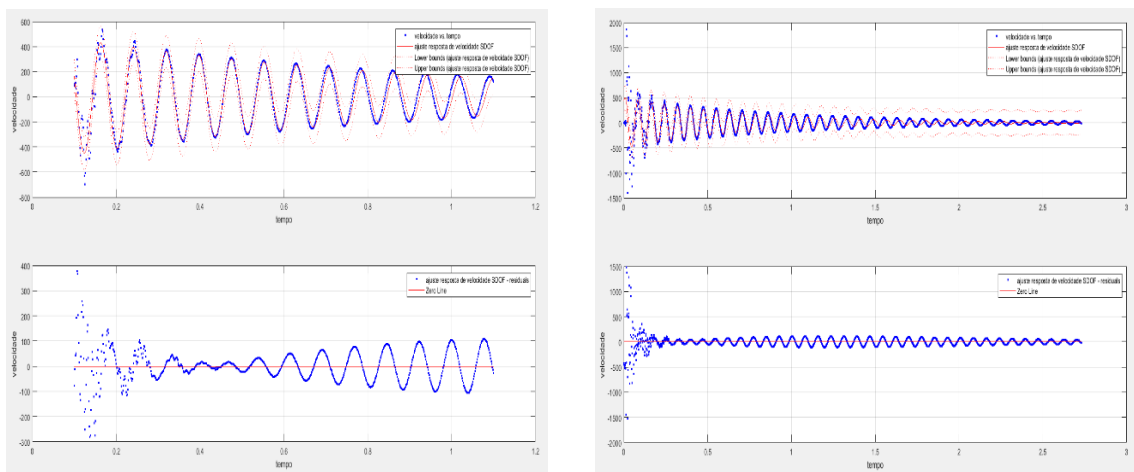
CP5 com campo $b=0$



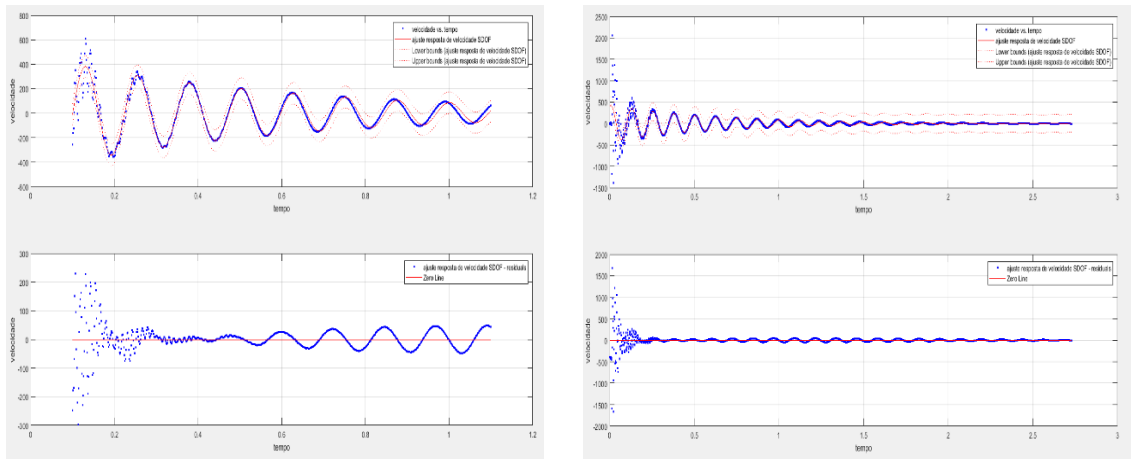
CP5 com campo $b=100$



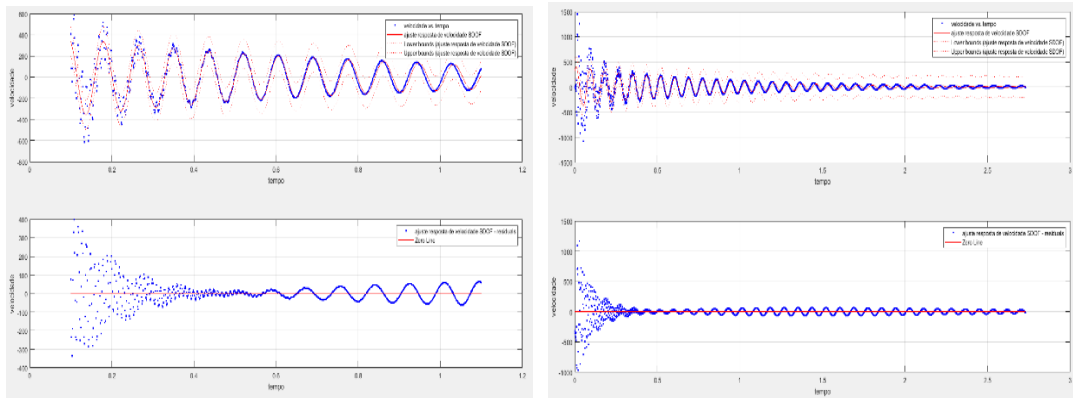
CP6 com campo $b=0$



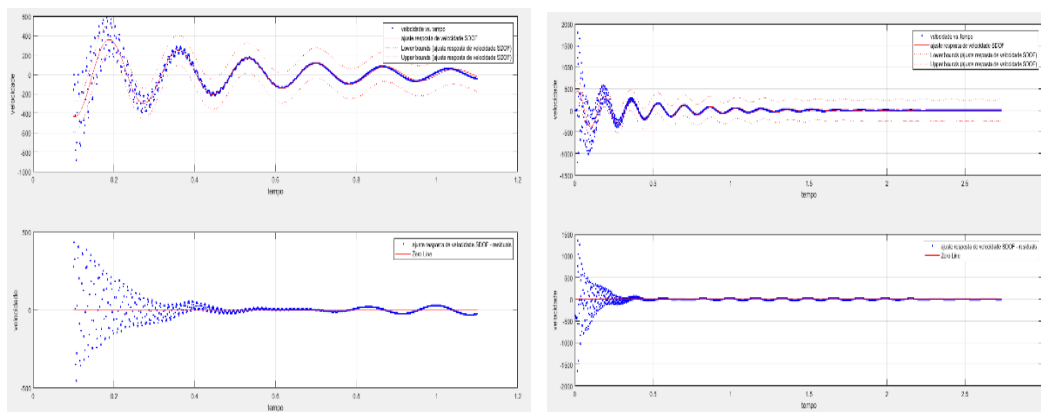
CP6 com campo $b=100$



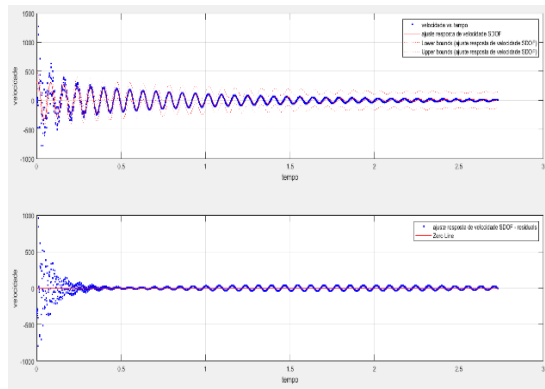
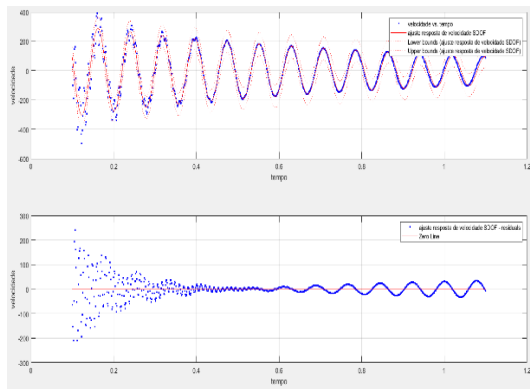
CP7 com campo $b=0$



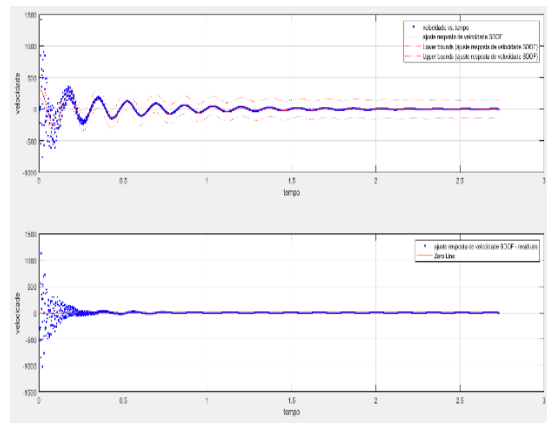
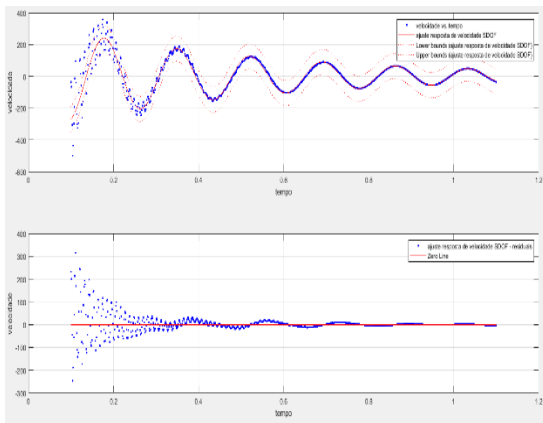
CP7 com campo $b=100$



CP8 com campo $b=0$



CP8 com campo $b=100$



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.



Figura 57 – Amplificador.

- **Analisador de Sinais**

Descrição: Analisador de sinais Brüel & Kjær

Modelo: Modelo PHOTON+

Características: 4 entradas e uma saída



Figura 58 – Analisador de sinais.

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

Descrição: Balança SHIMADZU

Modelo: AY 220

Capacidade de pesagem: 220 g



Figura 59 – Balança.

