

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Faculdade de Engenharia
Câmpus de Ilha Solteira

Henrique Edno Leoncini de Carvalho

Estudo do emprego de Elastômero Magneto
Reológico para controle de vibrações em estruturas

Ilha Solteira

2023

Henrique Edno Leoncini de Carvalho

**Estudo do emprego de Elastômero Magneto Reológico para
controle de vibrações em estruturas**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos

Prof.Dr.Amarildo Tabone Paschoalini
Orientador

Ilha Solteira

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C331e Carvalho, Henrique Edno Leoncini de.
Estudo do emprego de elastômero magneto reológico para controle de vibrações em estruturas / Henrique Edno Leoncini de Carvalho. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
132 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2023

Orientador: Amarildo Tabone Paschoalini
Inclui bibliografia

1. Elastômero magneto reológico. 2. Caracterização. 3. Estruturas. 4. Controle de vibrações. 5. Simulação.


Raiane da Silva Santos

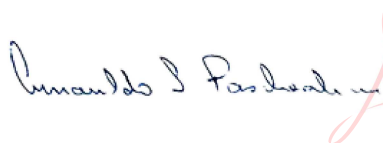
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Estudo do emprego de Elastômero Magneto Reológico para controle de vibrações em estruturas

AUTOR: HENRIQUE EDNO LEONCINI DE CARVALHO

ORIENTADOR: AMARILDO TABONE PASCHOALINI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, área: Mecânica dos Sólidos pela Comissão Examinadora:



Assinado de forma digital por
Amarildo Tabone
Paschoalini:09280956817
Dados: 2023.03.03 12:24:45 -03'00'

Prof. Dr. AMARILDO TABONE PASCHOALINI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **MARCIO ANTONIO BAZANI**
Data: 18/03/2023 09:22:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. MARCIO ANTONIO BAZANI (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Mecânica / Unesp - Ilha Solteira

Documento assinado digitalmente
 **REYOLANDO MANOEL LOPES REBELLO DA I**
Data: 03/03/2023 12:53:48-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. REYOLANDO MANOEL LOPES REBELLO DA FONSECA BRASIL (Participação Virtual)
Centro de engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas / Universidade Federal do ABC

Ilha Solteira, 02 de março de 2023

Dedico este trabalho aos meus pais Fernando Tadeu de Carvalho e Jaquelina Coelho Leoncini Carvalho, que investiram suas vidas à minha, e à minha companheira Cristini Cordesco, que esteve ao meu lado nos momentos difíceis e felizes.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Dr. Amarildo Paschoalini, por ter acreditado em mim, enxergado potencial que nem mesmo eu pude enxergar e me oferecido a oportunidade de desenvolver minha missão de vida e carreira profissional.

Ao amigo e referência Jeferson Camargo Fukushima, fundador da linha de pesquisa em nosso laboratório, que não hesitou em me ajudar em todas as esferas, aconselhando-me nas questões técnicas e humanas.

Ao amigo Daniel de Souza Obata, que desenvolveu a parte instrumental de aquisição de dados experimentais. Observando seu trabalho aprendi muito e pude desenvolver independência para operar, e mesmo desenvolver meus próprios algoritmos de aquisição.

Aos meus professores: Dr. Márcio Antônio Bazani, Dr. João Antonio Pereira, Dr. Gilberto Pechoto de Melo e Dr. Michael John Brennan, que foram inspirações. Em cada página deste trabalho existe a influência compartilhada de cada um deles.

Aos funcionários Carlos José Santana (Grilo) e Diogo Ribeiro de Almeida e Silva, que sempre foram muito prestativos durante toda esta jornada.

Ao Professor Dr. Elói J. F. Figueiredo, por avaliar meu trabalho e me instruir quanto às possíveis aplicações da pesquisa na Engenharia.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

A Fundação de Ensino, Pesquisa e Extensão da Unesp de Ilha Solteira (Fepisa), pelo apoio financeiro para a compra de materiais relacionados ao experimento.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”
(Isaac Newton)

Resumo

Elastômeros Magneto Reológicos (EMR) são materiais compósitos “inteligentes” que, sobre o efeito de um campo magnético externo, podem mudar substancialmente suas propriedades viscoelásticas, atributo que confere a este material grande potencial para desenvolvimento de tecnologias de controle de vibrações, que exigem o estudo do comportamento dinâmico do material através de modelos teóricos e experimentais: uma área onde ainda existem lacunas para a proposição de metodologias. Dividindo a última década em dois períodos de cinco anos, o número de patentes relacionadas a EMRs triplicou-se, segundo Organização Mundial da Propriedade Intelectual, indicando o crescente interesse no tópico pela comunidade científica. Unindo a demanda pelo estudo e desenvolvimento de métodos de caracterização do material EMR, bem como a importância de estudos nacionais voltados a problemas dinâmicos em estruturas, este trabalho é motivado em contribuir à comunidade científica propondo uma maneira inovadora de caracterização dinâmica, com procedimento experimental e abordagem teórica originais, explorando diferentes regimes de tensão de entrada de ensaio, que permitiu o melhor entendimento da relação entre tensão e campo magnético aplicado, assumida como linear com um erro de 4.8 %. Foram elaboradas técnicas de fabricação de amostras, reduzindo o surgimento de bolhas, bem como o foi estudada a aplicação deste material em dispositivos de para controle de vibrações em estruturas por meio de simulações generalizadas com sistemas de um grau de liberdade, sendo possível, através do acionamento do campo e alteração da frequência natural amortecida, a supressão de sua resposta em magnitude para valores abaixo da meia potência, adotado como parâmetro de alvo.

Palavras-chave: Elastômero Magneto Reológico. Caracterização. Estruturas. Controle de vibrações. Simulação.

Abstract

Magnetorheological elastomers (MRE) are “smart” composite materials that can significantly change their viscoelastic properties under the influence of an external magnetic field. This property gives this material a great potential for the development of vibration control technologies, which require the study of the dynamic behavior of the material through theoretical and experimental models: an area where gaps still exist for methodological proposals. Dividing the last decade into two five-year periods, the number of patents related to MRE has tripled, according to the World Intellectual Property Organization, indicating the growing interest of the scientific community in this topic. Combining the demand for studies and characterization methods with the demand for national studies focused on structural dynamics, this work is motivated to contribute to the scientific community by proposing an innovative arrangement for dynamic characterization, with an original experimental procedure and theoretical approach that explores different input voltage regimes, allowing a better understanding of the relationship between voltage and applied magnetic field, which is assumed to be linear with an error of 4.8 %. Techniques for fabricating samples that reduce the occurrence of bubbles have been elaborated, and the application of MREs in control devices for structures has been explored through generalized simulations with a single degree-of-freedom system that allows the activation of the magnetic field and the increase of the damped natural frequency and the suppression of the response in magnitude to values below half the power assumed as the target parameter.

Keywords: Magneto Rheological Elastomer. Characterization. Structures. Vibration control. Simulation.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Publicações de patentes na plataforma OMPI.	19
Figura 2 – Formação de vórtices.	21
Figura 3 – Formação de vórtices em cabos.	21
Figura 4 – Formação de vórtices em coberturas engastadas.	22
Figura 5 – Efeito de drapejamento.	23
Figura 6 – Força inercial e movimento relativo de uma estrutura.	24
Figura 7 – Diagonal semiativa do edifício Kajima Shizuoka.	25
Figura 8 – Característica dos tipos de controle.	26
Figura 9 – Comportamento das partículas magnéticas em um fluido magnetoreológico.	27
Figura 10 – Dispositivo de amortecimento magnetoreológico da ponte <i>Donting Lake</i>	28
Figura 11 – Amortecedor de duas camadas.	29
Figura 12 – Amortecedores viscoelásticos do <i>World Trade Center</i>	30
Figura 13 – Representação Modelo Kelvin Voigt.	31
Figura 14 – Representação de ensaios oscilatórios.	33
Figura 15 – Defasagem entre entrada e resposta para materiais viscoelásticos.	34
Figura 16 – Ciclo de histerese de materiais viscoelásticos.	35
Figura 17 – Influência de γ_A	36
Figura 18 – Influência de τ_A	36
Figura 19 – Influência de δ	37
Figura 20 – Representação discretizada de um sistema de um grau de liberdade.	39
Figura 21 – Pontos de meia potência para um sistema 1GDL.	41
Figura 22 – Dispositivo EMR desenvolvido no <i>LabSin</i> . (a) Foto real. (b) Diagrama.	42
Figura 23 – Dispositivo EMR.	43
Figura 24 – Comparação entre experimentos. (a) Arranjo atual. (b) Arranjo anterior (2021)	43
Figura 25 – Dimensões do dispositivo viscoelástico desenvolvido.	44
Figura 26 – Peças de acoplamento fabricadas.	44
Figura 27 – Diagrama da bancada de ensaio.	46
Figura 28 – Foto da bancada de ensaio.	47
Figura 29 – Foto da bancada de ensaio na fase do ensaio destrutivo de campo-corrente.	47
Figura 30 – Procedimento de fabricação de amostras.	49
Figura 31 – Sistema de vácuo desenvolvido para o experimento.	51
Figura 32 – Seringa de injeção de amostras. (a) Foto. (b) Bico projetado.	52
Figura 33 – Moldes desenvolvidos para cura de amostras.	53
Figura 34 – Fotos do dispositivo	54
Figura 35 – Redução dos dados de aquisição.	56
Figura 36 – Tensão experimental e simulada pelo modelo Kelvin Voigt.	59

Figura 37 – Exemplo do plot de superfície ($\tau = 1.05kPa$).	60
Figura 38 – Exemplo do ajuste de superfície ($\tau = 1.05kPa$).	60
Figura 39 – Exemplo de cálculo de pesos de interpolação.	62
Figura 40 – Cálculo do erro entre superfícies simulada e ajustada.	63
Figura 41 – Diagrama para cálculo de entrada e resposta.	65
Figura 42 – Qualidade na fabricação de amostras. (a) Método atual. (b) Métodos anteriores	67
Figura 43 – Ensaio de campo-corrente.	68
Figura 44 – Módulo de cisalhamento dinâmico em diferentes tensões de entrada.	69
Figura 45 – Viscosidade dinâmica em diferentes tensões de entrada.	70
Figura 46 – Módulo de cisalhamento dinâmico em diferentes campos magnéticos aplicados.	70
Figura 47 – Viscosidade dinâmica em diferentes campos magnéticos aplicados.	71
Figura 48 – Filtros nos limites de aquisição em campo nulo.	72
Figura 49 – Filtros nos limites de aquisição em campo máximo.	73
Figura 50 – Superfícies ajustadas para o módulo de cisalhamento dinâmico.	74
Figura 51 – Superfícies ajustadas para viscosidade dinâmica.	75
Figura 52 – Plot de camadas simuladas e ajustadas para módulo de cisalhamento dinâmico.	76
Figura 53 – Plot de camadas simuladas e ajustadas para viscosidade dinâmica.	76
Figura 54 – FRFs e magnitude de meia potência.	77
Figura 55 – Entrada em tensão aleatória.	78
Figura 56 – Entrada em frequência de excitação aleatória.	78
Figura 57 – Resposta em frequência natural amortecida no campo nulo.	79
Figura 58 – Resposta em magnitude no campo nulo.	79
Figura 59 – Diferença entre plots de magnitude	80
Figura 60 – Resposta com e sem controle, com campo de $0.0875T$	81
Figura 61 – Resposta com e sem controle, com campo de $0.175T$	81
Figura 62 – Resposta com e sem controle, com campo de $0.02625T$	82
Figura 63 – Resposta com e sem controle, com campo de $0.35T$	82
Figura 64 – Resposta para todos os campos aplicados no ponto de máxima magnitude.	83
Figura 65 – Projeto de experimento para estudo de controle de vibrações verticais em vigas com material EMR.	86
Figura 66 – Modelo discretizado para simulação de vibrações verticais em vigas com dispositivo EMR.	87
Figura 67 – Variação da rigidez dinâmica com o acionamento de campo para EMR com origem alternativa.	88

Lista de tabelas

Tabela 1 – Dimensionamento de amostras	67
Tabela 2 – Ajuste de superfícies aos dados experimentais	75
Tabela 3 – Erro entre camadas simuladas e ajustadas	76

Lista de abreviaturas e siglas

LabSin	Laboratório de Simulações Numéricas
EMR	Elastômero Magneto Reológico
BS	Borracha de Silicone
Fe	Ferro carbonila
Cat.	Catalisador
ELU	Estado Limite Último
ELS	Estado Limite de Serviço
RMS	Média quadrática aplicada em sinais, do inglês <i>Root Mean Square</i>
OMPI	Organização Mundial da Propriedade Intelectual
WIPO	World Intellectual Property Organization
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente
DFQB	Departamento de Física, Química e Biologia de Presidente Prudente
FRF	Função de Resposta em Frequência
1GDL	Sistema com um grau de liberdade

Lista de símbolos

x_L	coordenada de comprimento, com origem no apoio da viga [m];
t	coordenada de tempo, com origem no instante de aplicação da força [s]
$v(x,t)$	deflexão da viga no ponto x_L e tempo t , medida na posição de equilíbrio, considerando o peso próprio da viga [m]
E	Módulo de Young da viga [$kg/m \cdot s^2$]
J	momento de inércia da seção transversal da viga [$kg \cdot m$]
μ_L	coeficiente de massa por unidade de comprimento da viga [kg/m]
ω_b	frequência angular de amortecimento da viga [rad]
P	magnitude da força concentrada [N]
v	velocidade de movimento da carga [m/s]
$\delta_D(x - vt)$	função <i>Delta de Dirac</i> que traduz matematicamente o movimento da carga
τ	vetor de entrada em tensão [Pa]
γ	vetor de resposta em deformação [m/m]
η	viscosidade dinâmica [$Pa \cdot s$]
γ	vetor de resposta em velocidade de deformação [$m/m \cdot s$]
G	módulo de cisalhamento dinâmico [N/m]
τ_A	tensão máxima do ciclo [Pa]
ω	frequência angular de excitação [rad]
t	tempo [s]
δ	defasagem da resposta [rad]
f	frequência de excitação [Hz]
m	massa inercial infinitamente rígida [kg]
k	constante elástica da mola idealmente elástica sem massa [N/m]

c	coeficiente de amortecimento do amortecedor idealmente viscoso sem massa [Pa · s]
$f(t)$	força de excitação no tempo aplicada ao sistema [N]
$x(t)$	resposta em deslocamento no tempo [m]
ω_n	frequência natural angular não amortecida do sistema [rad]
f_n	frequência natural não amortecida do sistema [Hz]
c_c	amortecimento crítico do sistema [Pa · s]
ζ	coeficiente adimensional de amortecimento do sistema
ω_d	frequência natural angular amortecida do sistema [rad]
f_d	frequência natural amortecida do sistema [Hz]
$H(i\omega)$	magnitude da Função de Resposta em Frequência do sistema [Db]
i	unidade imaginária dada por $\sqrt{(-1)}$
$ H(i\omega)_{\frac{1}{2}} $	magnitude de meia potência [Db]
$ H(i\omega) $	magnitude máxima [Db]
M_{BS}	massa da Borracha de Silicone [g]
C_V	concentração em volume de ferro carbonila da amostra dimensionada [%]
V_{EMR}	volume de material compósito de Elastômero Magneto Reológico [cm ³]
ρ_{BS}	densidade da borracha de silicone definida pelo fabricante [g/cm ³]
e	espessura da amostra [cm]
L	largura da amostra [cm]
h	altura da amostra [cm]
M_{Fe}	massa da carga adicionada de ferro carbonila [g]
ρ_{Fe}	densidade da ferro carbonila definida pelo fabricante [g/cm ³]
$[\tau]$	vetor de tensões [Pa]
$[\tau]$	vetor de força (entrada) [N]
A	área total de contato das amostras com o dispositivo [m ²]

$[X]$	vetor de deslocamento $[m]$
$[a]$	vetor de aceleração (resposta) $[ms^2]$
$[\gamma]$	vetor de deformação $[m/m]$
$[\dot{\gamma}]$	vetor de velocidade de deformação $[m/m \cdot s]$
$d[\gamma]$	denota a aplicação da rotina de diferenciação numérica no vetor de deformação
dt	segundo elemento do vetor de tempo considerando-se o atraso de gravação do sinal, seu valor é $0.00012207s$
$[\gamma^+]$	denota a aplicação da rotina de pseudo-inversão no vetor de deformação
$[\dot{\gamma}^+]$	denota a aplicação da rotina de pseudo-inversão no vetor de velocidade de deformação
$[\tau_{KV}]$	vetor de tensão simulado pelo modelo Kelvin-Voigt
Δ_{KV}	vetor de diferenças entre dados de tensão experimentais e simulados
$\oslash$	denota o produto inverso de Hadamard, ou a divisão elemento por elemento entre vetores
$[E_{KV}]$	erro entre vetor de tensão simulado pelo modelo Kelvin-Voigt e o obtido experimentalmente $[\%]$
$\overline{[\Delta_{KV}]}$	denota a aplicação da rotina de cálculo de valor médio no vetor de diferenças entre dados experimentais e simulados
τ_x	tensão alvo fora diferente dos valores das tensões de entrada do ensaio
τ_{xapp}	regime de tensão da superfície ajustada
τ_{x-1}	tensão de ensaio mais próxima abaixo do valor de τ_x
τ_{x+1}	tensão de ensaio mais próxima acima do valor de τ_x
W	peso da soma atribuído às camadas em tensões ensaiadas
B	campo magnético
K	rigidez do material EMR
C	amortecimento do material EMR
E_{fab}	erro de fabricação da amostra $[\%]$

M_T	massa teórica total dimensionada [g]
M_E	massa experimental total dimensionada [g]
I	corrente elétrica [A]
f_V	vetor de frequências para cálculo da resposta [Hz]
$ H $	resposta em magnitude pontual [Db]
$ H $	resposta em magnitude vetorial [Db]
B^0	elemento do vetor de campos nulos [T]
B^C	elemento do vetor de campos constantes [T]
B_C	valor do elemento do vetor de campos constantes [T]
$[\tau_{Ar}]$	vetor aleatório de tensões de entrada [MPa]
$[f_r]$	vetor aleatório de frequências de excitação de entrada [Hz]
$[\delta_r]$	vetor aleatório de defasagens de entrada [rad]

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Origem da linha de pesquisa	17
1.2	Estado da Arte da pesquisa com o Elastômero Magnetoreológico	18
1.3	Motivação e objetivos	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Tipos de problemas dinâmicos em estruturas	20
2.2	Dispositivos de controle de vibrações em estruturas	25
2.3	Materiais “Inteligentes”: Elastômero Magneto Reológico	27
2.4	Dispositivos viscoelásticos	29
2.5	Modelo Kelvin Voigt	30
2.6	Ensaio oscilatórios	32
2.7	Vibração de sistemas com um grau de liberdade	37
3	PARTE EXPERIMENTAL	42
3.1	Dispositivo viscoelástico	42
3.2	Bancada de ensaio	45
3.3	Parâmetros de aquisição	48
3.4	Fabricação de amostras	49
3.5	Algoritmos desenvolvidos	54
3.5.1	Algoritmo de aquisição	54
3.5.2	Algoritmo de caracterização	56
3.5.3	Algoritmos de interpolação de resultados	59
3.5.4	Algoritmo de simulação de controle	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1	Fabricação de amostras	67
4.2	Ensaio de campo-corrente	68
4.3	Caracterização	69
4.4	Limites de aquisição	71
4.5	Interpolação de superfícies	74
4.6	Simulação de controle	77
5	CONCLUSÕES	84
6	TRABALHOS FUTUROS	86
6.1	Controle de vibrações verticais em vigas	86

6.2	Fabricação de EMR com Ferro Carbonila de origem alternativa	87
	REFERÊNCIAS	89
	ANEXOS	92
	ANEXO A – ALGORITMO DE AQUISIÇÃO	93
	ANEXO B – ALGORITMO DE CARACTERIZAÇÃO	101
	ANEXO C – ALGORITMO DE INTERPOLAÇÃO	105
	ANEXO D – ALGORITMO DE SIMULAÇÃO DE CONTROLE . . .	122

1 Introdução

1.1 Origem da linha de pesquisa

Este trabalho se insere em uma linha de pesquisa iniciada em 2014 em caráter colaborativo entre duas unidades da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), sendo Ilha Solteira e Presidente Prudente. Em Ilha Solteira representada pelo Laboratório de Simulações Numéricas (LabSin), componente da infraestrutura voltada à pesquisa em Mecânica dos Sólidos e Projetos do Departamento de Engenharia Mecânica, e em Presidente Prudente representada pelo Departamento de Física, Química e Biologia (DFQB), componente da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT). Dois trabalhos podem ser destacados como cerne desta colaboração: “Preparação e caracterização de nanocompósitos multifuncionais obtidos com nanopartículas ferroelétricas e paramagnéticas em filmes de borracha natural”. (BELLUCCI, 2013); “Desenvolvimento e caracterização de um elastômero magneto reológico para aplicação em absorvedores de vibração mecânica”. (FUKUSHIMA,).

Do ponto de vista da linha de pesquisa para o *LabSin*, pode-se colocar o trabalho de Bellucci (2013) como marco inicial no estudo de materiais compósitos com propriedades magnéticas. Valores utilizados como base na fabricação desse tipo de material foram ecoados em trabalhos posteriores. Aponta-se o trabalho de Fukushima () como marco inicial no estudo focado ao material Elastômero Magneto Reológico (EMR), voltando atenções e comprovando seu potencial de mudança de rigidez.

Como consequência dos resultados obtidos nestes trabalhos, outros trabalhos seguiram a linha, cada um contribuindo de maneira diferente rumo à um objetivo comum a todos: utilizar o potencial deste material em prol da sociedade brasileira e contribuição com a comunidade científica.

O trabalho seguinte a ser inserido na linha do tempo dessa linha de pesquisa é de autoria do próprio autor deste trabalho: “Caracterização de um material magneto reológico para amortecimento semiativo de vibrações em estruturas” (CARVALHO, 2019), e tem como principal contribuição a consolidação de um modelo físico de caracterização do material (modelo Kelvin-Voight), bem como o desenvolvimento de um programa computacional de extração de dados de módulo de cisalhamento e viscosidade a partir dos ciclos de histerese, trabalhando-se, portanto, com a resposta para excitações dinâmicas no material. Quanto aos objetivos, foi direcionado o potencial uso do material em estruturas de engenharia civil.

Este direcionamento do uso do material em estruturas de engenharia civil foi também explorado em mais trabalhos: “Isolamento de Vibrações em Estruturas de Pontes Utilizando Elastômero Magneto-Reológico” (ALMEIDA, 2021) , que contribuiu principalmente pela in-

trodução de simulações numéricas da resposta de um sistema de um grau de liberdade com uso rigidez variável através do EMR, explorando os dados aquistados no trabalho de Fukushima (2021), trabalhando diretamente com os dados experimentais em um único regime de tensão.

Com melhoramentos no programa desenvolvido no trabalho de Carvalho (2019), o segundo trabalho de Fukushima : “Caracterização dinâmica de elastômero magneto-reológico” (FUKUSHIMA, 2021), foi base para diversos outros devido a proposição de um arranjo instrumental original, obtendo resultados de caracterização dinâmica para um regime de tensão controlada com erro na entrada de 6.33 %, estes resultados são fruto de inúmeros ajustes e padronizações de ensaios, processo este que a cada trabalho é continuado. Destaca-se também, no contexto de aprimoração dos processos, a investigação de métodos inovadores para fabricação do EMR, estendendo sua capacidade de utilização, como por exemplo o trabalho: “Elastômeros magneto-reológicos: influência da orientação das partículas na capacidade de amortecimento de vibrações” (MACHADO, 2021), e o trabalho de Batista (2022): “Estudo da variação das propriedades mecânicas de Elastômeros Magnetoreológicos Orientados submetidos a campos magnéticos com variação de intensidade e direção”.

Portanto este trabalho é decorrente de uma colaboração científica que trouxe ao *LabSin* uma linha de pesquisa fértil e com grande potencial, que a cada contribuição aprofunda-se em passo de pesquisas paralelas na comunidade científica nacional e internacional, cabe ressaltar, também, a ajuda de pesquisadores cujos nomes não estão nos títulos destes trabalhos, todos referidos devidamente nos agradecimentos.

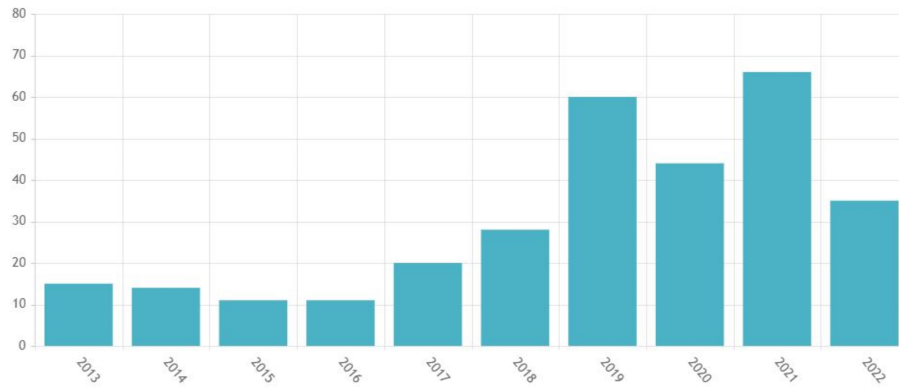
1.2 Estado da Arte da pesquisa com o Elastômero Magneto-reológico

Elastômeros Magneto Reológicos (EMR) são materiais compósitos ditos “inteligentes”, uma vez que, sobre o efeito de um campo magnético externo, podem mudar substancialmente suas propriedades viscoelásticas. São geralmente compostos por uma matriz elastomérica e uma dispersão de partículas magnetizáveis tais como a borracha de silicone e ferro carbonila, respectivamente (XU et al., 2011).

Em uma pesquisa na biblioteca de patentes internacionais pela plataforma WIPO, (do inglês *World Intellectual Property Organization*, traduzida como *Organização Mundial da Propriedade Intelectual*, OMPI), foi aferido o significativo aumento recente no número de patentes registradas, com uma média de 46.6 patentes por ano entre 2018-2022, em contraste com os cinco anos anteriores, entre 2013-2017, que apresentam uma média de 14.2 patentes por ano (vide Figura 1). Este levantamento estatístico elucida o crescente interesse no tópico, bem como a tendência da exploração e desenvolvimento de inovações tecnológicas utilizando o material, demandando também inovações nos métodos de caracterização, onde há grandes oportunidades para melhorar ou mesmo desenvolver abordagens teóricas e experimentais.

Destaca-se que cerca de 8 % dos resultados obtidos na pesquisa por patentes são relacionados à palavra “amortecedor” e direcionam-se para a engenharia de controle de vibrações, de fato o primeiro trabalho de Fukushima () atesta o potencial do material para este uso.

Figura 1 – Publicações de patentes na plataforma OMPI.



Fonte: MAGNETO... (2023).

1.3 Motivação e objetivos

Unindo a demanda pelo estudo e desenvolvimento de métodos de caracterização do material EMR, bem como a importância de estudos nacionais voltados a problemas dinâmicos em estruturas, este trabalho é motivado em contribuir a comunidade científica propondo uma maneira inovadora de caracterização dinâmica, com procedimento experimental e abordagem teórica originais, explorando diferentes regimes de tensão de entrada com o material, e desenvolvendo técnicas de fabricação de amostras, sendo processos replicáveis para inúmeros grupos de estudo de voltados a área de vibrações em todo mundo, bem como o estudar a aplicação deste material em dispositivos de controle de estruturas, por meio de simulações generalizadas com sistemas de um grau de liberdade. Uma vez que o trabalho avalia a possibilidade da aplicação de um material inovador para o desenvolvimento de tecnologias para controle de vibrações em estruturas, são apresentados fundamentos do estudo da Dinâmica das Estruturas, focando em estruturas de Engenharia Civil como exemplos práticos.

2 Fundamentação teórica

2.1 Tipos de problemas dinâmicos em estruturas

Como aponta Moutinho et al. (2007), os problemas de vibrações em estruturas de Engenharia Civil podem ser agrupados em dois domínios distintos: os que podem afetar a integridade estrutural, e os relacionados com o nível de conforto proporcionado aos usuários, sendo o primeiro atrelado ao conceito de Estado Limite Último (ELU) da estrutura e o segundo ao Estado Limite de Serviço (ELS).

Bachmann et al. (1995) classifica os tipos de ações dinâmicas e as estruturas suscetíveis a problemas devido seus efeitos. As vibrações em estruturas podem ter diferentes origens, por exemplo vibrações induzidas por pessoas, ou seja, a locomoção de indivíduos sobre pontes pedonais ou mesmo lajes de edifícios, seja em ritmo de caminhada ou corrida, ou mesmo o salto rítmico sobre lajes de estabelecimentos de dança ou estádios esportivos (arquibancadas), ou até o salto de plataformas de mergulho por atletas, são todos exemplos de casos comuns de estruturas que devem ser projetadas atentamente através de discretizações matemáticas das solicitações..

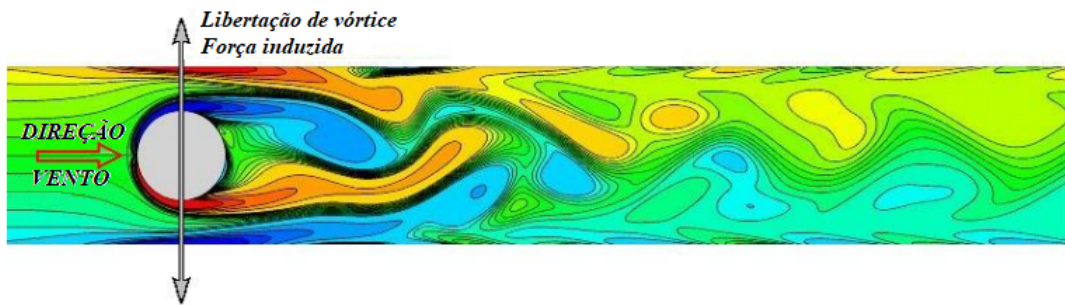
Vibrações induzidas por máquinas em estruturas oferecem desafios em seu projeto: as frequências de excitação podem atingir valores mais altos dos que ações dinâmicas providas da natureza, o dimensionamento de bases ou suportes para máquinas, como por exemplo uma torre de igreja que abrigará um sino, deve levar em conta efeitos incomuns a outros tipos de construções, voltados principalmente à transmissão das vibrações para todos os elementos estruturais do próprio sistema bem como sistemas vizinhos, seja na forma de deslocamentos excessivos ou mesmo de ruídos originados pela irradiação de ondas mecânicas oriundas da máquina, propagando-se pelos elementos da estrutura na forma de deslocamentos dinâmicos em todas as direções (longitudinal, torsional e flexural). Para estes casos o estudo de isolamento de base é crucial para garantir a integridade tanto da máquina geradora de forças dinâmicas, quanto da estrutura solicitada.

Para ações do vento, destaca-se diferentes situações onde a estrutura interage com o fluxo de ar, sendo melhor representado como um fluido em movimento em diferentes regimes (laminar ou turbulento), ocasionando vórtices ao atingir o regime turbulento que por sua vez causam gradientes de pressão, uma vez que o fluxo ganha velocidade cedendo pressão estática em seu balanço energético (CLANCY, 1975). Vórtices, portanto, são zonas de gradiente de pressão onde originam-se forças de reação para o retorno da condição de equilíbrio estático, essas forças afetam a estrutura causando seu deslocamento. Diferentes padrões de vórtices apresentam-se conforme a geometria do elemento estrutural que reage ao regime turbulento da ação do fluxo de ar. Os vórtices de Karman, fenômeno também conhecido como *vortex shedding*, ou “liberta-

ção” ou mesmo “desprendimento” de vórtices são típicos de geometrias cilíndricas, porém não exclusivos, uma vez que ocorre em outros tipos de geometrias, como tabuleiro de pontes.

A Figura 2 ilustra uma simulação do fenômeno tornando visível a alternância das zonas de baixa pressão (cores frias) e alta pressão (cores quentes).

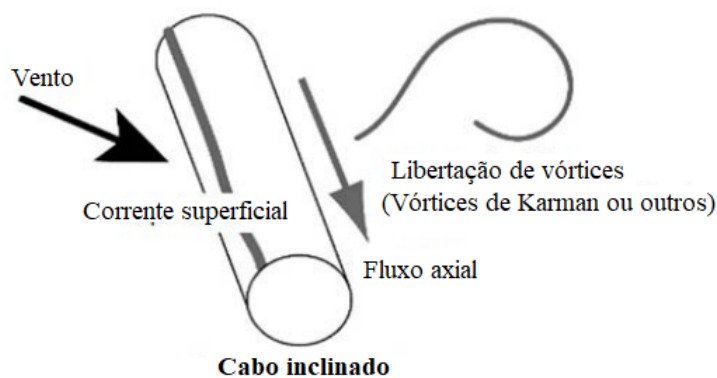
Figura 2 – Formação de vórtices.



Fonte: Giosan Ioan e Eng (2013).

Em pontes atirantadas o desprendimento de vórtices manifestam-se como “efeito de galope”, causando a vibração dos tirantes inclusive em regimes instáveis (ver tópico 5), podendo causar danos à construção, vide Figura 3:

Figura 3 – Formação de vórtices em cabos.

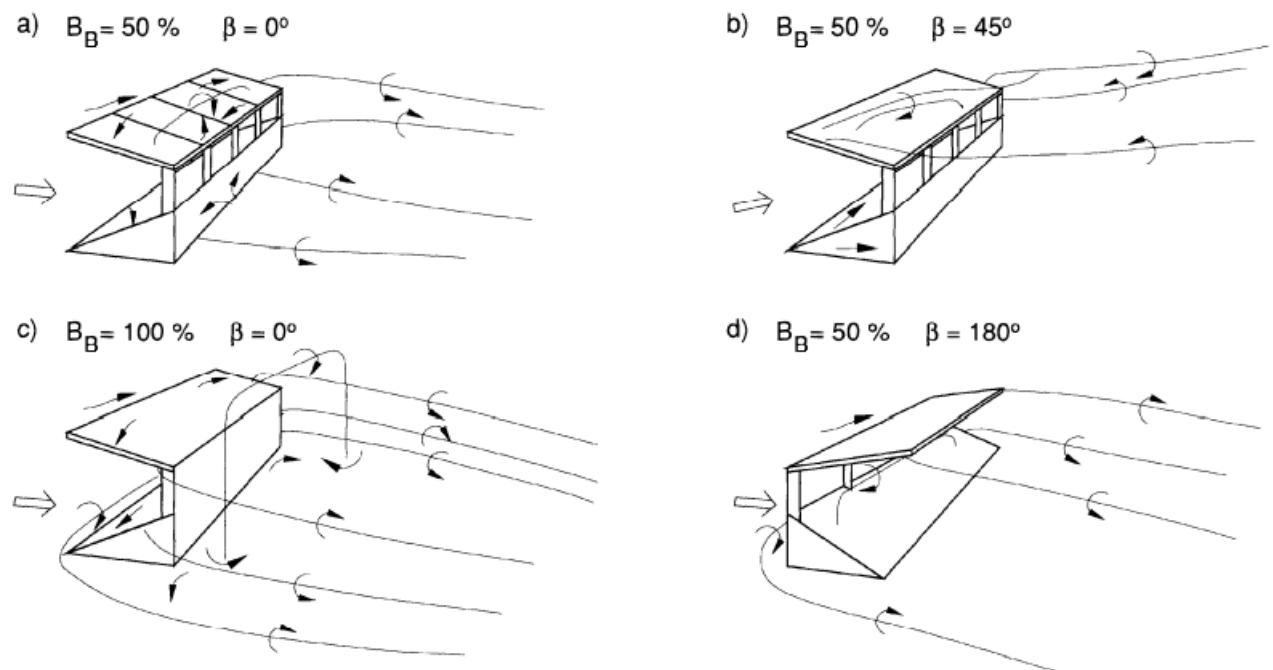


Fonte: Golebiowska e Peszynski (2018).

Em estruturas de cobertura engastada, o elemento de topo está sujeito ao drapejamento, conhecido como *stall flutter*, como ilustrado na Figura 4, o ângulo de incidência do vento β pode causar diferentes padrões de excitação, respondendo a arquitetura da estrutura, com índice de bloqueio do vento avaliado percentualmente pela variável B_B .

Tabuleiros de pontes enfrentam efeitos de drapejamento (*flutter*, em inglês), podendo causar deslocamentos excessivos. Na maioria das ocasiões relacionados ao Estado Limite de

Figura 4 – Formação de vórtices em coberturas engastadas.

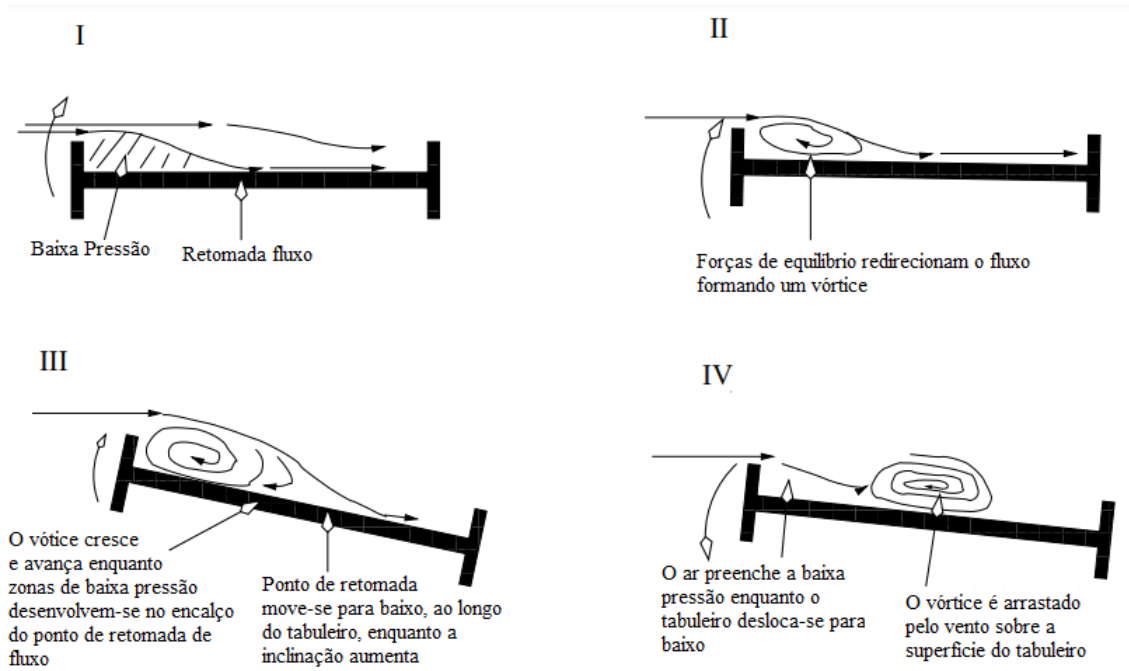


Fonte: Bachmann et al. (1995).

Serviço da estrutura, porém, casos emblemáticos como a Ponte de *Tacoma Narrows*, onde houve o colapso da estrutura, demonstram o potencial destrutivo do fenômeno para atingir também o Estado Limite Último, este efeito é agravado pela quantidade de vórtices gerados uma vez que a estrutura movimenta-se mudando os ângulos de incidência dos ventos e gerando novas condições de contorno, ocasionando o fenômeno de sincronização (*lock-in*, em inglês), que é explicado pela interação entre força dinâmica e a resposta estrutural de maneira sintonizada, aumentando a energia adicionada ao sistema, causando maiores amplitudes e maiores danos. A Figura 5 é um diagrama didático que ilustra o efeito do drapejamento torsional sincronizado para o caso de ventos, porém o mesmo fenômeno pode ser ocasionado por diferentes solicitações dinâmicas.

