

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FAÇULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

AUGUSTO DE MORAES BATISTA

**Estudo da variação das propriedades mecânicas de Elastômeros
Magnetoreológicos Orientados submetidos a campos magnéticos com
variação de intensidade e direção**

**Ilha Solteira
2023**

AUGUSTO DE MORAES BATISTA

**Estudo da variação das propriedades mecânicas de Elastômeros
Magnetoreológicos Orientados submetidos a campos magnéticos com
variação de intensidade e direção**

Trabalho de dissertação de mestrado
apresentado à Faculdade de Engenharia de
Ilha Solteira – Unesp como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica

Nome do orientador
Prof. Dr. Amarildo Tabone Paschoalini

Ilha Solteira
2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

B333e Batista, Augusto de Moraes.
Estudo da variação das propriedades mecânicas de elastômeros magnetoreológicos orientados submetidos a campos magnéticos com variação de intensidade e direção / Augusto de Moraes Batista. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2022
67 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2022

Orientador: Amarildo Tabone Paschoalini
Inclui bibliografia

1. Elastômero magneto-reológico orientados. 2. Propriedades mecânicas. 3. Campo magnético. 4. Materiais inteligentes.


Raiane da Silva Santos

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Estudo da variação das propriedades mecânicas de Elastômeros Magnetos-Reológicos Orientados submetidos a campos magnéticos com variação de intensidade e direção

AUTOR: AUGUSTO DE MORAES BATISTA

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:



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



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



Prof. Dr. RENIVALDO JOSE DOS SANTOS (Participação Virtual)
UNESP / Câmpus de Rosana

Ilha Solteira, 25 de fevereiro de 2022

Dedico este trabalho a toda minha família, aos meus Pais que me permitiram escolher o caminho a trilhar, me apoiando em em todas as decisões e a minha esposa, que me ajudou a persistir mesmo nos momentos mais difíceis

Agradecimentos

Agradeço a Universidade Estadual Paulista, que proporcionou todo meu desenvolvimento acadêmico e permitiu o a realização deste trabalho, por meio de todo seu corpo docente e técnico/administrativo, em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP Ilha Solteira

Agradeço ao meu Orientador, o Prof. Dr. Amarildo Tabone Pashoalini, por todo conhecimento transmitido não só durante a excussão deste trabalho, mas também como como pessoa e profissional e ao LabsiN.

Agradeço ao Dr Daniel Obata, cujo auxilio técnico e intelectual na realização dos experimentos e análise de dados foi vital para a realização deste trabalho.

Agradeço aos companheiros de pesquisa, cujas pesquisas me precedem:

- O Dr. Jefferson Camargo Fukishima, que auxiliou diretamente na confecção do corpo de prova e eletroímã, além de toda contribuição com seus trabalhos que são a base da pesquisa do Laboratório
- A Ma. Fernanda Carolina de Almeida e o Me. Leonardo Pupin Machada, cujos trabalhos auxiliaram na resolução de diversos problemas encontrados ao longo do caminho.
- Ao mestrando Henrique Edno Leoncini de Carvalho, que participou ativamente dos processos experimentais e embasou com seu trabalho o modelamento matemático usado.

Por fim, agradeço os amigos mestrando Otávio Duarte Zotelli Boaventura e Alexandre Paniago de Oliveira que auxiliaram indiretamente neste trabalho.

Resumo

O controle de vibração é de suma importância para aumentar a vida útil de equipamentos mecânicos, e uma das formas para controlar a vibração é a aplicação de materiais inteligentes, que são capazes de alterar suas propriedades e responder de a estímulos. Elastômeros Magneto-Reológicos são materiais inteligentes, já explorados no exterior porém com pouca pesquisa no país, que podem ser empregados no controle de vibrações, pois possuem a capacidade de alterar suas propriedades mecânicas quando submetidos a campos magnéticos. Este trabalho tem como objetivo (i) contextualizar o uso de Elastômeros Magneto-Reológicos no controle de vibrações, bem como (ii) apresentar os estudos já desenvolvidos na área pelo LabSiN, da UNESP de ilha Solteira, e contribuir com o (iii) desenvolvimento de um dispositivo que seja capaz de imprimir campos magnéticos com variação de intensidade e sentido, ponde assim (iv) estudar a variação da propriedade de um MRE com matriz de Silicone e partículas magnéticas de Iron Carbonyl orientadas durante a sua cura.

Palavras-chave: Elastômero Magneto-Reológico Orientados, Propriedades Mecânicas, Campo magnético, Materiais Inteligentes

Abstract

Vibration control is fundamental to increase the lifespan of mechanical equipment, one way to control vibration is the application of intelligent materials, which are able to change their properties and respond to stimuli. Magneto-Rheological Elastomers are intelligent materials, already explored abroad but with little research in Brazil, which can be used to control vibrations, as they have the ability to change their mechanical properties when subjected to magnetic fields. This work aims to (i) contextualize the use of Magneto-Rheological Elastomers in the control of vibrations, as well as (ii) present the studies already developed in the area by LabSiN, from UNESP in Ilha Solteira, and contribute to the (iii) development of a device that is capable of ingraft magnetic fields with varying intensity and direction, thus (iv) studying the variation of the properties of an MRE with Silicone matrix and oriented Iron Carbonyl magnetic particles during its curing.

Keywords: Magneto-Rheological Elastomers. Magnet Fields. Mechanical Properties. Intelligent Materials.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Desenho esquemático de um eletroímã em formato C	19
Figura 2 – a) MRF sem a aplicação de campo magnético b) alinhamento das partículas magnéticas com a aplicação de campo magnético em um MRF	19
Figura 3 – a) Cura não orientada b) cura orientada	21
Figura 4 – Modos de operação do MRE: a) Modo de cisalhamento b) Modo de Tração/Compressão c) Modo de campo-ativo	23
Figura 5 – a) Dispositivo de cisalhamento b) Dispositivo longitudinal c) Dispositivo de compressão	24
Figura 6 – Aparato experimental e desenho esquemático de Li et al. (2013)	25
Figura 7 – Viga sanduíche desenvolvida por Ying e Ni (2009)	26
Figura 8 – Material idealmente Elástico - Ângulo de fase entre tensão e deformação	27
Figura 9 – Material idealmente Viscoso - Ângulo de fase entre tensão e deformação	27
Figura 10 – Representação complexa do Módulo de Cisalhamento	28
Figura 11 – Modelo proposto por (LI; ZHOU; TIAN, 2010)	29
Figura 12 – Modelo de MRE proposto por Eem, Jung e Koo (2012)	30
Figura 13 – Modelo de MRE proposto por Chen e Jerrams (2011)	30
Figura 14 – Três tipos de circuitos magnéticos	31
Figura 15 – Reômetro usado por Eloy (2018), à esquerda sem o aparato que aplica o campo magnético e à direita com o acoplamento dele ao reômetro	32
Figura 16 – Aparato de testes usados por Silva (2020)	33
Figura 17 – Aparato experimental desenvolvido por Fukushima (2016)	33
Figura 18 – a) Vigas colmeia preenchidas com MRE b) Ensaio de vibração livre c) Ensaio de vibração forçada	34
Figura 19 – Eletroímã tipo C como MRE preenchendo o entreferro	38
Figura 20 – Aparato experimental usado por Almeida (2020)	39
Figura 21 – Esquemático da Orientação de Cura	40
Figura 22 – Esquemático das dimensões do corpo de prova	41
Figura 23 – Aparato Experimento - Base	42
Figura 24 – Aparato Experimental - Completo	42
Figura 25 – Cisalhamento do MRE no corpo de prova	43
Figura 26 – Critério de aceite dos dados	45
Figura 27 – Base do aparato experimental	47
Figura 28 – Plataforma Giratória	48
Figura 29 – Rodízio para prato de Micro-ondas	48
Figura 30 – Suporte em L para o Eletroímã	49
Figura 31 – Eletroímã	49