- **Conjunto eletroímã-bobina**

Descrição: Bobinas Cidepe

Modelo: EQ170D

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

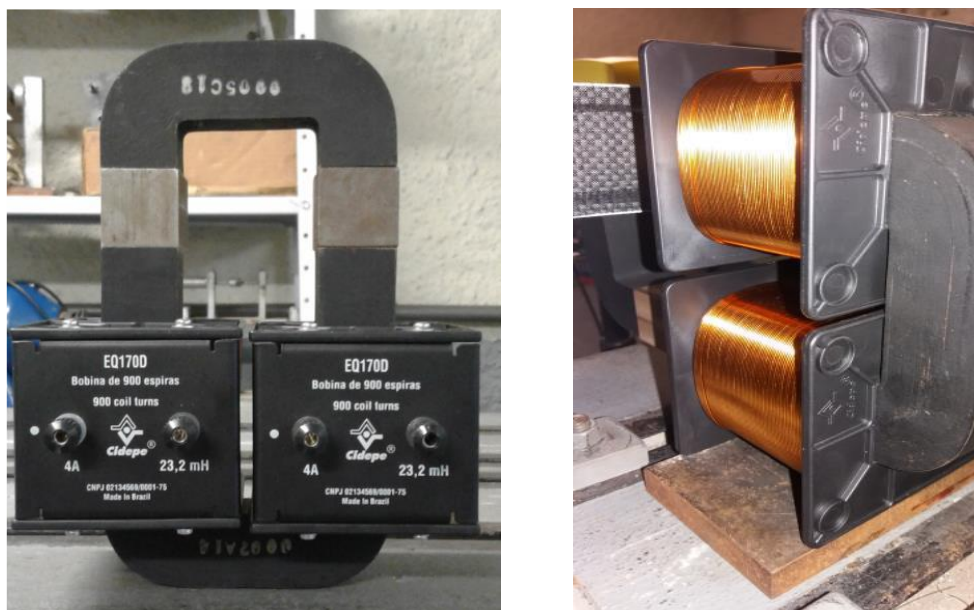


Figura 60 – Conjunto de eletroímã-bobina

- **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



Figura 61 – Fonte de tensão ou fonte de alimentação.

- *Gaussmeter*

Descrição: GAUSS/TESLAMETER

Modelo: 5070



Figura 62 – 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



Figura 63 – Gerador de função ou gerador de sinais.

- **Máquina de corte**

Descrição: Máquina de corte Norton

Modelo: Clipper TR 201E

Potência: 900 W

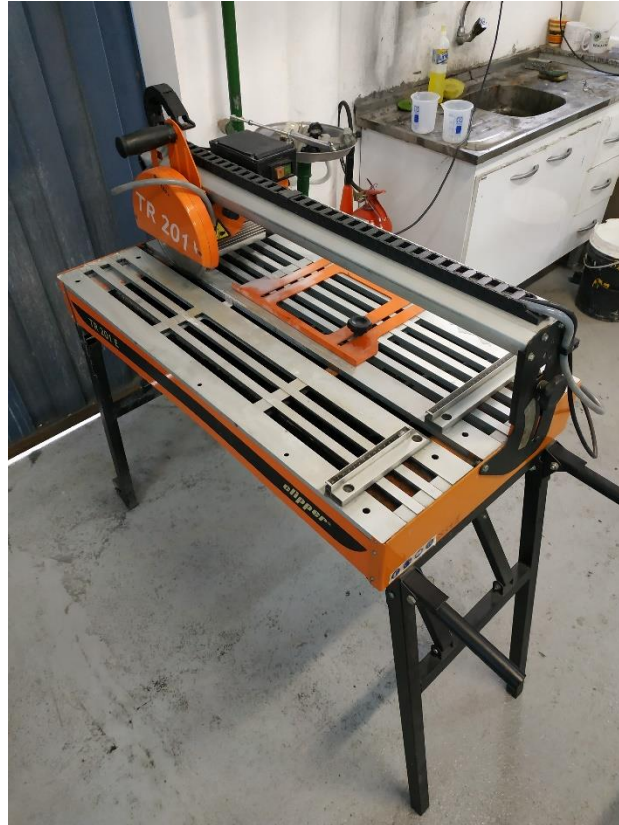


Figura 64 – Máquina de corte.

- **Martelo**

Descrição: Martelo de impacto Brüel & Kjaer

Modelo: 8204

Sensibilidade: 22,7 mV/N

Força máxima: 890 N



Figura 65 – Martelo de impacto.

- **Misturador mecânico**

Descrição: Agitador mecânico FISATOM

Modelo: 713D

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



Figura 66 – Misturador.

- **Paquímetro digital**

Descrição: Paquímetro digital - DIGIMESS

Modelo: 100.178 BL

Resolução: 0,01 mm

Capacidade: 200 mm



Figura 67 – Paquímetro digital.

- *Shaker*

Descrição: *Shaker* Brüel & Kjaer

Modelo: 4808

Faixa de frequência: 5 Hz a 10 kHz



Figura 68 – *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.



Figura 69 – Vibrômetro laser.