Pontes pedonais, rodoviárias e ferroviárias são exemplos de estruturas solicitadas por cargas móveis, porém, devido a grande diferença da natureza inercial (velocidade, aceleração e massa) do movimento humano e de automóveis, deve-se separar as análises, uma vez que os efeitos a serem considerados serão também muito diferentes. Analisando a natureza do movimento da carga móvel segundo princípios da Mecânica Clássica, que agrega as forças inerciais para o cálculo do sistema dinâmico, seu efeito é duplo: o peso, ou efeito gravitacional do carregamento móvel, e os efeitos inerciais da massa solicitante na estrutura deformada, o estudo aprofundado desses efeitos e a formulação de modelos físicos aplicados formam o cerne do estudo clássico de cargas móveis em pontes, tendo como principal característica as discretizações

Figura 5 – Efeito de drapejamento.



Fonte: Green e Unruh (2006).

dos objetos de estudo: pontes tornam-se vigas com diferentes condições de apoio e veículos tornam-se forças pontuais ou distribuídas com condições de movimento harmônico vertical e velocidade horizontal, a principal forma da equação de movimento para uma carga móvel sob uma viga é apresentada pela Equação 2.1 (FRÝBA, 1999).

$$EJ \frac{\partial^4 v(x_L, t)}{\partial x_L^4} + \mu_L \frac{\partial^2 v(x_L, t)}{\partial t^2} + 2\mu_L \omega_b \frac{\partial v(x_L, t)}{\partial t} = \delta_D(x_L - vt)P \quad (2.1)$$

na qual:

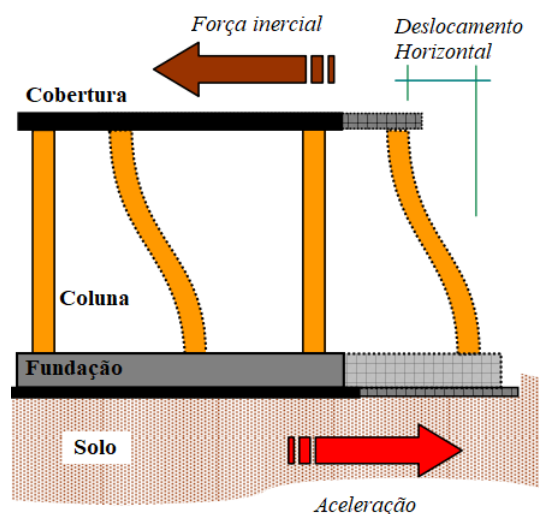
- x_L , é a coordenada de comprimento, com origem no apoio da viga [m];
- t , é a coordenada de tempo, com origem no instante de aplicação da força [s];
- $v(x, t)$, é a deflexão da viga no ponto x_L e tempo t , medida na posição de equilíbrio, considerando o peso próprio da viga [m];
- E , é o Módulo de Young da viga [$kg/m \cdot s^2$];
- J , é o momento de inércia da seção transversal da viga [$kg \cdot m$];
- μ_L , é o coeficiente de massa por unidade de comprimento da viga [kg/m];
- ω_b , é a frequência angular de amortecimento da viga [rad];
- P , é a magnitude da força concentrada [N];
- v , é a velocidade de movimento da carga [m/s];

– $\delta_D(x - vt)$, é função *Delta de Dirac* que traduz matematicamente o movimento da carga.

Destaca-se o trabalho de Inglis (1934) como essencial neste contexto pela tratativa matemática adotada na solução das equações integro-diferenciais que descrevem o fenômeno. Estudos mais recentes, datados do final dos anos 80 em diante voltam-se na simulação mais precisa por meio de métodos numéricos computacionais da resposta do sistema englobando suas diversas complexidades, destaca-se a inclusão da influência da rugosidade do pavimento como fonte principal de indução de vibrações na estrutura, sendo uma grandeza não determinística seu manejo exige maior uso de ferramentas de cálculo computacional, o mesmo efeito se estende para os modelos de veículos como sistemas de vários graus de liberdade e a solução da equação do movimento acoplada com a ponte modelada de maneira análoga (CASSOLA, 2005).

Quanto ao efeito de sismos em estruturas, tremores causam o movimento da base das estruturas em todas as direções, porém devido ao uso de fatores de segurança e majorações no cálculo estático das cargas permanentes, a maior parte das estruturas tendem a ter comportamento adequado quanto ao incremento ou decremento da ação vertical à gravidade, em contraste ao comportamento quanto a movimentos horizontais, uma vez que efeitos da inércia causam deslocamentos entre topo e base das estruturas (Figura 6), criando tensões flexurais em elementos estruturais como colunas, que são primariamente dimensionadas para resistir forças normais. Estas tensões causadas por deslocamentos horizontais são conhecidas como *stiffness forces*, do inglês “forças de rigidez”. Estes esforços muitas vezes excêntricos ao projeto original da estrutura também transferem-se para elementos de alvenaria, sendo o colapso de paredes resultado típico de terremotos. Novamente o isolamento de base passa a ser uma técnica de estudo para desenvolvimento de tecnologias de controle que possibilitem a manutenção da integridade estrutural de construções sujeitas a sismos.

Figura 6 – Força inercial e movimento relativo de uma estrutura.



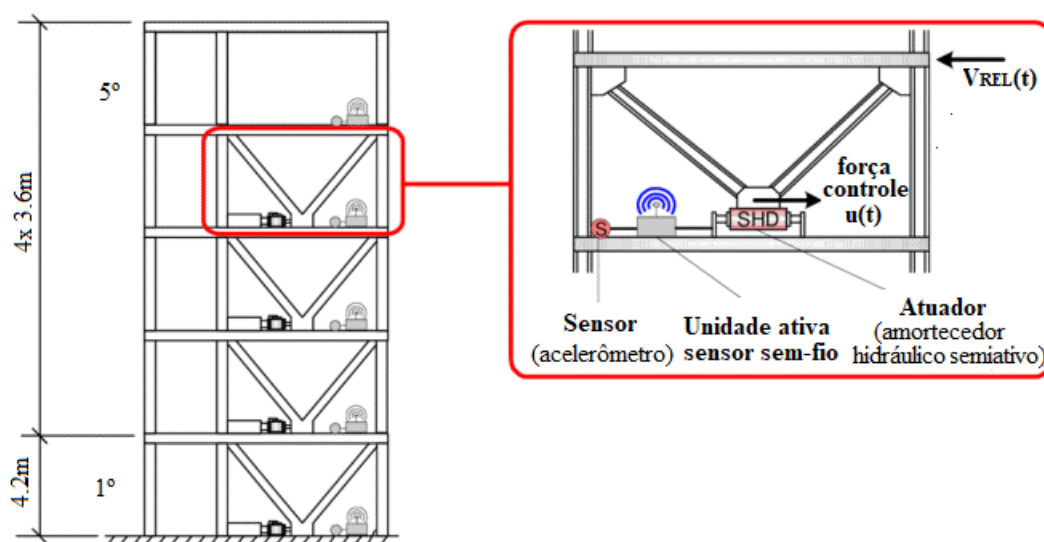
Fonte: Murty (2002).

2.2 Dispositivos de controle de vibrações em estruturas

A essência do controle de vibrações é a conversão do conhecimento de conceitos físicos e matemáticos que formulam um problema real em técnicas e tecnologias que permitam seu manejo, promovendo a qualidade de vida de seus beneficiados.

Moutinho et al. (2007) traça a linha do tempo das técnicas de controle e desenvolvimento de dispositivos, apontando que a simples introdução de elementos de reforço em estruturas pode ser considerada uma técnica de controle passivo, através da adição das rigidezes dos mesmos ao sistema, datada desde as origens das construções humanas, sendo um exemplo de sistema de malha aberta, uma vez que necessita da sintonização ou calibração manual do executor e suas características intrínsecas independem das condições externas, ou seja, uma diagonal instalada irá reagir conforme suas propriedades geométricas e seu material às solicitações de carga, seja quais forem. Por outro lado, uma diagonal de controle semiativo, tal como o amortecedor de orifício variável do edifício Kajima Shizuoka em Tóquio, no Japão, apresentado na Figura 7, é um elemento estrutural projetado para reagir as condições externas, aumentando ou diminuindo a força de amortecimento de acordo com a leitura de sensores que indicam as solicitações de entrada (realimentação), sendo, portanto, um sistema de malha fechada.

Figura 7 – Diagonal semiativa do edifício Kajima Shizuoka.



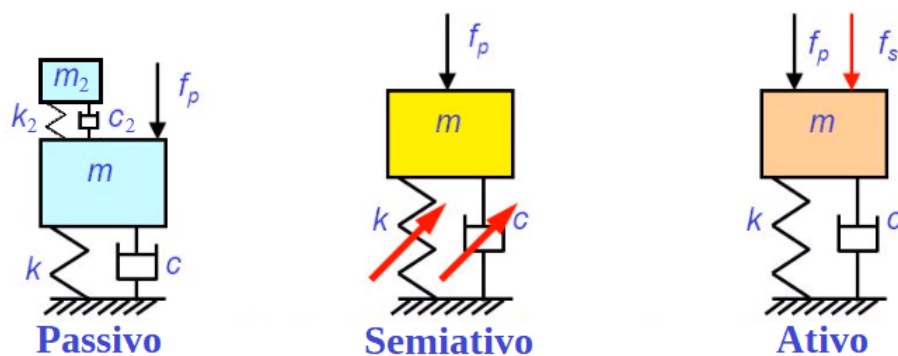
Fonte: Seth, Lynch e Tilbury (2005).

A estabilidade de um sistema pode ser interpretada como a tendência da resposta do mesmo em retornar a sua posição de equilíbrio (posição zero), após sofrer um distúrbio. A não ser que a ação de entrada seja infinita, a resposta de um sistema estável deve retornar ao seu valor nulo (BAVAFA-TOOSI, 2017). Dispositivos de controle de malha aberta, ou passivos, lidam com o problema da instabilidade adicionando robustez ao sistema inicial, fazendo com

que as condições para que o sistema atinja um regime instável sejam inalcançáveis, enquanto que, dispositivos de controle de malha fechada, ou ativos, controlam o sistema inicial a partir da medição da instabilidade e mecanismos de atuação, sendo um caso de maior complexidade de projeto.

Em 1868, sob contexto do fim da Primeira Revolução Industrial e da necessidade de maior acurácia para o desempenho de máquinas, J. C. Maxwell com sua riqueza em conhecimentos matemáticos, foi capaz de elucidar o problema da instabilidade em sistemas de controle de malha fechada realimentados através da linearização de equações diferenciais não lineares. Na primeira metade do século passado (1900 – 1930) mais ferramentas contribuíram para a Engenharia de Controle, com a introdução de técnicas de análise da resposta de sistemas no domínio da frequência (Diagramas de Bode e Nyquist), facilitando o também a visualização gráfica e a compreensão de osciladores harmônicos (BENNETT, 1996).

Figura 8 – Característica dos tipos de controle.



- **Passivo** - Um sistema secundário sintonizado é acoplado ao principal, minimizando sua resposta
- **Semiativo** - Rigidez e/ou amortecimento mudam para ajustar as forças dinâmicas internas e minimizar a resposta
- **Ativo** - Forças externas são aplicadas no sistema para minimizar a resposta

Fonte: Adaptado de Brennan (2014).

Estabelecidos os fundamentos do estudo de controle de vibrações em estruturas, várias são as tecnologias que se debruçam sobre esses conceitos na Engenharia Civil, com grande diversidade de técnicas e dispositivos de controle aplicados, porém, sempre há espaço para inovação e melhorias. Os dispositivos de controle são classificados como ativos, passivos, semiativos e híbridos, e diferenciam-se pela dependência de uma fonte de energia externa, sendo sistemas ativos completamente dependentes, passivos independentes, semiativos dependentes, porém em quantidades mínimas (baterias por exemplo), e sistemas híbridos parcialmente dependentes, uma vez que são a combinação entre sistema ativo e passivo: havendo uma sobrecarga no sistema pas-

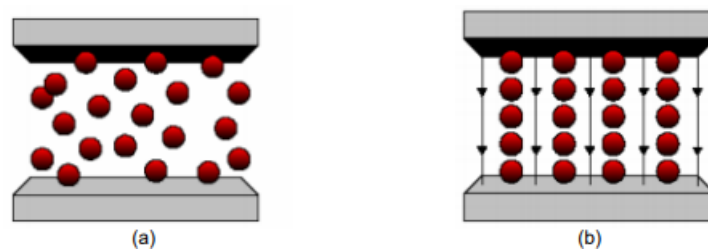
sivo, o ativo é acionado (CARVALHO, 2019). Definida a característica de cada tipo de controle quanto sua fonte de energia, o mecanismo físico pelo qual os mesmos agem na estrutura podem ser também analisados conforme a Figura 8. Observa-se que a grandeza a ser manipulada para cada tipo de controle também difere, no caso, podemos separar o controle passivo dos demais pela sua incapacidade de mudar suas propriedades conforme a entrada f_P , ou seja, é necessário a sintonização precisa e conhecimento total do tipo e magnitude da solicitação dinâmica, uma vez que as propriedades do dispositivo permanecerão inalteradas após sua instalação. Sistemas semiativos são capazes de alterar suas características intrínsecas (rigidez k e amortecimento c). Sistemas ativos promovem o controle através de ações externas geradas pelos dispositivo f_S , devidamente sintonizadas a cada caso.

2.3 Materiais “Inteligentes”: Elastômero Magneto Reológico

Define-se como materiais “inteligentes” aqueles que podem mudar suas propriedades mecânicas, tais como formato, rigidez e viscosidade; propriedades térmicas, ópticas, ou eletromagnéticas, de maneira controlada e previsível, em resposta ao seu ambiente (SMART..., 2023).

O Elastômero Magneto Reológico (EMR) é um material compósito que une as propriedades reológicas de uma matriz polimérica (geralmente borracha de silicone) com partículas de ferro magnetizáveis (geralmente ferro carbonila), apresentando a característica de *magnetosensitividade*, ou seja, capacidade de mudar propriedades intrínsecas, no caso viscosidade e rigidez (viscoelasticidade), em resposta à um campo magnético externo, demonstrando grandes potenciais de uso em tecnologias no contexto da Engenharia de Controle (FUKUSHIMA,). A Figura 9 demonstra o comportamento das partículas magnéticas do material em uma matriz fluida. Na Figura 9-a as partículas dispersantes permanecem distribuídas pela amostra, porém tendem ao alinhamento com as linhas de campo magnético externo (Figura 9-b), causando o aumento de valores do módulo de cisalhamento e viscosidade, e por consequência rigidez amortecimento, uma vez que referem-se a viscosidade e o módulo de cisalhamento aplicados na geometria.

Figura 9 – Comportamento das partículas magnéticas em um fluido magnetoreológico.



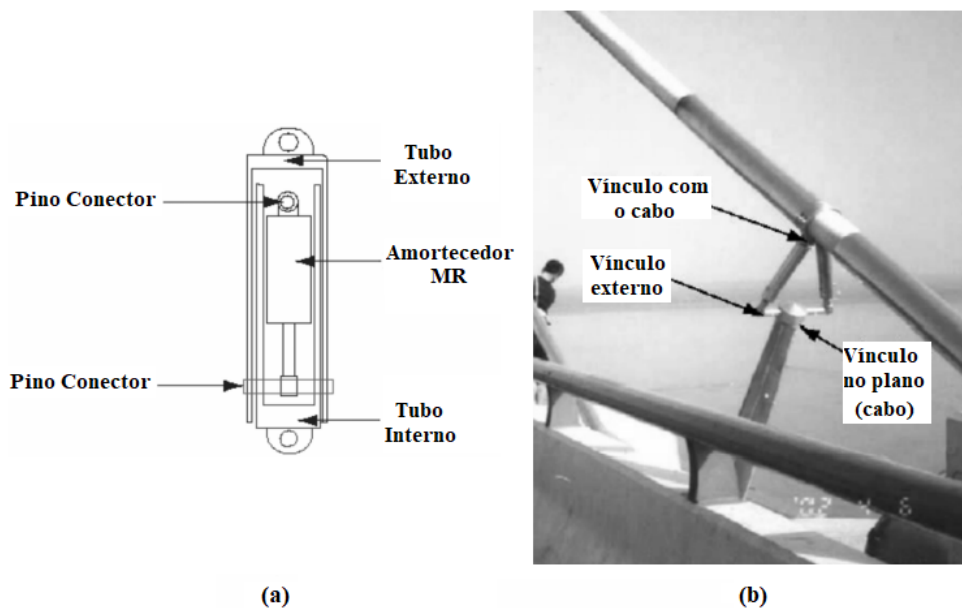
Fonte: Stutz (2005).

Os primeiros trabalhos do *LabSin* voltados ao estudo do material, realizados por Fukushima (), demonstram o potencial do Elastômero Magnetoreológico, que foi fabricado pelo

próprio grupo de pesquisa. Através de procedimentos experimentais foi constatado o aumento de 50 % da rigidez de amostras com campos magnéticos variando entre 0 e 1 Tesla. Ressalta-se que os trabalhos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa do *Labsin*, utilizam os parâmetros de fabricação de amostras do trabalho de Bellucci (2013).

A utilização de materiais “inteligentes” em dispositivos de controle de vibrações voltados para a Engenharia Civil tem demonstrado tendência para o desenvolvimento de dispositivos magneto reológicos, com os primeiros dispositivos datados no início do século XXI, sendo uma área de estudo ainda em pleno desenvolvimento. Em 2002, na China, surge a primeira aplicação prática de um dispositivo magneto reológico para amortecimento de cabos de pontes estaiadas, tornando a ponte *Donting Lake*, vide Figura 10, um caso de referência de uso dessa tecnologia. O mecanismo de controle funciona fornecendo a corrente elétrica adequada em cada cabo, através de um transformador de corrente contínua em uma malha fechada, que determina o valor a ser aplicado para evitar vibrações excessivas (CHEN et al., 2003).

Figura 10 – Dispositivo de amortecimento magnetoreológico da ponte *Donting Lake*.



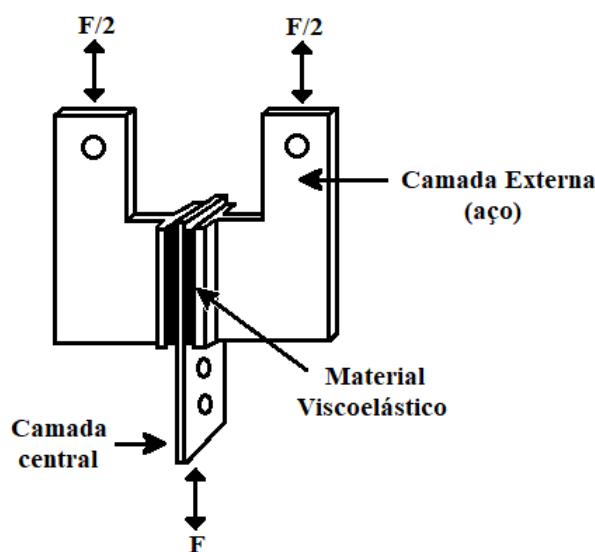
Fonte: Chen et al. (2003).

Nesse caso o maior interesse é na viscosidade variável do material “inteligente”, alterando a força de amortecimento a partir de alterações no campo magnético externo, uma vez que a matriz magnetoreológica é fluida e não sólida como o caso de estudo deste trabalho, o que faz com que a proposta dessa dissertação seja inovadora, uma vez que matrizes sólidas do material magneto sensível podem explorar grandes variações em rigidez, alterando a frequência natural do sistema a ser controlado.

2.4 Dispositivos viscoelásticos

A arquitetura básica de dispositivos com emprego de materiais viscoelásticos é simples, sendo classificado um amortecedor de dupla camada no qual o material viscoelástico é aprisionado entre duas camadas vinculares, gerando sua força de amortecimento principalmente devido à deformação em cisalhamento em detrimento da deformação extensional (SHEDBALE; MULEY, 2017), vide Figura 11.

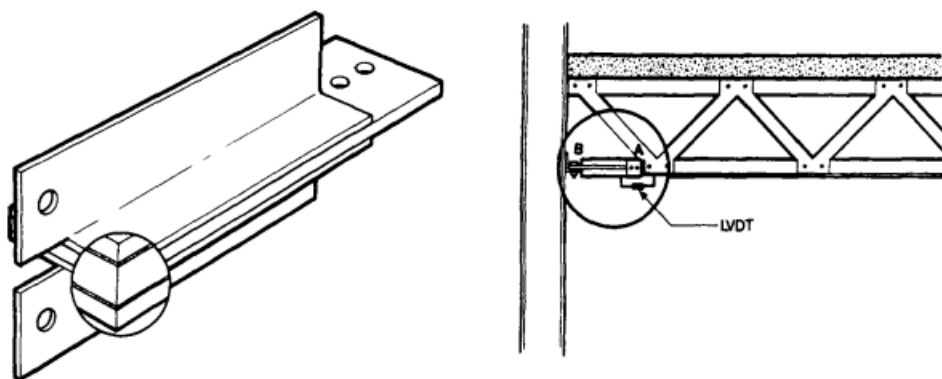
Figura 11 – Amortecedor de duas camadas.



Fonte: Shedbale e Muley (2017).

Os amortecedores viscoelásticos têm sua primeira aplicação conhecida na Engenharia Civil em 1969 nos edifícios *World Trade Center*, em Nova Iorque nos Estados Unidos, destruídos em 2001 na tragédia do 11 de setembro. Neste caso com o objetivo de suprimir deslocamentos causados pelo vento para um valor dentro do Estado Limite de Serviço da estrutura, dissipando a energia de entrada na forma de calor, agindo como um mecanismo de controle passivo. O *design*, ou concepção adotada remete ao modelo básico apresentado na Figura 11, possuindo as duas camadas típicas de material viscoelástico vinculadas à chapas rígidas. Foram distribuídos aproximadamente 10.000 dispositivos em cada uma das torres, desde o décimo ao centésimo décimo andares, os dispositivos foram posicionados nos banzos inferiores das treliças metálicas da estrutura (ponto A da Figura 12), ancorados nas colunas das paredes externas, vide ponto B da Figura 12 (SAMALI; KWOK, 1995).

Observando o posicionamento do dispositivo na Figura 12, constata-se a inclusão do mesmo como se fosse um elemento estrutural da estrutura principal. Mesmo levando em conta as diferenças dos amortecedores usuais, que trabalham com a dissipação da energia relacio-

Figura 12 – Amortecedores viscoelásticos do *World Trade Center*.

Fonte: Samali e Kwok (1995).

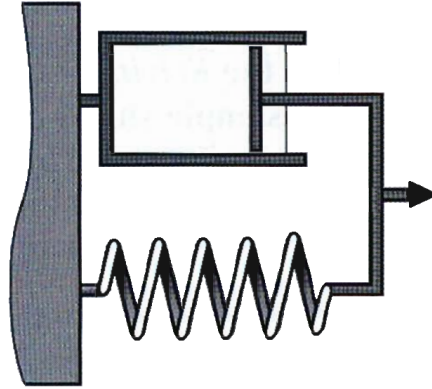
nada ao amortecimento, e o dispositivo aqui proposto, que trabalha com a mudança da rigidez e controle pela frequência natural, postula-se que a melhor forma de inclusão de um dispositivo “inteligente” na estrutura seja semelhante. O material viscoelástico magnetoreológico deve conferir um mínimo de rigidez passiva à estrutura, suficiente para que quando alterada consiga evitar a ressonância, para isso, imagina-se que a melhor maneira de atingir esse objetivo é sendo incorporado em meio à um elemento estrutural de maneira a interagir com a estrutura principal, equiparando valores de rigidez à um mínimo para o controle.

2.5 Modelo Kelvin Voigt

Para a determinação das propriedades dinâmicas das amostras ensaiadas no procedimento experimental deste trabalho, é necessário um modelo físico que seja capaz de reproduzir (simular) o comportamento dinâmico de cada ponto ensaiado com erro satisfatório, para isso foi utilizado o Modelo Kelvin Voigt, usualmente aplicado em sólidos viscoelásticos. Em suma, os resultados experimentais de entrada e resposta são submetidos à equação governante do modelo, assim são obtidos valores de constantes com significado físico de grande interesse (módulo de cisalhamento e viscosidade), que retroativamente podem ser aplicados em um dos parâmetros de aquisição (entrada ou resposta), de forma a obter o outro, podendo-se calcular o erro entre sinal experimental e simulado. Carvalho (2019) explora a quantificação deste erro para vários sinais obtidos com procedimento experimental semelhante ao deste trabalho obtendo erro máximo de 1 %, validando o uso do Modelo Kelvin Voigt para desenvolvimento de tecnologias de controle de vibração, uma vez que coeficientes de segurança facilmente ultrapassam o valor do erro experimental.

A formulação do modelo é simples e consiste em explicar o comportamento viscoelástico, que é assumido como a combinação em paralelo do comportamento idealmente elástico

Figura 13 – Representação Modelo Kelvin Voigt.



Fonte: Mezger (2020).

(mola) e o comportamento idealmente viscoso (amortecedor), ou seja, é uma discretização a um grau de liberdade baseada no modelo mola-amortecedor, desprovido de massa, vide Figura 13.

A parcela elástica do movimento relaciona-se fisicamente com o armazenamento de energia aplicada, ou seja, perante a ação de uma força externa, uma mola sofre deslocamento porém tem a capacidade de restituição, retornando toda energia aplicada até atingir seu estado inicial imediatamente após a retirada da força, sendo essa característica expressa matematicamente pela Lei de Hooke, onde força e deformação são proporcionais. A parcela viscosa pelo contrário relaciona-se com a perda de energia transmitida por forças externas, convertendo-a em trabalho de deformação e calor friccional entre moléculas, com deformação permanente e sem capacidade de restituição, sendo essa característica expressa matematicamente pela Lei de Newton-Stokes, onde força e velocidade de deformação são proporcionais.

A junção dos modelos idealmente elástico e viscoso do Modelo Kelvin Voigt atribui para a parcela viscosa do amortecedor a capacidade de restituição: ao ser retirada a força externa a parcela da elástica conduz o sistema ao seu estado inicial não deformado, porém de maneira não imediata devido à parcela viscosa, que amortece o movimento convertendo parte da energia total aplicada em trabalho de deformação e calor.

A equação do modelo relembra a equação de movimento clássica para sistemas dinâmicos, o que ajuda a entender a relação de semelhança entre as grandezas de viscosidade e amortecimento, bem como módulo de cisalhamento e rigidez. Considera-se uma força dinâmica agindo sobre o sistema mola-amortecedor, a Equação 2.2 descreve seu movimento.

$$\tau(\dot{\gamma}) = \eta \dot{\gamma} + G\gamma \quad (2.2)$$

na qual:

– τ , é o vetor de entrada em tensão [Pa];

- γ , é o vetor de resposta em deformação [m/m];
- η , é a viscosidade dinâmica [Pa·s];
- $\dot{\gamma}$, é o vetor de resposta em velocidade de deformação [m/m·s];
- G , é o módulo de cisalhamento dinâmico [N/m];

As expressões para as constantes G e η são obtidas pela aplicação da condição de contorno que, é explicada fisicamente pelo deslocamento máximo acontecer ponto de velocidade zero, ou seja, o pico de deslocamento ocorre na mudança de fase do movimento, vide Equação 2.3.

$$\dot{\gamma} = 0 \rightarrow \gamma = \gamma_A \quad (2.3)$$

na qual:

- γ_A , é a deformação máxima do ciclo;

Aplicando a condição de contorno (Equação 2.3), é possível isolar a variável módulo de cisalhamento dinâmico, resultado na Equação 2.4.

$$G = \frac{\tau(\gamma_A)}{\gamma_A} \quad [N/m] \quad (2.4)$$

Com o valor do cisalhamento dinâmico, é possível calcular o valor da viscosidade por substituição voltando à equação geral do modelo (Equação 2.2). Após isolar a viscosidade a seguinte Equação 2.5 é obtida.

$$\eta = \frac{\tau(\gamma) - G\gamma}{\dot{\gamma}} \quad [Pa \cdot s] \quad (2.5)$$

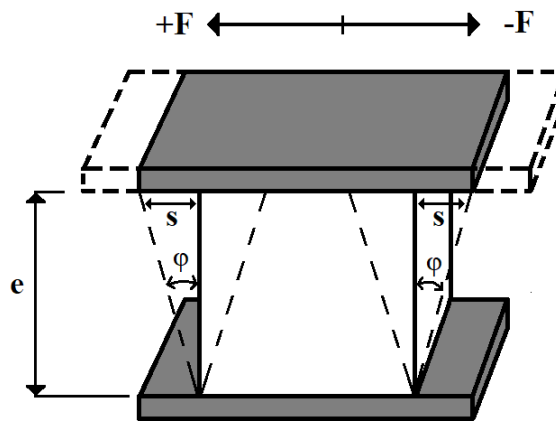
2.6 Ensaios oscilatórios

Ciclos de histerese são plotagens de tensão por deformação (ou grandezas análogas), oferecendo representações gráficas do comportamento de diferentes materiais quando submetidos às ações externas, e sua interpretação facilita a compreensão dos fenômenos reológicos, uma vez que para cada tipo de material são atribuídas propriedades gráficas diferentes e visíveis.

Ensaios oscilatórios consistem em submeter amostras à excitações harmônicas e, através da manipulação matemática dos dados de entrada e resposta, oferecer as ferramentas para interpretação das propriedades do material (caracterização dinâmica). Neste tipo de experimento um dos parâmetros (entrada ou resposta) necessariamente deve ser controlado, uma vez que, do contrário, a análise do comportamento do material se compromete, gerando dados arbitrários em diferentes regimes não comparáveis.

O princípio teórico que embasa ensaio oscilatórios é o Modelo de Couette, conhecido como “Modelo dos Dois Pratos”, onde a amostra do material é imaginada sob ação de uma força externa entre duas superfícies paralelas assumindo duas hipóteses: o fluxo é laminar; a amostra adere em ambas superfícies e não desliza ao longo delas. Uma das superfícies é assumida estacionária, enquanto a outra movimenta-se junto à amostra conforme ilustrado na Figura 14, onde F é o parâmetro de controle: amplitude da força de entrada aplicada no ensaio; s é o deslocamento máximo atingido no ciclo; φ é o ângulo de deflexão gerado pelo movimento oscilatório; e é a espessura da amostra.

Figura 14 – Representação de ensaios oscilatórios.



Fonte: Próprio autor.

Os sinais de entrada e resposta, bem como a derivada da resposta, portanto, podem ser expressos matematicamente por funções harmônicas, conforme Equação 2.6, Equação 2.7 e Equação 2.8.

$$\tau = \tau_A \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (2.6)$$

$$\gamma = \gamma_A \cdot \text{sen}(\omega t + \delta) \quad (2.7)$$

$$\dot{\gamma} = \gamma_A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \delta) \quad (2.8)$$

na qual:

- τ_A , é a tensão máxima do ciclo [Pa];
- ω , é a frequência angular de excitação [rad];
- t , é o tempo [s];
- δ , é a defasagem da resposta [rad];

A frequência em ciclos por segundo relaciona-se com frequência angular em radianos através da Equação 2.9:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (2.9)$$

na qual:

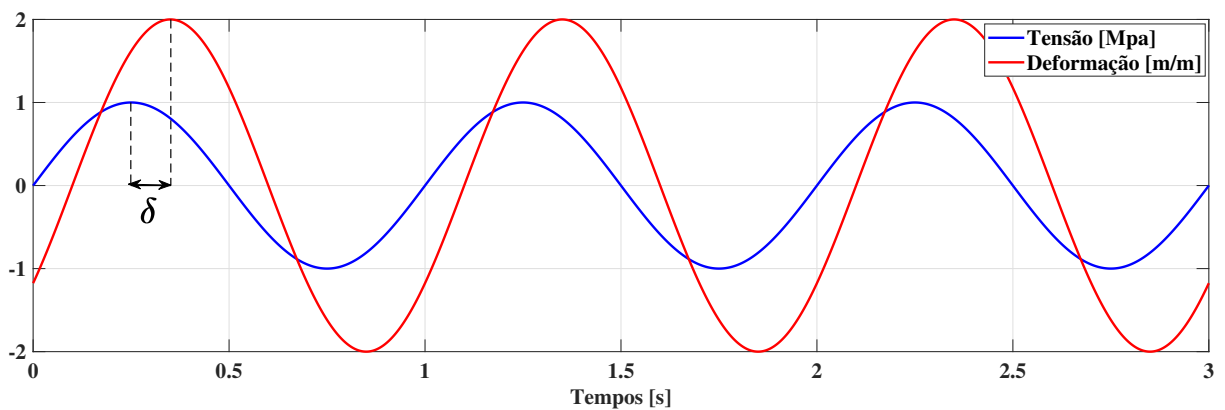
– f , é a frequência de excitação [Hz];

Para visualização gráfica dos conceitos a serem discutidos a seguir, foi elaborada uma simulação computacional com os seguintes parâmetros iniciais de entrada:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_A = 1 \text{ MPa} \\ \gamma_A = 2 \text{ m/m} \\ f = 1 \text{ Hz} \\ \delta = -\pi/5 \text{ rad} \\ t = [0.000 \ 0.003 \ 0.006 \ \dots \ 3.000] \text{ s} \end{array} \right.$$

Materiais viscoelásticos apresentam sinais de entrada e resposta adquiridos em ensaio oscilatório defasados quando comparados no mesmo período de tempo, isso ocorre devido ao atraso gerado pela parcela viscosa do material (amortecimento). Uma defasagem nula ou muito próxima à zero indica o comportamento idealmente elástico da amostra e uma alta (máximo 90°) indica o comportamento idealmente viscoso. A Figura 15 ilustra um exemplo simulado de aquisição de dados de entrada e resposta, utilizando os parâmetros apresentados anteriormente.

Figura 15 – Defasagem entre entrada e resposta para materiais viscoelásticos.

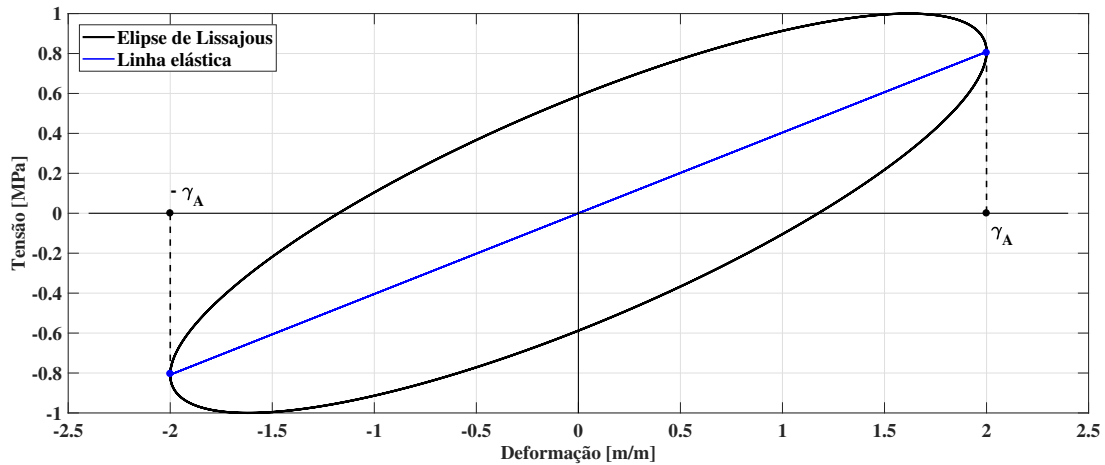


Fonte: Próprio autor.

A plotagem do ciclo de histerese, ou seja, de dois sinais cíclicos, resulta em uma elipse, que em termos matemáticos é definida uma *Figura de Lissajous*, e seu ângulo de inclinação e área estão diretamente ligados a rigidez e amortecimento da amostra respectivamente. A Figura 16 apresenta um exemplo usando os dados simulados, percebe-se que foi traçada a linha

elástica da elipse, correspondente aos pontos onde a deformação é máxima, em conformidade com a Equação 2.4. Estes pontos não devem ser confundidos com os pontos de vértice da elipse.

Figura 16 – Ciclo de histerese de materiais viscoelásticos.



Fonte: Próprio autor.

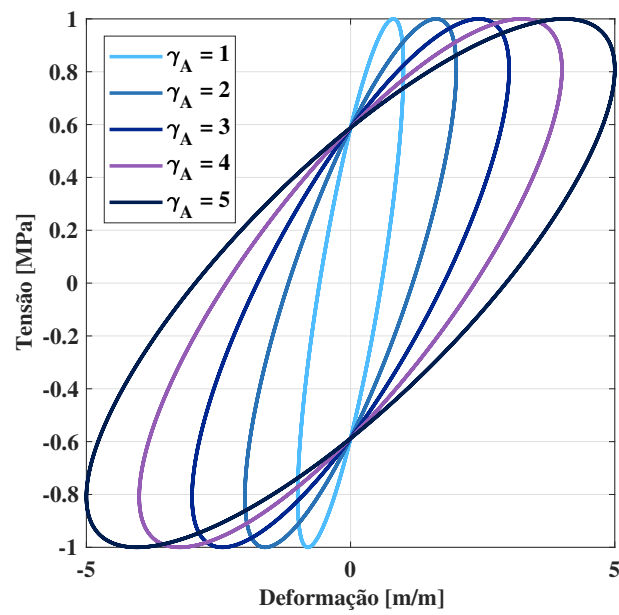
Para melhor compreensão da influência de cada variável de entrada na aquisição de ciclos de histerese simulados, foram elaboradas simulações onde uma variável de estudo foi escolhida, admitindo 5 valores diferentes, enquanto todas as outras foram mantidas constantes.

Primeiramente é feita a análise da influência da variável amplitude máxima de deformação, que foi variada de acordo com o vetor: $\gamma_A = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5] \ [m/m]$, as curvas obtidas estão dispostas na Figura 17.

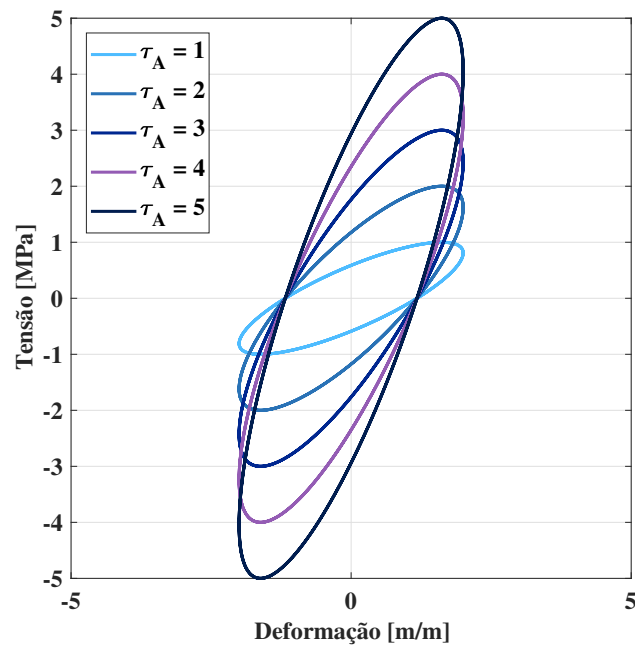
Observa-se pela Figura 17 que o efeito do aumento da amplitude máxima de deformação é o conseqüente aumento da área da elipse, ou seja, aumenta-se a perda de energia, ou o amortecimento atrelado aos ciclos, que se afastam de um comportamento ideal elástico rumo ao comportamento idealmente viscoso. Viscosidade e módulo de cisalhamento dinâmicos decrescem proporcionalmente a cada passo do aumento da amplitude de deformação, ou seja, tornam-se cinco vezes menores.