Figura 32 – Aparato Montado	50
Figura 33 – Sensores do aparato experimental	51
Figura 34 – Suporte dos ímãs para orientação do corpo de prova	52
Figura 35 – Corpos de prova Orientado Submetido a campo de 0,4T com variação de ângulo	53
Figura 36 – Corpos de prova Orientado Submetido a campo de 0,4T com variação de ângulo	54
Figura 37 – Corpos de prova Orientado Submetido a campo de 0,4T com variação de ângulo - Comparativo entre frequências fixas e chirp	54
Figura 38 – Corpos de prova Orientado Submetido a campo de 0,4T com variação de ângulo - Módulo de Cisalhamento	55
Figura 39 – Corpos de prova Orientado Submetido a campo de 0,4T com variação de ângulo - Adaptação ao modelo Kevin-Voigth	56
Figura 40 – Corpos de prova Orientado Submetido a campo de 0,4T com variação de ângulo - Variação da Defasagem σ	56
Figura 41 – Corpos de prova Orientado e não Orientados sem presença de campo magnético	57
Figura 42 – Corpos de prova Orientado e não Orientados sob campo magnético de 0,4T	57
Figura 43 – Corpos de prova não Orientado com variação de campo magnético	58
Figura 44 – Corpos de prova Orientado com variação de campo magnético	58
Figura 45 – Dispositivo para ensaio de Compressão	60

Lista de abreviaturas e siglas

CCVP	Concentração Crítica do Volume de Partículas
MR	MagnetoRheological
<i>MRE</i>	<i>MagnetoRheological Elastomers</i>
<i>MRF</i>	<i>Magnetorheological Fluid</i>
PU	Poliuretano

Lista de símbolos

ω	Frequência de excitação
ω_n	Frequência natural
ω_d	Frequência natural amortecida
ω_r	Razão entre frequência de excitação e frequência natural
ξ	Razão de amortecimento
A	Área
c	Amortecimento
E	módulo de Young
F	Força de excitação
h	Espessura do elastômero
k	Rigidez
n	Número de camadas de MRE
r	$\frac{c}{2m\omega_n}$
X	Deslocamento
Y	Deslocamento da base

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivos	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Redução de Vibrações Mecânicas	14
2.2	Materiais inteligentes	15
2.3	Uso de Materiais Inteligentes para a redução de vibrações	17
2.4	Materiais Magneto-Reológicos (MRs)	18
2.5	Elastômero Magneto-Reológico: propriedades e aplicações	21
2.5.1	Módulo de Cisalhamento	26
2.6	Projeto de um dispositivo MRE	28
2.7	Ensaio dinâmico para a caracterização das propriedades mecânicas	32
2.8	Tópicos em aberto	34
3	ESTADO DA ARTE	36
3.1	Campos para pesquisa	36
3.1.1	Configurações dos dispositivos	36
3.1.2	Propriedades magnéticas do elastômero	36
3.1.3	Propriedades do Elastômero base	36
3.1.4	Modelagem	37
3.1.5	Caracterização	37
3.1.6	Controle	37
3.2	Pesquisa no LabSiN	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1	Corpos de prova	40
4.2	Aparato experimental	41
4.3	Procedimento experimental	43
4.3.1	Realização do Ensaio	43
4.3.2	Aquisição dos dados	44
4.3.3	Rotina Computacional	45
4.3.4	Análise dos dados	45
5	RESULTADOS	47
5.1	Montagem do experimento	47
5.2	Corpo de prova	51

5.2.1	Características	51
5.2.2	Processo de cura	51
5.3	Calibração do Eletroímã	52
5.4	Varição das propriedades com a direção e intensidade do campo	53
5.4.1	Rigidez	53
5.4.2	Módulo de cisalhamento e Regime de escoamento	55
5.5	Validação da Cura orientada	57
6	CONCLUSÃO	59
7	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	60
	REFERÊNCIAS	62

1 Introdução

Prologar a vida de equipamentos é um preceito básico da engenharia, e as vibrações mecânicas são muito prejudiciais para o bom rendimento e durabilidade destes.

Há séculos as diversas áreas da engenharia buscam formas de evitar ou minimizar o efeito das vibrações em equipamentos. Um recurso recentemente explorado para essa finalidade é o uso de Materiais Inteligentes, que podem mudar sua forma ou propriedades quando estimulados, podendo assim se adequar às excitações inferidas sobre sistemas mecânicos, a fim de combater seus efeitos.

Motivados a estudar formas inovadoras de se combater o efeito da vibração sobre sistemas mecânicos, o Laboratório de Simulações Numéricas (LabsiN), da UNESP de Ilha Solteira, desde 2016 vem estudando o uso de Materiais Inteligentes para esta finalidade, mas especificamente com o uso de Elastômeros Magneto-Reológicos.

Elastômeros Magneto-Reológicos (MRE) são materiais compostos por uma matriz polimérica, de borracha ou silicone, por exemplo, com presença de partículas magnéticas distribuídas em seu interior de maneira isotrópica ou anisotrópica. Essas partículas, quando em presença de campo magnético, sofrem mudanças em seu alinhamento, o que por sua vez provoca uma mudança nas propriedades mecânicas da matriz, podendo alterar parâmetros como rigidez e viscosidade.

Desde o início das pesquisas muito já foi compreendido sobre o MRE, como metodologia de fabricação, modelagem e projeto de dispositivos de ensaios. Este trabalho terá como objetivo agregar conhecimento à pesquisa por meio do estudo do comportamento de um MRE anisotrópico quando submetido à variação do campo magnético em direção e sentido, buscando criar caminhos para uma futura aplicação prática de um dispositivo de controle de vibrações ativa com ímãs rotativos.

Para atingir o objetivo deste trabalho, inicialmente serão apresentados os conceitos de vibrações mecânicas e qual a importância de minimizá-las ou até mesmo eliminá-las quando possível. Em sequência será apresentado brevemente o que são materiais inteligentes com enfoque no MRE (Elastômero Magneto Reológico).

Em sequência será apresentado um estado da arte sobre as pesquisas atuais envolvendo esse tipo de material, no qual será especialmente colocado como o LabSiN está inserido neste cenário.