Os resultados da variação da grandeza amplitude máxima em tensão, simulado com o vetor de tensões: $\tau_A = [1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5] \ [MPa]$ podem ser consultados na Figura 18, onde é possível observar novamente o aumento das área de cada ciclo, ou seja, o aumento da perda de energia, porém dessa vez com o aumento proporcional do módulo de cisalhamento e viscosidade dinâmicos em cinco vezes.

Estas análises ajudam no entendimento do conceito de regime viscoelástico, em ensaios oscilatórios, pois a variação desses dois parâmetros (tensão e deformação máximas) nada mais é do que a variação do parâmetro de controle de ensaio, ou seja, em ensaios de deslocamento controlado o comportamento esperado corresponde ao mesmo da Figura 17, enquanto ensaios de

Figura 17 – Influência de γ_A .

Fonte: Próprio autor.

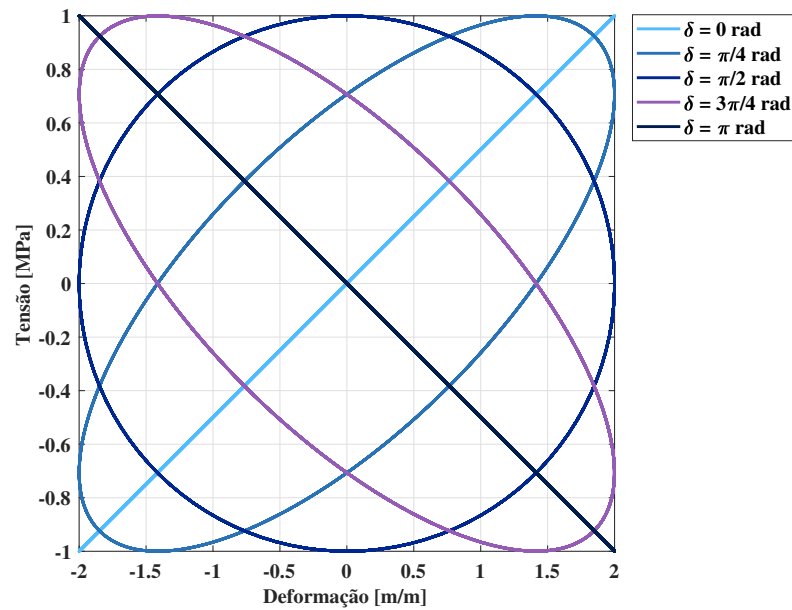
Figura 18 – Influência de τ_A .

Fonte: Próprio autor.

força controlada correspondem a Figura 18. Portanto, em ensaios de deslocamento controlado para materiais viscoelásticos dentro do limite de comportamento linear viscoelástico, espera-se

a diminuição proporcional da viscosidade e módulo de cisalhamento dinâmicos, bem como o aumento da perda de energia aplicada ao sistema; para ensaios de força controlada, espera-se o aumento proporcional da viscosidade e módulo de cisalhamento e, novamente, o aumento da energia dissipada. Destaca-se que a simulação gerada limita-se no intervalo linear viscoelástico teórico de uma amostra, que na prática pode ser ultrapassado, promovendo aumentos não lineares das grandezas.

Figura 19 – Influência de δ .



Fonte: Próprio autor.

Por fim, a Figura 19 dispõe os resultados com a variação da defasagem em valores: $\delta = [0 \ \pi/4 \ \pi/2 \ 3\pi/4 \ \pi] \ [rad]$. É possível observar a mudança de fase e a transição entre comportamentos ideal elástico nos valores extremos, onde não há nenhuma dissipação de energia sendo o ciclo apenas a linha elástica, para o comportamento ideal viscoso, onde o ciclo toma forma de uma circunferência e a dissipação de energia é a máxima limitada aos parâmetros da amostra, os pontos adjacentes são intermediários entre esses pólos, conhecidos como *ponto de gel*, com defasagem de 45° (MEZGER, 2020).

2.7 Vibração de sistemas com um grau de liberdade

O sistema 1GDL (Um Grau de Liberdade), é definido como o sistema dinâmico cujo a equação de movimento é governada por uma Equação Diferencial Ordinária (EDO) de segunda ordem. Apenas duas condições de contorno (posição e velocidade) são necessárias para descrever a trajetória do sistema (SISEMORE; BABUŠKA, 2020).

Muitas estruturas podem ser modeladas como sistemas de um grau de liberdade, sua representatividade é o motivo pelo qual foi escolhido para generalizar um caso de estudo para este trabalho. Com características do sistema (rigidez e amortecimento) determinadas pelo Modelo Kelvin Voigt, que descreve o comportamento do material magnetoreológico, e uma massa teórica que representa a massa de uma estrutura ou elemento estrutural idealizado, ou seja é um modelo Massa-Mola-Amortecedor tendo a peculiaridade de ser um sistema “inteligente”, ou seja, capaz de mudar suas propriedades intrínsecas de rigidez e amortecimento dentro de um intervalo de controle através o efeito magnetoreológico em resposta a ativação de um campo magnético.

Como anteriormente mencionado, diversas estruturas ou mesmo elementos estruturais submetidos à ações dinâmicas podem ser idealizados em sistemas 1GDL. De fato, para cada caso apresentado em seção 2.1 é possível e viável elaborar simulações computacionais para inúmeras situações relevantes, porém procedimentos experimentais específicos são um desafio, pois nem sempre serão viáveis. Outro fator que contribui para aumentar a representatividade desses sistemas para diversos casos práticos é o desenvolvimento de técnicas de subestruturação dinâmica, que visam a decomposição de sistemas complexos em múltiplos sistemas com graus de liberdade reduzidos, muitas vezes buscando sistemas 1GDL (KLERK; RIXEN; VOORMEEREN, 2008).

A seguir serão apresentadas as grandezas e expressões matemáticas pertinentes para o cálculo computacional de simulações de controle neste trabalho, primeiramente apresenta-se o modelo idealizado de um sistema 1GDL, bem como sua equação de movimento, vide Figura 20 e Equação 2.10 (MAIA; SILVA, 1997). Ressalta-se a escolha do equacionamento de um sistema 1GDL clássico, com rigidez elástica e amortecimento viscoso ideal, sendo também possível a escolha um equação de movimento propriamente viscoelástica, entendendo-se que, para os objetivos deste trabalho, uma análise com um sistema clássico também é válida.

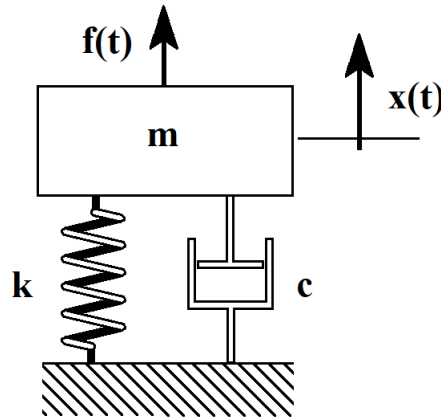
$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (2.10)$$

na qual:

- m , é a massa inercial infinitamente rígida $[kg]$;
- k , é a constante elástica da mola idealmente elástica sem massa $[N/m]$;
- c , é o coeficiente de amortecimento do amortecedor idealmente viscoso sem massa $[Pa \cdot s]$;
- $f(t)$, é a força de excitação no tempo aplicada ao sistema $[N]$;
- $x(t)$, é a resposta em deslocamento no tempo $[m]$;

O cálculo de k e c é possível pela Equação 3.18 e Equação 3.19, a partir da caracterização do material (ver subseção 3.5.4).

Figura 20 – Representação discretizada de um sistema de um grau de liberdade.



Fonte: Próprio autor.

Ao igualar Equação 2.10 a zero, é possível a análise de variáveis significantes para descrever o sistema, esta técnica é chamada de análise de vibração livre do sistema, as variáveis a seguir são produto desta tratativa.

A frequência natural é aquela em que o sistema apresenta maiores amplitudes de deslocamento, seu valor, desconsiderando os efeitos do amortecimento é obtido através da Equação 2.11, e Equação 2.12.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.11)$$

na qual:

- ω_n , é a frequência natural angular não amortecida do sistema [*rad*];

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \quad (2.12)$$

na qual:

- f_n , é a frequência natural não amortecida do sistema [*Hz*];

O amortecimento crítico é uma grandeza proveniente da análise de vibração livre, e expressa o valor limite do amortecimento de um sistema para que este mude seu comportamento de resposta dinâmica entre os regimes subamortecido, onde uma resposta para uma entrada em impulso completa ciclos até o equilíbrio estático ser alcançado, e o superamortecido, onde nenhum ciclo é atingido. Seu cálculo é dado pela Equação 2.13.

$$c_c = 2m\omega_n \quad (2.13)$$

na qual:

- c_c , é o amortecimento crítico do sistema [$Pa \cdot s$];

O coeficiente de amortecimento é uma grandeza adimensional relevante para simplificações de expressões, é dado pela Equação 2.14.

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (2.14)$$

na qual:

- ζ , é o coeficiente adimensional de amortecimento do sistema ;

Considerando o efeito do amortecimento que muitas vezes pode ser irrelevante para o valor da frequência natural, a Equação 2.15 e a Equação 2.16 são obtidas.

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (2.15)$$

na qual:

- ω_d , é a frequência natural angular amortecida do sistema [rad];

$$f_d = \frac{\omega_d}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m} (1 - \zeta^2)} \quad (2.16)$$

na qual:

- f_d , é a frequência natural amortecida do sistema [Hz];

Como mencionado anteriormente na seção 2.2, a Função de Resposta em Frequência (FRF) permite análises profundas quanto ao comportamento dinâmico de sistemas, no caso deste trabalho seu uso é primordial, uma vez que propõe-se que o dispositivo magnetoreológico seja capaz de controlar a resposta por meio da alteração da frequência natural, utilizando como parâmetro de segurança a magnitude de meia potência.

O cálculo da FRF analítica em valor absoluto (magnitude) segundo Equação 2.17 envolve o uso de números imaginários, que relacionam-se com a parcela envolvida no amortecimento do sistema, é aplicado o uso de logaritmo para converter a grandeza em Decibéis.

$$|H(i\omega)| = 20 \cdot \log_{10} \left| \left(\frac{(1/m)}{(\omega_n^2 - \omega^2) + 2i\zeta\omega_n\omega} \right) \right| \quad (2.17)$$

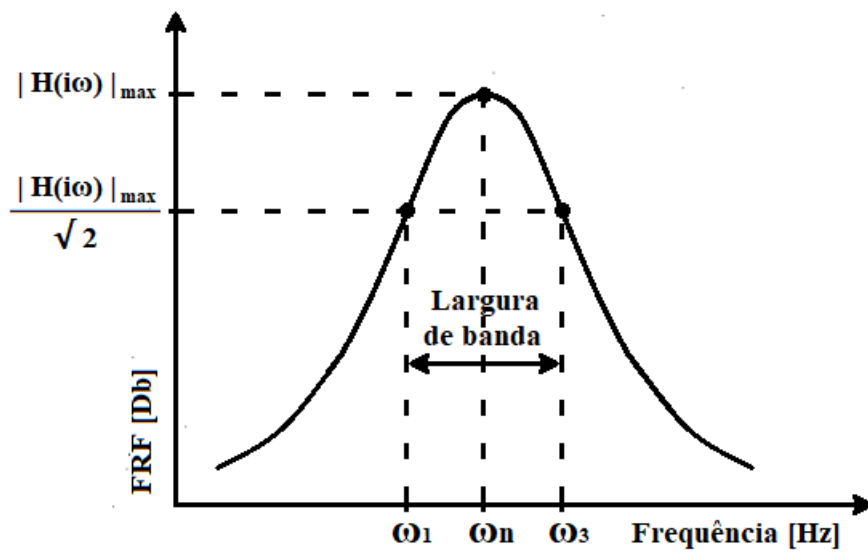
na qual:

- $H(i\omega)$, é a magnitude da Função de Resposta em Frequência do sistema [Db];
- i , é a unidade imaginária dada por $\sqrt{-1}$.

A magnitude de meia potência é o valor da resposta em magnitude de um sistema para o qual a energia dissipada por ciclo é metade da energia máxima possível de ser dissipada na condição de ressonância (limitada pelas características do sistema). Essa grandeza é referida

por Maia e Silva (1997) como os “flancos do pico da resposta”, indicando um ponto inicial onde a influência do pico de ressonância atenua-se. A Figura 21 ilustra os pontos de meia potência e, através da Equação 2.18, é possível o seu cálculo. Este valor foi escolhido neste trabalho como parâmetro de segurança, ou seja, admite-se que, ao mudar a frequência natural do sistema através do acionamento do campo, que por sua vez aumenta a rigidez e o amortecimento do sistema, caso a frequência de excitação harmônica excite o sistema abaixo de magnitude de meia potência média estimada, o dispositivo agiu com sucesso, evitando regimes ressonantes e respostas excessivas.

Figura 21 – Pontos de meia potência para um sistema 1GDL.



Fonte: Próprio autor.

$$\left| H(i\omega)_{\frac{1}{2}} \right| = \frac{|H(i\omega)|_{max}}{\sqrt{2}} \quad (2.18)$$

na qual:

- $\left| H(i\omega)_{\frac{1}{2}} \right|$, é magnitude de meia potência [Db];
- $|H(i\omega)|$, é a magnitude máxima [Db].

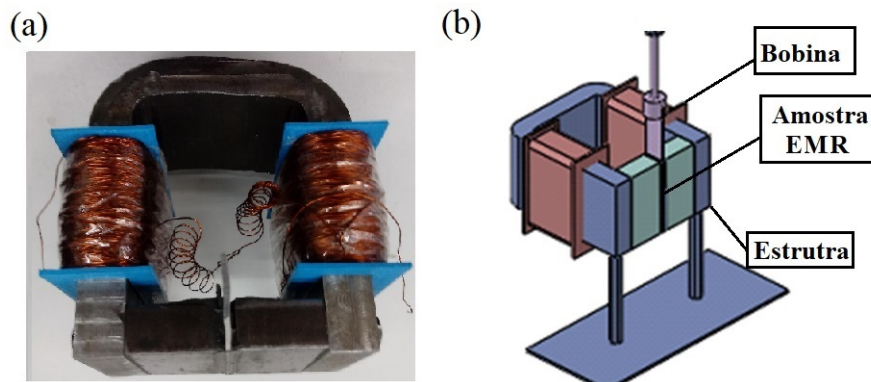
As variáveis ω_1 e ω_2 são as frequências de meia potência, e neste trabalho são obtidas computacionalmente por meio do índice de vetor na magnitude de meia potência.

3 Parte experimental

3.1 Dispositivo viscoelástico

A concepção da arquitetura básica do dispositivo de controle com emprego de material EMR remete as técnicas básicas de emprego de materiais viscoelásticos em amortecedores (Figura 11), ou seja, consiste em camadas de material rígido (aço por exemplo) vinculadas entre camadas do material viscoelástico. A principal diferença quando o material intra-camadas é dotado de propriedades magnetoreológicas é a necessidade de aplicação de um campo com intensidade controlável que possa influenciar mudanças de propriedades dinâmicas. Para atender estes propósitos foi desenvolvido um dispositivo em formato de “ferradura” ou “C”, que, devido sua geometria, não só conduzirá o campo ao ponto de interesse, mas também será estrutura para o acoplamento de bobinas de cobre geradoras de campo alimentadas por uma fonte de energia elétrica em corrente contínua. Esta primeira versão do dispositivo ilustrada na Figura 22 foi proposta por Fukushima (2021), sendo uma adaptação da concepção proposta por Tian e Nakano (2018) (Figura 23).

Figura 22 – Dispositivo EMR desenvolvido no *LabSin*. (a) Foto real. (b) Diagrama.

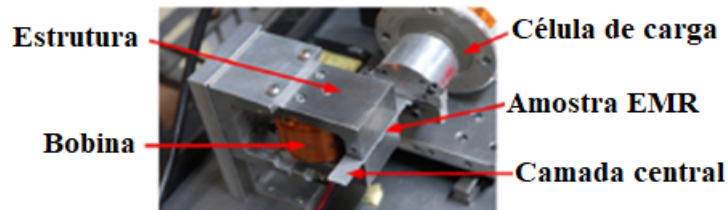


Fonte: Próprio autor

Ao dispositivo “ferradura” ilustrado na Figura 22 foi feita uma adaptação neste trabalho: os vínculos, ou camadas externas externas do dispositivo viscoelástico foram reduzidos cerca de um terço em sua dimensão longitudinal em formatos de trapézios conforme a Figura 24, essa alteração visa a economia de material dispersante (ferro carbonila), cotado, para realização deste trabalho, em 2.306.00 R\$/Kg (equivalente a três cestas básicas por kilo), ou seja, sua redução é bem vinda quanto ao aspecto financeiro da realização de ensaios, bem como otimiza a condução de campo magnético, uma vez que a nova geometria promove maior concentração do campo, sendo também interessante do ponto de vista de alcance de um maior intervalo de

tensões, uma vez que a geometria da amostra de EMR está diretamente ligada a sua rigidez, com amostras menores exige-se menos do equipamento excitador (*shaker*), e com este mesmo objetivo também foi aumentada a espessura da amostra em aproximadamente um terço, ou seja, a distância horizontal entre as duas camadas externas em sua região de contato com a amostra.

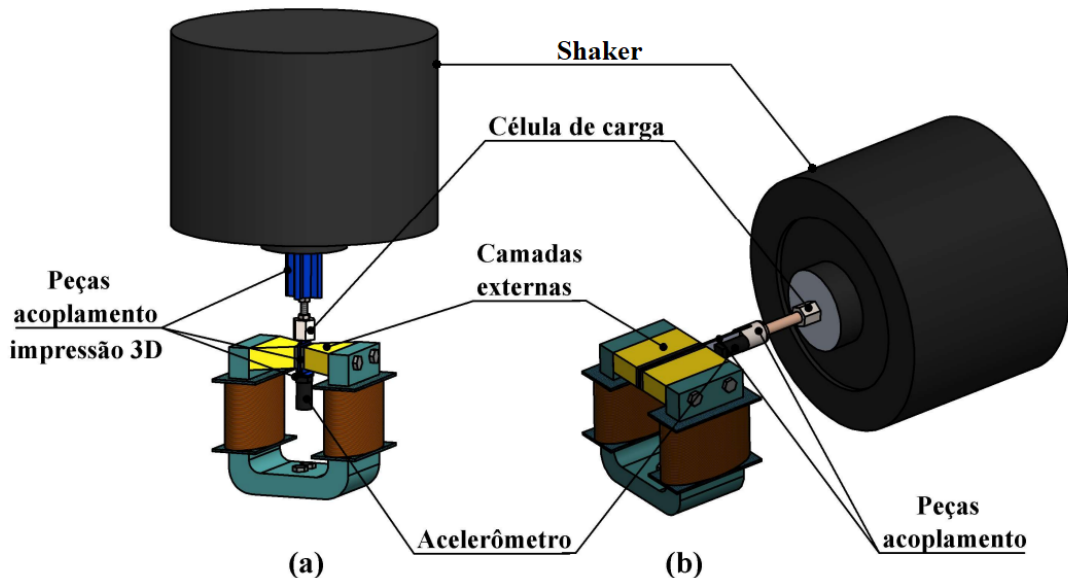
Figura 23 – Dispositivo EMR.



Fonte: Tian e Nakano (2018).

A direção de excitação da amostra foi alterada, sendo agora na direção transversal dos suportes vinculares, ou seja, verticalmente, visando facilitar a fixação do dispositivo na fase experimental, possibilitando que a estrutura de “ferradura” seja ancorada em seu platô (extremidade plana), vide Figura 24. Estas novas disposições foram adotadas pelo grupo como padrão para o desenvolvimento dos próximos trabalhos.

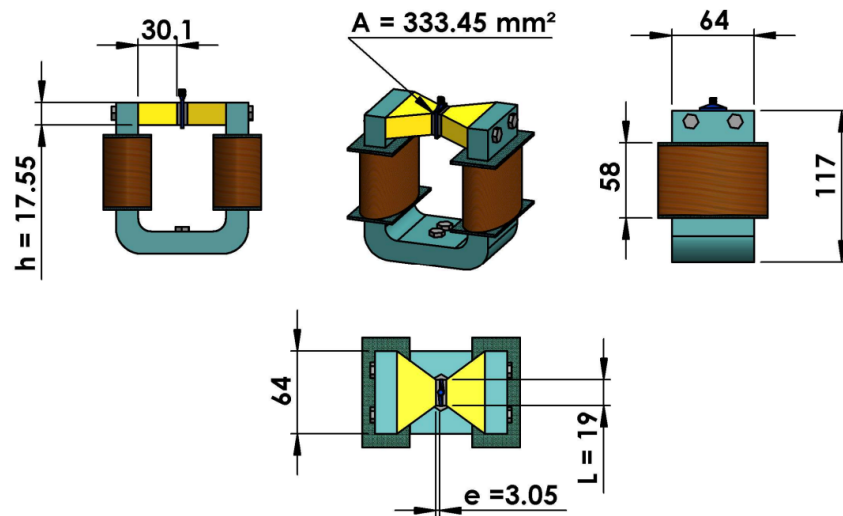
Figura 24 – Comparação entre experimentos. (a) Arranjo atual. (b) Arranjo anterior (2021)



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 25 é possível consultar as dimensões do dispositivo viscoelástico desenvolvido, foram destacadas as medidas entre amostra EMR e dispositivo, sendo e a espessura da amostra, h sua altura, L sua largura e A sua área de contato com o dispositivo.

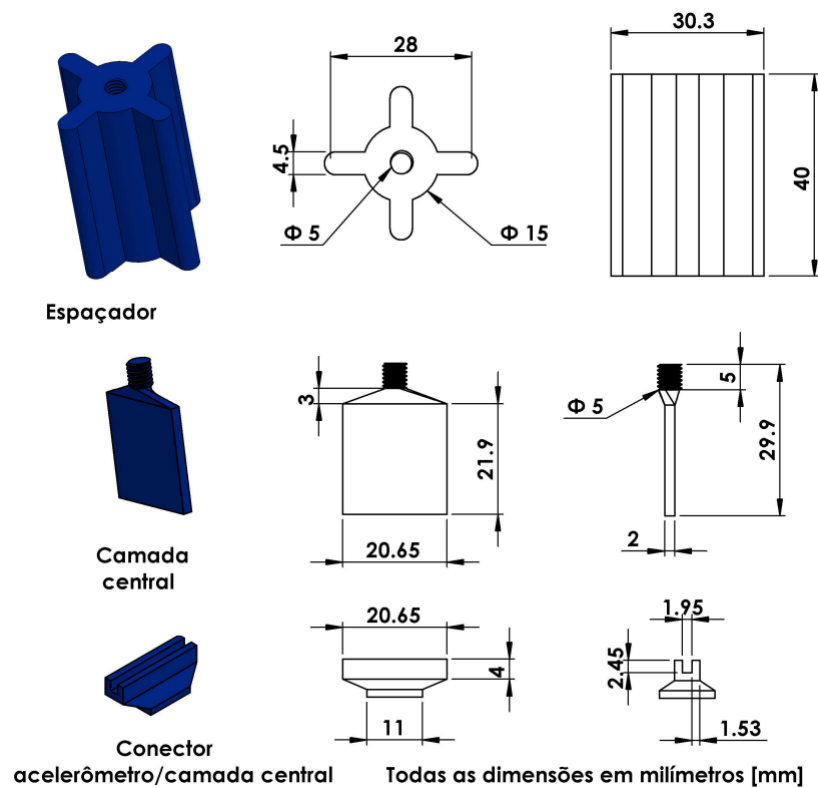
Figura 25 – Dimensões do dispositivo viscoelástico desenvolvido.



Todas as dimensões em milímetros [mm]

Fonte: Próprio autor.

Figura 26 – Peças de acoplamento fabricadas.



Todas as dimensões em milímetros [mm]

Fonte: Próprio autor.

As peças estruturais entre dispositivo e fonte de excitação também foram alteradas uma vez que, em ensaios anteriores foram detectados harmônicos gerados pelo acoplamento entre peças, bem como foi decidido pelo grupo alterar o posicionamento dos sensores de entrada (célula de carga) e de saída (acelerômetro) com o objetivo de deixar os resultados mais precisos, vide Figura 24.

Uma vez que as dimensões dos componentes estruturais de acoplamento projetados para este trabalho são específicas e incomuns, o grupo utilizou da impressão 3D para fabricação de peças, sendo um processo muitas vezes de tentativa e erro com várias correções necessárias, vide Figura 26. O equipamento utilizado foi a impressora 3D da marca CREALITY modelo HALOT-ONE, o material de impressão é resina.

A alteração do material da camada central do amortecedor de três camadas acarreta na inevitável mudança de força de aderência entre resina e amostra EMR quando comparada aos ensaios anteriores em que o componente era em aço, porém, uma vez que os deslocamentos obtidos são baixos (máximo de 37 microns), a força de aderência não deverá afetar os resultados e só assim o faria se o regime adotado fosse próximo a ruptura do dispositivo.

3.2 Bancada de ensaio

O procedimento experimental de caracterização dinâmica do material EMR recria e adapta processos conhecidos da literatura de ensaios em materiais viscoelásticos, com sua essência em ensaios oscilatórios. Destaca-se como maior contribuição ao presente arranjo experimental o trabalho de (FUKUSHIMA, 2021), que foi revisado em todas as esferas pelo grupo de pesquisa, sendo feitas algumas alterações desde a arquitetura de peças e disposição instrumental, bem como a otimização de algoritmos de aquisição culminando em um sistema otimizado, capaz de caracterizar o material em diferentes regimes de entrada em tensão com maior precisão, que é ilustrado pela Figura 27.

A alimentação das bobinas é feita via fonte de bancada da marca MINIPA modelo MPC-303DI, com limite de $\pm 30\text{ V}$, vide Figura 27-G.

O procedimento de ensaio deve submeter o dispositivo a uma excitação em um grau de liberdade, tal entrada é gerada pelo *shaker* da marca ROBOTRON, modelo ESE 221 TYP 11077, vide Figura 27-C.

A resposta do sistema é obtida em aceleração pelo acelerômetro da marca PCB, modelo 333B, vide Figura 27-E, que conecta-se ao sistema por uma peça fabricada em resina (suporte acelerômetro/camada central), unidos com cêra. A união entre camada central e peça conectora é por adesivo a base de cianoacrilato.

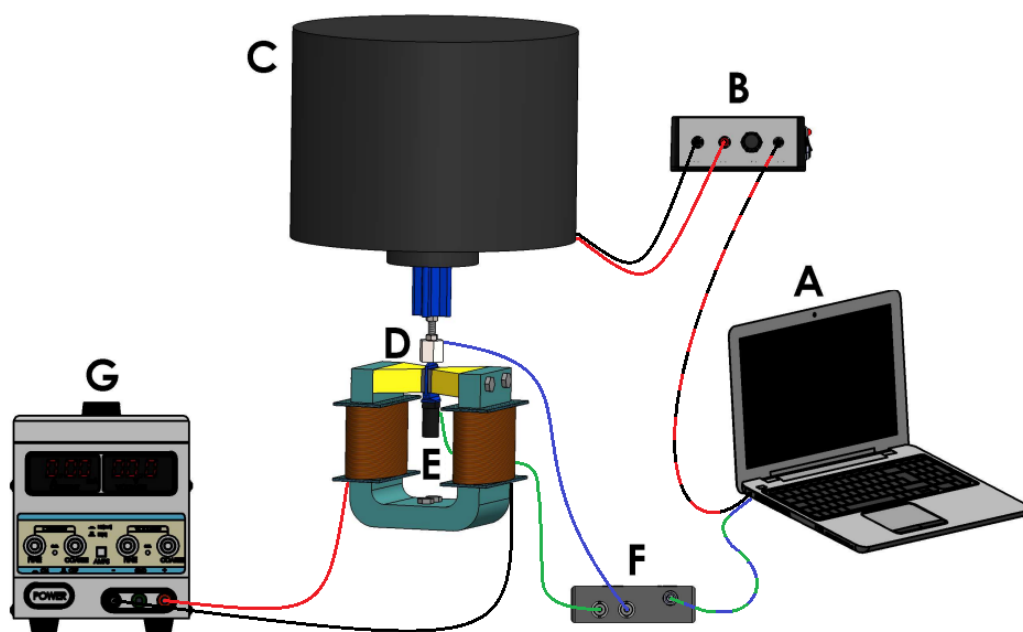
O parâmetro de controle em tensão é obtido por meio do controle do sinal de excitação emitido pelo *shaker* através de um amplificador da marca CROWN, modelo XLS1000, vide

Figura 27-B

O sinal de entrada é gerado por um computador (Figura 27-A) por meio do algoritmo de aquisição, seu valor é medido por uma célula de carga, vide Figura 27-D. A cada rodada é retornado o valor RMS do sinal de entrada em força (Newtons), que é processado pelo algoritmo de aquisição.

Ambos sensores de aquisição (célula de carga e acelerômetro) retornam o sinal através de um condicionador de sinais Figura 27-F, uma vez que não geram a energia necessária para retornarem seus sinais diretamente via cabos.

Figura 27 – Diagrama da bancada de ensaio.



Fonte: Próprio autor.

A temperatura da bobina também foi monitorada com o termômetro digital da marca FULL GAUGE, modelo PENTA, com o objetivo de prevenir que a temperatura atingida na parte externa das espiras de cobre se aproximasse do ponto de fusão do cobre, por volta de 110°C , bem como averiguar variação de temperatura entre rodadas do ensaio, ou seja, para cada campo esperou-se que a temperatura atingisse um valor de equilíbrio.

Na Figura 28 é possível consultar cada um dos instrumentos citados, sendo a foto real da bancada de ensaio para caracterização dinâmica do material.

Uma segunda fase de ensaio é necessária: para determinar qual o campo atingido no interior da amostra de EMR exige-se a introdução de uma sonda de gaussímetro, um processo invasivo que, para amostras em tamanhos reduzidos como esta, pode alterar os resultados, portanto os ensaios de caracterização são realizados sem a informação do campo magnético atingido, e o controle da intensidade é feito via amperagem da fonte de bancada.

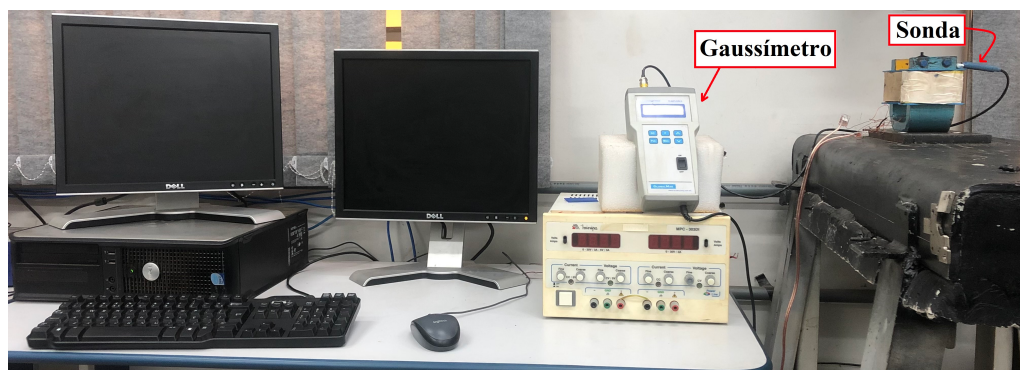
Figura 28 – Foto da bancada de ensaio.



Fonte: Próprio autor.

Após a obtenção dos resultados dinâmicos nas referidas amperagens as peças de conexão entre *shaker* e dispositivo são removidas e realiza-se um ensaio destrutivo da amostra, introduzindo a sonda do gaussímetro (GLOBALMAG-TLMP HALL) no interior da amostra EMR, em contato com a camada central do dispositivo de três camadas.

Figura 29 – Foto da bancada de ensaio na fase do ensaio destrutivo de campo-corrente.



Fonte: Próprio autor.

Primeiramente é realizada a eliminação do campo residual, para isso inverte-se os pólos da fonte e aplica-se um campo contrário ao do ensaio de caracterização, após o campo nulo

ser atingido, são refeitas as amperagens do ensaio anterior, o gaussímetro revela qual campo foi atingido em cada condição, os dados são armazenados para o cálculo da função matemática ajustada que relacionará o campo em Tesla em função da intensidade de corrente em Amperes. Na Figura 29 é possível visualizar a disposição instrumental do ensaio destrutivo de campo-corrente.

3.3 Parâmetros de aquisição

As grandezas físicas de parâmetro para o procedimento experimental são: força de entrada F , frequência de excitação f , e corrente elétrica I , para cada uma delas foi escolhido um intervalo de trabalho com diferentes critérios.

Para a tensão de entrada o critério de escolha foi a própria limitação instrumental, após testes empíricos foi averiguado saturação nos sinais de resposta em ensaios com entrada de força próximas ou acima de 5 N , inicialmente pela limitação imposta pelo condicionador de sinais, ultrapassando sua amplitude máxima de trabalho, portanto foi decidido que a força máxima de ensaio seria de 3.5 N . Como grande parte da proposta de inovação deste ensaio para ensaios anteriores é a capacidade de obter múltiplos regimes de entrada, foi adotada a divisão em 5 regimes de análise, resultando em um vetor de forças: $F = [0.7 \ 1.4 \ 2.1 \ 2.8 \ 3.5] \ N$, que pode ser convertido em tensão pela simples divisão pelo valor da área de contato da amostra “A”, resultando em um vetor $\tau = [1.05 \ 2.10 \ 3.15 \ 4.20 \ 5.25] \ kPa$.

A escolha do intervalo de trabalho para a frequência de excitação também levou em conta limitações, porém da própria estrutura do sistema de aquisição. O dispositivo é ancorado em uma mesa robusta de concreto que assim como qualquer sistema tem sua frequência natural. Foi observado que, para frequências entre 70 – 80 Hz a mesa atingia um padrão de vibração desviando parte da energia de entrada do sistema, alterando os resultados. Posicionando objetos com grande massa na mesa este fenômeno era suprimido, porém, trabalhando com frequências até 60 Hz foi possível evitar essas adaptações, sendo um intervalo dentro da proposta deste trabalho, uma vez que estruturas de Engenharia Civil tendem a ter frequências naturais baixas, bem como sendo um intervalo que proporciona uma boa visibilidade do comportamento do material. A frequência mínima de 10 Hz é estabelecida pelo limite de aquisição acelerômetro (também de 10 Hz). Foram adotados passos de 5 Hz , totalizando 11 frequências de aquisição, com o vetor $f = [10 \ 15 \ 20 \ 25 \ 30 \ 35 \ 40 \ 45 \ 50 \ 55 \ 60] \ Hz$.

Quanto à corrente elétrica, após testes empíricos foi observado que a resposta do material para grandes correntes, tornando-se mais rígido, demandava um grande acréscimo de energia de excitação, aumentando imprecisões na aquisição uma vez que a energia perdida entre os acoplamentos dos componentes estruturais do sistema também tende a aumentar, portanto foi adotada uma corrente máxima de 10 A . A corrente mínima é a situação de campo nulo ($I = 0 \ A$). Com passos de 2 A , o vetor de correntes totaliza 6 elementos: $I = [0 \ 2 \ 4 \ 6 \ 8 \ 10] \ A$. Após

o ensaio de campo-corrente descrito em seção 3.2, com resultados expressos pela Equação 4.2 (ver seção 4.2), foi obtido o correspondente vetor de campos magnéticos:

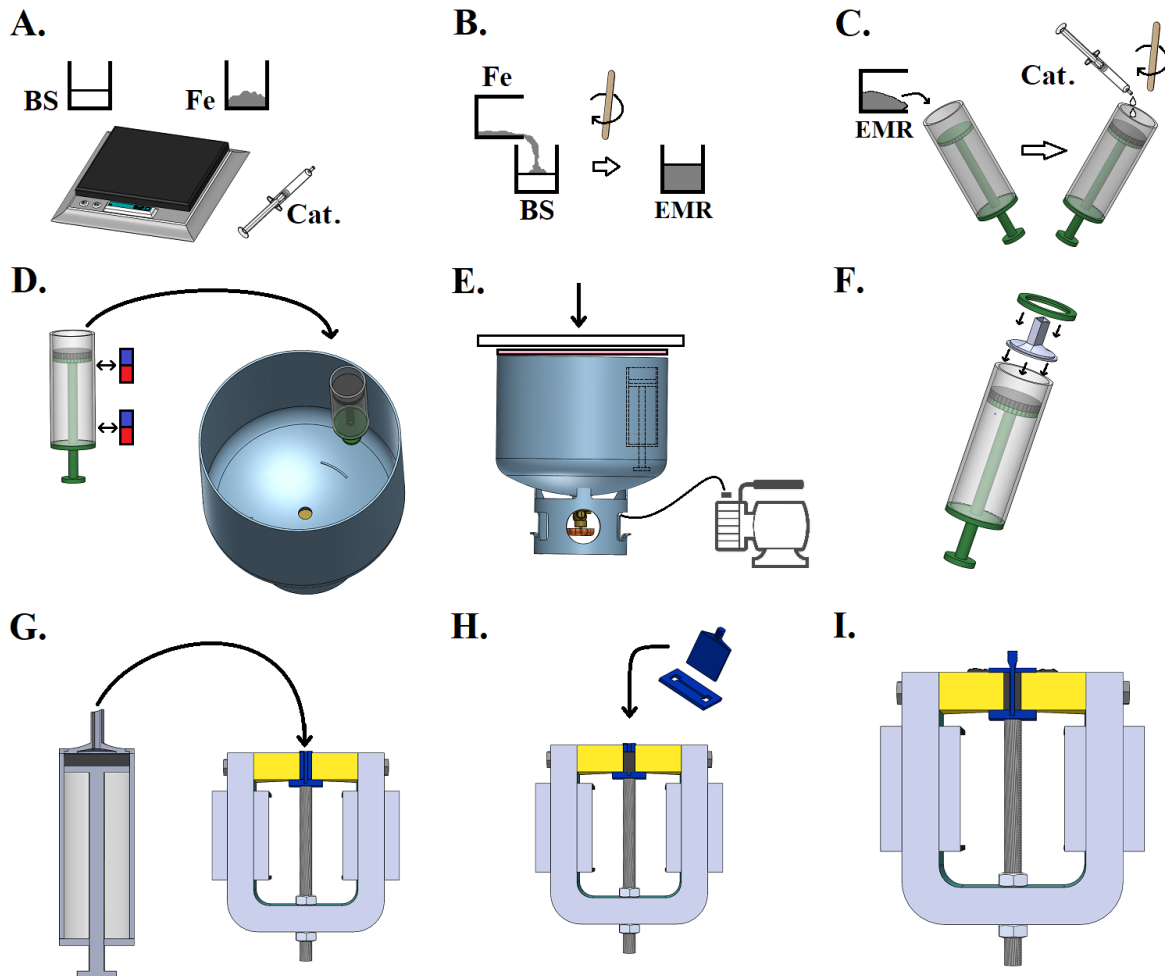
$$B = [0 \ 0.07 \ 0.14 \ 0.21 \ 0.28 \ 0.35] \text{ T}.$$

3.4 Fabricação de amostras

O processo de fabricação de amostras sofreu grandes alterações quando comparado aos trabalhos anteriores do grupo de pesquisa. Com exceção ao dimensionamento de amostras, essencialmente todos os outros processos sofreram alterações, isso por conta do problema do aprisionamento de bolhas no processo de cura do material EMR, que podem afetar a repetibilidade de ensaios, uma vez que o padrão de bolhas incorporadas é um fenômeno imprevisível.

A Figura 30 é uma ilustração *passo a passo* do procedimento de fabricação de amostras, que será descrito a seguir.

Figura 30 – Procedimento de fabricação de amostras.



Fonte: Próprio autor.