Por fim, dando sequências aos estudos apresentados será realizado um experimento no qual um corpo de prova de MRE, com partículas magnéticas orientadas, será submetido a esforços senoidais, quando será analisado o comportamento do material em relação à

intensidade do campo magnético aplicado e ao ângulo de incidência do mesmo em relação à orientação das partículas, para diferentes frequências de excitação.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento de um Material Magneto-Reológico, com partículas magnéticas de Ironcarbonyl orientadas por campo magnético durante o processo de cura, quando submetidos a campos magnéticos com diferente intensidade e diversos ângulos de incidência em relação à orientação desta partículas, para excitações senoidais de variadas frequências.

Esta caracterização, assim como o aparato experimental desenvolvidos neste trabalho, objetiva servir como base para a construção de um dispositivo de controle que seja capaz de alterar a rigidez de um sistema por meio da rotação de um eletroímã ao redor de um sistema mola/amortecedor.

2 Revisão bibliográfica

A revisão a seguir busca abordar a literatura corrente acerca do funcionamento, aplicações e estado-da-arte da pesquisa relacionada a Elastômeros Magneto-Reológicos. Inicia-a com uma breve contextualização de sua aplicação para redução de vibrações, seguida da sua classificação dentre os materiais inteligentes e, por fim, um pouco sobre modelos e ensaios.

2.1 Redução de Vibrações Mecânicas

A redução de vibrações é, há mais de um século e até hoje, uma preocupação em diversas áreas da engenharia. Isso se deve em grande parte às graves consequências que advêm da ocorrência de vibração em excesso. Para máquinas em geral, um alto nível de vibrações causa desgaste rápido de algumas de suas partes como: rolamentos e engrenagens, além de afrouxar parafusos, porcas. (RAO, 2011) Elas podem apresentar um ruído excessivo, ameaçando a saúde ocupacional de pessoas próximas. Trabalhadores que operem máquinas com alta vibração por longos períodos de tempo podem sofrer dores musculares e nas articulações. (KATU; DESVALE; KANAI, 2003)

As estruturas dessas máquinas, bem como as estruturas que as suportam, precisam resistir à tensão cíclica que as vibrações induzem, eventualmente causando uma falha por fadiga do material. O mesmo ocorre em estruturas civis de grande porte como prédios e pontes. Para máquinas de usinagem, corte ou de manufatura em geral, a vibração pode provocar erros no processo de produção ou reduzir a qualidade do acabamento do produto. Painéis de medição e controle, bem como partes elétricas e eletrônicas, podem vir a falhar ou funcionar incorretamente quando estão embarcados em máquinas ou equipamento com vibração em excesso. (RAO, 2011)

As vibrações, em todos os tipos de estrutura, são causadas por forças dinâmicas. Essas, por sua vez, podem se originar de fenômenos naturais como ventos, ondas e abalos sísmicos que afetam estruturas civis ou desbalanceamento, desalinhamento e folga para máquinas rotativas. (KANDASAMYA et al., 2016)

A redução das vibrações pode ser realizada de três principais formas: (GERSTENBERGER, 1957)

1. Minimizando a fonte da vibração: balanceando um rotor, por exemplo;
2. Reduzindo a resposta da estrutura: adicionado a ela massa, rigidez ou amortecimento;

3. Isolando a estrutura da fonte de vibração: usando amortecedores, coxins e outros dispositivos.

Uma série de métodos para realizar essas intervenções em uma estrutura podem ser encontrados na literatura. Uma classificação mais generalizada os divide entre métodos passivos e ativos. Os passivos não dependem da adição de energia de uma fonte externa para agir na estrutura, enquanto os ativos dependem. Por esse motivo seu desenho, projeto e operação tendem a ser mais simples e menos custosos. (KUMAR, 2013)

Nas últimas duas décadas, avanços realizados na área de Ciência dos Materiais, permitiram o desenvolvimento de métodos de redução de vibração com o uso de Materiais Inteligentes. Alguns desses materiais podem ser usados em métodos passivos, mas também podem ter suas propriedades alteradas, como amortecimento e rigidez, de acordo com um estímulo externo, alterando o comportamento da estrutura para reduzir suas vibrações de forma. (RUDDY; AHEARNE; BYRNE, 2007)

A seção a seguir trata desse tipo de material, mostra exemplos e suas aplicações.

2.2 Materiais inteligentes

A definição mais comum de Materiais Inteligentes considera que eles são materiais avançados que podem reagir a estímulos do ambiente de forma a responder a eles de forma inteligente, para a qual foram projetados. (ELISHAKOFF, 2007)

Outras características próprias de materiais inteligentes são (QADER et al., 2019):

- Transitividade: podem responder a estímulos diversos em diferentes estados;
- Imediatez: a resposta ao estímulo é rápida;
- Autoatuação (inteligência): a atuação é dentro do material
- Seletividade: a resposta é distinguível e pode ser predita;
- Objetividade: atuação e reação são realizadas no mesmo local.

Os Materiais Inteligentes podem ser diferenciados entre Passivos ou Ativos. Considerando todas as aplicações possíveis, um exemplo de Material Inteligente Passivo seriam as fibras óticas, usadas para transferir ondas eletromagnéticas, sem que haja um gasto de energia significativo. Os Ativos podem ainda ser subdivididos em dois tipos. Os do primeiro tipo são os que mudam a natureza da energia que recebem como, por exemplo, as células fotovoltaicas que convertem energia luminosa do sol em energia elétrica (PARIDA; INIYAN; GOIC, 2011). Os do segundo tipo alteram alguma característica física quando

expostos a efeitos externos, como os cristais fotocromicos que têm sua cor alterada quando na presença de luz. (FERRARA; BENGISU, 2014)

Uma classificação mais geral de acordo com a resposta do material é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Tipos de materiais inteligentes

Material	Entrada/Estímulo	Saída/Resposta	Aplicação
Ligas de memória de forma	Temperatura ou tensão mecânica	Deformação	Molas, atuadores, implantes médicos
Piezoelétricos	Tensão mecânica	Potencial Elétrico	Sensores, atuadores e coletores de energia
Magneto-Eletoestritivos e Magneto-Eleto-reológicos	Campo magnético/elétrico	Deformação, alteração de rigidez ou viscosidade	Atuadores, revestimentos, absorvedores de vibração ou impacto
Crômicos	Luz, temperatura, diferença de potencial e outros	Mudança de cor, diferença de potencial	Vidros inteligentes, sensores

Fonte: Qader et al. (2019)

As Ligas de Memória de Forma (LMFs) são metais com pelo menos duas fases básicas, sendo que a transição entre as fases pode ser provocada por temperatura ou tensão. O material é capaz de memorizar a sua forma em um estado, ser deformado após a transição de fase e, ao retornar à fase inicial, recuperar sua forma não deformada. Além disso, as LMFs podem apresentar termoelasticidade, superelasticidade e aumento de amortecimento ao trocar de fase. de acordo com o estímulo externo. Algumas aplicações são: malhas metálicas para pneus, molas automotivas e para redução de vibrações em máquinas, atuação em eixos e máquinas rotativas. (DYE, 2015; CONCILIO; ANTONUCCI; SACCO, 2021)