Primeiramente são separados em diferentes recipientes os materiais que formarão o composto: a Borracha de Silicone (BS), a Ferro Carbolina (Fe), e o Catalisador (Cat.), suas massas são dimensionadas segundo Equação 3.1, Equação 3.3 e Equação 3.4, respectivamente. Os resultados e valores de suas densidades podem ser consultados na Tabela 1. A medida das massas é feita por uma balança de precisão da marca COMMERCE BRASIL, modelo CBRN05529, vide Figura 30-A. Ressalta-se que os valores dimensionados nas equações deste tópico são posteriormente majorados por fins práticos de execução: multiplicam-se todos os valores obtidos por oito, valor testado empiricamente.

$$M_{BS} = (1 - C_V) \cdot \rho_{BS} \cdot V_{EMR} \quad (3.1)$$

na qual:

- M_{BS} , é a massa da Borracha de Silicone [g];
- C_V , é a concentração em volume de ferro carbonila da amostra dimensionada [%];
- V_{EMR} , é o volume de material composto de Elastômero Magneto Reológico [cm^3];
- $\rho_{BS} = 1.2$, é a densidade da borracha de silicone definida pelo fabricante [g/cm^3].

O Volume de material EMR, por sua vez, é calculado segundo a Equação 3.2.

$$V_{EMR} = 2 \cdot (e \cdot L \cdot h) \quad (3.2)$$

na qual:

- e , é a espessura da amostra [cm], vide Figura 25;
- L , é a largura da amostra [cm], vide Figura 25;
- h , é a altura da amostra [cm], vide Figura 25.

A massa de ferro carbonila adicionada, portanto, é calculada pela Equação 3.3.

$$M_{Fe} = C_V \cdot \rho_{Fe} \cdot V_{EMR} \quad (3.3)$$

na qual:

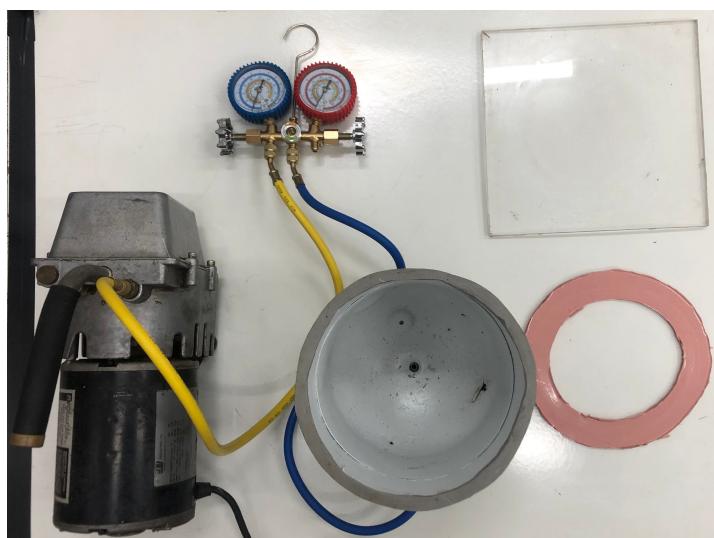
- M_{Fe} , é a massa da carga adicionada de ferro carbonila [g];
- $\rho_{Fe} = 7.86$, é a densidade da ferro carbonila definida pelo fabricante [g/cm^3].

Os materiais são misturados ainda sem a adição do catalisador com um palito de mistura até a homogeneidade, resultando em uma pasta viscosa Figura 30-B.

Quanto a evolução de testes em amostras com o objetivo de redução de bolhas, primeiramente foi pensado em uma nova disposição do sistema de vácuo utilizado em trabalhos anteriores, foi construída uma nova câmara de vácuo, com volume menor atingindo a condição de vácuo máximo atingido do equipamento (-24psi) mais rapidamente, em cerca de 30 s, sendo

antes esse tempo de 1-2min, a nova câmara também proporcionou visibilidade das amostras durante o processo, uma vez que sua tampa é em acrílico transparente, bem como foi adicionado um manômetro para medição do vácuo, vide Figura 31, porém, apesar de reduzir pequenas bolhas (relativas ao olho nu), as bolhas maiores permaneceram, exigindo novas abordagens.

Figura 31 – Sistema de vácuo desenvolvido para o experimento.



Fonte: Próprio autor.

No procedimento anterior, o material catalisado era transferido diretamente ao dispositivo, que era totalmente inserido na câmara de vácuo, porém como é observado na Figura 31, a superfície de contato do material em processo de cura não é grande o suficiente para promover o escape do ar aprisionado. Não só isso, o próprio processo de transferência era feito com palitos, incorporando ainda mais ar no interior da amostra. Para solucionar estes dois problemas foi elaborada uma seringa de injeção de material em processo de cura (Figura 32), sendo seu corpo de uma seringa comercial alimentícia, e seu bico de injeção projetado pelo grupo de trabalho, de forma a ter um encaixe justo no dispositivo e moldes, a peça foi materializada na mesma impressora 3D utilizada para as peças de acoplamento do experimento seção 3.1. Desta maneira foi aumentada a superfície de contato de significativamente, principalmente devido ao formato achatado que a amostra toma ao acomodar-se no interior da seringa ainda na fase de cura.

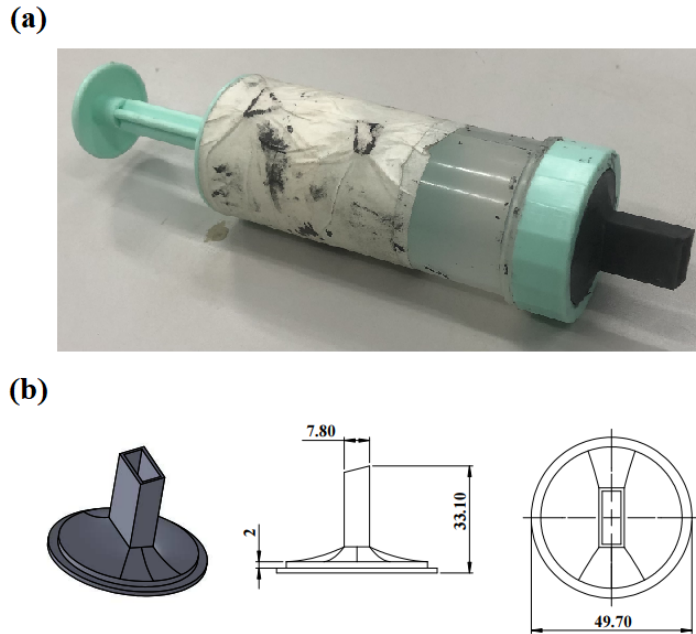
O desenvolvimento de um procedimento padronizado exigiu vários testes com amostras de borracha de silicone pura, e com carga de ferro carbonila em 33 % de volume. Foram estudadas diferentes concentrações de catalisador chegando na conclusão que deveria ser utilizada a mínima concentração recomendada pelo fabricante de 2 % em massa, (Equação 3.4) desconsiderando a massa da ferro carbonila adicionada, assim aumentando o tempo de trabalho (tempo após a adição do catalisador que o material ainda pode ser moldado).

$$M_{Cat} = \frac{2 \cdot M_{BS}}{100} \quad (3.4)$$

na qual:

- M_{Cat} , é a massa de catalisador [g].

Figura 32 – Seringa de injeção de amostras. (a) Foto. (b) Bico projetado.



Fonte: Próprio autor.

Ressalta-se que a escolha pelo valor específico de concentração de ferro carbonila em 33 % de volume total de amostras é devido limite de percolação de nanocompósitos, um valor teórico que postula o limite da formação de cadeias, ou conexões entre partículas do dispersante, sendo um referencial para fabricação desses materiais (BELLUCCI, 2013).

Retomando os passos da Figura 30, o material homogêneo obtido pela mistura de ferro carbolina e borracha de silicone é transferido à seringa de injeção de amostras, o catalisador, com massa devidamente calculada (Equação 3.3) é despejado por meio de uma seringa à mistura, que é novamente misturada até a homogeneidade, atribuindo um aspecto fluido ao material, vide Figura 30-C. A partir da adição e mistura do catalisador, inicia-se a contagem do tempo de trabalho, portanto, é um processo que exige destreza e assertividade do operador, que não deve exceder o limite de 1min entre a mistura do catalisador e o acionamento do vácuo.

Através de testes empíricos comparando amostras de BS pura e amostras de EMR, observou-se que a adição de carga à borracha de silicone aumentou seu tempo de trabalho, o que contribui para o processo de fabricação uma vez que as amostras com cargas recém catalisadas (Figura 30-C) devem ser submetidas à uma câmara de vácuo (Figura 30-E), ou seja, foi possível aumentar

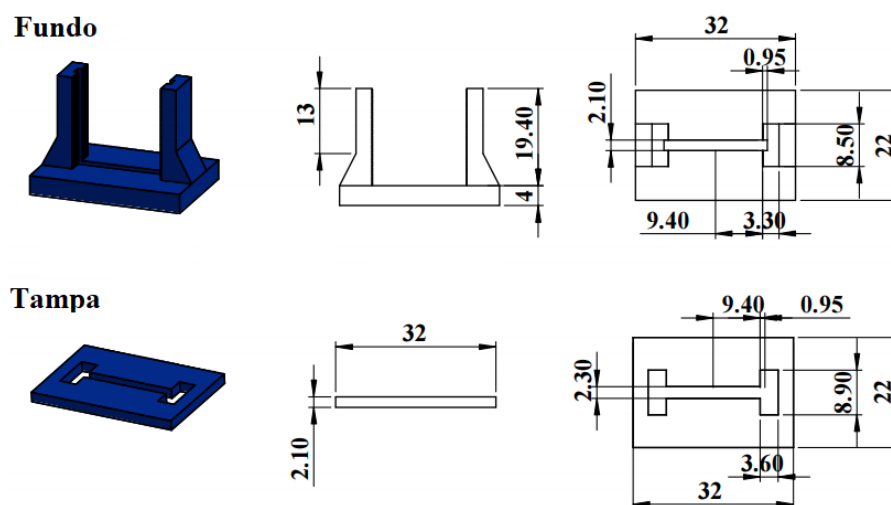
o tempo de exposição no vácuo, que antes seria entre 4-5min e passou a ser aproximadamente 10min, sendo o tempo de trabalho sugerido pelo fabricante de 8min no total.

A seringa é então posicionada dentro da câmara de vácuo metálica com ajuda de dois pequenos imãs colados em sua superfície externa com fita adesiva Figura 30-D, a câmara é então fechada com um anel de vedação de borracha e tampa acrílica, aciona-se a bomba, vide Figura 30-E. Inicia-se a contagem do tempo do processo de vácuo de 10min, caso o operador exceda o limite de 1min do passo anterior este tempo deve ser descontado.

Após o acionamento da bomba é necessário observar a leitura do manômetro, uma vez que o vácuo máximo de -24psi for atingido fecha-se a válvula do *manifold* e desliga-se a bomba. Ao atingir-se o tempo de vácuo, a câmara é descomprimida abrindo-se a válvula do *manifold*, a seringa é retirada e seu bico injetor é acoplado Figura 30-F.

Em trabalhos anteriores era utilizado fita adesiva como suporte de molde para cura do material, que adere-se às camadas externas do dispositivo viscoelástico sem nenhum aditivo. Para este trabalho foram desenvolvidos moldes em resina 3D. Os componentes para molde desenvolvidos consistem em uma peça de fundo e uma peça de tampa, vide Figura 33, e Figura 30-H.

Figura 33 – Moldes desenvolvidos para cura de amostras.



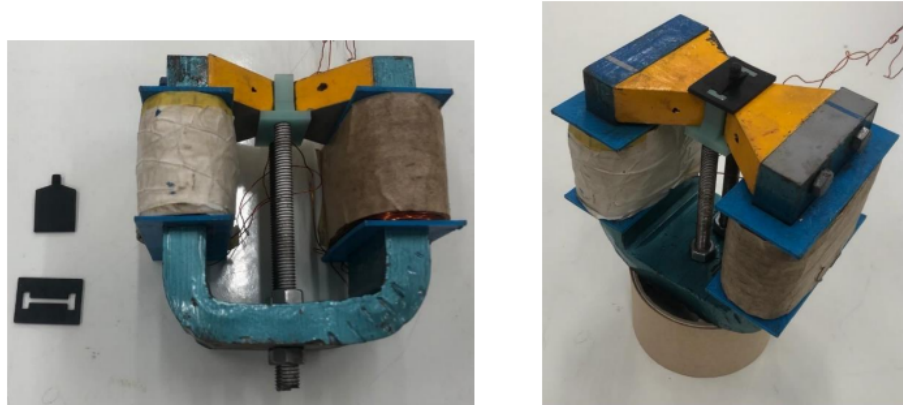
Fonte: Próprio autor.

Na Figura 30-G, e Figura 34 é possível observar a presença do molde de fundo em contato direto com as camadas externas do dispositivo viscoelástico, para isso utiliza-se barras roscadas passando pelos furos de ancoragem do platô da estrutura, as mesmas são travadas por porcas, o processo de fabricação portanto continua com a injeção da amostra anteriormente exposta ao vácuo no dispositivo.

Após o operador despejar o máximo de material possível dentro da cavidade criada pelo molde de fundo e camadas externas do dispositivo, são inseridas a tampa e a camada interna,

vide Figura 30-H e Figura 34, o material excedente transborda criando sobras em volta da tampa (Figura 30-I). O tempo de cura total recomendado pelo fabricante é de 5 dias, porém devido ao efeito de retardamento do processo de cura devido à adição de carga conhecido, são adicionados 2 dias, totalizando um tempo de cura de uma semana.

Figura 34 – Fotos do dispositivo .



Fonte: Próprio autor.

Após a cura os moldes são cuidadosamente retirados, rebarbas e excessos são removidos e o dispositivo está pronto para montagem na bancada de ensaio.

Ressalta-se a importância do operador certificar-se que não há nenhum campo residual de ensaios anteriores nos dispositivos “ferradura” antes de qualquer processo de fabricação, uma vez que a cura orientada sobre o efeito de campos magnéticos muda as características do material.

3.5 Algoritmos desenvolvidos

Este tópico é voltado para a melhor compreensão do leitor quanto ao trabalho desenvolvido, oferecendo resumidas explicações funcionais dos algoritmos computacionais desde a aquisição dos dados até a obtenção dos resultados finais. Os programas foram escritos na extensão *.m*, executáveis em aplicativos como o *GNU Octave*, ou mesmo *MATLAB*. As versões originais podem ser consultadas no Anexo A, Anexo B, Anexo C, Anexo C.

3.5.1 Algoritmo de aquisição

O algoritmo de aquisição tem por objetivo gerar o sinal que será emitido ao *shaker* controlando o valor da força pela média quadrática (em inglês *Root Mean Square*, ou RMS) dos ciclos à um alvo escolhido, bem como armazenar e plotar os dados obtidos pelos sensores (célula de carga e acelerômetro).

Primeiramente, com a função de armazenar as informações básicas do ensaio, e mesmo converte-las no próprio nome do arquivo de dados, são definidas variáveis criadas que indicam: a presença ou não de campo magnético no ensaio (em caso afirmativo a corrente elétrica aplicada na fonte), a concentração de ferro carbonila, a frequência de excitação desejada, a rodada em questão (caso seja necessário repetir os dados), e a opção de incluir a data no nome do arquivo de dados final.

Os valores tabelados das sensibilidades dos sensores são também armazenados em variáveis: para a célula de carga 0.011241 V/N ; para o acelerômetro 0.010 V/ms^2 , estes valores serão aplicados em divisões pelos sinais gravados, convertendo seus valores originalmente obtidos em tensão elétrica (Volts) em força (Newtons) e aceleração (metros por segundo ao quadrado).

As próximas variáveis a serem definidas são a força média alvo, que varia conforme o regime em tensão de interesse de estudo, a frequência de amostragem (resolução), que para todas as rodadas foi de 8192 Hz ; o tempo de aquisição de rodadas definido em 4 s , e o tempo de atraso entre reprodução do sinal e gravação (aquisição) de 0.2 s . Com estes valores é possível calcular o valor do incremento do vetor de tempo e produzir o vetor de tempo que corresponderá a coordenada das abcissas de cada ponto aquisitado.

Um sinal arbitrário com amplitude unitária é gerado através de uma função senoidal com o valor da frequência de ensaio desejada e o vetor de tempo.

A seguir é executada a rotina de adaptação de força, que é responsável pelo controle da tensão dinâmica no ensaio. Uma variável auxiliar *output_force* “força de saída” é criada e seu valor é admitido 0.5, este valor é admitido como amplitude do sinal de força gerado anteriormente, que agora é nomeado como variável x . A amplitude é admitida como um valor arbitrário pois não há relação de igualdade direta entre o sinal digital gerado e o sinal aquisitado, uma vez que o sinal original necessariamente deve passar pelo amplificador, seu valor efetivo no sistema depende do ajuste desse equipamento.

Inicia-se a aquisição: o sinal x é enviado ao shaker que excita o sistema. São gravados em dois canais diferentes as respostas dos sensores em força e aceleração.

É programado um laço *while* que irá comparar o valor RMS da força gravada por rodada (de quatro em quatro segundos) ao valor da força alvo escolhida, a diferença será compensada com incrementos ou decrementos percentuais no valor da *output_force* (amplitude de x), a condição de fim do ciclo é um erro menor ou igual ao escolhido (valores absolutos), que no caso deste trabalho foi de 0.5% , existem outras condições de parada caso seja detectada alguma falha na aquisição. Uma vez atingido o erro mínimo os sinais gravados são armazenados.

O operador deve permanecer atento para ajustar o amplificador caso os valores admitidos inicialmente sejam muito diferentes dos aquisitados, que fará com que o sinal digital mesmo após varios incrementos não alcance o valor de força desejada.

Os sinais aquisitados são armazenados em duas formas diferentes: originais e filtrados.

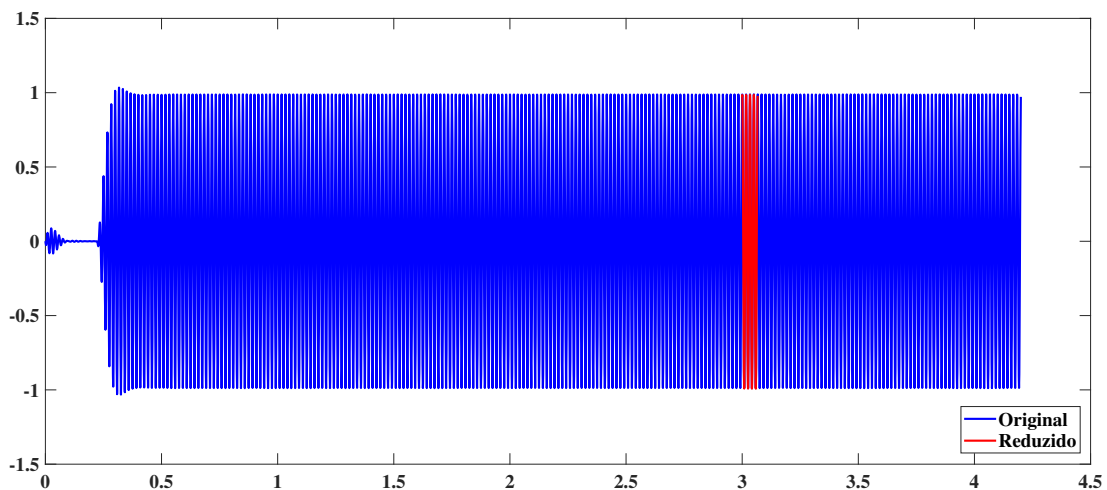
De forma geral os dados filtrados serão os utilizados em todos os cálculos, porém a análise de dados originais e filtrados permite entender os limites e dificuldades da aquisição no sistema. Após testes, o filtro mínimo que apresentou resultados satisfatórios foi o de segunda ordem do tipo passa-banda para frequências 12 % acima ou abaixo da frequência de escolhida na rodada. No Capítulo 4, na Figura 48 e Figura 49 são apresentados os pontos extremos em frequência e tensão dos ensaios e o resultado da atuação dos filtros.

3.5.2 Algoritmo de caracterização

Estas rotinas têm como objetivo a aplicação do modelo Kelvin Voigt nos dados aquisitados, traduzindo-os em grandezas físicas como módulo de cisalhamento dinâmico e viscosidade dinâmica, bem como plotar os resultados da caracterização e ciclos de histerese.

Primeiramente os vetores de entrada e resposta aquisitados são reduzidos de maneira diminuir o custo computacional de futuros cálculos. Descartam-se os segundos iniciais da aquisição, adotam-se os pontos a partir dos três segundos da aquisição (quatro segundos no total). O número de ciclos também é reduzido obtendo-se uma parcela do sinal representativa, são adotados os primeiros quatro períodos a partir dos três segundos da aquisição. A Figura 35 ilustra a seleção reduzida dos dados aquisitados (força em 0.7 N).

Figura 35 – Redução dos dados de aquisição.



Fonte: Próprio autor.

Com esta formatação dos dados, inicia-se a aplicação do Modelo Kelvin Voigt, primeiramente convertendo o valor do sinal de entrada em força para tensão pela Equação 3.5.

$$[\tau] = [F] \cdot \frac{1}{2A} \quad (3.5)$$

na qual:

- $[\tau]$, é o vetor de tensões $[Pa]$;
- $[F]$, é o vetor de força (entrada) $[N]$;
- A , é a área total de contato das amostras com o dispositivo $[m^2]$, vide Figura 25.

De maneira semelhante, o vetor de resposta em aceleração é convertido para deslocamento e em seguida deformação através da Equação 3.6 e Equação 3.7.

$$[X] = [a] \cdot \frac{1}{\omega^2} \quad (3.6)$$

na qual:

- $[X]$, é o vetor de deslocamento $[m]$;
- $[a]$, é o vetor de aceleração (resposta) $[ms^2]$;

$$[\gamma] = [X] \cdot \frac{1}{e} \quad (3.7)$$

na qual:

- $[\gamma]$, é o vetor de deformação $[m/m]$;

A Equação 3.6 neste caso é válida pois o filtro aplicado garante que o vetor de aceleração seja uma onda harmônica apenas na frequência fundamental (seno ou cosseno perfeito), caso contrário seria matematicamente incorreto aplicá-la, pois as condições de integração estariam sendo ignoradas.

O vetor de velocidade de deformação é obtido pela diferenciação numérica computacional do vetor de deformação pelo vetor de tempo (Equação 3.8).

$$[\dot{\gamma}] = \frac{d[\gamma]}{dt} \quad (3.8)$$

na qual:

- $[\dot{\gamma}]$, é o vetor de velocidade de deformação $[m/m \cdot s]$;
- $d[\gamma]$, denota a aplicação da rotina de diferenciação numérica no vetor de deformação;
- dt , é uma constante, sendo o segundo elemento do vetor de tempo considerando-se o atraso de gravação do sinal, seu valor é $0.00012207s$.

O cálculo de G apresentado na Equação 2.4 é feito de maneira alternativa através multiplicação do vetor de tensão com a matriz pseudo inversa do vetor de deformação, vide Equação 3.9, um artifício matemático que é análogo à regressão linear da elipse do ciclo de histerese, ou seja, a reta que liga suas máximas projeções ao seu eixo horizontal, ou sua linha elástica, vide Figura 16.

$$G = [\tau] \cdot [\gamma^+] \quad (3.9)$$

na qual:

- $[\gamma^+]$, denota a aplicação da rotina de pseudo-inversão no vetor de deformação.

A viscosidade dinâmica é obtida isolando-se sua variável na equação geral do modelo Kelvin Voigt, vide Equação 2.2, operação que na forma vetorial é representada na Equação 3.10. Nota-se novamente o uso da pseudo-inversão com o objetivo de deixar os cálculos diretos (com menor uso de variáveis auxiliares).

$$\eta = ([\tau] - [\gamma] \cdot G) \cdot [\dot{\gamma}^+] \quad (3.10)$$

na qual:

- $[\dot{\gamma}^+]$, denota a aplicação da rotina de pseudo-inversão no vetor de velocidade de deformação.

Através da Equação 3.9 e Equação 3.10 o modelo Kelvin-Voigt é aplicado. Apesar de já ter sido aferida em trabalhos anteriores sua validade (CARVALHO, 2019), é sempre recomendável retornar os valores das constantes G e η para a equação geral (Equação 2.2), obtendo-se o vetor de tensão simulado pelo modelo, possibilitando compará-lo ao obtido experimentalmente, esta prática previne o armazenamento de dados com falhas de aquisição, que serão indicadas pelo erro entre os vetores. A Equação 3.11, Equação 3.12 e Equação 3.13 representam esse procedimento, essa diferença pode ser visualizada na Figura 36 em uma rodada arbitrária.

$$[\tau_{KV}] = G \cdot [\gamma] + \eta [\dot{\gamma}] \quad (3.11)$$

na qual:

- $[\tau_{KV}]$, é o vetor de tensão simulado pelo modelo Kelvin-Voigt.

$$[\Delta_{KV}] = ([\tau] - [\tau_{KV}]) \oslash [\tau] \quad (3.12)$$

na qual:

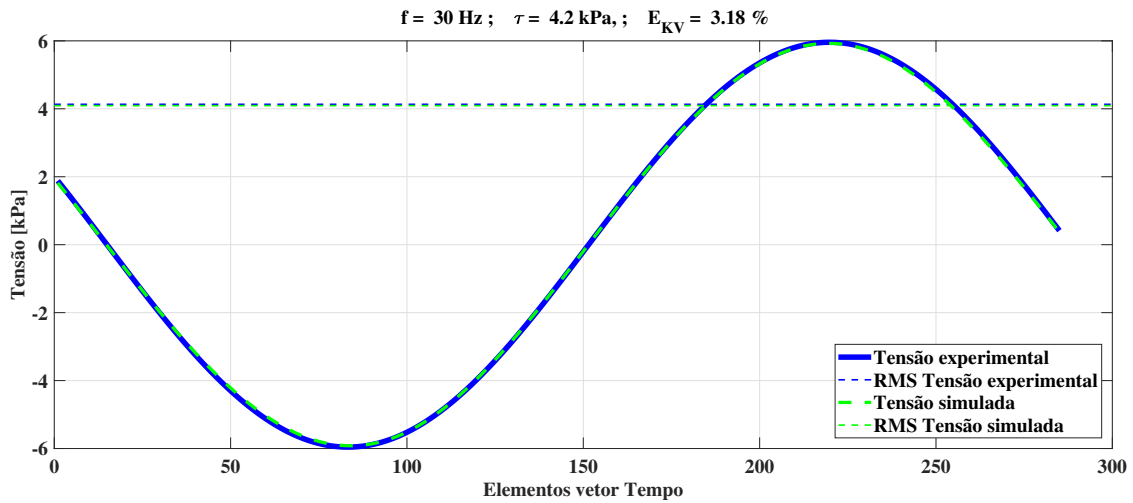
- Δ_{KV} , é o vetor de diferenças entre dados de tensão experimentais e simulados;
- $\oslash$, denota o produto inverso de Hadamard, ou a divisão elemento por elemento entre vetores.

$$E_{KV} = \overline{[\Delta_{KV}]} \cdot 100 \quad (3.13)$$

na qual:

- $[E_{KV}]$, é o erro entre vetor de tensão simulado pelo modelo Kelvin-Voigt e o obtido experimentalmente [%];
- $\overline{[\Delta_{KV}]}$, denota a aplicação da rotina de cálculo de valor médio no vetor de diferenças entre dados experimentais e simulados.

Figura 36 – Tensão experimental e simulada pelo modelo Kelvin Voigt.



Fonte: Próprio autor.

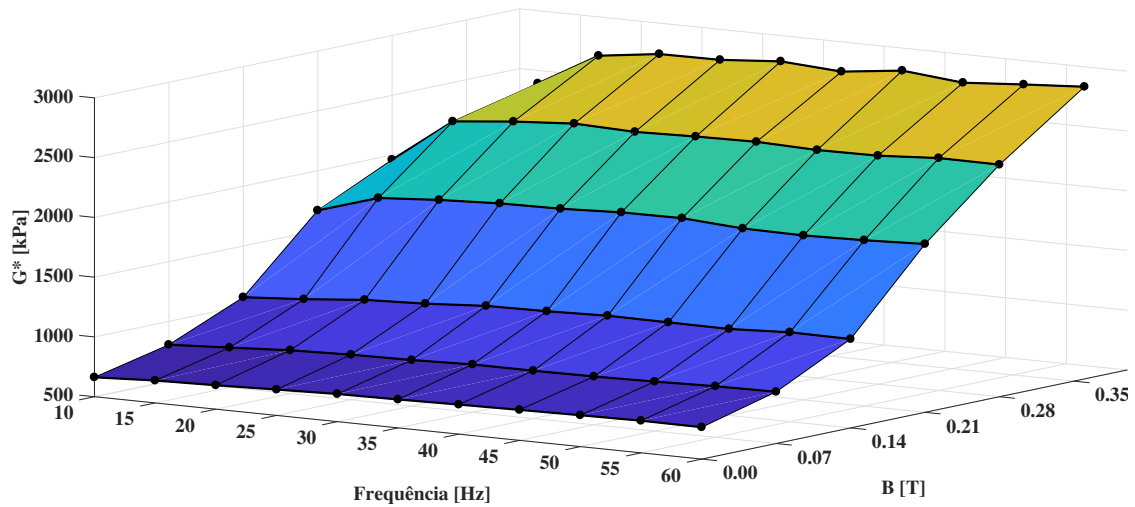
3.5.3 Algoritmos de interpolação de resultados

O objetivo desse conjunto de algoritmos é a interpolação dos resultados de caracterização, obtendo resultados por entre os intervalos de aquisição que serão utilizados nas simulações de controle.

Para entender o procedimento da interpolação de resultados deve-se ter em mente a formatação dos resultados de caracterização, que podem ser enxergados como gráficos em duas dimensões com eixo das abcissas em frequência e ordenadas em módulo de cisalhamento ou viscosidade dinâmicos, com diversas curvas para cada campo magnético ensaiado, vide Figura 46 e Figura 47. Pode-se também enxergar o plot em outra perspectiva, com um campo fixo e diversas curvas para cada tensão ensaiada, vide Figura 44 e Figura 45.

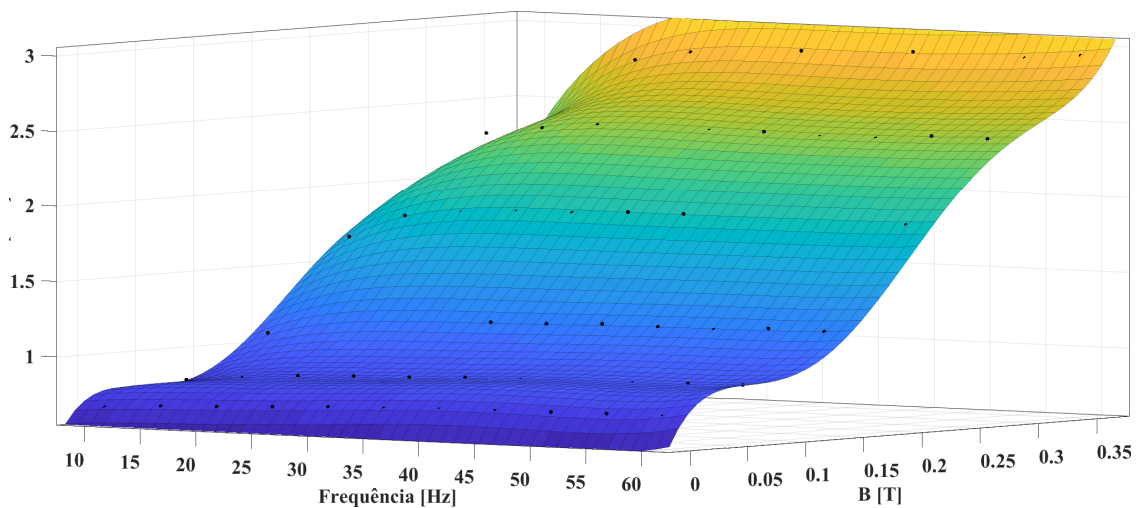
Percebe-se que a análise em ambas perspectivas exige múltiplos plots para apresentar todos os regimes ensaiados. Porém é possível o plot em três dimensões, ou seja, o eixo horizontal em frequência, vertical em módulo de cisalhamento ou viscosidade e profundidade em campo magnético, desta maneira os múltiplos plots se transformam as múltiplas superfícies, cada um em uma tensão de entrada, que “empilham-se” umas sobre as outras no eixo vertical, sendo possível correlacionar o “salto” entre superfícies com a variação da tensão. A permuta dos eixos, trocando a profundidade por tensão não é interessante para os objetivos deste trabalho, uma vez que a variável de controle nas simulações em um sistema 1GDL genérico é o campo, sendo a tensão constante em função da força de entrada no sistema, em outras palavras: a partir de uma tensão muda-se o campo para melhorar resposta do sistema, a variável “fixa” portanto é a tensão. A Figura 37 é um exemplo de plot 3D em uma rodada arbitrária.

Os plots em três dimensões tornam-se cruciais para a simulação de resultados, uma vez

Figura 37 – Exemplo do plot de superfície ($\tau = 1.05kPa$).

Fonte: Próprio autor.

que interpolações em duas dimensões ofereceriam mais complexidades para ajuste de curvas analíticas. As superfícies tais como a apresentada na Figura 37 podem ser ajustadas em diferentes naturezas matemáticas (polinomiais, logarítmicas, exponenciais) através de aplicativos computacionais que retornam as equações que as descrevem e avaliam a qualidade do ajuste, a Figura 38 é um exemplo de aplicação do ajuste da mesma superfície apresentada na Figura 37.

Figura 38 – Exemplo do ajuste de superfície ($\tau = 1.05kPa$).

Fonte: Próprio autor.

Neste trabalho foi adotado ajustes em polinômios de quinto grau, por oferecerem boa qualidade em todas as tensões analisadas (resultados podem ser consultados na Tabela 2).

Obtida a superfície ajustada, o processo é repetido para as demais tensões e torna-se pos-

sível, através da equação da superfície ajustada, interpolar valores de características dinâmicas para uma dada tensão, por exemplo supõe-se que seja de interesse determinar qual o módulo de cisalhamento dinâmico para uma tensão $\tau_X = 1.05 \text{ kPa}$, com campo e frequência fora dos pontos de amostragem, $B_X = 0.16 \text{ T}$ e $f_X = 37 \text{ Hz}$, basta acessar a equação da curva ajustada na Figura 38 e substituir os valores. Estas expressões são equações polinomiais extensas, seus valores podem ser consultados no Anexo C, a Equação 3.14 foi incluída para exemplo. Para a viscosidade o mesmo se aplica.

$$\begin{aligned}
 G_{\tau 1.05}(f_X = 37, B_X = 0.16) = & 6286.0 B_X^5 + 0.7622 B_X^4 f_X - 5734.0 B_X^4 - \dots \\
 & 0.003087 B_X^3 f_X^2 + 0.1748 B_X^3 f_X + 1731.0 B_X^3 + \dots \\
 & 0.0001991 B_X^2 f_X^3 - 0.02385 B_X^2 f_X^2 + 0.8044 B_X^2 f_X - \dots \\
 & 191.8 B_X^2 - 2.28 \cdot 10^{-6} B_X f_X^4 + 0.0003249 B_X f_X^3 - \dots \quad (3.14) \\
 & 0.01584 B_X f_X^2 + 0.3137 B_X f_X + 6.276 B_X + \dots \\
 & 9.245 \cdot 10^{-9} f_X^5 - 1.49 \cdot 10^{-6} f_X^4 + 0.00008792 f_X^3 - \dots \\
 & 0.002361 f_X^2 + 0.03147 f_X + 0.5171 = \mathbf{1.38571 \text{ MPa}}
 \end{aligned}$$

Porém, estas equações ajustadas ainda limitam-se às tensões de ensaio. Para permitir complementar o problema proposto acima, possibilitando obter as características dinâmicas com uma tensão fora dos pontos ensaiados é necessário a interpolação entre as superfícies conhecidas, criando uma nova superfície na tensão alvo, para isso admite-se a linearidade entre superfícies adjacentes, ou seja, para uma tensão $\tau_X = 1.575 \text{ kPa}$, que é a média entre as camadas conhecidas em $\tau = 1.05 \text{ kPa}$, e $\tau = 2.10 \text{ kPa}$, a superfície interpolada será a média entre elas, aplicando-se uma soma com peso de 50 % em ambas as camadas. Para um valor mais próximo da superfície $\tau = 2.10 \text{ kPa}$, por exemplo $\tau_X = 2.0 \text{ kPa}$, o peso percentual aumenta na camada de $\tau = 2.10 \text{ kPa}$, como pode ser observado na Figura 39, nesse caso a superfície interpolada corresponderia à soma em 90.5 % de $\tau = 2.10 \text{ kPa}$, e 9.5 % de $\tau = 1.05 \text{ kPa}$.

Portanto as superfícies desconhecidas em tensões não ensaiadas são calculadas através soma com atribuição de pesos lineares entre as superfícies conhecidas, com tensões mais próximas abaixo e acima do alvo.

O conjunto Equação 3.15 e Equação 3.16 resume o cálculo descrito.

$$\begin{cases} G(\tau_x, f, B) = |G(\tau_{x-1}, f, B) \cdot (1 - W)| + |G(\tau_{x+1}, f, B) \cdot W| \\ \eta(\tau_x, f, B) = |\eta(\tau_{x-1}, f, B) \cdot (1 - W)| + |\eta(\tau_{x+1}, f, B) \cdot W| \end{cases} \quad (3.15)$$

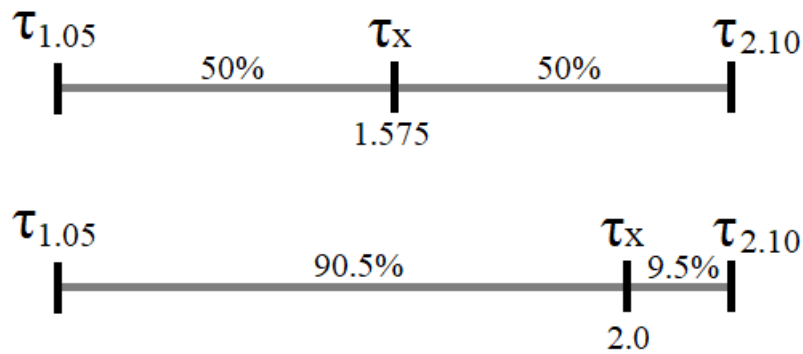
na qual:

- τ_x , é a tensão alvo fora diferente dos valores das tensões de entrada do ensaio;

- τ_{x-1} , é a tensão de ensaio mais próxima abaixo do valor de τ_x ;
- τ_{x+1} , é a tensão de ensaio mais próxima acima do valor de τ_x ;
- W , é o peso da soma atribuído às camadas em tensões ensaiadas;
- B , é o campo magnético.

$$W = \frac{|\tau_x - \tau_{x-1}|}{|\tau_{x+1} - \tau_{x-1}|} \quad (3.16)$$

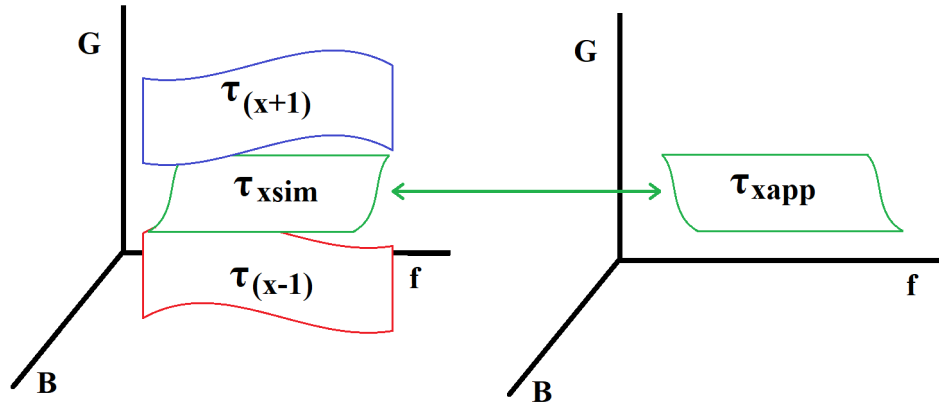
Figura 39 – Exemplo de cálculo de pesos de interpolação.