Os irmãos Curie, por volta de 1880, foram os primeiros a descobrir que certos materiais, ao serem deformados através de uma força mecânica, geravam uma diferença de potencial. Sendo que o contrário também ocorria, ao ser aplicada uma voltagem, o material respondia se deformando. Desde então, os materiais piezoelétricos vêm sendo aplicados como sensores de deformação para estruturas e para ensaios experimentais, coleta de energia (*energy harvesting*) e atuadores para causar vibração. Os materiais piezoelétricos podem ser tanto inorgânicos com óxido de zinco (ZnO) ou nitreto de alumínio (AlN) ou orgânicos como a hidroxiapatita. (YANG, 2004)

Os materiais crômicos formam uma ampla família de materiais inteligentes que mudam de cor de acordo com algum estímulo externo, como: luz, temperatura, campo elétrico ou magnético, contato com líquido ou solvente, bombardeamento de elétrons e outros. Eles são usados para mudança de a transparência ou cor em *displays* e painéis,

roupas inteligentes e sensores de diversas aplicações devido à grande variedade de estímulos a que reagem. (QADER et al., 2019)

Os materiais Magneto ou Eletro-restritivos contraem ou se expandem de acordo com um campo magnético ou elétrico, respectivamente. Eles são podem aplicados para atuadores macios (*soft actuators*) usados em robôs de cirurgia, por exemplo (QADER et al., 2019). Por último, os magnetoreológicos são tratados nas seções seguintes, e suas propriedades, princípio de atuação e aplicações são citados também.

2.3 Uso de Materiais Inteligentes para a redução de vibrações

Quando se trata de redução de vibrações, os materiais inteligentes se apresentam como uma boa alternativa para monitoramento e controle da saúde de estruturas onde massa e espaço são limitados. Essas propriedades propiciam uma forma discreta, integrada e distribuída de adicionar à uma estrutura propriedades de sensores e atuadores. (ELISHAKOFF, 2007)

Três tipos de Materiais Inteligentes usados para redução de vibrações são:

- Piezoelétricos;
- Ligas de memória de forma e;
- Magneto-reológicos.

Os materiais piezoelétricos podem ser usados passivamente como uma forma de adicionar dissipação de energia a uma estrutura em movimento ao transformar sua deformação em eletricidade. (HEYWANG; LUBITZ; WERSING, 2008) Porém, ao ser aplicada uma diferença de potencial elétrico, sua alteração de tamanho pode atuar para a redução de vibração de forma ativa. (SUI; SHI, 2012) As ligas de memória podem ser aplicadas em redução de vibrações para fabricação de molas que são aplicadas até mesmo em estruturas civis. (GUR; FRANTZISKONIS, 2016; DYE, 2015).

Materiais piezoelétricos respondem relativamente rápido, porém sua deformação é muito baixa (menor que 1%), enquanto materiais com memória de forma tem deformações de até 8%, mas são muito lentos na resposta. (ELISHAKOFF, 2007)

Assim, se destacam os Materiais Inteligentes Magneto-reológicos para o controle de vibrações. Eles são ativos e do segundo tipo, já que podem ter sua viscoelasticidade e propriedades reológicas alteradas na presença de um campo magnético, sendo essa resposta dada na ordem de milissegundos. (JORGE et al., 2005) Apesar de poderem ser usados para redução de vibrações de forma passiva, se mostram mais efetivos se forem aplicados de maneira semiativa ou ativa. (TAKEWAKI, 2007)

Eles são versáteis ao ponto de poderem ser sintetizados como fluido, gel ou até sólido como um elastômero, permitindo uma grande variedade de aplicações como absorvedores de impacto, freios, amortecedores, embreagens, isoladores vibroacústicos e estruturas adaptativas. (LI et al., 2014)

A próxima seção discorre sobre os materiais magneto-reológicos, suas propriedades e substâncias que são usadas para fabricá-los.

2.4 Materiais Magneto-Reológicos (MRs)

Em 1948, Jacob Rabinow publicou um dos primeiro artigos sobre o efeito Magneto-reológico (MR). (RABINOW, 1948) Mas, apenas em meados da década de 1980 é que se intensificaram as pesquisas com esse tipo de material. Desde então, aplicações e os mais diversos dispositivos foram comercializados com sucesso. (RUDDY; AHEARNE; BYRNE, 2007)

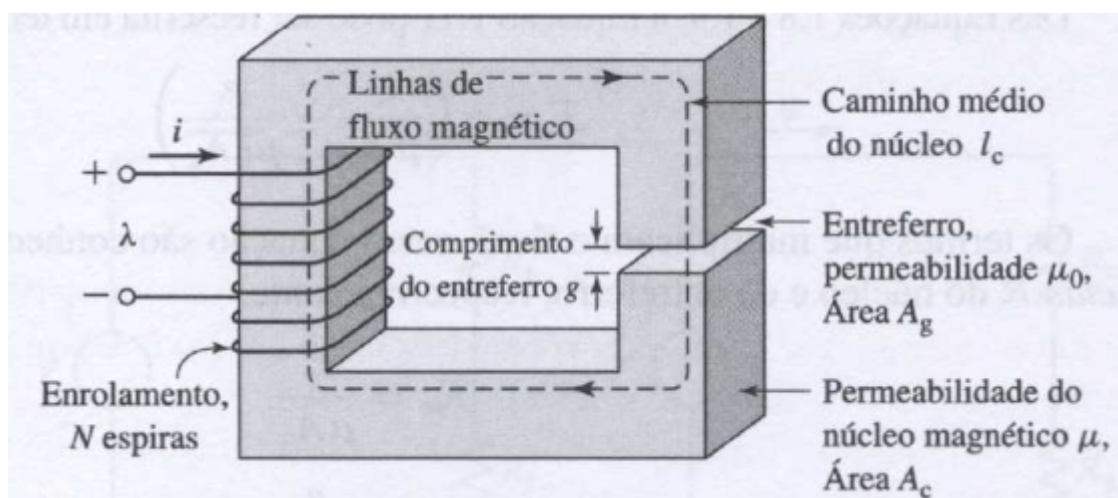
Materiais magneto-reológicos possuem partículas coloidais magnetizáveis suspensas em um material base eletricamente isolante. Se esse material for um fluido viscoso, por exemplo, óleo de silicone, temos um Fluido Magneto-reológico ou *Magnetorheological Fluid (MRF)*. Caso seja usada uma matriz elástica ao invés de um fluido, como borracha de silicone, temos um o Elastômero Magneto-Reológico ou *Magnetorheological Elastomers, MRE*. (RUDDY; AHEARNE; BYRNE, 2007)

Qualquer que seja a aplicação, o mais comum é se usarem bobinas ou solenoides para gerar o campo magnético aplicado ao material MR, controlando sua intensidade através da corrente elétrica fornecida. Idealmente, o fluxo magnético aplicado é perpendicular ao movimento do material. Um dos *designs* mais eficientes é em formato C, pois ele cria um caminho fechado pelo qual o fluxo magnético tem o mínimo de perdas. Exemplos de aplicação podem ser encontrados em Liao et al. (2012), Li, Z. e Du (2013), Lerner e Cunefare (2008)