Fonte: Próprio autor.

Com o entendimento de como as superfícies de interpolação são obtidas é possível aprofundar seu manejo em prol de obter análises experimentais importantes. Imaginando uma superfície de uma tensão conhecida obtida pelo aplicativo de ajuste de superfícies aos dados experimentais chamada τ_{xapp} , é possível simular seu próprio valor assumindo este como incógnita na expressão Equação 3.15, ou seja, simula-se uma superfície em tensão conhecida τ_{xsim} através da interpolação de suas camadas também conhecidas acima e abaixo de seu valor. O erro entre τ_{xapp} e τ_{xsim} assume um significado físico importante: é a medição da linearidade assumida entre módulo de cisalhamento e viscosidade dinâmicos e regimes de tensão assumida pela Equação 3.15 e Equação 3.16 com a influência do campo magnético. Em outras palavras: ignora-se um dos polinômios de superfície dos dados (com forma similar Equação 3.14) como se ele não tivesse sido adquirido; interpola-se uma superfície em seu lugar com a Equação 3.15, para então reassumir a existência desses dados e comparar as duas superfícies, caso haja um erro significativo isso indica que assumir uma interpolação com um parâmetro linear (no caso o peso W) é uma afirmação falsa, do contrário significa que a relação entre campo magnético em função da propriedade viscoelástica e frequência tende a se manter entre sucessivas tensões. A Figura 40 ilustra esse processo de cálculo.

Figura 40 – Cálculo do erro entre superfícies simulada e ajustada.



Fonte: Próprio autor.

3.5.4 Algoritmo de simulação de controle

Com programas capazes de simular qualquer valor de módulo de cisalhamento e viscosidade dinâmicos dentro dos parâmetros máximos e mínimos do ensaio, ou seja, campos entre $0\ T$ e $0.35\ T$, tensões entre $1.05\ kPa$ e $5.25\ kPa$ e frequências entre $10\ Hz$ e $60\ Hz$, é possível a simulação de um sistema de um grau de liberdade “inteligente” com amortecimento e rigidez controláveis para uma entrada randômica, sendo um caso completo para análise uma vez que atingirá valores próximos a ressonância do sistema em diversos momentos, requerindo a adaptação do sistema através da mudança de sua frequência natural, diminuindo a magnitude da resposta; em outros momentos, excitará o sistema em regimes brandos de resposta, não exigindo adaptações. Uma análise com entrada harmônica simples limitaria o estudo a apenas uma resposta e uma entrada, com um vetor de entrada randômico o sistema reage dentro de seu máximo potencial estabelecido pelos limites de aquisição do ensaio, exigindo também o desenvolvimento de alguma técnica de controle e a determinação de parâmetros mínimos.

Antes de qualquer cálculo o vetor de tempo deve ser definido, para os fins deste trabalho foi adotado um vetor de tempo de zero a um segundo, com 101 elementos, porém o número total de elementos será tratado como uma variável nos cálculos seguintes pois é um valor que pode ser alterado nos códigos escritos, representado pela letra k . É possível representar o vetor de tempo da seguinte maneira:

$$[t]_{(1,k)} = [t_0 \dots \frac{i}{F_S} \frac{i+1}{F_S} \dots t_k]$$

Sendo $F_S = 100$ a resolução de amostragem, o inverso de seu valor indica o passo entre os elementos do vetor de tempo.

Uma vez que a menor frequência de amostragem é de dez ciclos por segundo, o tempo

final de um segundo é adequado para análise, o número de elementos do vetor foi testado e considerado suficiente para a análise dos fenômenos, o custo computacional dos cálculos nessa fase são significativos.

Para calcular o vetor de entrada aleatória são geradas três variáveis em forma de vetores com valores randômicos dentro de limites estabelecidos, sendo os vetores de amplitude da tensão $[\tau_{Ar}]$, a frequência de excitação $[f_r]$, e a defasagem da fase do sinal $[\delta_r]$, pode-se representar um elemento i arbitrário dos vetores randômicos pelas expressões:

$$\begin{cases} \tau_{Ari} = \forall \in \mathbb{R} / 0.7 \leq \tau_{Ar} \leq 3.5 & \rightarrow [\tau_{Ar}]_{(1,k)} = [\tau_{Ar1} \dots \tau_{Ari} \dots \tau_{Ark}] \\ \delta_{ri} = \forall \in \mathbb{R} / 0 \leq \delta \leq 2\pi & \rightarrow [\delta_r]_{(1,k)} = [\delta_{r1} \dots \delta_{ri} \dots \delta_{rk}] \\ f_{ri} = \forall \in \mathbb{R} / 10 \leq f_r \leq 60 & \rightarrow [f_r]_{(1,k)} = [f_{r1} \dots f_{ri} \dots f_{rk}] \end{cases}$$

O cálculo do vetor de força de entrada é feito utilizando os elementos destes vetores pela Equação 3.17.

$$[\tau_r]_{(1,k)} = [\tau_{Ar}] \circ \text{sen}(2\pi \cdot [f_r] \circ t + [\delta_r]) \quad (3.17)$$

na qual:

– $\circ$, denota o produto de Hadamard, ou a multiplicação elemento por elemento entre vetores.

O vetor de campo magnético e de massa são constantes para todos os pontos analisados, para o cálculo da resposta não controlada é considerado um vetor de campo unidimensional nulo, com k colunas, para a situação onde o controle é aplicado substitui-se todos os valores pelo campo alvo. O valor da massa para todas as situações é de $3.0kg$, sendo um valor de estudo interessante por ser uma massa factível de um futuro ensaio experimental, bem como é o valor onde as frequências naturais calculadas permeiam em torno do valor intermediário de aquisição de $30Hz$, podemos representar estes vetores em sua forma matemática:

$$\begin{cases} B_i^0 = 0 & \rightarrow [B_i^0]_{(1,k)} = [0 \dots 0 \dots 0] \\ B_i^C = B_C & \rightarrow [B_i^C]_{(1,k)} = [B_C \dots B_C \dots B_C] \\ m_i = 3 & \rightarrow [m_i]_{(1,k)} = [3 \dots 3 \dots 3] \end{cases}$$

Sendo $[B^0]$ o vetor de campo na situação sem controle aplicado, $[B^C]$ na situação de controle com campo alvo B_C . O vetor constante de massa é denotado por $[m]$.

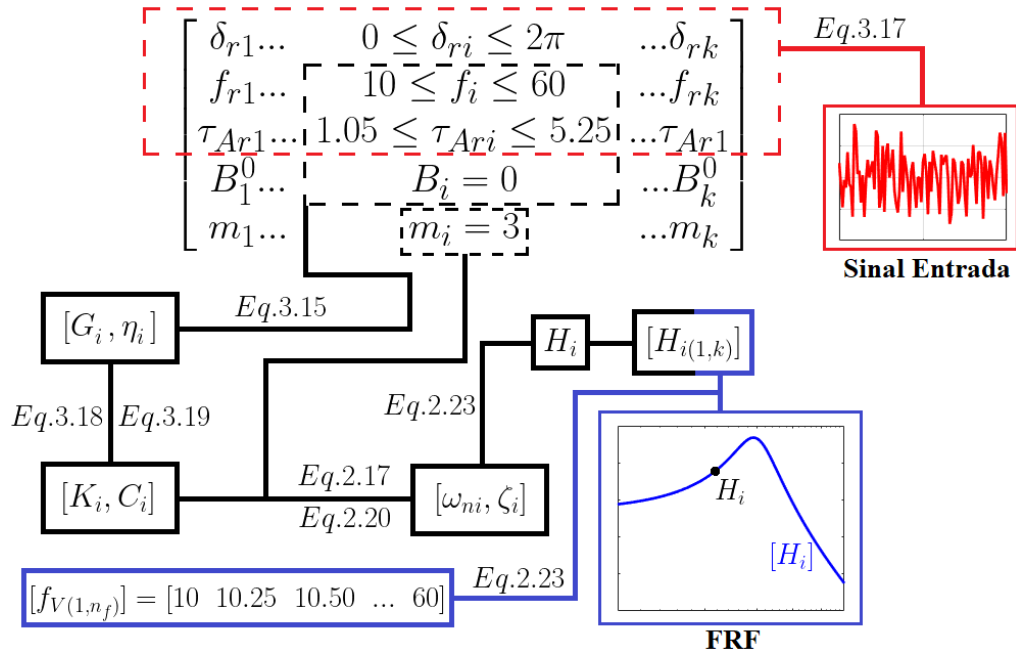
Mesmo sem a mudança do campo magnético o material EMR tem seu comportamento viscoelástico dependente da frequência de excitação e da tensão de entrada, portanto para cada elemento do vetor de entrada são atribuídas características específicas (viscosidade e módulo de cisalhamento dinâmicos e frequência natural), portanto o programa de simulação de resposta deve ser capaz de correlacioná-los, sendo um problema de maior complexidade quando comparado a análises clássicas de sistemas.

Definido todos os parâmetros iniciais de cálculo procede-se ao cálculo em sim. Os parâmetros podem ser expressos em uma matriz da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \delta_{r1} \dots & 0 \leq \delta_{ri} \leq 2\pi & \dots \delta_{rk} \\ f_{r1} \dots & 10 \leq f_i \leq 60 & \dots f_{rk} \\ \tau_{Ar1} \dots & 1.05 \leq \tau_{Ari} \leq 5.25 & \dots \tau_{Ar1} \\ B_1^0 \dots & B_i = 0 & \dots B_k^0 \\ m_1 \dots & m_i = 3 & \dots m_k \end{bmatrix}$$

Procede-se com o cálculo das Funções de Resposta e Frequência, requerendo uma série de outros cálculos. Para melhor entendimento da obtenção das FRFs foi elaborado o diagrama da Figura 41.

Figura 41 – Diagrama para cálculo de entrada e resposta.



Fonte: Próprio autor.

Podemos separar os cálculos em entrada e resposta. O cálculo da entrada é direto pela Equação 3.17, permitindo o plot do sinal de entrada, como referenciado na Figura 40.

O cálculo da resposta se subdivide em duas variáveis finais com a mesma equação, porém uma na forma vetorial e outra na forma de elemento por elemento. A partir dos vetores randômicos de frequência, amplitude em tensão, e campo nulo, é possível obter as características dinâmicas de viscosidade e módulo de cisalhamento dinâmicos pela Equação 3.15, vide Figura 40.

A seguir utiliza-se a Equação 3.18 e Equação 3.19, que relacionam diretamente as grandezas viscosidade e módulo de cisalhamento dinâmicos com amortecimento e rigidez respecti-

vamente, em função da geometria da amostra (ALMEIDA, 2021).

$$K = \frac{G \cdot A}{e} \quad (3.18)$$

na qual:

- K , é a rigidez do material EMR.

$$C = \frac{\eta \cdot A}{e} \quad (3.19)$$

na qual:

- C , é o amortecimento do material EMR.

O próximo passo de cálculo requiere o valor da massa. São calculados a frequência angular natural em radianos (Equação 2.11) e o coeficiente de amortecimento adimensional (Equação 2.14).

Sendo a FRF uma função $|H|(\omega_n, f_r, \zeta, m)$ é possível calcular seu valor elemento por elemento para os parâmetros de entrada, que representa o ponto em magnitude rebatido na frequência de excitação de entrada conforme referenciado na Figura 40, ou seja é a magnitude efetiva do ponto. Substituindo o valor da frequência por um vetor de frequências obtém-se a forma vetorial de $|H|$, denotada por $[|H|]$, que contém os dados para plot da resposta no domínio das frequências, para tanto foi criado um vetor de frequências f_V com uma resolução $n_f = 200$ (elementos), com passo linear 0.25 entre os limites de 10 Hz a 60 Hz, que pode ser escrito:

$$[f_{V(1,n_f)}] = [10 \ 10.25 \ 10.50 \ \dots \ 60]$$

Portanto, para cada coluna da matriz de parâmetros é atribuído um gráfico da FRF e seu valor pontual. O vetor de entrada, porém, engloba também as linhas. Para obtermos as k curvas e valores de magnitude das FRFs submetemos o procedimento de cálculo descrito à um laço *for*, do primeiro elemento até o elemento k .

Para o cálculo de todas as respostas na situação de controle, onde é aplicado campo magnético basta repetir o mesmo procedimento, porém substituindo o vetor nulo $[B^0]$ por um pelo vetor $[B^C]$, com campo magnético alvo.

O parâmetro de controle utilizado foi a magnitude de meia potência, ou seja, para pontos onde a magnitude ultrapassa o valor da meia potência (ver seção 2.7) aciona-se o controle pelo campo magnético.

O cálculo da magnitude de meia potência, portanto, segue o mesmo procedimento descrito pela Figura 40, com adição da Equação 2.18. Para esta grandeza, foi adotado um valor médio mediante uma análise estatística de pontos, conforme Capítulo 4 (Figura 54).

4 Resultados e discussões

4.1 Fabricação de amostras

O dimensionamento de amostras através do conjunto: Equação 3.1, Equação 3.2, Equação 3.3 e Equação 3.4, apresentadas na seção 3.4, foi resumido na Tabela 1.

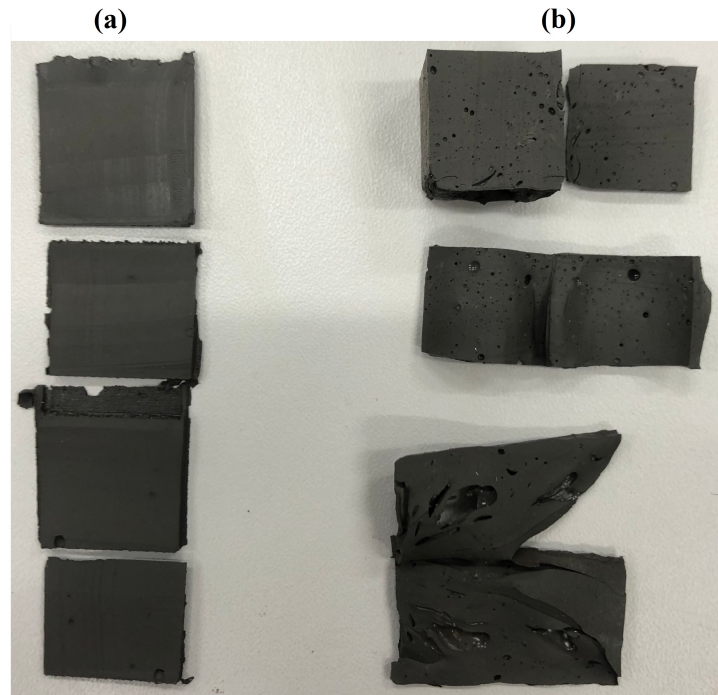
Tabela 1 – Dimensionamento de amostras

Componentes								
Borracha de Silicone: $\rho_{BS} = 1.2\text{g/cm}^3$; Ferro Carbonila: $\rho_{Fe} = 7.86\text{g/cm}^3$								
Fração BS [% v/v]	Massa BS [g]	Fração Fe [% v/v]	Massa Fe [g]	Fração Cat. [% m/m]	Massa Cat. [g]	Massa total [g]	Volume total [cm ³]	Majoração
67	1.635	33	5.276	2	0.033	6.94	2.034	x 8
67	13.083	33	42.207	2	0.262	55.552	16.272	-

Fonte: Próprio autor.

Na seção 3.4 são apresentadas as técnicas de fabricação de amostras. A qualidade da fabricação foi avaliada visualmente cortando as amostras ao meio (transversalmente) e checando visualmente a existência de bolhas, conforme Figura 42.

Figura 42 – Qualidade na fabricação de amostras. (a) Método atual. (b) Métodos anteriores



Fonte: Próprio autor.

A redução de bolhas em amostras com método de fabricação atual é notória, atingindo o resultado desejado pelo grupo de trabalho, quase não apresentando bolhas visíveis no interior das amostras.

Foi calculado o erro experimental entre amostra dimensionada e fabricada, para isso mediu-se a massa total da amostras após os ensaios de caracterização $M_E = 7.3$ g, e comparou-se com os valores do dimensionamento, conforme demonstrado na Equação 4.1

$$E_{fab} = \frac{|M_T - M_E|}{M_T} \cdot 100 = \frac{|6.94 - 7.3|}{6.94} \cdot 100 = 5.19\% \quad (4.1)$$

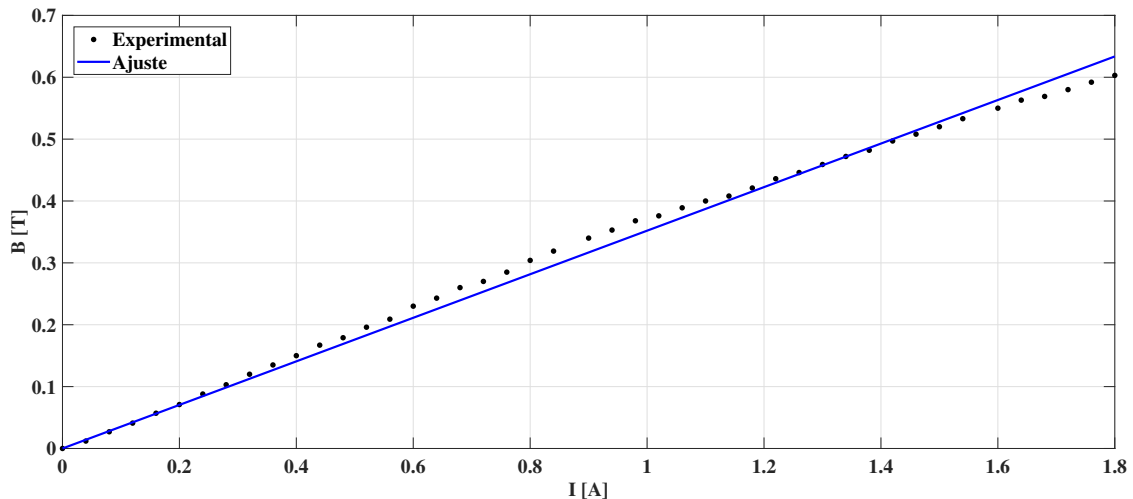
na qual:

- E_{fab} , é o erro de fabricação da amostra [%];
- M_T , é a massa teórica total dimensionada [g];
- M_E , é a massa experimental total dimensionada [g].

4.2 Ensaio de campo-corrente

Conforme explicado na seção 3.2, e ilustrado na Figura 29 foi realizado um ensaio com o objetivo de relacionar as correntes ensaiadas à campos magnéticos, foram obtidos 45 pontos entre as correntes de 0 A a 1.8 A, com passo aproximadamente em 0.04 A, vide Figura 41.

Figura 43 – Ensaio de campo-corrente.



Fonte: Próprio autor.

Percebe-se a característica linear que correlaciona as grandezas, como esperado, uma vez que, segundo a Lei de Ampère, o campo magnético no espaço determinado em volta à uma corrente elétrica é proporcional à corrente que lhe serve como fonte (SEARS, 1963).

A Equação 4.2 descreve uma reta ajustada aos pontos ensaiados.

$$B(I) = 0.352 \cdot I \quad (4.2)$$

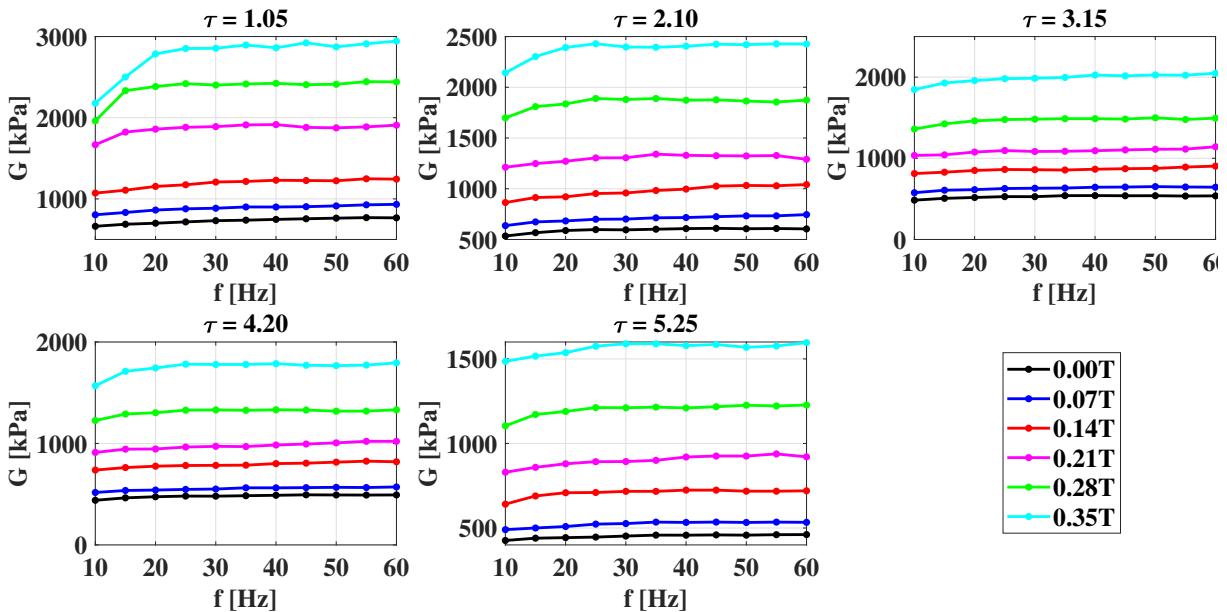
na qual:

- B , é o campo magnético [T].
- I , é a corrente elétrica [A].

4.3 Caracterização

Os resultados da caracterização em módulo de cisalhamento e viscosidade dinâmicos plotados em duas dimensões são apresentados nas figuras a seguir (Figura 44, Figura 45, Figura 46, Figura 47).

Figura 44 – Módulo de cisalhamento dinâmico em diferentes tensões de entrada.



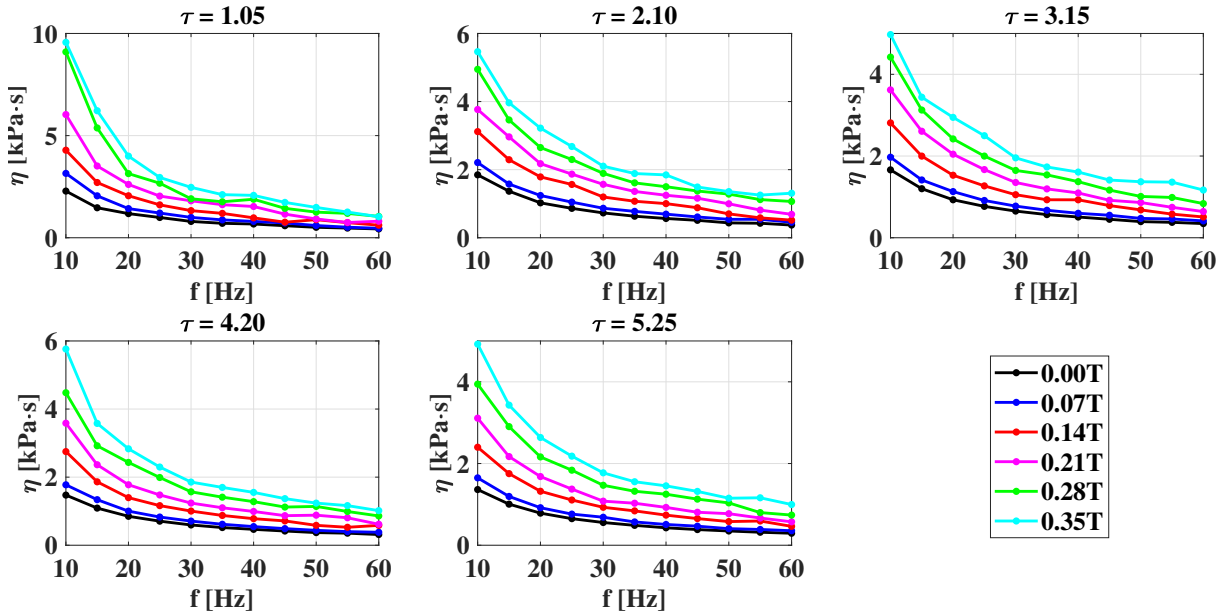
Fonte: Próprio autor.

Para todos os pontos de aquisição foi calculado o erro atrelado a aplicação do Modelo Kelvin Voigt, pela Equação 3.13. Ao total foram 330 pontos calculados: onze frequências, cinco tensões de entrada e seis campos magnéticos.

$$E_{KV} = 3.91 \%$$

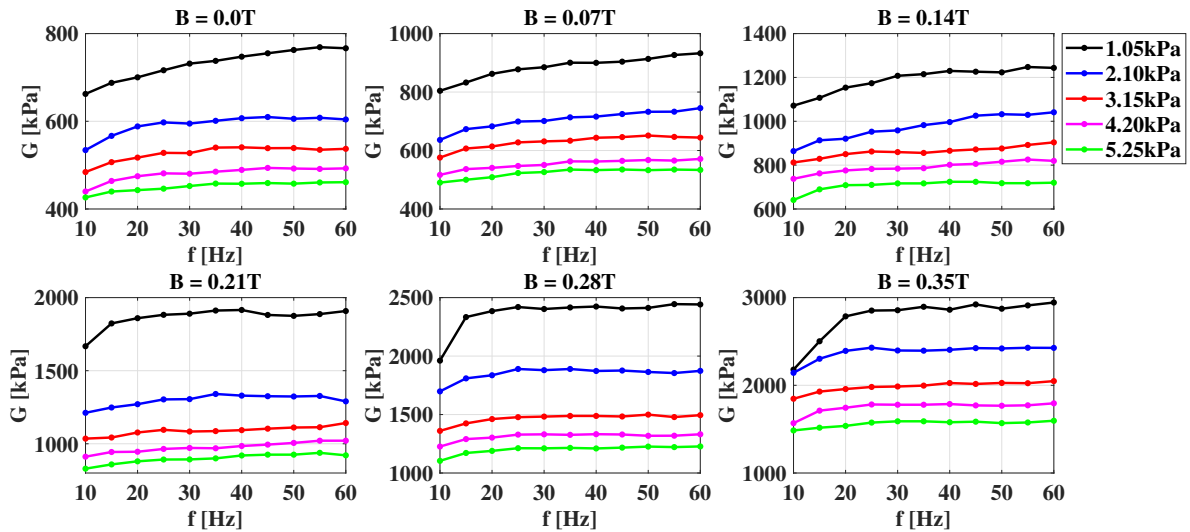
Observa-se que aumento do campo confere ao material aumento de ambas propriedades viscoelásticas.

Figura 45 – Viscosidade dinâmica em diferentes tensões de entrada.



Fonte: Próprio autor.

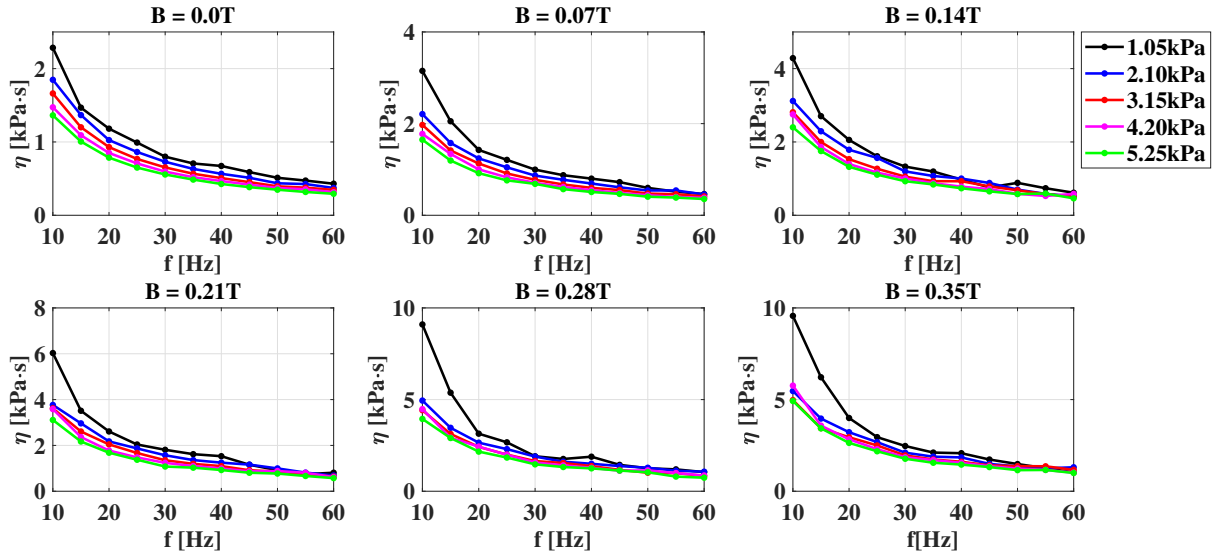
Figura 46 – Módulo de cisalhamento dinâmico em diferentes campos magnéticos aplicados.



Fonte: Próprio autor.

Com o aumento da frequência de amostragem, o material demonstra menor flexibilidade e por consequência é mais rígido: a viscosidade dinâmica diminui e o módulo de cisalhamento dinâmico aumenta, ambos tendendo a uma curva assintótica de estabilização, fenômeno comum à amostras de sólidos viscoelásticos (MEZGER, 2020).

Figura 47 – Viscosidade dinâmica em diferentes campos magnéticos aplicados.



Fonte: Próprio autor.

4.4 Limites de aquisição

Conforme discorrido em subseção 3.5.1, ao analisar os dados originais e filtrados nos valores limites de aquisição do ensaio é possível ter melhor compreensão dos fatores que podem dificultar a aquisição. A Figura 47 ilustra as aquisições de entrada em força e saída em aceleração no campo nulo para os regimes de tensão e frequência máximas e mínimas, enquanto a Figura 48 apresenta os mesmos regimes, porém no campo máximo de 0.35 T .

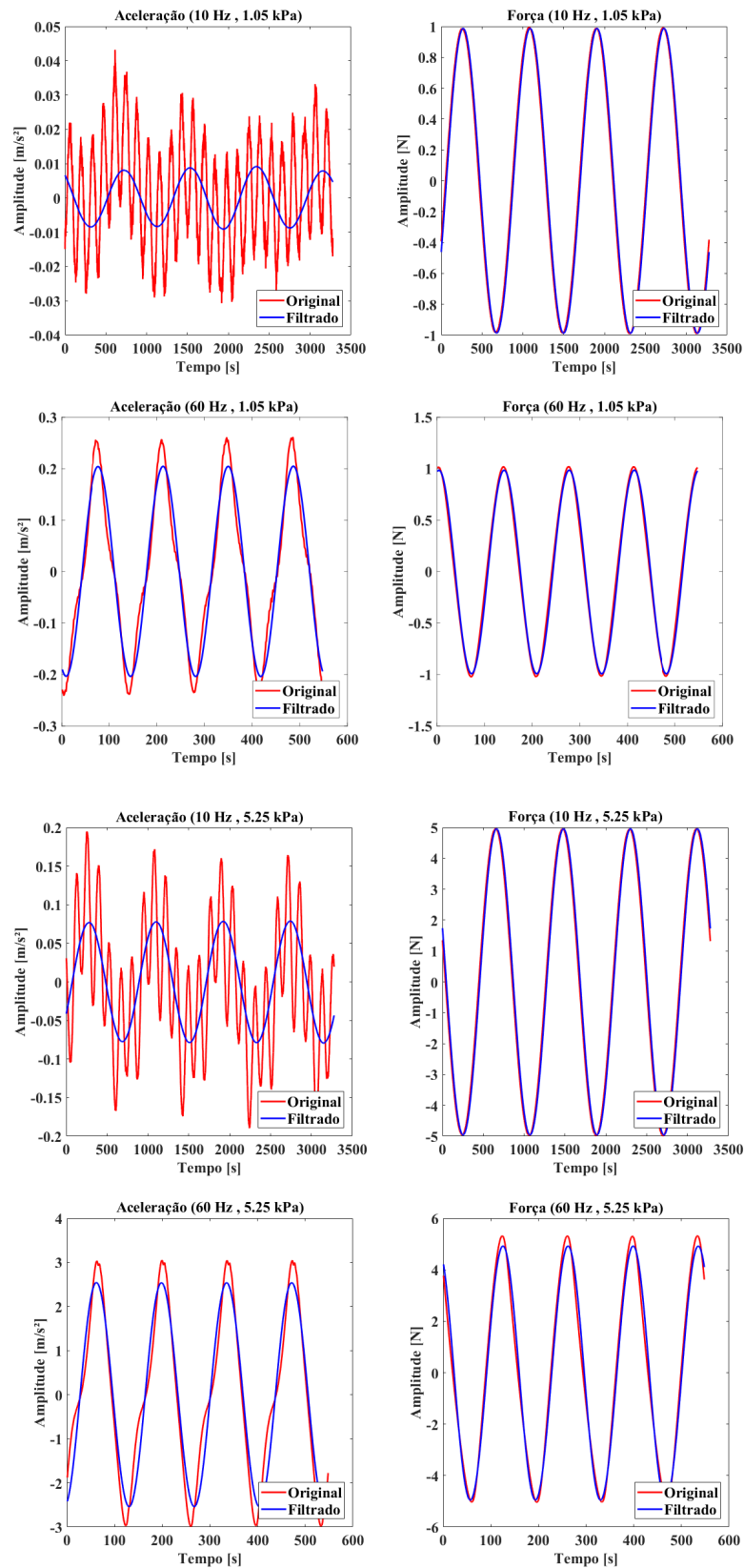
Percebe-se que a entrada em força pouco se altera ao longo de todas as aquisições, a resposta em aceleração porém sofre influência direta da alteração de parâmetros. O valor da frequência de amostragem influencia a resposta em aceleração, de tal forma que, quanto menor seu valor, maior é a atuação do filtro no sinal original.

A influência da tensão de ensaio na aquisição da resposta é similar, quanto menor seu valor maior será a discrepância entre sinal original e filtrado, com regimes de tensões maiores é possível melhorar consideravelmente a aquisição mesmo em frequência menores, como pode ser observado comparando resultados em 10 Hz para ambas as entradas em tensão na situação com ou sem campo.

O campo por sua vez tende a aumentar a atuação dos filtros em tensões e frequências mais baixas, porém este efeito não é observado para frequências baixas com tensões maiores.

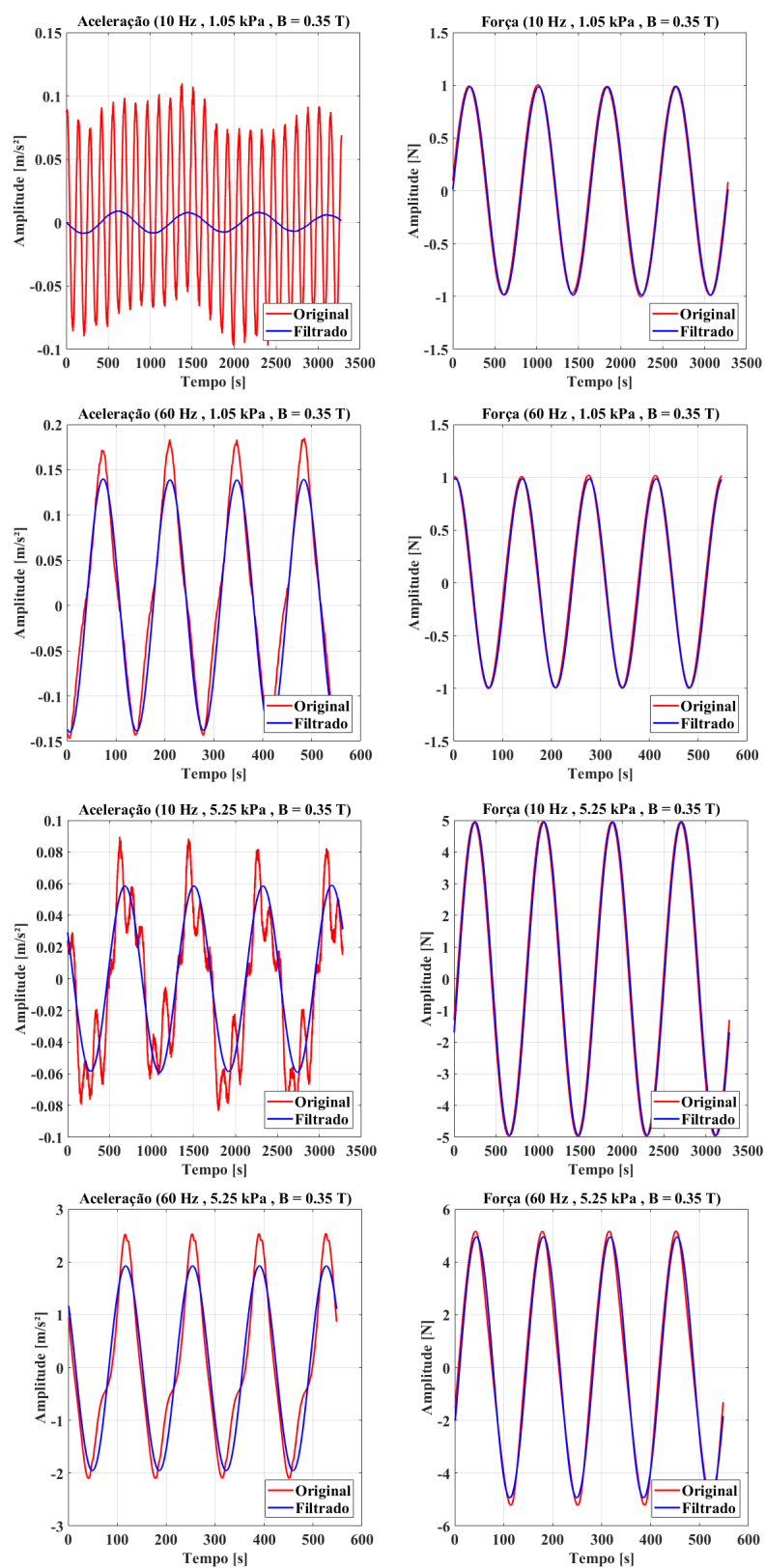
A maior discrepância dos para aquisitados na resposta remete à instrumentação, o valor limite de 10 Hz do acelerômetro de foi explorado na frequência mínima adquirida, enquanto que, para a célula, de carga todos os pontos estão longe dos seus limites de aquisição.

Figura 48 – Filtros nos limites de aquisição em campo nulo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 49 – Filtros nos limites de aquisição em campo máximo.



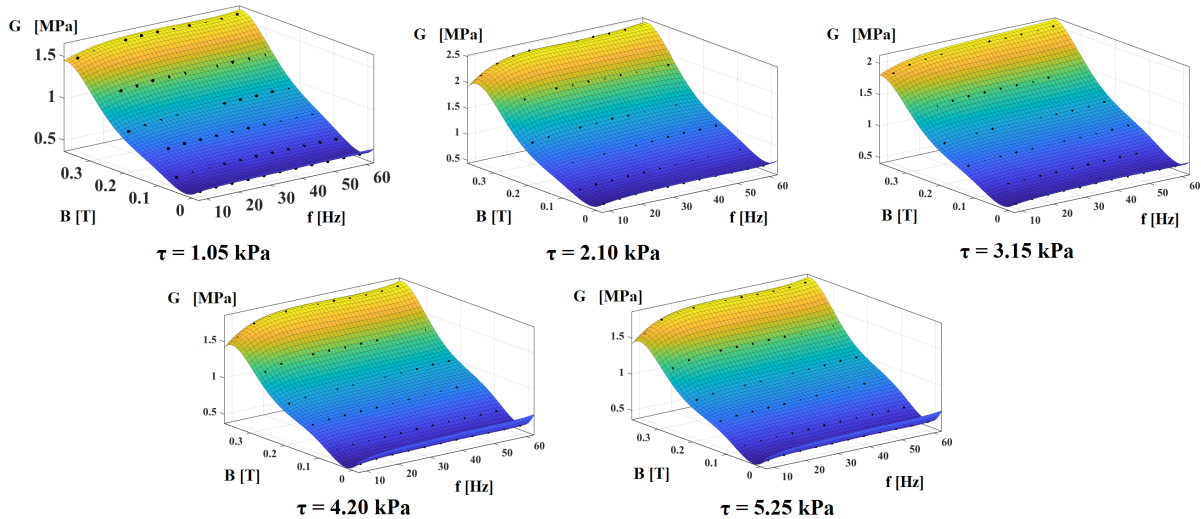
Fonte: Próprio autor.

Com tensões maiores os deslocamentos são maiores e consequentemente a aceleração (amplitude) também, o que contribui para uma aquisição mais precisa do acelerômetro mesmo em sua frequência mínima de trabalho, o que também explica a maior atuação dos filtros nos dados com campo apenas para 10 Hz. Neste caso, com o aumento de rigidez do EMR promovido pelo acionar do campo, o deslocamento passa a ser menor, dificultando ainda mais a aquisição. Em 60 Hz a diminuição do deslocamento com o acionamento do campo não causa efeitos significativos uma vez que já é uma frequência onde o acelerômetro trabalha com maior facilidade.

4.5 Interpolação de superfícies

As superfícies ajustadas aos dados experimentais são ilustradas na Figura 50 e Figura 51.

Figura 50 – Superfícies ajustadas para o módulo de cisalhamento dinâmico.



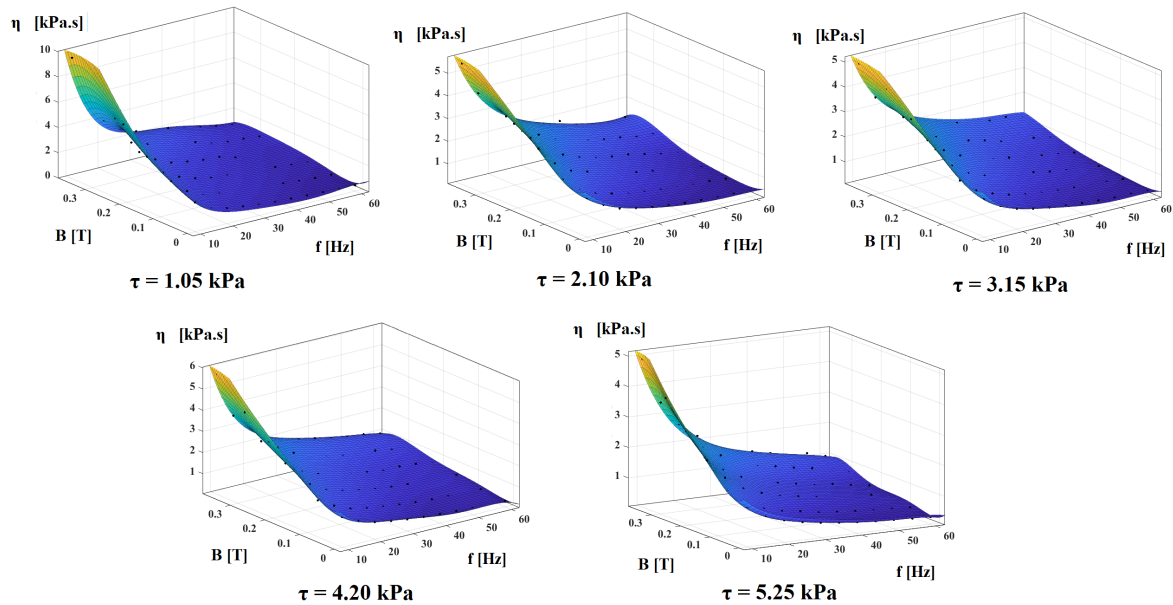
Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 2 é possível consultar os resultados da medição de qualidade do ajuste, calculados pelo valor estatístico *R ao quadrado ajustado*, denotado por: $\overline{R^2}$, sendo um valor usual para medida de adaptação de modelos. Se $\overline{R^2} = 1$, o ajuste do modelo é perfeito, valores próximos a zero indicam uma má qualidade do ajuste.

Conforme descrito na subseção 3.5.3, foi assumida a relação linear entre (G, η) e a tensão não só no campo nulo, onde as simulações realizadas na seção 2.6 (Figura 17) comprovam essa relação, mas com o acionamento de campo, ou seja, indica não só que os saltos entre superfícies proporcionais, que a forma das superfícies são mantidas.

Ressalta-se que, com o acionamento do campo, nem todos os fenômenos são previsíveis, uma vez que a pesquisa com materiais EMR principalmente quanto a caracterização dinâmica ainda é um tópico de inovação e descobertas na comunidade científica.

Figura 51 – Superfícies ajustadas para viscosidade dinâmica.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 2 – Ajuste de superfícies aos dados experimentais

τ [kPa]	$\overline{R^2}$ (G)	$\overline{R^2}$ (η)
1.05	0.9991	0.9912
2.10	0.9996	0.9959
3.15	0.9998	0.9968
4.20	0.9998	0.9955
5.25	0.9997	0.9982
Média	0.9996	0.9955
Média Total	=	0.9976

Fonte: Próprio autor.

O procedimento de cálculo descrito na subseção 3.5.3, e ilustrado na Figura 40 gerou resultados de erros percentuais calculados assumindo-se um número limitado de pontos (861 para cada análise) nas duas superfícies comparadas (experimental e simulada), com 5 regimes de tensões conhecidos.

Foi possível o cálculo de três erros entre superfícies, uma vez que a superfície estudada deve estar entre duas outras conhecidas, as tensões máxima e mínima não permitem esse processo de simulação retroativa.

Os resultados dos erros calculados podem ser consultados na Tabela 3.

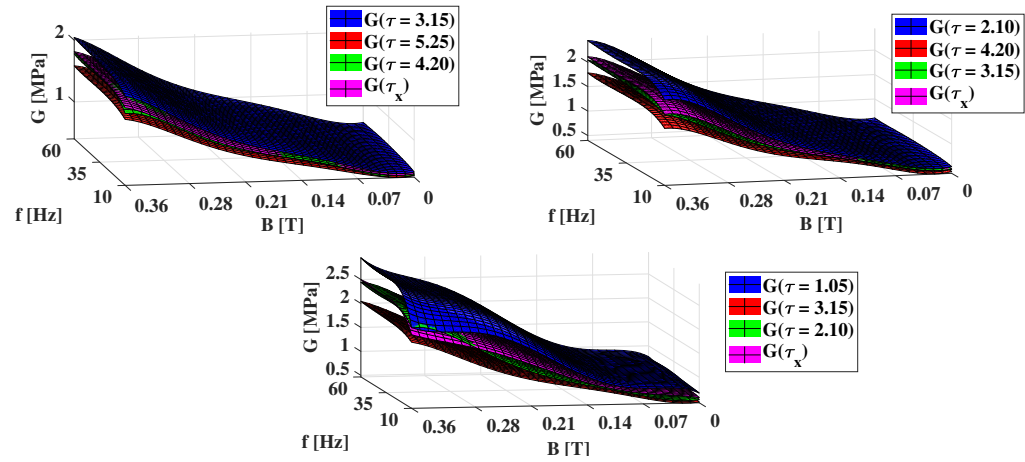
A Figura 52 e Figura 53 apresentam os plots das superfícies obtidas pelos dados experimentais, com valores τ definidos, e simulados, com valores τ_x .

Tabela 3 – Erro entre camadas simuladas e ajustadas

τ [kPa]	$E_{\%}$ (G)	$E_{\%}$ (η)
2.10	7.87	6.56
3.15	3.94	4.44
4.20	2.54	3.57
Média	4.78 %	4.85 %
Média total	4.815 %	

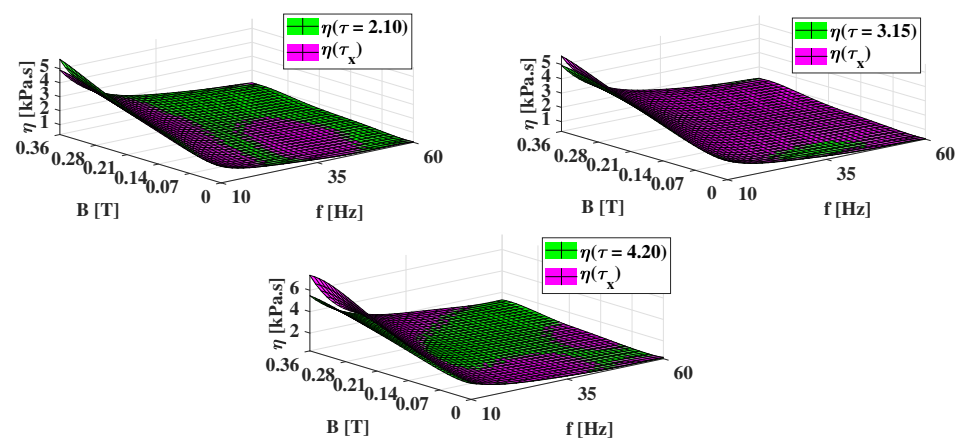
Fonte: Próprio autor.

Figura 52 – Plot de camadas simuladas e ajustadas para módulo de cisalhamento dinâmico.



Fonte: Próprio autor.

Figura 53 – Plot de camadas simuladas e ajustadas para viscosidade dinâmica.



Fonte: Próprio autor.

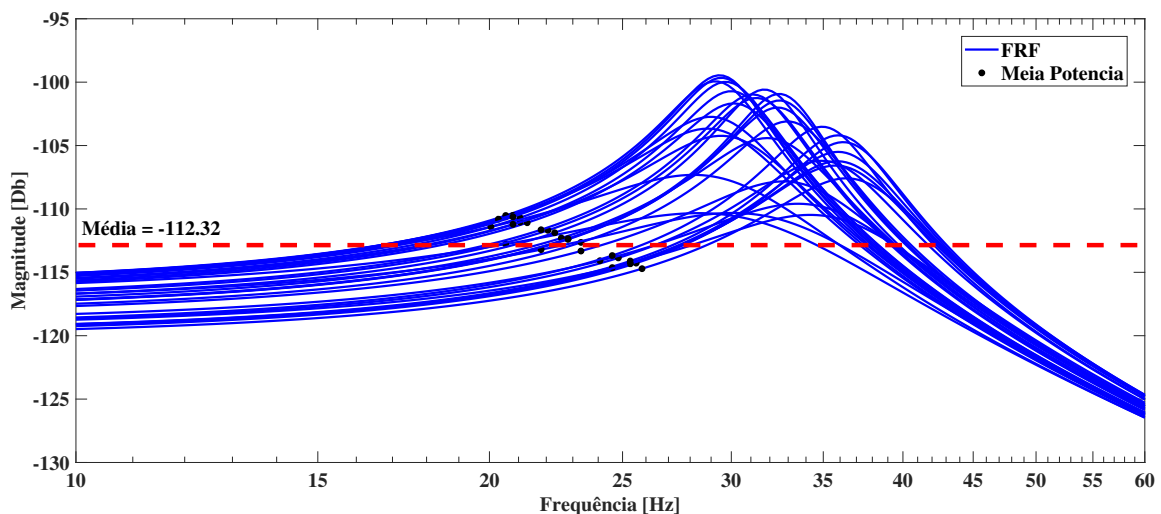
4.6 Simulação de controle

O método de controle adotado, conforme explicado na subseção 3.5.3 é o de liga/desliga. A referência é o sistema no campo nulo, ou seja, imagina-se que seja necessário controlar a resposta de um sistema 1GDL perante uma entrada aleatória, para isso aciona-se o campo nos pontos de interesse, onde a resposta em magnitude ultrapassa a magnitude de meia potência definida na subseção 3.5.4, controlando o sistema através da alteração de sua frequência natural, que depende diretamente da tensão e frequência de entrada, uma vez que estas grandezas determinam as características viscoelásticas do material.

Destaca-se que o vetor de entrada aleatório gerado está condicionado a amplitudes mínimas e máximas, ou seja, qualquer valor excitará o sistema com deslocamentos consideráveis. A condição de tensão ou deslocamento mínimo para acionamento do sistema, portanto, torna-se inerente. Na prática, no entanto, deve-se condicionar o controle a apenas agir quando uma condição mínima de tensão ou deformação for atingida, evitando o acionamento do sistema em frequência de excitação próximas a frequência natural amortecida do sistema, porém de amplitudes desprezíveis.

Foi criada uma rotina onde foram determinados os valores da meia potência para $k = 31$ parâmetros de entrada em campo nulo (vide subseção 3.5.4). Este número reduzido deve-se ao grande custo computacional relacionado ao cálculo da FRF em sua forma vetorial $[[H]]$. As FRFs foram então plotadas com seus pontos de meia potência destacados, empiricamente percebeu-se que a variância entre os pontos era suficiente para considerar-se um valor médio aplicável ao sistema em qualquer condição, dado por $|H_{1/2}| = -112.32 \text{ Db}$, vide Figura 54. A massa adotada é $m = 3.0 \text{ kg}$ (ver subseção 3.5.4).

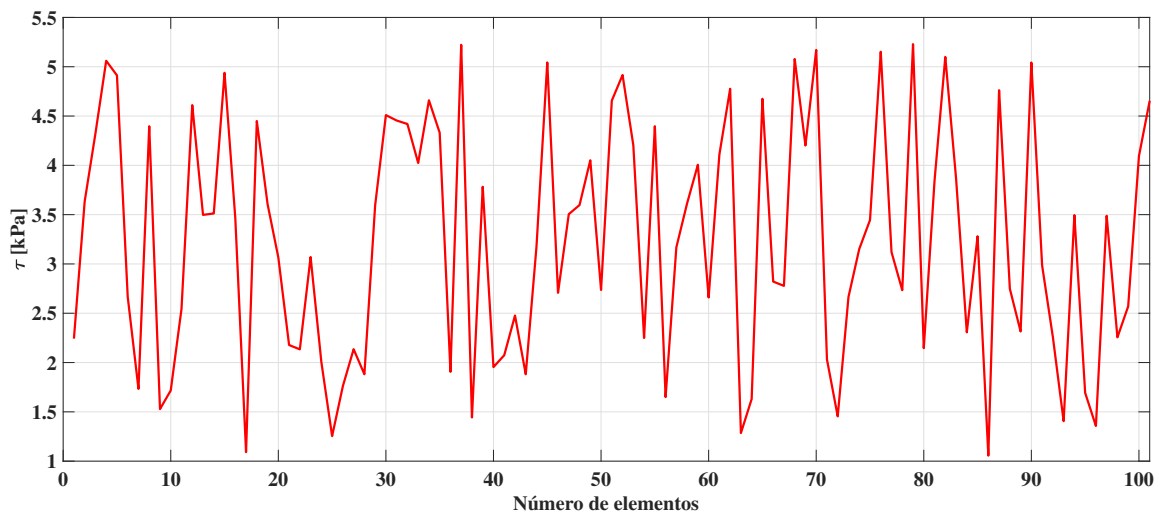
Figura 54 – FRFs e magnitude de meia potência.



Fonte: Próprio autor.

Conforme Equação 3.17, a entrada em aleatória em tensão foi gerada para o sistema de referência com 101 elementos em seu vetor linha, ilustrada na Figura 55.

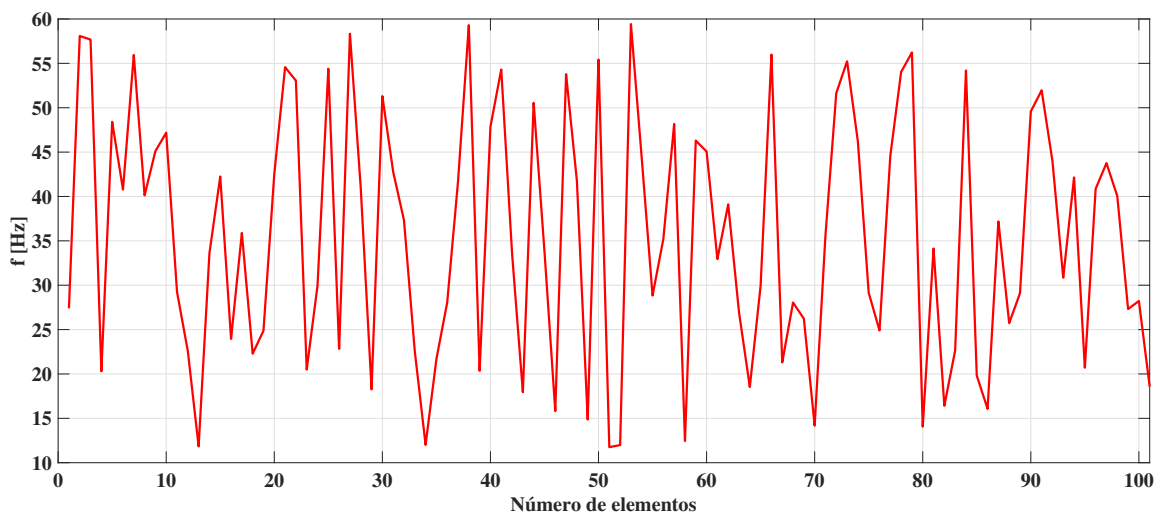
Figura 55 – Entrada em tensão aleatória.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 56 dispõe o plot das frequências de excitação para cada ponto da entrada em tensão no sistema de referência.

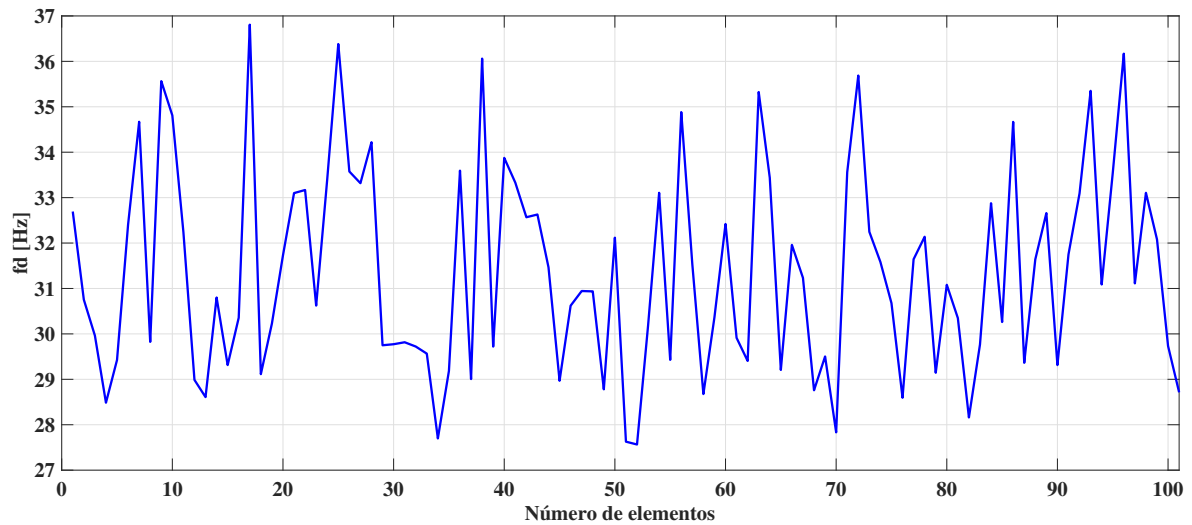
Figura 56 – Entrada em frequência de excitação aleatória.



Fonte: Próprio autor.

As frequências naturais amortecidas, vide Figura 57, permeiam em torno do valor intermediário de 30Hz, principalmente pelo valor de massa adotado.

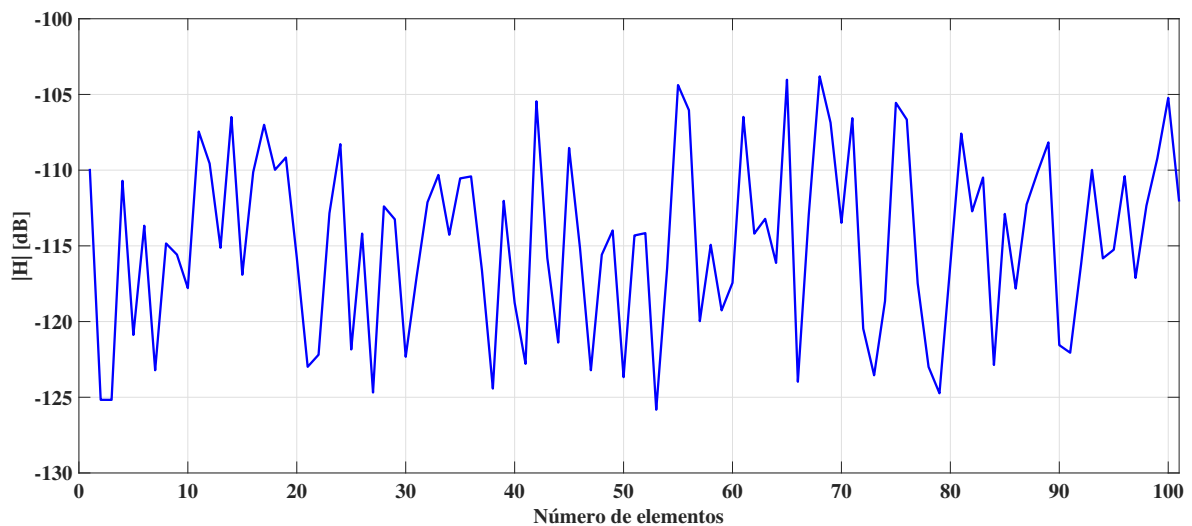
Figura 57 – Resposta em frequência natural amortecida no campo nulo.



Fonte: Próprio autor.

A resposta em magnitude do sistema, calculada em cada um dos 101 pontos de aquisição, ou seja, a magnitude efetiva de cada ponto de entrada em sua devida frequência de excitação é apresentada na Figura 58, no sistema de referência em campo nulo.

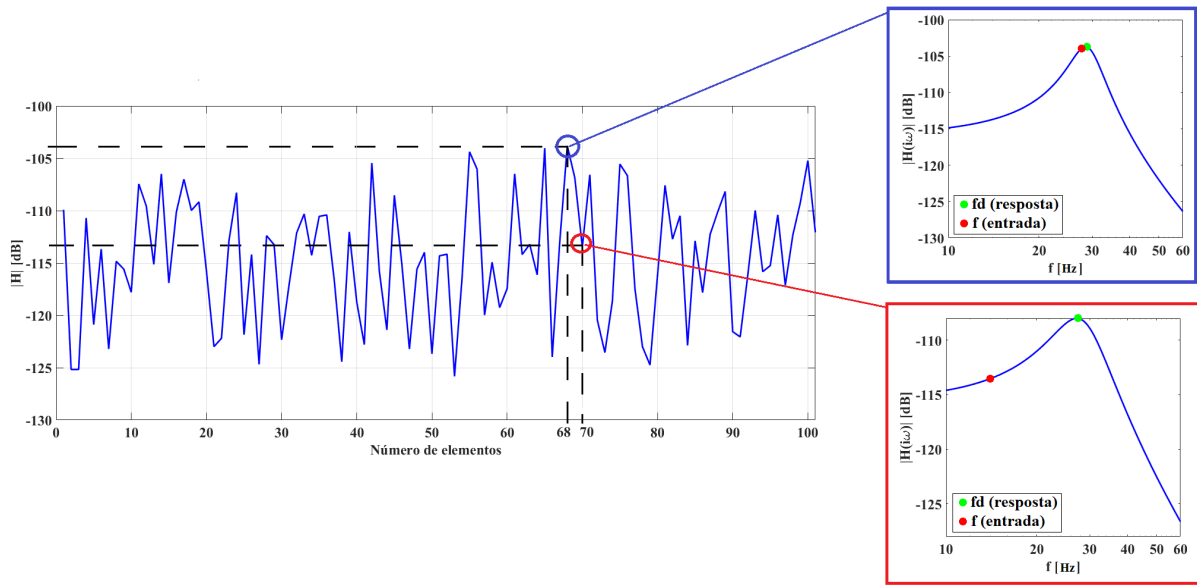
Figura 58 – Resposta em magnitude no campo nulo.



Fonte: Próprio autor.

Devido a natureza do controle a ser aplicado, que age mudando a frequência natural do dispositivo, alterando sua resposta dinâmica, a mesma toma forma incomum quando comparada a estudos tradicionais de vibrações, para melhor elucidar a exposição dos resultados foi elaborada a Figura 59.

Figura 59 – Diferença entre plots de magnitude



Fonte: Próprio autor.

Observa-se na Figura 59 que dois pontos com características distintas foram destacados: o elemento 68 do vetor de magnitude calculada ponto a ponto, que é o ponto de máxima magnitude, e o ponto 70, onde a magnitude tem um decréscimo significativo. Para cada um desses pontos uma FRF $[H(i\omega)]$ foi calculada, o significado de pontos com alta magnitude é a frequência de excitação próxima ao valor da frequência natural amortecida no elemento analisado, menores magnitudes indicam uma distância maior entre os valores da frequência de excitação e frequência natural amortecida do elemento.

Nos resultados seguintes é implementado o algoritmo de controle, acionando um valor fixo de campo magnético nos os pontos onde a magnitude excede o valor da meia potência.

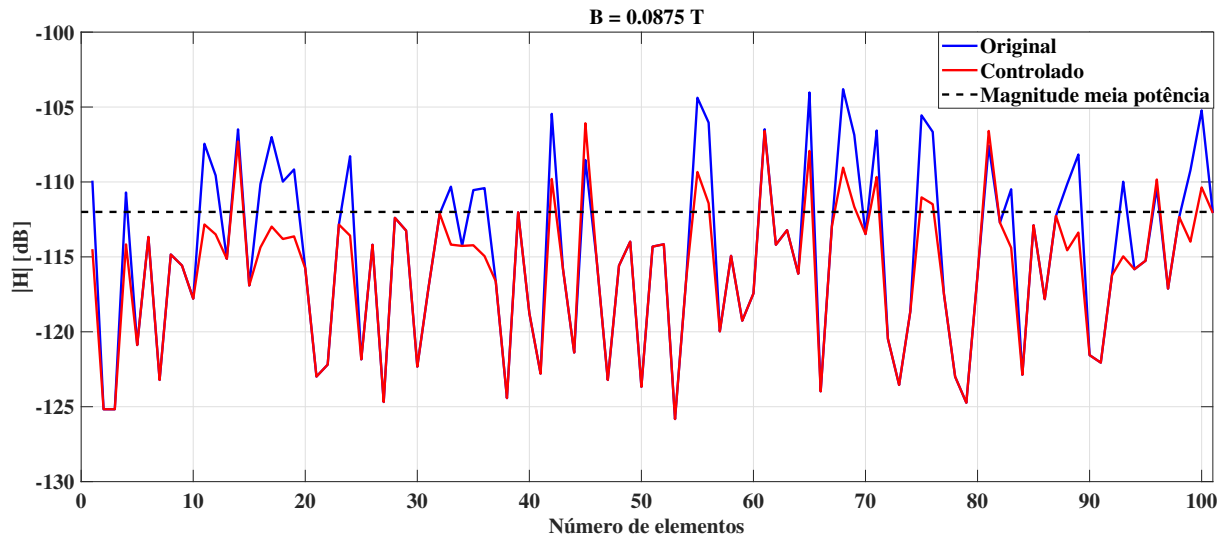
Para melhor compreensão do sistema e do efeito do acionamento do campo, bem como para determinar um ponto ótimo de trabalho, foram simulados quatro valores de campo magnético: $0.0875T$, $0.175T$, $0.2625T$, $0.35T$. Os resultados são dados pela Figura 60, Figura 61, Figura 62, Figura 63.

Analisando o conjunto Figura 60, Figura 61, Figura 62, Figura 63, percebe-se que, a partir da segunda condição de campo imposta ao sistema, com $B = 0.175T$ todos os pontos da simulação de controle encontram-se abaixo da linha de meia potência, sendo o ponto ótimo de trabalho no intervalo de campos estudados.

Novamente utilizando o ponto de magnitude máxima do sistema de referência, no elemento 68 vide Figura 59, para melhor visualização dos efeitos do acionamento do algoritmo de controle, foi elaborada a Figura 64, com as FRFs $[H(i\omega)]$ para cada situação de campo magnético.

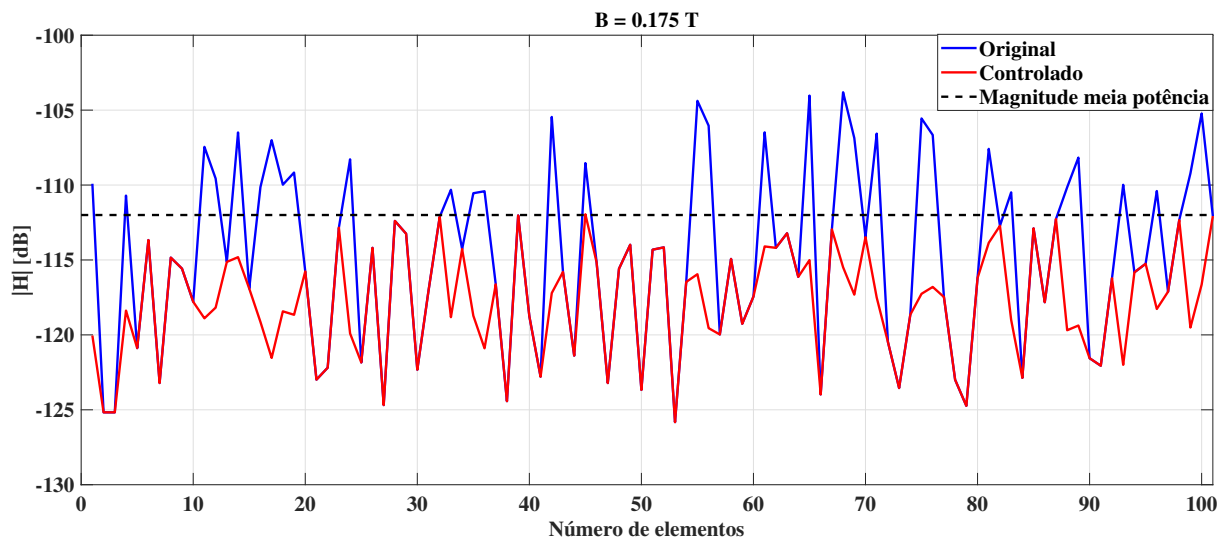
Analisando a Figura 64, é possível notar a redução da resposta do sistema junto ao aumento de rigidez, com abaulamento dos picos devido ao aumento do amortecimento. O valor da resposta na frequência de excitação de entrada f tende a tornar-se mais próximo ao valor mínimo da resposta do sistema (linha de rigidez). A magnitude de meia potência relativa para cada FRF sob influência do campo também é destacada ($|H_{1/2 \text{ nova}}|$).

Figura 60 – Resposta com e sem controle, com campo de $0.0875T$.

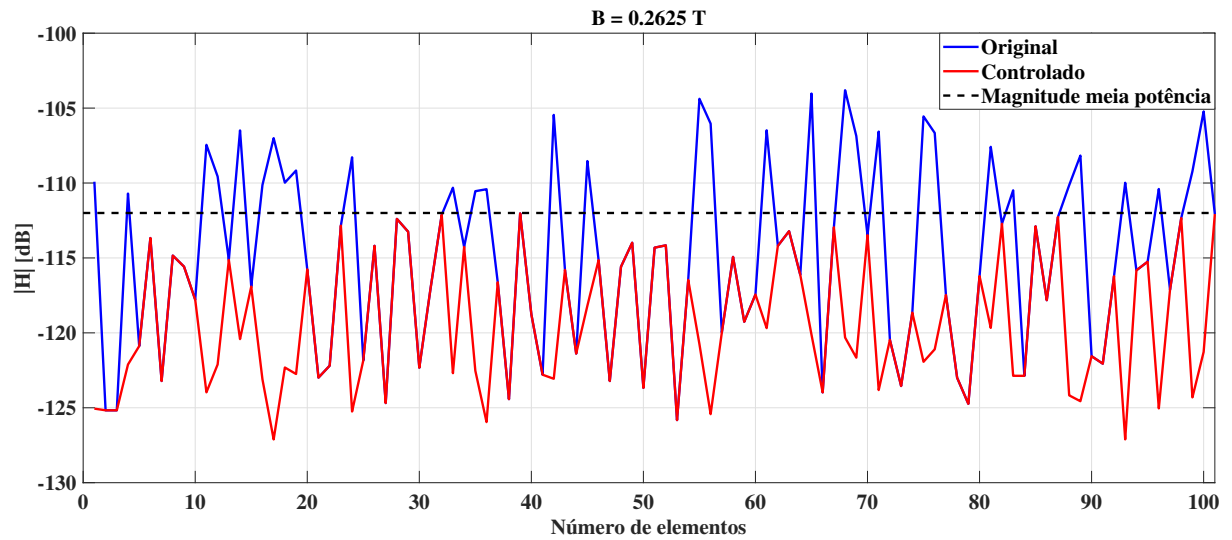


Fonte: Próprio autor.

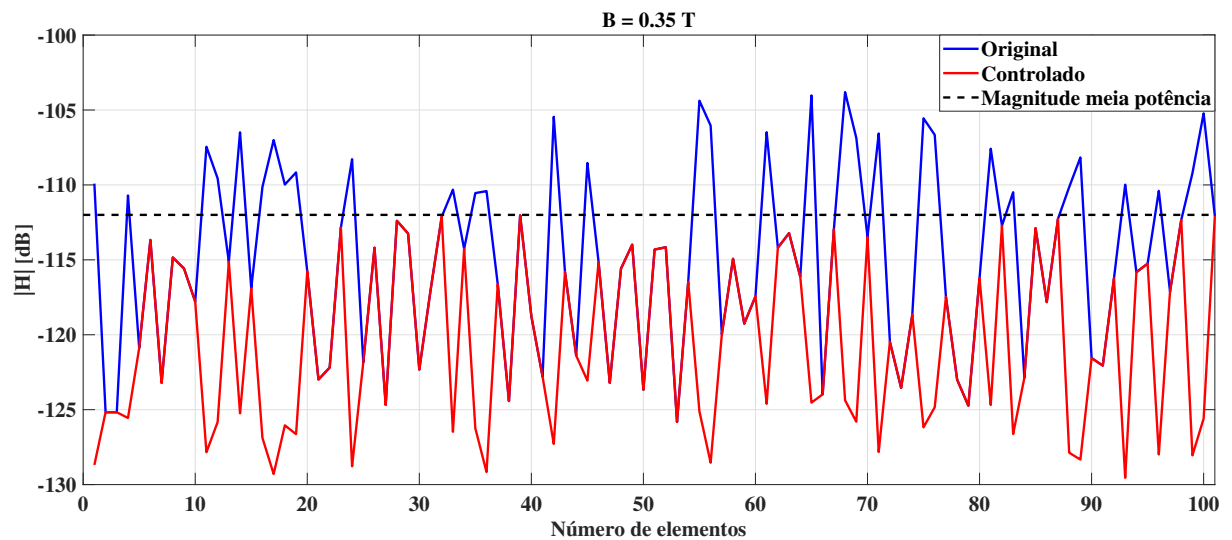
Figura 61 – Resposta com e sem controle, com campo de $0.175T$.



Fonte: Próprio autor.

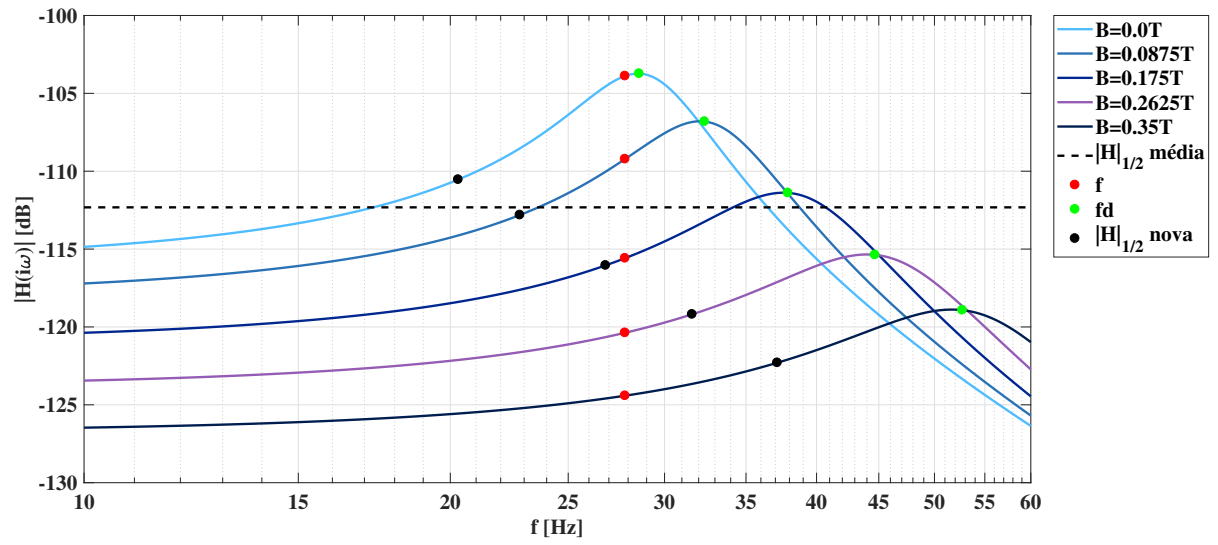
Figura 62 – Resposta com e sem controle, com campo de $0.02625T$.

Fonte: Próprio autor.

Figura 63 – Resposta com e sem controle, com campo de $0.35T$.

Fonte: Próprio autor.

Figura 64 – Resposta para todos os campos aplicados no ponto de máxima magnitude.



Fonte: Próprio autor.

5 Conclusões

Neste trabalho foi proposto um método experimental original que pudesse investigar o comportamento dinâmico de amostras de Elastômero Magneto Reológico em diferentes regimes de entrada, bem como foram criadas técnicas de fabricação de amostras com o objetivo de melhorar sua qualidade, promovendo a repetibilidade de futuros estudos.

O sistema de aquisição elaborado foi capaz de fornecer resultados coerentes, ou seja, com variação de propriedades de forma consistente e esperada em relação à trabalhos anteriores da linha de pesquisa, sendo limitado principalmente pela sensibilidade do acelerômetro utilizado, com um erro de adaptação do modelo físico utilizado, o Modelo Kelvin Voigt, de 3,91 %, calculado comparando dados de entrada simulados e experimentais para todos os pontos adquiridos.

Os dados em diversos regimes de tensão oferecem a oportunidade de análises mais completas e específicas tanto na aplicação de métodos de controle quanto ao próprio comportamento do material. Através de métodos de interpolação de superfícies o grupo foi capaz de desenvolver programas computacionais que podem simular qualquer dado dentro dos intervalos de aquisição, sendo também possível mas não recomendável a extrapolação. Por meio de uma análise retroativa entre superfícies simuladas obtidas experimentalmente foi possível afirmar que, mesmo com a aplicação de campo magnético, a relação entre superfícies em diferentes regimes de entrada é linear em compasso ao comportamento linear viscoelástico do material, ou seja, as superfícies mantêm sua forma entre regimes para ambas características viscoelásticas viscosidade e módulo de cisalhamento dinâmicos, com erro total médio entre superfícies simuladas e experimentais de 4,815 %.