Ao usar o formato C, deve-se manter o espaço entre os dois polos do circuito magnético o menor possível, para que se reduzam as perdas de energia no ar e se mantenha um campo forte. Este espaço também pode ser referido como comprimento do entre-ferro ou *gap*, mostrado na Figura 1 (LEAO, 2011). Contudo, quanto maior o *gap* o volume de material que pode ser efetivamente energizado é limitado, além disso precisa-se reservar espaço para a bobina. Por esses motivos, o projeto de dispositivos que apliquem materiais MRs é um tópico de pesquisa aberto e bastante desafiador. (LI et al., 2014)

Nos MRFs, parte-se do princípio que as partículas estão aleatoriamente distribuídas no material base quando não há campo magnético próximo. No momento da aplicação de um campo magnético com intensidade suficiente, as partículas em suspensão se alinham e

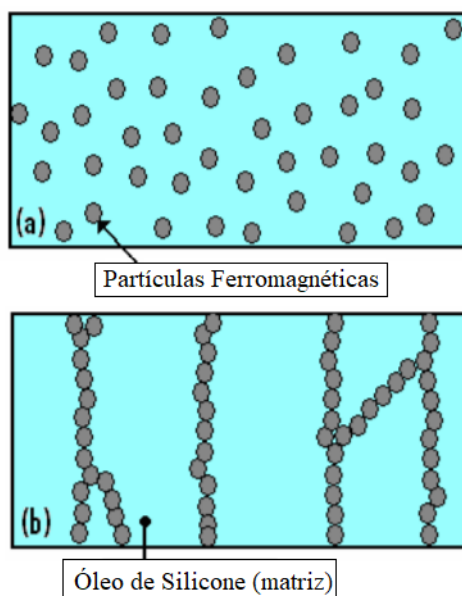
Figura 1 – Desenho esquemático de um eletroímã em formato C



Fonte: Leao (2011)

formam cadeias, como mostrado na Figura 2. Essas cadeias têm uma resistência contra tensão cisalhante, o que aumenta a viscosidade aparente do fluido e, por isso, ocorre aumento do amortecimento. (YALCINTAS; DAI, 1999)

Figura 2 – a) MRF sem a aplicação de campo magnético b) alinhamento das partículas magnéticas com a aplicação de campo magnético em um MRF



Fonte: modificado de Jolly, Carlson e Munoz (1996)

Porém, as partículas em suspensão no fluido podem decantar e sofrer desgaste, reduzindo o a performance do fluido e causando possível falha do dispositivo que o emprega (RUDDY; AHEARNE; BYRNE, 2007). Vazamentos do fluido e das partículas também podem ser uma preocupação ambiental (POPP et al., 2010). Goncalves, Koo e Ahmadian (2006) aponta ainda outros problemas relacionados à estabilidade do fluido e a tensão máxima que ele suporta.

Por outro lado, o MRE pode alterar a distribuição do campo magnético aplicado a ele quando se deforma, tornando sua modelagem um pouco mais complexa quando esse efeito é significativo. (LI; LI, 2014)

Ainda assim o MRE apresenta-se como uma alternativa ao MRF, mesmo não sendo capaz de substituir o fluido em todas as aplicações. Sua matriz sólida faz com que as partículas magnéticas não se movam muito de lugar, evitando deposição das mesmas, mas limitando sua interação (LI et al., 2014). Elastômeros como borrachas e silicone podem ser usados pois são macios e deformáveis de 5 a até 700% em temperatura ambiente, e isso pode ser controlado de acordo com a necessidade da aplicação, oferecendo um meio mais efetivo para controle semiativo de vibrações quando comparando com dispositivos de MRF (LI et al., 2013). Com a aplicação de um campo magnético, o aumento do módulo de rigidez cisalhante pode ir de 10 a 400% (CANTERA et al., 2017).

Quanto às partículas magnéticas, seu tamanho pode variar de algumas unidades para centenas de micrômetros (LOKANDER; STENBERG, 2003; STEPANOV et al., 2007). São comumente usadas ligas de ferro, cobalto ou níquel (LANOTTE et al., 2003). O mais importante é haver três principais características: alta permeabilidade magnética, baixa magnetização residual e alta saturação magnética. (MUNOZ; JOLLY, 2001)

De forma breve, a permeabilidade magnética de um material é definida como o quanto de magnetização um material obtém quando um dado campo magnético é aplicado a ele. Por consequência, a saturação magnética de uma material ocorre quando, mesmo aumentando a intensidade do campo aplicado, sua magnetização não aumenta mais. Um material com alta saturação precisa de um campo mais intenso para atingir sua saturação, permitindo o aumento de sua magnetização ao longo de uma grande faixa de intensidade do campo magnético. Alguns materiais, mesmo após a remoção do campo magnético, continuam magnetizados, fenômeno conhecido como magnetização residual, ou, ainda, remanência ou permanência magnética. (FARIA; LIMA, 2014)

Com alta permeabilidade, as partículas atraem facilmente pequenos campos magnéticos de fuga no material composto e, assim, induzem um efeito magneto-reológico mais eficiente. Uma baixa magnetização residual permite o retorno ao estado original do material sem que haja alteração das propriedades do elastômero ou do fluido sem a presença do campo magnético. (LOKANDER; STENBERG, 2003)

Para melhorar a distribuição das partículas, buscando a maior uniformidade possível, em geral é aplicado um tratamento especial para remoção da umidade da superfície das partículas. (STEPANOV et al., 2007) Outro tratamento possível, desenvolvido por Zhang, Li e Gong (2008), é a aplicação de um gel polimérico para aumentar a aderência à matriz e evitar sua oxidação.

2.5 Elastômero Magneto-Reológico: propriedades e aplicações

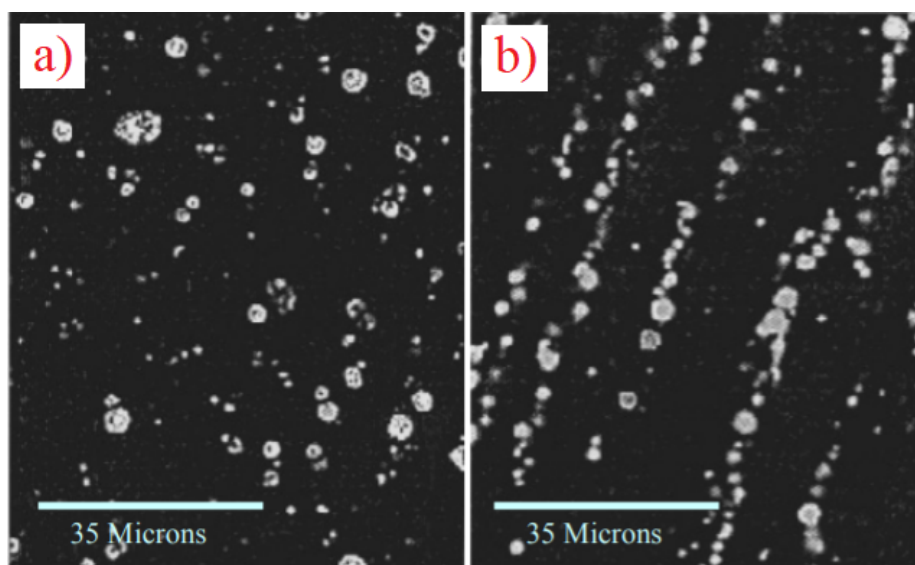
A fabricação do MRE se inicia com a combinação da matriz em estado líquido ou pastoso com as partículas magnéticas e aditivos, se presentes, até a obtenção de uma mistura uniforme. Bolhas de ar precisam ser removidos da mistura através de um tratamento térmico (LIAO et al., 2012) ou por meio de vácuo para melhorar a uniformidade e permeabilidade do material (KALLIO, 2005). Em seguida ou durante do processo de remoção de bolhas, é necessário solidificar a mistura através de um processo chamado de cura ou vulcanização da matriz, que pode ser feito com o uso de catalisadores ou termicamente, dependendo do material usado.