A técnica de fabricação de amostras por meio da injeção de material em fase de cura submetido a vácuo, bem como a padronização de um processo em fases com tempos e medidas de dimensionamento específicas obtidas por meio de testes empíricos significaram um avanço na qualidade final de amostras, oferecendo referências objetivas de qualidade de amostras a serem cumpridas.

A diferença notória entre qualidade de amostras de trabalhos anteriores e este trabalho (Figura 42) impossibilita uma comparação mais profunda e fiel quanto a resultados de caracterização, uma vez que vários são os efeitos dinâmicos ocasionados por um maior número de vãos no interior da amostra, desde permeabilidade magnética até a rigidez e amortecimento. Analisando os resultados de Fukushima (2021), percebe-se, que o comportamento do material foi semelhante com o acionamento do campo, aumentando o valor de ambas características viscoelásticas. Com o aumento da frequência de excitação também há semelhança: grandes aumentos de módulo de cisalhamento dinâmico para frequências até 30Hz, atingindo um platô de estabili-

zação de resultados, e diminuições sucessivas não lineares da viscosidade dinâmica tendendo à uma assíntota no eixo das frequências, ou seja, a forma das curvas de comportamento viscoelásticos são semelhantes. Quanto a ordem de grandeza dos resultados de caracterização dinâmica, interpolando dados no mesmo regime de tensão utilizado no estudo de Fukushima (2021), foram obtidas as mesmas: módulo de cisalhamento dinâmico na ordem das centenas de kilopascal e viscosidade dinâmica na ordem das dezenas, porém com valores numéricos diferentes.

Por fim, a simulação em um sistema de um grau de liberdade com os dados interpolados permite um melhor entendimento do comportamento de um dispositivo de controle de vibrações utilizando material Elastômero Magneto Reológico em diversos regimes de entrada. Com acionamento do campo magnético foi possível controlar a resposta dinâmica do sistema, suprimindo picos e garantindo o cumprimento do parâmetro de segurança adotado com todos os valores de magnitude abaixo do valor da meia potência a partir do campo de 0.175T, sendo também notado que o aumento do campo tende a se aproximar do valor mínimo de amplitude do sistema em sua linha de rigidez horizontal. Com o aumento do campo, rigidez e amortecimento também aumentam causando impacto na resposta dinâmica, com a suavização do pico de ressonância e redução da magnitude pelo deslocamento da linha de rigidez.

Na seção 2.1 e seção 2.2, foram apresentados princípios de vibrações em estruturas e métodos de controle contextualizando, o estudo elaborado com sistemas representativos de 1GDL quanto sua possível aplicação.

A proposta de um dispositivo capaz de controlar a resposta dinâmica estrutural pela alteração da frequência natural amortecida é inovadora e utiliza ao máximo o atributo de alteração de propriedades viscoelásticas do material magneto-sensível, as simulações propostas neste trabalho comprovam sua eficácia e seu potencial de uso para o desenvolvimento de tecnologias.

6 Trabalhos futuros

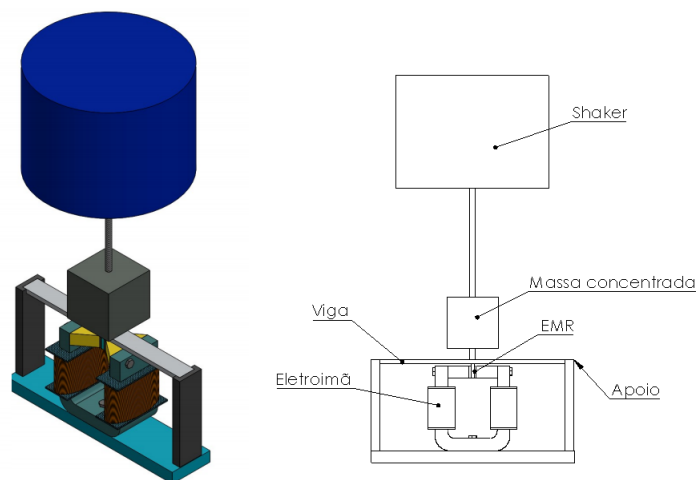
A partir da soma de conhecimentos adquiridos ao longo de anos de trabalhos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa do *LabSin* foi possível materializar esta pesquisa, o mesmo vale para trabalhos futuros, que poderão partir desta para enxergar além.

É do entendimento do autor deste trabalho que os passos futuros da pesquisa ter por ambição aproximar-se progressivamente a uma aplicação prática dos conceitos aprendidos, que cada vez mais se estabelecem, ou seja, um estudo voltado à um dispositivo específico factível.

6.1 Controle de vibrações verticais em vigas

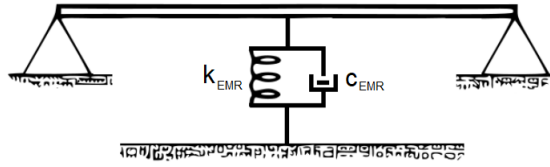
As simulações em um sistema de 1GDL genérico realizadas neste trabalho podem ser adaptadas para situações diferentes. De fato, com algumas mudanças, no caso uma simples soma no valor da rigidez com a rigidez dinâmica de uma viga dada pela Equação 6.1 (BLEVINS; PLUNKETT, 1980), é possível simular a resposta de uma viga bi-apoiada sujeita a vibrações verticais com origem no meio de sua extensão (Figura 66). Este estudo torna-se interessante pela viabilidade da produção de um experimento que possa ser expresso pelo próprio sistema 1GDL estudado, a massa de 3kg utilizada neste trabalho, as dimensões do dispositivo e os materiais disponíveis propiciam as condições necessárias para este estudo. Alguns esboços de projetos iniciais foram feitos, vide Figura 65.

Figura 65 – Projeto de experimento para estudo de controle de vibrações verticais em vigas com material EMR.



Fonte: Próprio autor.

Figura 66 – Modelo discretizado para simulação de vibrações verticais em vigas com dispositivo EMR.



Fonte: Próprio autor.

$$K_{viga} = \frac{\pi^4 \cdot E \cdot I}{2L_{viga}^3} \quad (6.1)$$

na qual:

- K_{viga} , é a rigidez dinâmica da viga a ser comada com a rigidez do dispositivo [N/m].
- I , é o momento de inércia da seção transversal da viga [m^4].
- E , é o módulo de Young da viga [Pa].
- L_{viga} , é o comprimento da viga [m].

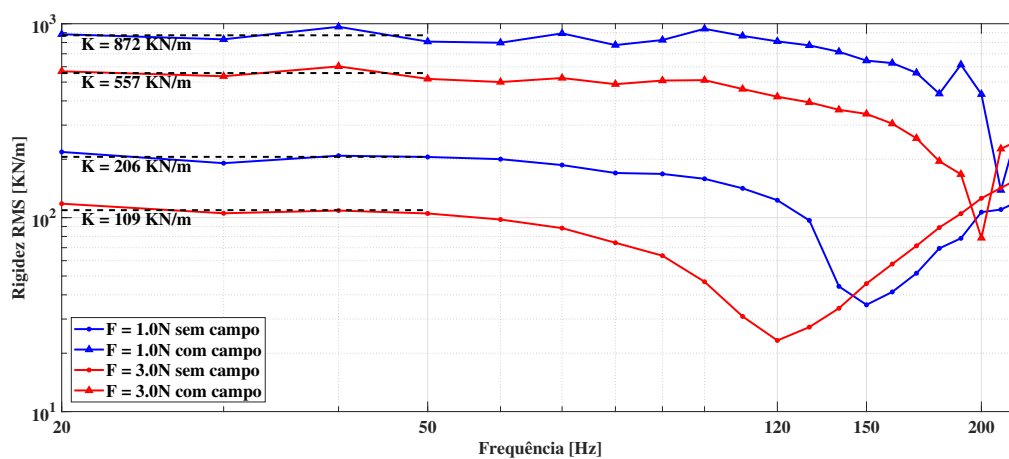
6.2 Fabricação de EMR com Ferro Carbonila de origem alternativa

Como mencionado anteriormente, a Ferro Carbonila tem alto custo financeiro de 2.306.00 R\$/Kg, equivalente à três cestas básicas por kilo, aproximadamente.

Estudos preliminares foram realizados com material alternativo importado da China, reduzindo o custo em 77,9 %, e diminuindo prazos de entrega. As amostras demonstraram boa capacidade de alteração de propriedades viscoelásticas, como visto na Figura 67 (rigidez dinâmica). Foram comparadas as densidades entre a Ferro Carbonila de origem alternativa e tradicional, sendo a Ferro carbonila tradicional cerca 12 % mais densa.

Entretanto o estudo foi realizado com um campo muito além do intervalo deste trabalho, o que exige extrapolações para comparações, sendo uma oportunidade para um trabalho futuro.

Figura 67 – Variação da rigidez dinâmica com o acionamento de campo para EMR com origem alternativa.



Fonte: Próprio autor.

Referências

ALMEIDA, F. C. d. *Isolamento de vibrações em estruturas de ponte utilizando elastômero magneto-reológico*. 2021. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 66.

BACHMANN, H. et al. *Vibration problems in structures: practical guidelines*. Basel, Suíça; Boston, Estados Unidos; Berlin, Alemanha: Birkhäuser Verlag, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.

BATISTA, A. d. M. *Estudo da variação das propriedades mecânicas de Elastômeros Magnetoreológicos Orientados submetidos a campos magnéticos com variação de intensidade e direção*. 2022. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2022. Citado na página 18.

BAVAFA-TOOSI, Y. *Introduction to linear control systems*. Cambridge, Estados Unidos: Academic Press, 2017. Citado na página 25.

BELLUCCI, F. S. *Preparação e caracterização de nanocompósitos multifuncionais obtidos com nanopartículas ferroelétricas e paramagnéticas em filmes de borracha natural*. 2013. 188 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais) — Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Presidente Prudente, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 17, 28 e 52.

BENNETT, S. A brief history of automatic control. *IEEE Control Systems Magazine*, Piscataway, Estados Unidos, v. 16, n. 3, p. 17–25, 1996. Citado na página 26.

BLEVINS, R. D.; PLUNKETT, R. Formulas for natural frequency and mode shape. *Journal of Applied Mechanics*, Nova Iorque, Estados Unidos, v. 47, n. 2, p. 461, 1980. Citado na página 86.

BRENNAN, M. J. *Notas de aula em controle ativo de vibrações*. Southampton, Reino Unido: Instituto de pesquisas em acústica e vibrações, 2014. Disponível em: <<https://www.slideserve.com/sachi/active-vibration-control>>. Acesso em: 22-01-2022. Citado na página 26.

CARVALHO, H. E. L. d. *Caracterização de um material magneto-reológico para amortecimento semiativo de vibrações em estruturas*. 2019. 76 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2019. Citado 5 vezes nas páginas 17, 18, 27, 30 e 58.

CASSOLA, S. *Análise dinâmica da interação entre ponte rodoviária e veículos pesados*. 2005. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo - EESC, São Carlos, 2005. Citado na página 24.

CHEN, Z. et al. Mr damping system on dongting lake cable-stayed bridge. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Smart structures and materials 2003*:

smart systems and nondestructive evaluation for civil infrastructures. [S.l.], 2003. v. 5057, p. 229–235. Citado na página 28.

CLANCY, L. J. *Aerodynamics*. Somerset, Inglaterra: John Wiley & Sons, 1975. Citado na página 20.

FRÝBA, L. *Vibration of solids and structures under moving loads*. Praga, República Tcheca: Instituto de pesquisa de Transportes de Praga, 1999. Citado na página 23.

FUKUSHIMA, J. C. *Desenvolvimento e caracterização de um Elastômero Magneto-Reológico para aplicação em absorvedores de vibração mecânica*. 2016. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)—Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira. Citado 3 vezes nas páginas 17, 19 e 27.

FUKUSHIMA, J. C. *Caracterização dinâmica de elastômeros magneto-reológicos*. 2021. 101 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2021. Citado 5 vezes nas páginas 18, 42, 45, 84 e 85.

GIOSAN IOAN E ENG, P. *Vortex shedding induced loads on free standing structures*. Nashville, Estados Unidos, 2013. 42 p. Disponível em: <<https://www.coursehero.com/file/10349332/Vortex-Shedding-Induced-Loads/>>. Acesso em: 22-01-2022. Citado na página 21.

GOLEBIEWSKA, I.; PESZYNSKI, K. Cable vibration caused by wind. In: EDP SCIENCES. *EPJ Web of Conferences*. [S.l.], 2018. v. 180, p. 02031. Citado na página 21.

GREEN, D.; UNRUH, W. G. Tacoma bridge failure—a physical model. *American Journal of Physics*, Melville, Estados Unidos, v. 74, n. 8, 2006. Citado na página 23.

INGLIS, C. E. *A mathematical treatise on vibrations in railway bridges*. Cambridge, Inglaterra: Cambridge University Press, 1934. Citado na página 24.

KLERK, D. de; RIXEN, D. J.; VOORMEEREN, S. General framework for dynamic substructuring: history, review and classification of techniques. *AIAA journal*, Reston, Estados Unidos, v. 46, n. 5, p. 1169–1181, 2008. Citado na página 38.

MACHADO, L. P. *Elastômeros magneto-reológicos: influência da orientação das partículas na capacidade de amortecimento de vibrações*. 2021. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista - UNESP, Ilha Solteira, 2021. Citado na página 18.

MAGNETO Rheological Elastomer. In: ORGANIZAÇÃO Mundial da Propriedade Intelectual. WIPO - World Intellectual Property Organization, 2023. Disponível em: <https://patentscope.wipo.int/search/pt/result.jsf?_vid=P10-LDBB9C-50295>. Acesso em: 01-08-2023. Citado na página 19.

MAIA, N. M. M.; SILVA, J. M. M. e. *Theoretical and experimental modal analysis*. Taunton, Inglaterra: Research Studies Press, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 41.

MEZGER, T. *The rheology handbook*. 2. ed. Hannover, Alemanha: European Coatings, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 31, 37 e 70.

MOUTINHO, C. M. R. et al. *Controlo de vibrações em estruturas de engenharia civil*. 2007. 394 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)—Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto-FEUP, Porto, Portugal, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 25.

MURTY, C. V. R. *What are the Seismic Effects on Structures*. Kanpur, India: Instituto Indiano de Tecnologia de Kanpur, 2002. Disponível em: <<http://www.iitk.ac.in/nicee/EQTips/EQTip05.pdf>>. Acesso em: 11-01-2023. Citado na página 24.

SAMALI, B.; KWOK, K. Use of viscoelastic dampers in reducing wind-and earthquake-induced motion of building structures. *Engineering Structures*, Oxford, Inglaterra, v. 17, n. 9, p. 639–654, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

SEARS, F. W. Faraday's law and ampere's law. *American Journal of Physics*, Melville, Estados Unidos, v. 31, n. 6, p. 439–443, 1963. Citado na página 68.

SETH, S.; LYNCH, J. P.; TILBURY, D. M. Wirelessly networked distributed controllers for real-time control of civil structures. In: IEEE. *Proceedings of the 2005, American Control Conference, 2005*. [S.l.], 2005. p. 2946–2952. Citado na página 25.

SHEDBALE, N.; MULEY, P. Review on viscoelastic materials used in viscoelastic dampers. *International Research Journal of Engineering and Technology*, Nova Deli, India, v. 4, n. 7, p. 8, 2017. Citado na página 29.

SISEMORE, C.; BABUŠKA, V. *The Science and Engineering of Mechanical Shock*. Nova Iorque, Estados Unidos: Springer International Publishing, 2020. Citado na página 37.

SMART materials. In: . McGraw Hill Dictionary of Scientific & Technical Terms, 2023. Disponível em: <<https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Smart+materials>>. Acesso em: 09-01-2023. Citado na página 27.

STUTZ, L. T. *Síntese e análise de uma suspensão semi-ativa magneto reológica baseada na abordagem de controle com estrutura variável*. 2005. 181 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, Rio de Janeiro, 2005. Citado na página 27.

TIAN, T.; NAKANO, M. Fabrication and characterisation of anisotropic magnetorheological elastomer with 45 iron particle alignment at various silicone oil concentrations. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Londres, Inglaterra, v. 29, n. 2, p. 151–159, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.

XU, Y. et al. A high-performance magnetorheological material: preparation, characterization and magnetic-mechanic coupling properties. *Soft Matter*, Cambridge, Inglaterra, v. 7, n. 11, p. 5246–5254, 2011. Citado na página 18.

Anexos

ANEXO A – Algoritmo de aquisição

Programa principal de aquisição e controle de força de entrada:

ensaio_1frequencia_adaptacao_forca

```
% Limpar arquivos e dados armazenados
clear          % limpar arquivo
clc           % limpa tela
close all     % fecha janelas

%% Parametros Iniciais
sens_placa = 1;          % calibracao para Dell Optplex755
                        % Line Traseira, Nivel: 69

sens_load_cell = 0.011241; % 10mV/N      (Data sheet Modelo 208
                                C02)
sens_acc      = 0.010;      % 10mV/ms2 (Acelerômetro grande
                                PCB333B)
sens_acc      = 0.0010;     % 1mV/ms2 (Acelerômetro pequeno
                                PCB 352C22 SNL W219088)

%% Entrada de Parâmetros:
% Campo Magnetico      [ 0- NAO; 1 - SIM]
o = 0;

% Concentracao Fe porcentagem:      [ % ]
p = 33;

% Corrente Eletrica:          [ Ampere ]
c = 0.8;

%inserir Data no nome do arquivo?
data = 0; % 0- Não, 1 - sim;

% Frequencia do Ensaio [ Hz ]
f = 10;

% Força Desejada [ Newton ]
```

```
N = 0.7;

% Rodada
round = 4;

%% Geração de Parametros de tempo

Fs = 1024*8;          % Frequência de Amostragem (Hz)
T = 4;                % Tempo de aquisição (s)
dt = 1/Fs;            % Incremento do vetor de tempo
df = 1/T;             % Incremento do vetor de frequência
t = 0:dt:T-dt;        % Vetor de Tempo (s)
td = 0.2;             % Atraso entre reprodução e gravação
t2 = 0:dt:(T+td)-dt; % Vetor tempo de gravação com atraso

%% Gerador de Sinais
% Sinal Senoidal
s = sin(2*pi*f*t);    % sinal no tempo

%% Adaptação da Força
output_force = 0.5;
x = output_force * s;

fprintf('RMS de Força desejado : %g N. \n',N)

while(true)
    fprintf('RMS de Força desejado : %g N. \n',N)
    fprintf('Referencia Força enviada: %g. \n',output_force)
    grava_plota % filtra os dados de y1 e y2

    error_force = (rms_f - N)/N;
    fprintf('Erro de força: %2.2f%% \n',error_force*100)

    if abs(error_force) > 0.005
        if error_force < 0
```

```
        if error_force < 0.1
            output_force = 1.1*output_force;
        elseif error_force < 0.05
            output_force = 1.05*output_force;
        else
            output_force = 1.01*output_force;
        end
    else
        if error_force > 0.1
            output_force = 0.90*output_force;
        elseif error_force > 0.05
            output_force = 0.95*output_force;
        else
            output_force = 0.99*output_force;
        end
    end
else
    fprintf('Força desejada atingida com margem de 0.5%% \n
        .')
    break
end

if (output_force > 3) || (output_force < 0.1)
    disp('Erro na adapção de força')
    return
end

x = output_force * s;
end

%% Frequency

% overlap
n = 0.5;
% number of points
nfft = fix(0.5*Fs);
% integer number of points given by overlapping the signal
over_lap = fix(nfft*n);
```

```

% CPSD, unwrapped phase and coherence
[XX1,Fcx] = cpsd(x ,x ,hanning(nfft),over_lap,nfft,Fs,'onesided
    ');
[YY1,Fc]   = cpsd(y1,y1,hanning(nfft),over_lap,nfft,Fs,'onesided
    ');
[YY2,~]     = cpsd(y2,y2,hanning(nfft),over_lap,nfft,Fs,'onesided
    ');

%% Saída
Ts  = t2(end);
dt  = t2(2);
Fs  = 1/dt;

per = 4; % periodos a serem vizualizados
s_i = 3; % segundo inicial,

% Extração do espaço de tempo desejado
y1p = y1(s_i*Fs:ceil(s_i*Fs+per/f/dt));
y2p = y2(s_i*Fs:ceil(s_i*Fs+per/f/dt));

% Remoção desvio DC
y1p = y1p - mean(y1p);
y2p = y2p - mean(y2p);

% omega2
w2 = ( 2*pi*f)^2;

% RMS periodo extraído
rms_a = std(y2p);
rms_f = std(y1p);
rms_d = rms_a / w2;

yc = y1; %vetor de dados da celula de carga para a rodada em
    questao
ya = y2; %vetor de dados da celula de carga para a rodada em
    questao

%% Save Raw Signs

```

```

txt_orientacao = ["sem_campo","campo"];
tempo          = clock();
txt_tempo      = strcat('_',num2str(tempo(1)), '_',num2str(tempo
    (2)), '_',num2str(tempo(3)), '_',num2str(tempo(4)), '_',num2str
    (tempo(5)));
if data == 0, txt_tempo = ''; end
txt_exp        = strcat(txt_orientacao(o+1), '_',num2str(c), 'A_
    ', num2str(p), '%_',num2str(f), 'Hz', '_',num2str(N), 'N_',
    num2str(round), 'round');
%txt_exp       = strcat(orientacao_txt(o), '_',num2str(campo(c)
    ), 'T_', num2str(porcentagem(p)), '%_',num2str(frequencia(f))
    , 'Hz');
txt_final      = strcat(txt_exp,txt_tempo, '.mat');

save(txt_final, 't2', 'yc', 'ya', 'o', 'c', 'p', 'f', 'N', 'ya_raw', '
    yc_raw')

```

Programa para gravação dos sinais:

grava_plota

```

%% Placa de som Som:
y(:,1) = x;      % Canal 1
y(:,2) = x;      % Canal 2

% Executango e Gravando áudio
playObj = audioplayer (x,Fs) ; % Configura Player da saída
    de áudio ( sinal, sample rate)
recObj = audiorecorder(Fs,24,2); % Configura Gravador(Sample
    rate, number of bits, number of channels)

fprintf('Enviando e recebendo sinal %g segundos... \n',T)
play(playObj)
record(recObj, T+td);
% ----- Ciclo PRINT do sinal de audio (1s) -----
%clc
fprintf('Reproduzindo sinal: %g segundos. \nSegundos
    restantes: ',T)

```

```

fprintf(' ')
for i=T:-.5:0
    fprintf(repmat('\b', 1, 6))                % apaga
        escrito
    fprintf('%3.0f s.',i)                        % escreve
        tempo faltante
    pause(.5)                                    % aguarda 1
        s
    P = getaudiodata(recObj);                    % recupera
        sinal de audio
    P = P'/sens_placa;                           % conversão
        da leitura em Volts
    x1_speaker = P(1,:) / sens_load_cell;          %
        Sensibilidade Céluda de carga      mV/N
    x2_speaker = P(2,:) / sens_acc ;               %
        Sensibilidade Acelerômetro 333 100mv/G

    if (length(x1_speaker)> Fs)
        subplot 211, plot(x1_speaker), grid on    % PLOT
            Força para conferencia
        xlim([length(x1_speaker)-(1/f*Fs*4) length(
            x1_speaker)])
        %ylim([-60 60])
        %yticks([-60:5:60])
        subplot 212, plot(x2_speaker), grid on    % PLOT
            Força para conferencia
        xlim([length(x1_speaker)-(1/f*Fs*4) length(
            x1_speaker)])
    end

end

fprintf('\nReprodução concluída! \n')
disp('Fim');

% ----- Fim do ciclo -----

% Direcionando os arquivos de audio coletados para as variáveis
.
P = getaudiodata(recObj);

```

```
P = P'/sens_placa;
%% Condicionamento do Sinal
x1_speaker = P(1,:) / sens_load_cell;
% Sensibilidade Célula de carga      mV/N
x2_speaker = P(2,:) / sens_acc      ;
% Sensibilidade Acelerômetro 333 100mv/G

% Removendo o desvio
x1_speaker = x1_speaker-mean(x1_speaker);
x2_speaker = x2_speaker-mean(x2_speaker);

% Realocando sinal
y1=x1_speaker;
y2=x2_speaker;

%ya = y2
%yc = y1

ya_raw = y2 ;
yc_raw = y1 ;

%% Filtro
% Filter Parameters
a=[0.88*f 1.12*f]/(Fs/2);
% frequencia inferior e frequencia superior

% Filter Applicattion
[B,A]=butter(2,a,'bandpass');
% tipo(ordem, frequencia, banda)

y1=filter(B,A,y1);
% aplicação do filtro

y2=filter(B,A,y2);
% aplicação do filtro

%% Saída
T = t2(end);
dt = t2(2);
```

```
Fs = 1/dt;

per = 4; % periodos a serem vizualizados
s_i = 3; % segundo inicial,

% Extração do espaço de tempo desejado
y1p = y1(s_i*Fs:ceil(s_i*Fs+per/f/dt));
y2p = y2(s_i*Fs:ceil(s_i*Fs+per/f/dt));

% Remoção desvio DC
y1p = y1p - mean(y1p);
y2p = y2p - mean(y2p);

% omega2
w2 = ( 2*pi*f)^2;

% RMS periodo extraído
rms_a = std(y2p);
rms_f = std(y1p);
rms_d = rms_a / w2;
```

ANEXO B – Algoritmo de caracterização

Programa de aplicação do Modelo Kelvin Voigt:

load_exp_kelvin_ensaio

```
clear, clc,
close all

load('sem_campo_0.8A_33%_10Hz_0.7N_4round.mat')
corr = 1 ;

y1 = yc*corr ;
y2 = ya*corr ;

% 7.69 = 0.4937/0.0642
% Correção da sensibilidade da placa

%% Setup
per = 4; % periodos a serem vizualidos
s_i = 3; % segundo inicial
fig = 2; % numero da figure desejada para visualização
        % se repedido será plotado na figure atual

%% Parametros
T = t2(end);
dt = t2(2);
Fs = 1/dt;

%% Filtro

% Este programa roda um filtro independente do programa gerador
do sinal
% os dados adquiridos são tratados em seu formato original e re
-filtrados
% para poder manipular filtros.
```

```

% y1=yc e y2=ya são dados filtrados do programa gerador do
    sinal, não
% utilizar

%Sinais originais no periodo de tempo analisado
yc_raw_p = yc_raw(s_i*Fs:ceil(s_i*Fs+per/f/dt)) ;
ya_raw_p = ya_raw(s_i*Fs:ceil(s_i*Fs+per/f/dt)) ;
t2_p = t2(s_i*Fs:ceil(s_i*Fs+per/f/dt));
% Filter Parameters
a=[0.88*f 1.12*f]/(Fs/2);
% frequencia inferior e frequencia superior
%a=[ 6*f]/(Fs/2);
% frequencia inferior e frequencia superior
%janela [highpass lowpass]

% Filter Aplicattion
[B,A]=butter(2,a,'bandpass'); % tipo(ordem, frequencia, banda)
yc_filtro=filter(B,A,yc_raw);
% aplicação do filtro
ya_filtro=filter(B,A,ya_raw);
% aplicação do filtro

%% Frequency

% overlap
n = 0.5;
% number of points
nfft = fix(0.5*Fs);
% integer number of points given by overlapping the signal
over_lap = fix(nfft*n);

% CPSD, unwrapped phase and coherence
[YY1,Fc] = cpsd(yc_filtro,yc_filtro,hanning(nfft),over_lap,
    nfft,Fs,'onesided');
[YY2,~] = cpsd(ya_filtro,ya_filtro,hanning(nfft),over_lap,
    nfft,Fs,'onesided');

%% Saída

```

```

% Extração do espaço de tempo desejado - dados filtrados
ycp = yc_filtro(s_i*Fs:ceil(s_i*Fs+per/f/dt));
yap = ya_filtro(s_i*Fs:ceil(s_i*Fs+per/f/dt));

% Remoção desvio DC
ycp = ycp - mean(ycp);
yap = yap - mean(yap);

%  $\omega^2$  e  $\omega$ 
w = (2*pi*f) ;
w2 = (2*pi*f)^2;

% RMS período extraído
rms_a = std(yap);
rms_f = std(ycp);
rms_d = rms_a / w2;
k = rms_f / rms_d;

%% TENSÃO, DEFORMAÇÃO, KELVIN VOIGHT

% yap é a aceleração filtrada no período de tempo analisado
% ycp é a força filtrada no período de tempo analisado

%dimensoes do MRE : b=19mm , h=17.55mm , e=3.05mm

nA = length(yap);
% numero de pontos totais do vetor
periodo = 1/f ;
% periodo
np = ceil(periodo/dt);
% numero de pontos por periodo

s1 = nA - 2.04*np;
% periodo inicial
s2 = nA - 1*np;
periodo final

```

```

T = ycp(s1:s2) / (2*0.019*0.01755);
% Tensão
X = yap(s1:s2)./w2 ;
% Deslocamento X

D = X / (0.00305);
% Deformação X/espessura

g = (T ) / (D) ;
% Módulo de cisalhamento g = tensão/deformacao

dD = diff(D)/dt;
% derivada do deslocamento ( sai com - 1 elemento)
dD = [dD dD(end)];
% derivada do deslocamento com + 1 elemento (repete-se o último
    )

n = (T - D * g) / (dD);
% viscosidade Pa.s
% o valor negativo da viscosidade
% devido ao sentido da inclinação
% da elipse de lissajous
% considera-se seu valor absoluto

% Resultados dados filtrados

TKV = D*g+dD*n ; % Tensão modelo Kelvin Voight

g2 = k*0.00305/(2*0.019*0.01755) ;
% modulo cisalhamento calculado pela rigidez e geometria

erro_g1g2 = (abs(abs(g) - abs(g2))/abs(g2))*100 ; % erro
    entre g exp e g analitico

Erro_modelo_KV = mean(abs((abs(T-TKV)./T)*100)); % Erro modelo/
    dados exp

```

ANEXO C – Algoritmo de interpolação

Programa para interpolação de superfícies:

simulacoes_funcao_B_T_fixo_F

```
% SIMULAÇÃO DE PROPRIEDADES EM FUNÇÃO DA TENSÃO, FREQUÊNCIA E
CAMPO - ENSAIO MRE SIGMA ALDRICH 33% %
```

```
%% inicializacao
```

```
clc; clear all;
```

```
load('dados_modulo_viscosidade.mat')
```

```
%% ENTRADA DE PARAMETROS
```

```
%Fmin = 10Hz & Fmax = 60Hz
```

```
frequencia_alvo = 37 ; %[Hz]
```

```
%Bmin = 0.00T & Bmax = 0.35T
```

```
campo_alvo = 0.35 ; %[T]
```

```
%Tmin = 1.05KPa & Tmax = 5.25KPa
```

```
tensao_alvo = 1.05 ; %[KPa]
```

```
%% GRAFICO 3D COM TENSÃO NO EIXO Z - MELHOR PARA CONTROLE
```

```
% CAMPO VARIÁVEL E 'TENSÃO FIXA'
```

```
% CURVE-FIT
```

```
% eixo x -> frequencia [Hz]
```

```
% eixo y -> Campo [T]
```

```
% eixo z -> G* ou n* [Kpa] ou [KPa.s]
```

```
% variacao do eixo z -> tensao
```

```
vetor_B_T_fixo = [vetor_B_00A' vetor_B_02A' vetor_B_04A'
```

```
vetor_B_06A' vetor_B_08A' vetor_B_10A' ];
```

```
vetor_frequencia_T_fixo = [ frequencia_F07 frequencia_F07
```

```
frequencia_F07 frequencia_F07 frequencia_F07
```

```

    frequencia_F07]; ;

vetor_G_B_T105 = [ G_F07    G_F07_02A    G_F07_04A    G_F07_06A
                  G_F07_08A G_F07_10A];
vetor_G_B_T210 = [ G_F14    G_F14_02A    G_F14_04A    G_F14_06A
                  G_F14_08A G_F14_10A];
vetor_G_B_T315 = [ G_F21    G_F21_02A    G_F21_04A    G_F21_06A
                  G_F21_08A G_F21_10A];
vetor_G_B_T420 = [ G_F28    G_F28_02A    G_F28_04A    G_F28_06A
                  G_F28_08A G_F28_10A];
vetor_G_B_T525 = [ G_F35    G_F35_02A    G_F35_04A    G_F35_06A
                  G_F35_08A G_F35_10A];

vetor_n_B_T105 = [ viscosidade_F07    viscosidade_F07_02A
                  viscosidade_F07_04A    viscosidade_F07_06A
                  viscosidade_F07_08A    viscosidade_F07_10A];
vetor_n_B_T210 = [ viscosidade_F14    viscosidade_F14_02A
                  viscosidade_F14_04A    viscosidade_F14_06A
                  viscosidade_F14_08A    viscosidade_F14_10A];
vetor_n_B_T315 = [ viscosidade_F21    viscosidade_F21_02A
                  viscosidade_F21_04A    viscosidade_F21_06A
                  viscosidade_F21_08A    viscosidade_F21_10A];
vetor_n_B_T420 = [ viscosidade_F28    viscosidade_F28_02A
                  viscosidade_F28_04A    viscosidade_F28_06A
                  viscosidade_F28_08A    viscosidade_F28_10A];
vetor_n_B_T525 = [ viscosidade_F35    viscosidade_F35_02A
                  viscosidade_F35_04A    viscosidade_F35_06A
                  viscosidade_F35_08A    viscosidade_F35_10A];

%%

clc
syms f B T w G_T105 G_T210 G_T315 G_T420 G_T525 Gx
      n_T105 n_T210 n_T315 n_T420 n_T525 nx
% Superficies ajustada : Funcao de 5 grau

% Modulo de cisalhamento
% Funcao de superficie T=1.05Kpa
p00_T105_G =          0.5171;  %(0.1496, 0.8846)

```

```

p10_T105_G =      0.03147;  %(-0.03602, 0.09896)
p01_T105_G =        6.276;  %(2.972, 9.581)
p20_T105_G =    -0.002361; %(-0.006909, 0.002187)
p11_T105_G =      0.3137;  %(0.04606, 0.5813)
p02_T105_G =     -191.8;   %(-235.5, -148)
p30_T105_G =    8.792e-05; %(-5.516e-05, 0.000231)
p21_T105_G =    -0.01584; %(-0.02601, -0.005676)
p12_T105_G =      0.8044;  %(-0.311, 1.92)
p03_T105_G =      1731;   %(1430, 2032)
p40_T105_G =    -1.49e-06; %(-3.618e-06, 6.378e-07)
p31_T105_G =    0.0003249; %(0.0001458, 0.000504)
p22_T105_G =    -0.02385; %(-0.04312, -0.004583)
p13_T105_G =      0.1748; %(-2.888, 3.237)
p04_T105_G =     -5734;   %(-6658, -4810)
p50_T105_G =    9.245e-09; %(-2.821e-09, 2.131e-08)
p41_T105_G =    -2.28e-06; %(-3.497e-06, -1.063e-06)
p32_T105_G =    0.0001991; %(5.186e-05, 0.0003464)
p23_T105_G =    -0.003087; %(-0.02402, 0.01785)
p14_T105_G =      0.7622; %(-2.97, 4.494)
p05_T105_G =      6286;   %(5258, 7314)

```

```
% Modulo de cisalhamento
```

```
% Funcao de superficie T=2.10Kpa
```

```

p00_T210_G =      0.3813;  %(0.1629, 0.5997)
p10_T210_G =      0.02571; %(-0.0144, 0.06582)
p01_T210_G =      -2.21;   %(-4.174, -0.2461)
p20_T210_G =    -0.001358; %(-0.004061, 0.001344)
p11_T210_G =    -0.05974; %(-0.2188, 0.0993)
p02_T210_G =      94.98;   %(68.96, 121)
p30_T210_G =    3.955e-05; %(-4.549e-05, 0.0001246)
p21_T210_G =    -0.001113; %(-0.007155, 0.004929)
p12_T210_G =      1.281;   %(0.6178, 1.944)
p03_T210_G =     -796.4;   %(-975.1, -617.7)
p40_T210_G =   -5.926e-07; %(-1.857e-06, 6.719e-07)
p31_T210_G =    8.828e-05; %(-1.818e-05, 0.0001947)
p22_T210_G =    -0.02729; %(-0.03875, -0.01584)
p13_T210_G =      -2.12;   %(-3.94, -0.2998)
p04_T210_G =      2853;   %(2304, 3402)
p50_T210_G =    3.491e-09; %(-3.68e-09, 1.066e-08)

```

```

p41_T210_G = -9.153e-07; %(-1.639e-06, -1.919e-07)
p32_T210_G = 0.0001846; %(9.705e-05, 0.0002721)
p23_T210_G = 0.01237; %(-6.996e-05, 0.02481)
p14_T210_G = 2.375; %(0.1574, 4.593)
p05_T210_G = -3513; %(-4124, -2902)

```

```
% Modulo de cisalhamento
```

```
% Funcao de superfície Polinomial de 3 grau T=3.15Kpa
```

```

p00_T315_G = 0.3597; %(0.2245, 0.4948)
p10_T315_G = 0.02088; %(-0.003941, 0.04571)
p01_T315_G = -2.357; %(-3.573, -1.142)
p20_T315_G = -0.001158; %(-0.002831, 0.0005145)
p11_T315_G = 0.01364; %(-0.0848, 0.1121)
p02_T315_G = 89.44; %(73.34, 105.5)
p30_T315_G = 3.43e-05; %(-1.834e-05, 8.693e-05)
p21_T315_G = -0.001881; %(-0.005621, 0.001859)
p12_T315_G = 0.3759; %(-0.03441, 0.7861)
p03_T315_G = -676.7; %(-787.3, -566)
p40_T315_G = -4.986e-07; %(-1.281e-06, 2.841e-07)
p31_T315_G = 4.012e-05; %(-2.577e-05, 0.000106)
p22_T315_G = -0.004063; %(-0.01115, 0.003025)
p13_T315_G = -0.8605; %(-1.987, 0.266)
p04_T315_G = 2196; %(1856, 2536)
p50_T315_G = 2.755e-09; %(-1.683e-09, 7.194e-09)
p41_T315_G = -1.958e-07; %(-6.436e-07, 2.519e-07)
p32_T315_G = -5.421e-06; %(-5.959e-05, 4.875e-05)
p23_T315_G = 0.005926; %(-0.001775, 0.01363)
p14_T315_G = 0.8053; %(-0.5675, 2.178)
p05_T315_G = -2461; %(-2840, -2083)

```

```
% Modulo de cisalhamento
```

```
% Funcao de superfície Polinomial de 3 grau T=4.20Kpa
```

```

p00_T420_G = 0.2548; %(0.1472, 0.3624)
p10_T420_G = 0.0326; %(0.01283, 0.05236)
p01_T420_G = -3.151; %(-4.119, -2.183)
p20_T420_G = -0.001925; %(-0.003257, -0.0005935)
p11_T420_G = -0.09015; %(-0.1685, -0.01177)
p02_T420_G = 118.4; %(105.6, 131.3)
p30_T420_G = 5.667e-05; %(1.476e-05, 9.857e-05)

```

```

p21_T420_G =      0.001148;   %(-0.00183, 0.004126)
p12_T420_G =      0.8879;     %(0.5612, 1.215)
p03_T420_G =     -933.4;      %(-1021, -845.3)
p40_T420_G =    -8.074e-07;   %(-1.431e-06, -1.842e-07)
p31_T420_G =     1.45e-05;    %(-3.796e-05, 6.696e-05)
p22_T420_G =     -0.0147;    %(-0.02034, -0.009054)
p13_T420_G =     -1.823;     %(-2.72, -0.9264)
p04_T420_G =      3035;      %(2765, 3306)
p50_T420_G =    4.423e-09;    %(8.893e-10, 7.957e-09)
p41_T420_G =   -3.019e-07;    %(-6.584e-07, 5.464e-08)
p32_T420_G =     0.0001373;   %(9.42e-05, 0.0001805)
p23_T420_G =    -0.003958;   %(-0.01009, 0.002174)
p14_T420_G =      3.101;     %(2.008, 4.194)
p05_T420_G =    -3450;      %(-3751, -3149)

```

```
% Modulo de cisalhamento
```

```
% Funcao de superficie Polinomial de 3 grau T=5.25Kpa
```

```

p00_T525_G =      0.3403;   %(0.2124, 0.4682)
p10_T525_G =      0.01439;  %(-0.009109, 0.03788)
p01_T525_G =     -2.437;    %(-3.588, -1.287)
p20_T525_G =   -0.0007694;  %(-0.002353, 0.0008137)
p11_T525_G =      0.02358;  %(-0.06958, 0.1167)
p02_T525_G =      72.87;    %(57.63, 88.11)
p30_T525_G =    2.014e-05;   %(-2.966e-05, 6.995e-05)
p21_T525_G =   -0.0001565;  %(-0.003696, 0.003383)
p12_T525_G =      0.06408;  %(-0.3242, 0.4523)
p03_T525_G =     -529.2;    %(-633.9, -424.5)
p40_T525_G =   -2.473e-07;   %(-9.88e-07, 4.933e-07)
p31_T525_G =   -1.031e-05;   %(-7.266e-05, 5.205e-05)
p22_T525_G =   -0.0001621;  %(-0.00687, 0.006546)
p13_T525_G =     -0.2479;   %(-1.314, 0.8181)
p04_T525_G =      1716;     %(1395, 2038)
p50_T525_G =    1.132e-09;   %(-3.068e-09, 5.333e-09)
p41_T525_G =    1.119e-07;   %(-3.118e-07, 5.357e-07)
p32_T525_G =    1.139e-05;   %(-3.987e-05, 6.265e-05)
p23_T525_G =   -0.001559;   %(-0.008847, 0.005729)
p14_T525_G =      0.3606;   %(-0.9386, 1.66)
p05_T525_G =    -1943;      %(-2301, -1585)

```

```
% Viscosidade
```

```
% Funcao de superficie T=1.05Kpa
```

```
p00_T105_n =      6.59;   %(3.848, 9.332)
p10_T105_n =     -0.7284; %(-1.232, -0.2248)
p01_T105_n =     28.57;   %(3.92, 53.23)
p20_T105_n =     0.03916; %(0.005229, 0.07309)
p11_T105_n =     -3.247; %(-5.243, -1.25)
p02_T105_n =     113.8;   %(-212.8, 440.4)
p30_T105_n =    -0.001073; %(-0.002141, -5.739e-06)
p21_T105_n =      0.147; %(0.07117, 0.2229)
p12_T105_n =     -7.608; %(-15.93, 0.7139)
p03_T105_n =    -173.1;   %(-2417, 2071)
p40_T105_n =    1.436e-05; %(-1.517e-06, 3.023e-05)
p31_T105_n =    -0.002739; %(-0.004075, -0.001402)
p22_T105_n =      0.1869; %(0.04315, 0.3307)
p13_T105_n =     -5.956; %(-28.8, 16.89)
p04_T105_n =     1511;   %(-5384, 8406)
p50_T105_n =   -7.409e-08; %(-1.641e-07, 1.594e-08)
p41_T105_n =    1.659e-05; %(7.512e-06, 2.568e-05)
p32_T105_n =   -0.0004304; %(-0.001529, 0.0006683)
p23_T105_n =     -0.2424; %(-0.3986, -0.08622)
p14_T105_n =      36.65;  %(8.806, 64.5)
p05_T105_n =    -3673;   %(-1.134e+04, 3999)
```

```
% Viscosidade
```

```
% Funcao de superficie T=2.10Kpa
```

```
p00_T210_n =      3.719;  %(2.62, 4.819)
p10_T210_n =     -0.2817; %(-0.4836, -0.07982)
p01_T210_n =      2.583;   %(-7.302, 12.47)
p20_T210_n =     0.01173; %(-0.001874, 0.02534)
p11_T210_n =     -1.078; %(-1.879, -0.2778)
p02_T210_n =     236.8;   %(105.8, 367.8)
p30_T210_n =    -0.000275; %(-0.0007031, 0.000153)
p21_T210_n =      0.05073; %(0.02031, 0.08114)
p12_T210_n =     -4.125; %(-7.462, -0.7881)
p03_T210_n =    -1217;   %(-2117, -317.3)
p40_T210_n =    3.367e-06; %(-2.999e-06, 9.732e-06)
p31_T210_n =   -0.0008485; %(-0.001384, -0.0003126)
p22_T210_n =      0.01175; %(-0.0459, 0.0694)
```

```

p13_T210_n =      12.89;   %(3.727, 22.05)
p04_T210_n =      2966;   %(201.2, 5731)
p50_T210_n =    -1.656e-08; %(-5.266e-08, 1.954e-08)
p41_T210_n =     4.573e-06; %(9.315e-07, 8.214e-06)
p32_T210_n =     0.0002469; %(-0.0001937, 0.0006874)
p23_T210_n =     -0.0573; %(-0.1199, 0.005333)
p14_T210_n =     -10.85;  %(-22.01, 0.3159)
p05_T210_n =     -2881;   %(-5957, 194.8)

```

```
% Viscosidade
```

```
% Funcao de superfície Polinomial de 3 grau T=3.15Kpa
```

```

p00_T315_n =      4.219;   %(3.329, 5.109)
p10_T315_n =     -0.4305;  %(-0.5939, -0.267)
p01_T315_n =      5.247;   %(-2.756, 13.25)
p20_T315_n =     0.02299;  %(0.01198, 0.034)
p11_T315_n =     -1.049;   %(-1.697, -0.4009)
p02_T315_n =     158.1;    %(52.08, 264.1)
p30_T315_n =    -0.0006397; %(-0.0009862, -0.0002932)
p21_T315_n =     0.0424;   %(0.01778, 0.06702)
p12_T315_n =     -2.595;   %(-5.296, 0.1061)
p03_T315_n =    -683.3;    %(-1412, 45.04)
p40_T315_n =     8.729e-06; %(3.577e-06, 1.388e-05)
p31_T315_n =    -0.000621; %(-0.001055, -0.0001872)
p22_T315_n =    -0.002027; %(-0.0487, 0.04464)
p13_T315_n =      7.92;    %(0.5038, 15.34)
p04_T315_n =     1394;     %(-844.4, 3632)
p50_T315_n =    -4.599e-08; %(-7.521e-08, -1.677e-08)
p41_T315_n =     2.878e-06; %(-6.997e-08, 5.826e-06)
p32_T315_n =     0.0002709; %(-8.579e-05, 0.0006275)
p23_T315_n =    -0.04564;  %(-0.09634, 0.005067)
p14_T315_n =     -3.751;   %(-12.79, 5.287)
p05_T315_n =    -1268;     %(-3759, 1222)

```

```
% Viscosidade
```

```
% Funcao de superfície Polinomial de 3 grau T=4.20Kpa
```

```

p00_T420_n =      4.177;   %(3.081, 5.273)
p10_T420_n =     -0.4852;  %(-0.6864, -0.2839)
p01_T420_n =      8.742;   %(-1.111, 18.6)
p20_T420_n =     0.02898;  %(0.01542, 0.04254)

```

```

p11_T420_n =      -1.67;   %(-2.468, -0.8715)
p02_T420_n =      199.1;   %(68.52, 329.6)
p30_T420_n =     -0.000879; %(-0.001306, -0.0004523)
p21_T420_n =       0.07076; %(0.04044, 0.1011)
p12_T420_n =      -2.947;  %(-6.273, 0.3786)
p03_T420_n =      -1084;   %(-1981, -187.5)
p40_T420_n =     1.285e-05; %(6.503e-06, 1.919e-05)
p31_T420_n =     -0.00124; %(-0.001774, -0.0007058)
p22_T420_n =       0.03695; %(-0.02051, 0.09441)
p13_T420_n =       5.726;  %(-3.406, 14.86)
p04_T420_n =      2957;    %(201.5, 5713)
p50_T420_n =     -7.17e-08; %(-1.077e-07, -3.572e-08)
p41_T420_n =     7.875e-06; %(4.245e-06, 1.15e-05)
p32_T420_n =    -0.0002925; %(-0.0007316, 0.0001466)
p23_T420_n =     0.0004438; %(-0.06198, 0.06287)
p14_T420_n =      -7.455;  %(-18.58, 3.674)
p05_T420_n =     -2975;    %(-6041, 90.51)

```

```
% Viscosidade
```

```
% Funcao de superficie Polinomial de 3 grau T=5.25Kpa
```

```

p00_T525_n =       3.01;   %(2.396, 3.623)
p10_T525_n =     -0.2678;  %(-0.3805, -0.1551)
p01_T525_n =       4.215;  %(-1.303, 9.733)
p20_T525_n =       0.01322; %(0.005624, 0.02081)
p11_T525_n =      -1.082;  %(-1.529, -0.635)
p02_T525_n =      196.9;   %(123.8, 270)
p30_T525_n =    -0.0003526; %(-0.0005915, -0.0001137)
p21_T525_n =       0.04063; %(0.02365, 0.05761)
p12_T525_n =      -1.346;  %(-3.208, 0.5167)
p03_T525_n =     -1239;    %(-1741, -736.3)
p40_T525_n =     4.711e-06; %(1.158e-06, 8.264e-06)
p31_T525_n =    -0.0006253; %(-0.0009244, -0.0003262)
p22_T525_n =       0.01145; %(-0.02073, 0.04363)
p13_T525_n =       1.494;  %(-3.619, 6.608)
p04_T525_n =      3764;    %(2220, 5307)
p50_T525_n =     -2.46e-08; %(-4.475e-08, -4.456e-09)
p41_T525_n =     3.451e-06; %(1.419e-06, 5.484e-06)
p32_T525_n =    -7.538e-05; %(-0.0003213, 0.0001705)
p23_T525_n =     0.006145; %(-0.02882, 0.04111)

```

```

p14_T525_n =          -1.329;   %(-7.561, 4.903)
p05_T525_n =          -4162;   %(-5879, -2445)

%f(x,y) = p00          + p10*x      + p01*y      + p20*x^2      +
          p11*x*y      + p02*y^2      + p30*x^3 + ...
%          p21*x^2*y + p12*x*y^2 + p03*y^3      + p40*x^4      +
          p31*x^3*y      + p22*x^2*y^2 + p13*x*y^3 + ...
%          p04*y^4      + p50*x^5      + p41*x^4*y + p32*x^3*y^2 +
          p23*x^2*y^3 + p14*x*y^4      + p05*y^5 ;
%x = frecuencia , y = campo

G_T105 = p00_T105_G      + p10_T105_G*f      + p01_T105_G*B
          + p20_T105_G*f^2      + p11_T105_G*f*B      +...
          p02_T105_G*B^2      + p30_T105_G*f^3      + p21_T105_G*f^2*B
          + p12_T105_G*f*B^2      + p03_T105_G*B^3      +...
          p40_T105_G*f^4      + p31_T105_G*f^3*B + p22_T105_G*f^2*B
          ^2 + p13_T105_G*f*B^3      + p04_T105_G*B^4      +...
          p50_T105_G*f^5      + p41_T105_G*f^4*B + p32_T105_G*f^3*B
          ^2 + p23_T105_G*f^2*B^3      + p14_T105_G*f*B^4 +...
          p05_T105_G*B^5;

G_T210 = p00_T210_G      + p10_T210_G*f      + p01_T210_G*B
          + p20_T210_G*f^2      + p11_T210_G*f*B      +...
          p02_T210_G*B^2      + p30_T210_G*f^3      + p21_T210_G*f^2*B
          + p12_T210_G*f*B^2      + p03_T210_G*B^3      +...
          p40_T210_G*f^4      + p31_T210_G*f^3*B + p22_T210_G*f^2*B
          ^2 + p13_T210_G*f*B^3      + p04_T210_G*B^4      +...
          p50_T210_G*f^5      + p41_T210_G*f^4*B + p32_T210_G*f^3*B
          ^2 + p23_T210_G*f^2*B^3      + p14_T210_G*f*B^4 +...
          p05_T210_G*B^5;

G_T315 = p00_T315_G      + p10_T315_G*f      + p01_T315_G*B
          + p20_T315_G*f^2      + p11_T315_G*f*B      +...
          p02_T315_G*B^2      + p30_T315_G*f^3      + p21_T315_G*f^2*B
          + p12_T315_G*f*B^2      + p03_T315_G*B^3      +...
          p40_T315_G*f^4      + p31_T315_G*f^3*B + p22_T315_G*f^2*B
          ^2 + p13_T315_G*f*B^3      + p04_T315_G*B^4      +...

```

$$\begin{aligned}
& p50_T315_G*f^5 + p41_T315_G*f^4*B + p32_T315_G*f^3*B \\
& \quad ^2 + p23_T315_G*f^2*B^3 + p14_T315_G*f*B^4 + \dots \\
& p05_T315_G*B^5;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
G_T420 = & p00_T420_G + p10_T420_G*f + p01_T420_G*B \\
& + p20_T420_G*f^2 + p11_T420_G*f*B + \dots \\
& p02_T420_G*B^2 + p30_T420_G*f^3 + p21_T420_G*f^2*B \\
& \quad + p12_T420_G*f*B^2 + p03_T420_G*B^3 + \dots \\
& p40_T420_G*f^4 + p31_T420_G*f^3*B + p22_T420_G*f^2*B \\
& \quad ^2 + p13_T420_G*f*B^3 + p04_T420_G*B^4 + \dots \\
& p50_T420_G*f^5 + p41_T420_G*f^4*B + p32_T420_G*f^3*B \\
& \quad ^2 + p23_T420_G*f^2*B^3 + p14_T420_G*f*B^4 + \dots \\
& p05_T420_G*B^5;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
G_T525 = & p00_T525_G + p10_T525_G*f + p01_T525_G*B \\
& + p20_T525_G*f^2 + p11_T525_G*f*B + \dots \\
& p02_T525_G*B^2 + p30_T525_G*f^3 + p21_T525_G*f^2*B \\
& \quad + p12_T525_G*f*B^2 + p03_T525_G*B^3 + \dots \\
& p40_T525_G*f^4 + p31_T525_G*f^3*B + p22_T525_G*f^2*B \\
& \quad ^2 + p13_T525_G*f*B^3 + p04_T525_G*B^4 + \dots \\
& p50_T525_G*f^5 + p41_T525_G*f^4*B + p32_T525_G*f^3*B \\
& \quad ^2 + p23_T525_G*f^2*B^3 + p14_T525_G*f*B^4 + \dots \\
& p05_T525_G*B^5;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
n_T105 = & p00_T105_n + p10_T105_n*f + p01_T105_n*B \\
& + p20_T105_n*f^2 + p11_T105_n*f*B + \dots \\
& p02_T105_n*B^2 + p30_T105_n*f^3 + p21_T105_n*f^2*B \\
& \quad + p12_T105_n*f*B^2 + p03_T105_n*B^3 + \dots \\
& p40_T105_n*f^4 + p31_T105_n*f^3*B + p22_T105_n*f^2*B \\
& \quad ^2 + p13_T105_n*f*B^3 + p04_T105_n*B^4 + \dots \\
& p50_T105_n*f^5 + p41_T105_n*f^4*B + p32_T105_n*f^3*B \\
& \quad ^2 + p23_T105_n*f^2*B^3 + p14_T105_n*f*B^4 + \dots \\
& p05_T105_n*B^5;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
n_T210 = & p00_T210_n + p10_T210_n*f + p01_T210_n*B \\
& + p20_T210_n*f^2 + p11_T210_n*f*B + \dots \\
& p02_T210_n*B^2 + p30_T210_n*f^3 + p21_T210_n*f^2*B \\
& \quad + p12_T210_n*f*B^2 + p03_T210_n*B^3 + \dots
\end{aligned}$$

```

p40_T210_n*f^4 + p31_T210_n*f^3*B + p22_T210_n*f^2*B
^2 + p13_T210_n*f*B^3 + p04_T210_n*B^4 + ...
p50_T210_n*f^5 + p41_T210_n*f^4*B + p32_T210_n*f^3*B
^2 + p23_T210_n*f^2*B^3 + p14_T210_n*f*B^4 + ...
p05_T210_n*B^5;

n_T315 = p00_T315_n + p10_T315_n*f + p01_T315_n*B
+ p20_T315_n*f^2 + p11_T315_n*f*B + ...
p02_T315_n*B^2 + p30_T315_n*f^3 + p21_T315_n*f^2*B
+ p12_T315_n*f*B^2 + p03_T315_n*B^3 + ...
p40_T315_n*f^4 + p31_T315_n*f^3*B + p22_T315_n*f^2*B
^2 + p13_T315_n*f*B^3 + p04_T315_n*B^4 + ...
p50_T315_n*f^5 + p41_T315_n*f^4*B + p32_T315_n*f^3*B
^2 + p23_T315_n*f^2*B^3 + p14_T315_n*f*B^4 + ...
p05_T315_n*B^5;

n_T420 = p00_T420_n + p10_T420_n*f + p01_T420_n*B
+ p20_T420_n*f^2 + p11_T420_n*f*B + ...
p02_T420_n*B^2 + p30_T420_n*f^3 + p21_T420_n*f^2*B
+ p12_T420_n*f*B^2 + p03_T420_n*B^3 + ...
p40_T420_n*f^4 + p31_T420_n*f^3*B + p22_T420_n*f^2*B
^2 + p13_T420_n*f*B^3 + p04_T420_n*B^4 + ...
p50_T420_n*f^5 + p41_T420_n*f^4*B + p32_T420_n*f^3*B
^2 + p23_T420_n*f^2*B^3 + p14_T420_n*f*B^4 + ...
p05_T420_n*B^5;

n_T525 = p00_T525_n + p10_T525_n*f + p01_T525_n*B
+ p20_T525_n*f^2 + p11_T525_n*f*B + ...
p02_T525_n*B^2 + p30_T525_n*f^3 + p21_T525_n*f^2*B
+ p12_T525_n*f*B^2 + p03_T525_n*B^3 + ...
p40_T525_n*f^4 + p31_T525_n*f^3*B + p22_T525_n*f^2*B
^2 + p13_T525_n*f*B^3 + p04_T525_n*B^4 + ...
p50_T525_n*f^5 + p41_T525_n*f^4*B + p32_T525_n*f^3*B
^2 + p23_T525_n*f^2*B^3 + p14_T525_n*f*B^4 + ...
p05_T525_n*B^5;

% interpolacao de superficies w = weight

```

```

w1 = (1/tensoes_aprox(1))*T - (tensoes_aprox(1)/
    tensoes_aprox(1)) ;
w2 = (1/tensoes_aprox(1))*T - (tensoes_aprox(2)/
    tensoes_aprox(1)) ;
w3 = (1/tensoes_aprox(1))*T - (tensoes_aprox(3)/
    tensoes_aprox(1)) ;
w4 = (1/tensoes_aprox(1))*T - (tensoes_aprox(4)/
    tensoes_aprox(1)) ;

% Funções de 5 grau simbolicas
Gx1_sym = ((1-w1)*G_T105 + w1*G_T210); % G*(f,B,Ti) ->
    1.05KPa <= T <= 2.10KPa
Gx2_sym = ((1-w2)*G_T210 + w2*G_T315); % G*(f,B,Ti) ->
    2.10KPa <= T <= 3.15KPa
Gx3_sym = ((1-w3)*G_T315 + w3*G_T420); % G*(f,B,Ti) ->
    3.15KPa <= T <= 4.20KPa
Gx4_sym = ((1-w4)*G_T420 + w4*G_T525); % G*(f,B,Ti) ->
    4.20KPa <= T <= 5.25KPa

nx1_sym = ((1-w1)*n_T105 + w1*n_T210); % G*(f,B,Ti) ->
    1.05KPa <= T <= 2.10KPa
nx2_sym = ((1-w2)*n_T210 + w2*n_T315); % G*(f,B,Ti) ->
    2.10KPa <= T <= 3.15KPa
nx3_sym = ((1-w3)*n_T315 + w3*n_T420); % G*(f,B,Ti) ->
    3.15KPa <= T <= 4.20KPa
nx4_sym = ((1-w4)*n_T420 + w4*n_T525); % G*(f,B,Ti) ->
    4.20KPa <= T <= 5.25KPa

T = tensao_alvo;          %substituindo tensao -> plot exige
    funcao com 2 variaveis

Gx1_plot = subs(Gx1_sym);
Gx2_plot = subs(Gx2_sym);
Gx3_plot = subs(Gx3_sym);
Gx4_plot = subs(Gx4_sym);

nx1_plot = subs(nx1_sym);
nx2_plot = subs(nx2_sym);

```

```

    nx3_plot = subs(nx3_sym);
    nx4_plot = subs(nx4_sym);

    f = frequencia_alvo ;    %substituindo Frequencia
    B = campo_alvo ;        %substituindo Campo

% Encontrando ponto desejado - condições
if (frequencia_alvo < frequencia_F07(1)) || (
    frequencia_alvo > frequencia_F07(end))

    fprintf('Frequência alvo fora do intervalo de análise \n')
    fprintf('Fmin = 10Hz      & Fmax = 60Hz \n')

    return

else if (campo_alvo < campos(1)) || (campo_alvo > campos(
    end))

    fprintf('Campo alvo fora do intervalo de análise \n')
    fprintf('Bmin = 0.00T    & Bmax = 0.35T \n')

    return

else if (tensao_alvo < tensoes_aprox(1)) || (tensao_alvo >
    tensoes_aprox(end))

    fprintf('Tensão alvo fora do intervalo de análise \n')
    fprintf('Tmin = 1.05KPa & Tmax = 5.25KPa \n')

    return

else if (tensao_alvo >= tensoes_aprox(1)) && (tensao_alvo
    <= tensoes_aprox(2))

    Gx_sym = Gx1_sym ;
    Gx_plot = Gx1_plot;
    GX = vpa(subs(Gx1_sym));

    nx_sym = nx1_sym ;

```

```

    nx_plot = nx1_plot;
    nX = vpa(subs(nx1_sym));

    fprintf('Frequência alvo = %g Hz\n',frequencia_alvo)
    fprintf('Campo        alvo = %g T\n',campo_alvo)
    fprintf('Tensao       alvo = %g KPa\n',tensao_alvo)
    fprintf('G*          alvo = %g MPa\n',GX)
    fprintf('n*          alvo = %g MPa\n',nX)

else if (tensao_alvo > tensoes_aprox(2)) && (tensao_alvo
    <= tensoes_aprox(3))

    Gx_sym = Gx2_sym ;
    Gx_plot = Gx2_plot;
    GX = vpa(subs(Gx2_sym));

    nx_sym = nx2_sym ;
    nx_plot = nx2_plot;
    nX = vpa(subs(nx2_sym));

    fprintf('Frequência alvo = %g Hz\n',frequencia_alvo)
    fprintf('Campo        alvo = %g T\n',campo_alvo)
    fprintf('Tensao       alvo = %g KPa\n',tensao_alvo)
    fprintf('G*          alvo = %g MPa\n',GX)
    fprintf('n*          alvo = %g MPa\n',nX)

else if (tensao_alvo > tensoes_aprox(3)) && (tensao_alvo <=
    tensoes_aprox(4))

    Gx_sym = Gx3_sym ;
    Gx_plot = Gx3_plot;
    GX = vpa(subs(Gx3_sym));

    nx_sym = nx3_sym ;
    nx_plot = nx3_plot;
    nX = vpa(subs(nx3_sym));

    fprintf('Frequência alvo = %g Hz\n',frequencia_alvo)
    fprintf('Campo        alvo = %g T\n',campo_alvo)

```

```

    fprintf('Tensao      alvo = %g KPa\n',tensao_alvo)
    fprintf('G*        alvo = %g MPa\n',GX)
    fprintf('n*        alvo = %g KPa.s\n',nX)

else if (tensao_alvo > tensoes_aprox(4)) && (tensao_alvo <=
    tensoes_aprox(5))

    Gx_sym = Gx4_sym ;
    Gx_plot = Gx4_plot;
    GX = vpa(subs(Gx4_sym));

    nx_sym = nx4_sym ;
    nx_plot = nx4_plot;
    nX = vpa(subs(nx4_sym));

    fprintf('Frequência alvo = %g Hz\n',frequencia_alvo)
    fprintf('Campo      alvo = %g T\n',campo_alvo)
    fprintf('Tensao      alvo = %g KPa\n',tensao_alvo)
    fprintf('G*        alvo = %g MPa\n',GX)
    fprintf('n*        alvo = %g KPa.s\n',nX)

end;end;end;end;end;end;end;end

% Visualizar Funcoes
Gx1 = vpa(simplify(Gx1_sym),5);
Gx2 = vpa(simplify(Gx2_sym),5);
Gx3 = vpa(simplify(Gx3_sym),5);
Gx4 = vpa(simplify(Gx4_sym),5);
nx1 = vpa(simplify(nx1_sym),5);
nx2 = vpa(simplify(nx2_sym),5);
nx3 = vpa(simplify(nx3_sym),5);
nx4 = vpa(simplify(nx4_sym),5);

%save('funcoes_G_n.mat','Gx1','Gx2','Gx3','Gx4','nx1','nx2','
    nx3','nx4')

%save('funcoes_G_n_tensao.mat','G_T105','G_T210','G_T315','
    G_T525','n_T105','n_T210','n_T315','n_T525')

```

Programa para análise do erro de interpolação de superfícies para G*:

simulacoes_funcao_B_Tfixo_F

* o erro de n* utiliza do mesmo algoritmo, substituindo G por n.

```
%% inicializacao
clc; clear all;
load('funcoes_G_n_tensao.mat')

%% ENTRADA DE PARAMETROS

campo_alvo = 0.14 ;      %[T]

frequencia_alvo = 30 ;   %[Hz]

tensao_alvo = 2.10 ;     %[KPa]

%%
w = 0.5; %fator de peso - média linear entre superfícies

Gx1 = ((1-w)*G_T105 + w*G_T315);
Gx2 = ((1-w)*G_T210 + w*G_T420);
Gx3 = ((1-w)*G_T315 + w*G_T525);

%Analise do erro da interpolacao de superficies

n = 4; % multiplicador da quantidade de pontos
      discretizados

%ATENCAO : n=1 já demora bastante para gerar os gráficos

frequencia_amostragem_erro = [frequencia_F07(1):(
    frequencia_F07(2)-frequencia_F07(1))/n:frequencia_F07
    (end)];
campo_amostragem_erro = [campos(1):(campos(2)-campos(1))
    /n:campos(end)];

G_erro_1 = (abs(G_T210- Gx1)/G_T210)*100;
G_erro_2 = (abs(G_T315- Gx2)/G_T315)*100;
G_erro_3 = (abs(G_T420- Gx3)/G_T420)*100;
```

```
for i=1:length(frequencia_amostragem_erro)
    for j =1:length(campo_amostragem_erro)

        f = frequencia_amostragem_erro(i) ;
        B = campo_amostragem_erro(j) ;
        G_erro_discreto_1(i,j) = vpa(subs(G_erro_1)) ;
        G_erro_discreto_2(i,j) = vpa(subs(G_erro_2)) ;
        G_erro_discreto_3(i,j) = vpa(subs(G_erro_3)) ;
    end
end

erro_interp_T105_T315 = mean(mean( G_erro_discreto_1)) ;
erro_interp_T210_T420 = mean(mean( G_erro_discreto_2)) ;
erro_interp_T315_T525 = mean(mean( G_erro_discreto_3)) ;
erro_interp_medio = mean([erro_interp_T105_T315
    erro_interp_T210_T420 erro_interp_T315_T525]);
```

ANEXO D – Algoritmo de simulação de controle

Programa para cálculo das FRF na forma vetorial e ponto a ponto:

simulacao_controle

```
%% SIMULACAO RESPOSTA SISTEMA 1GDL - CONTROLE SEMIATIVO
% Frequency Response Function %
%% Initialization
clc; clear all;
%% Loading G & n functions
load('funcoes_G_n.mat')

%% Time vector
Fs = 100;                                %Sampling Frequency
Ts = 1/Fs;                               %Sampling Period
Tt = 1;                                  %Total time period
t = 0:Ts:Tt;                             %Time vector, total time 60[sec
    ]
k = length(t);                           %Length of the signal

%% Geometry

A = 2*0.019*0.01755; %[m²]
e = 0.00305; %[m]

%% Random input generation

% % Amplitude - random
% Tmin = 1.05 ; %[KPa]
% Tmax = 5.25 ; %[KPa]
% Fmin = Tmin*A ; %[KN];
% Fmax = Tmax*A ; %[KN];
% F = (Fmax-Fmin).*rand(k,1) + Fmin;
% %F = ((Fmax-Fmin)/2).*ones(k,1);
%
```

```

% % Frequency - random
% fmax = 60; %[Hz]
% fmin = 10; %[Hz]
% omega_max = 2*pi*fmax;
% omega_min = 2*pi*fmin;
% omega = (omega_max-omega_min).*rand(k,1) + omega_min;
% %omega = ((omega_max-omega_min)/2).*ones(k,1);
%
% % Frequency Vector
% n_frequencias = 200;
% f_vector = linspace(fmin,fmax,n_frequencias);
%
% % Phase - random
% phi_max = 2*pi; %[Hz]
% phi_min = 0; %[Hz]
% phi = (phi_max-phi_min).*rand(k,1) + phi_min;
% %phi = ((phi_max-phi_min)/2).*ones(k,1);
%
% force_input = F.*sin(omega.*t'+phi) ;
%
% frequency_input = omega;
%
% frequency_input_hz = omega/(2*pi);
%
% tension_input = F/A;
%
% %%Salvar resultado do vetor de entrada
%
% save('random_input_1.mat','F','omega','n_frequencias','
    f_vector','phi','force_input','frequency_input','
    frequency_input_hz','tension_input')

%% Random input plot
%Plotting Input - Time Domain

%Load specific input
load('random_input_1.mat')

```

```
%%  
% Parameters  
m = 3;                                % Mass [kg]  
  
tension_interval = [1.05 2.10 3.15 4.20 5.25] ;  
  
syms Gx nx f T B  
  
lim=k;  
  
% Calculo da FRF  
for i=1:lim  
    if (tension_input(i) >= tension_interval(1)) && (  
        tension_input(i) <= tension_interval(2))  
  
        Gx = Gx1 ;  
        nx = nx1 ;  
  
    else if (tension_input(i) > tension_interval(2)) && (  
        tension_input(i) <= tension_interval(3))  
  
        Gx = Gx2 ;  
        nx = nx2 ;  
  
    else if (tension_input(i) > tension_interval(3)) && (  
        tension_input(i) <= tension_interval(4))  
  
        Gx = Gx3 ;  
        nx = nx3 ;  
  
    else if (tension_input(i) > tension_interval(4)) && (  
        tension_input(i) <= tension_interval(5))  
  
        Gx = Gx4 ;  
        nx = nx4 ;  
  
end;end;end;end  
  
T = tension_input(i);
```

```

f = frequency_input_hz(i);
B = 0;

G(i) = vpa(subs(Gx)); % [MPa]
n(i) = vpa(subs(nx)); % [KPa]

%Initial variables
K(i) = abs(G(i)*A/e)*1e6; % [N/m]
c(i) = abs(n(i)*A/e)*1e3; % [N s/m]

wn(i) = sqrt(K(i)./m);
cc(i) = 2*m*wn(i);
zeta(i) = c(i)./cc(i);
wd(i) = wn(i).*(1-zeta(i).^2).^(1/2);

fn(i) = (vpa(wn(i)/(2*pi)));
fd(i) = (vpa(wd(i)/(2*pi)));

%Hana(i,:) = (1/m)./(((wn(i).^2)-(f_vector*2*pi).^2)
    +(2*j*zeta(i)*wn(i)*(f_vector*2*pi)));

H_ana_output(i) = (1/m)./(((wn(i).^2)-frequency_input
    (i).^2)+(2*j*zeta(i)*wn(i)*frequency_input(i)));

H_ana_original_DB = vpa(20*log10(abs(H_ana_output)
    /(2*pi)));

H_ana_control_DB = vpa(20*log10(abs(H_ana_output)
    /(2*pi)));

%Plotar grafico da FRF em um ponto especifico

end

mag_half_power_mean = -112.21 ;
%%
% Controle dos pontos acima da meia potencia

```

```
clf

for i=1:lim

    if( abs(H_ana_original_DB(i)) >= 112 ) %SE magnitude
        for maior que magnitude de meia potencia

    else if (tension_input(i) >= tension_interval(1)) &&
        (tension_input(i) <= tension_interval(2))

        Gx = Gx1 ;
        nx = nx1 ;

    else if (tension_input(i) > tension_interval(2)) && (
        tension_input(i) <= tension_interval(3))

        Gx = Gx2 ;
        nx = nx2 ;

    else if (tension_input(i) > tension_interval(3)) && (
        tension_input(i) <= tension_interval(4))

        Gx = Gx3 ;
        nx = nx3 ;

    else if (tension_input(i) > tension_interval(4)) && (
        tension_input(i) <= tension_interval(5))

        Gx = Gx4 ;
        nx = nx4 ;

    end;end;end;end

    T = tension_input(i);
    f = frequency_input_hz(i);
    B = 0.35; % Campo com incremento - controle

    G_control(i) = vpa(subs(Gx)); % [MPa]
```

```

n_control(i) = vpa(subs(nx)); % [KPa]

%Initial variables
K_control(i) = abs(G_control(i)*A/e)*1e6; % [N/m]
c_control(i) = abs(n_control(i)*A/e)*1e3; % [N s/m]

wn_control(i) = sqrt(K_control(i)./m);
cc_control(i) = 2*m*wn_control(i);
zeta_control(i) = c_control(i)./cc_control(i);
wd_control(i) = wn_control(i).*(1-zeta_control(i).^2)
    .^(1/2);

fn_control(i) = (vpa(wn_control(i)/(2*pi)));
fd_control(i) = (vpa(wd_control(i)/(2*pi)));

H_ana_output_control(i) = (1/m)./(((wn_control(i).^2)
    -frequency_input(i).^2)+(2*j*zeta_control(i)*
    wn_control(i)*frequency_input(i)));

H_ana_control_DB(i) = vpa(20*log10(abs(
    H_ana_output_control(i))/(2*pi)));

end

end

```

Programa para cálculo magnitude de meia potência média:

mag_meia_pot

```

%%
load('random_input_1.mat')
%%
% Parameters
m = 3; % Mass [kg]

tension_interval = [1.05 2.10 3.15 4.20 5.25] ;

syms Gx nx f T B

```

```

lim=k;

% Calculo da FRF
for i=1:lim
    if (tension_input(i) >= tension_interval(1)) && (
        tension_input(i) <= tension_interval(2))

        Gx = Gx1 ;
        nx = nx1 ;

    else if (tension_input(i) > tension_interval(2)) && (
        tension_input(i) <= tension_interval(3))

        Gx = Gx2 ;
        nx = nx2 ;

    else if (tension_input(i) > tension_interval(3)) && (
        tension_input(i) <= tension_interval(4))

        Gx = Gx3 ;
        nx = nx3 ;

    else if (tension_input(i) > tension_interval(4)) && (
        tension_input(i) <= tension_interval(5))

        Gx = Gx4 ;
        nx = nx4 ;

end;end;end;end

T = tension_input(i);
f = frequency_input_hz(i);
B = 0.35;

G(i) = vpa(subs(Gx)); % [MPa]
n(i) = vpa(subs(nx)); % [KPa]

%Initial variables
K(i) = abs(G(i)*A/e)*1e6; % [N/m]

```

```

c(i) = abs(n(i)*A/e)*1e3; % [N s/m]

wn(i) = sqrt(K(i)./m);
cc(i) = 2*m*wn(i);
zeta(i) = c(i)./cc(i);
wd(i) = wn(i).*(1-zeta(i).^2).^(1/2);

fn(i) = (vpa(wn(i)/(2*pi)));
fd(i) = (vpa(wd(i)/(2*pi)));

Hana(i,:) = (1/m)./(((wn(i).^2)-(f_vector*2*pi).^2)
    +(2*j*zeta(i)*wn(i)*(f_vector*2*pi)));

H_ana_output(i) = (1/m)./(((wn(i).^2)-frequency_input
    (i).^2)+(2*j*zeta(i)*wn(i)*frequency_input(i)));

H_ana_original_DB = vpa(20*log10(abs(H_ana_output)
    /(2*pi)));

H_ana_control_DB = vpa(20*log10(abs(H_ana_output)/(2*
    pi)));

end

%%
figure(2)
for findex=68:68
    %findex=10;
    semilogx(f_vector,20*log10(abs(Hana(findex,:))/(2*pi)),'b','
        LineWidth',2); hold on

    index_f_vector_input(findex) = fix(interp1(f_vector,find(
        f_vector),frequency_input_hz(findex))); % Indice da
        frequencia de excitacao na FRF

    index_fd(findex) = fix(interp1(f_vector,find(f_vector),double
        (fd(findex)))); % Indice da frequencia natural na FRF

```

```

index_fd_half_power_1(findex) = fix(interp1(f_vector,find(
    f_vector),double(fd(findex)/sqrt(2)))); % Indice da meia
    potencia (esquerda)

% index_wd_half_power_2(findex) = fix(interp1(f_vector,find(
    f_vector),double(wd(findex)*sqrt(2)*0.9))); % Indice da
    meia potencia (direita aprox)

% Plot das FRF's especificas de cada ponto

semilogx(f_vector(index_fd(findex)),20*log10(abs(Hana(findex,
    index_fd(findex)))/(2*pi)),'g*','LineWidth',2 ); hold on

semilogx(f_vector(index_f_vector_input(findex)),20*log10(abs(
    Hana(findex,index_f_vector_input(findex)))/(2*pi)),'r*','
    LineWidth',2 ); hold on;

semilogx(f_vector(index_fd_half_power_1(findex)),20*log10(abs
    (Hana(findex,index_fd_half_power_1(findex)))/(2*pi)),'k*',
    'LineWidth',2 ); hold on;

%semilogx(f_vector(index_wd_half_power_2(findex)),20*log10(
    abs(Hana(findex,index_wd_half_power_2(findex)))/(2*pi)),'k
    *','LineWidth',2 ); hold on;

% Calculo Magnitude de meia potencia media

Hana_half_power(findex) = vpa(20*log10(abs(Hana(findex,
    index_fd_half_power_1(findex)))/(2*pi)));

ylabel('|H(i\omega)| [dB]')
xlabel('f [dB]')
% %%SALVANDO SINAIS PARA PLOT
% Xfd4 = f_vector(index_fd(findex)) ; Yfd4 = 20*
    log10(abs(Hana(findex,index_fd(findex)))/(2*pi));
% Xf4 = f_vector(index_f_vector_input(findex)) ; Yf4 = 20*
    log10(abs(Hana(findex,index_f_vector_input(findex)))/(2*pi))

```

```

;
% Xm4 = f_vector(index_fd_half_power_1(findex)); Ym4 = 20*
    log10(abs(Hana(findex,index_fd_half_power_1(findex)))/(2*pi)
    );
% X4 = f_vector                                ; Y4 = 20*log10
    (abs(Hana(findex,:)))/(2*pi));
%
% save('FRF_4.mat','X4','Y4','Xm4','Ym4','Xf4','Yf4','Xfd4','
    Yfd4')

end

% mag_half_power = mean(Hana_half_power)
%
%
% mag_half_power_1 = -112.9079;
%
% mag_half_power_2 = -112.2226;
%
% mag_half_power_3 = -112.4758;
%
% mag_half_power_4 = -112.0541;
%
% mag_half_power_5 = -111.9249;
%
% mag_half_power_loop = [mag_half_power_1,mag_half_power_2,
    mag_half_power_3,mag_half_power_4,mag_half_power_5];
%
% mag_half_power_mean = mean(mag_half_power_loop)

```