Outros materiais comumente usados como matriz podem ser borrachas naturais, silicone, borrachas termoplásticas, outras borrachas sintéticas (CHEN et al., 2007) e até mesmo Poliuretano (PU) (SHEN; GOLNARAGHI; HEPPLER, 2004).

Os MREs podem ser categorizados em dois grupos: isotrópicos e anisotrópicos ou orientados. Quando a cura ocorre sem a presença de um campo magnético, ele é denominado isotrópico. Mas, se um campo magnético, maior que 0,8 T, for aplicado à mistura ao longo de seu processo de cura, as partículas magnéticas tendem a formar cadeias, assim com no MRF, modificando as propriedades do material de acordo com a direção da força ou do campo aplicado, categorizando-o como anisotrópico. (LI; Z.; DU, 2013)

A Figura 3, mostra duas micrografias eletrônicas de varredura da superfície de MREs, no item a) não foi realizada a cura orientada, logo as partículas estão dispersas aleatoriamente. Enquanto no item b), a seta indica a orientação do campo aplicado durante a cura e é possível notar uma preferência das partículas em se alinhar nessa direção.

Figura 3 – a) Cura não orientada b) cura orientada



Fonte: Jolly, Carlson e Munoz (1996)

Apesar de alguns estudos indicarem uma mudança no amortecimento do MRE com a aplicação do campo magnético (JOLLY; CARLSON; MUNOZ, 1996; LOKANDER; STENBERG, 2003; LI et al., 2013), ele advém principalmente do atrito causado pelo deslizamento das partículas magnéticas com a matriz (FAN et al., 2011). A mudança mais significativa ocorre na rigidez do MRE (KALLIO, 2005) Assim, é comum avaliar o efeito MR através da razão entre o aumento da intensidade do campo magnético aplicado e a rigidez do elastômero, quando comparado com seu estado natural. (LI et al., 2014)

Por outro lado, algumas aplicações usam a redução da rigidez como uma forma de controle das vibrações. Isso é feito através da combinação de ímãs permanentes e eletroímãs, assim, a maior parte do tempo o MRE está sob o efeito do campo do ímã permanente e em certos momentos, aplica-se com campo com sentido inverso através do eletroímã, fazendo a redução da rigidez do dispositivo. Kim et al. (2011) usaram essa ideia para projetar um absorvedor de vibração sintonizável. Outros exemplos são, Sinko et al. (2013) e Opie e Yim (2011) que, respectivamente desenvolveram um absorvedor e um isolador de vibrações.

A proporção de material da matriz e volume de partículas magnéticas tem um impacto fundamental no efeito MR. Segundo Kaleta, Krolewicz e Lewandowski (2011), o modo mais comum de se obter o quantidade máxima é calculando a Concentração Crítica do Volume de Partículas (CCVP). Mas, de acordo com Lokander (2004), o maior efeito MR ocorre com um percentual de partículas ligeiramente menor que o CCVP. Para exemplificar, para ferro ASC 300, o CCVP é de 36,5%. Contudo essa metodologia só é válida para MREs isotrópicos. Para os anisotrópicos, é necessário se fazerem investigações experimentais. (KALETA; KROLEWICZ; LEWANDOWSKI, 2011)

Outros componentes para melhorar as propriedades do MRE podem ser utilizadas como, por exemplo, a adição de plastificadores (LOKANDER, 2004; WANG et al., 2006). Tian, Li e Deng (2011) adicionaram pó de grafite ao MRE, o que resultou em melhores propriedades mecânicas iniciais, mas reduziu o aumento da rigidez provocada pela aplicação do campo magnético. A Policaprolactona é um aditivo que tem sido usado para controlar as propriedades de amortecimento do MRE. (GONG et al., 2012)

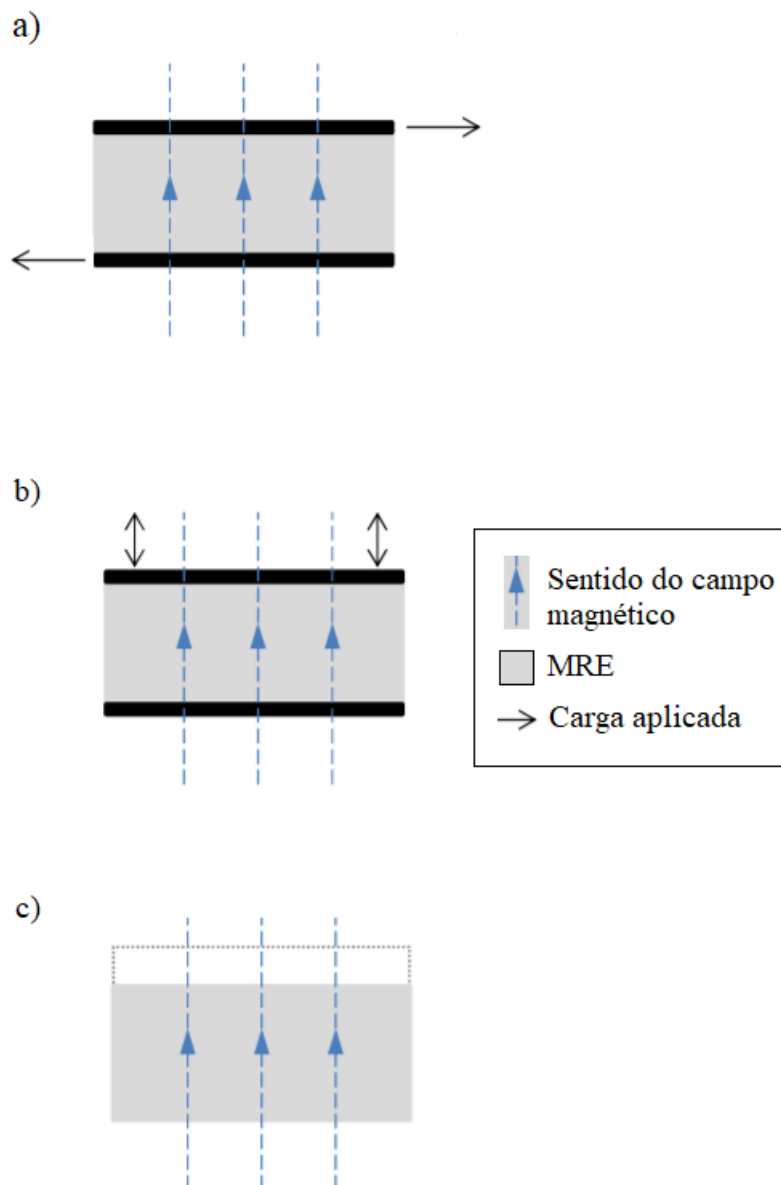
As aplicações de MREs exploram três modos básicos de funcionamento do material:

- cisalhamento;
- tração/compressão; e
- campo-ativo.

Uma ilustração de cada um desses modos, é mostrada na Figura 4. Nos dois primeiros modos usa-se o MRE para suportar cargas de cisalhamento ou tração/compressão,

aplicando o campo magnético quando conveniente ou de acordo com alguma lei de controle, usufruindo-se da variação do módulo de cisalhamento ou de Young, respectivamente. No modo campo-ativo, explora-se a capacidade do MRE de ter seu tamanho modificado, seja esticando ou contraindo-o, através da aplicação do campo magnético. Sendo as aplicações possíveis, a aplicação do MRE como um tipo de sensor. (GINDER et al., 2000; WANG; MENG, 2001)

Figura 4 – Modos de operação do MRE: a) Modo de cisalhamento b) Modo de Tração/Compressão c) Modo de campo-ativo



Fonte: modificado de Li et al. (2014)

Exemplos de aplicações de MRE são citados a seguir.

- Absorvedores de vibração (DENG; GONG, 2007; LERNER; CUNEFARE, 2008; KIM et al., 2011);

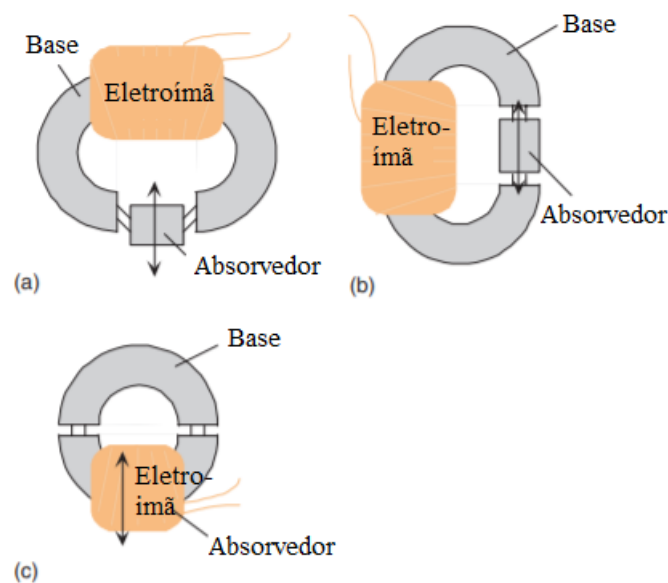
- Isolamentos (LIAO et al., 2012; OPIE; YIM, 2011);
- Isoladores de base adaptativos (LI et al., 2013; BEHROOZ; WANG; GORDANINE-JAD, 2014);
- Coxins (KAVLICOGLU et al., 2011);
- Vigas sanduíche (YING; NI, 2009; ZHOU; WANG, 2006).

Cada artigo citado acima é descrito em mais detalhes a seguir.

Deng e Gong (2007) desenvolveram um absorvedor de vibrações usando MRE para aumentar a faixa de vibração na qual o aparelho seria efetivo. Com a alteração da rigidez provocada pela alteração do campo magnético aplicado, o dispositivo pode ser adaptado à frequência de ressonância da estrutura, reduzindo as vibrações mesmo que ela se altere. Os autores testaram o dispositivo em uma barra apoiada. Outro trabalho utilizou a mesma ideia para reduzir as vibrações de um refrigerador criogênico em miniatura usado para sensores óticos de satélites, mas alterando o campo magnético através de um controlador em tempo real (KIM et al., 2011).

Já Lerner e Cunefare (2008), fabricaram um MRE com gel de silicone e micropartículas de ferro testando três configurações experimentais diferentes de um absorvedor de vibração. Cada uma das configurações pode ser vista na Figura 5. O MRE mais efetivo foi preparado com 35% em volume, alterando em 5 vezes a frequência natural.

Figura 5 – a) Dispositivo de cisalhamento b) Dispositivo longitudinal c) Dispositivo de compressão

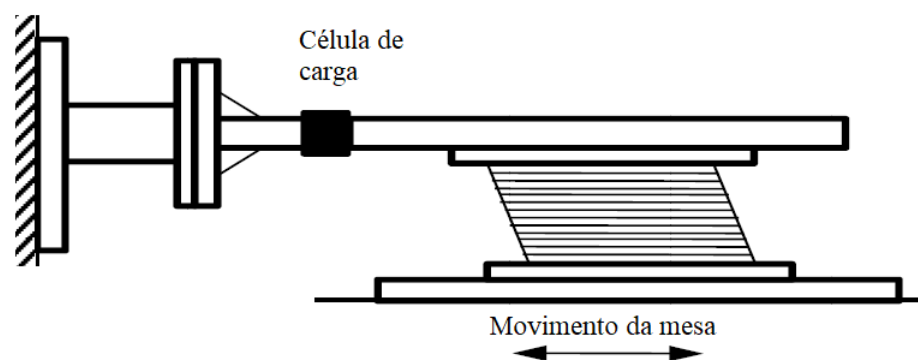


Fonte: modificado de Lerner e Cunefare (2008)

Adicionando em uma malha de controle fechada tipo On-off a informação da velocidade, [Liao et al. \(2012\)](#) foi capaz de reduzir em 61,6% a transmissibilidade de um sistema, usando um isolador de vibrações MRE. [Opie e Yim \(2011\)](#), pensando em uma possível falta de energia para um isolador ativo de MRE, desenvolveram um dispositivo semiativo considerando essa situação de falha. Testes foram realizados em um aparato com uma grau de liberdade excitado por *shaker* pela base.

Em relação a isoladores de base adaptativos, ([LI et al., 2013](#)) criaram um isolador para edifícios se protegerem contra abalos sísmicos de epicentro próximos e distantes. O foco do trabalho foi produzir um elastômero que tivesse uma rigidez muito sensível ao campo magnético, permitindo uma grande faixa de ajuste da rigidez. O resultado foi um aumento máximo de 1630% na rigidez lateral, usando o aparato mostrado na Figura 6

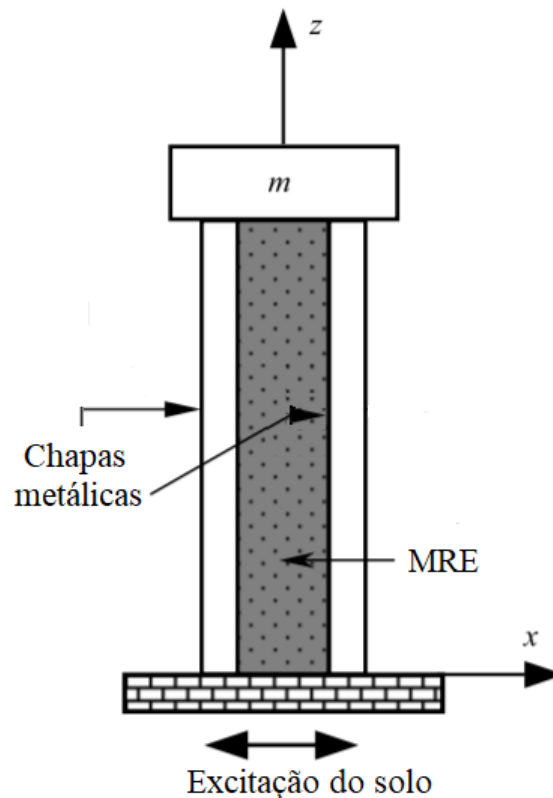
Figura 6 – Aparato experimental e desenho esquemático de [Li et al. \(2013\)](#)



Fonte: [Li et al. \(2013\)](#)

[Kavlicoglu et al. \(2011\)](#) desenvolveram coxins altamente adaptativos de MRE e os testaram sob diversas condições de carga separadamente: compressão/tração, cisalhamento, vibração e impacto. Diferente dos trabalhos citados acima, [Ying e Ni \(2009\)](#) excitaram com um sinal aleatório uma viga sauíche preenchida com MRE. Eles desenvolveram um modelo para o movimento da viga, Figura 7, usando equações diferenciais parciais de sexta ordem e realizaram simulações numéricas, mostrando que, com a aplicação do campo magnético, as vibrações são bem reduzidas, especialmente nas frequências próximas às ressonâncias do sistema.

Figura 7 – Viga sanduíche desenvolvida por Ying e Ni (2009)



Fonte: modificado de Ying e Ni (2009)

De maneira similar, Zhou e Wang (2006) construíram uma viga sanduíche onde apenas o centro continha MRE, sendo as pontas preenchidas com elastômero base, sem partículas magnéticas. O modelo deles considerou a variação no comprimento da viga que continha MRE, simulações numéricas foram feitas e os seus resultados mostram a variação do amortecimento e do módulo de rigidez de acordo com o campo e a porcentagem de MRE.

2.5.1 Módulo de Cisalhamento

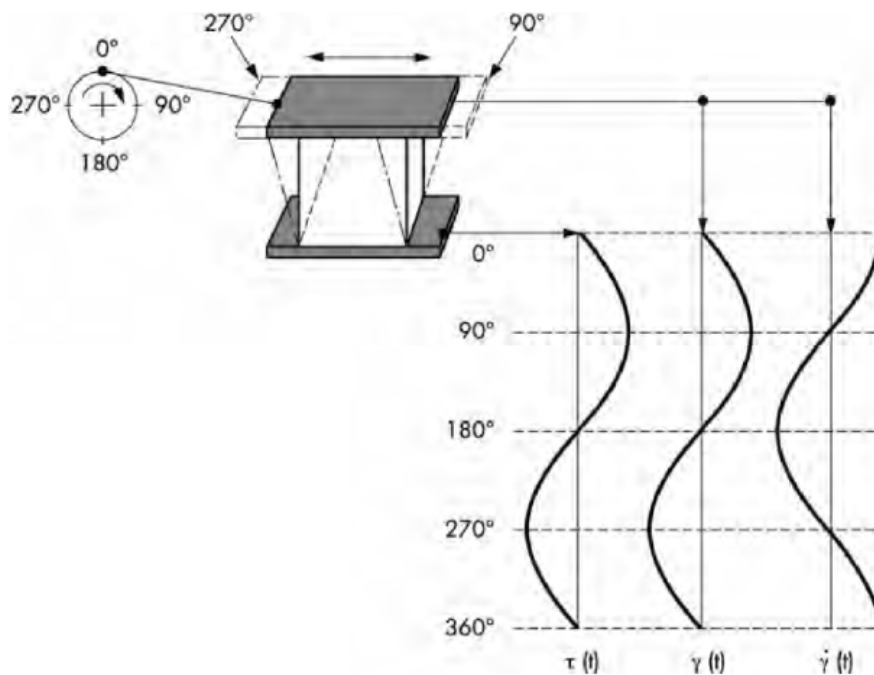
De acordo com a “Lei de Hooke” temos:

$$\tau(t) = G^* \cdot \gamma(t) \quad (2.1)$$

Com G^* sendo o módulo de cisalhamento complexo.

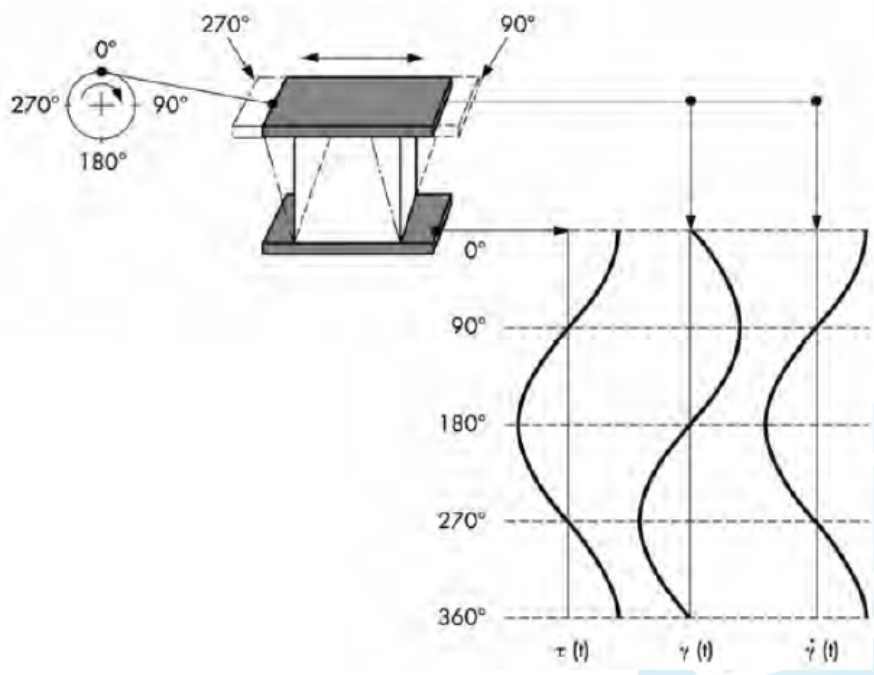
Em materiais idealmente elásticos temos $\tau(t)$ e $\gamma(t)$ em fase, de modo que o não há ângulo de fase entre eles, como observado na figura 8. Por outro lado, materiais idealmente viscosos, o ângulo de fase entre $\tau(t)$ e $\gamma(t)$ é de 90° , como observado na figura 9.

Figura 8 – Material idealmente Elástico - Ângulo de fase entre tensão e deformação



Fonte:Mezger (2014)

Figura 9 – Material idealmente Viscoso - Ângulo de fase entre tensão e deformação

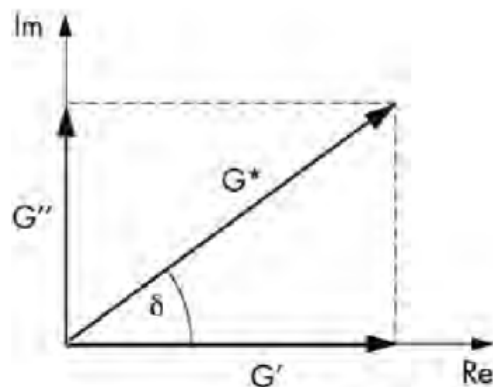


Fonte:Mezger (2014)

Materiais como o MRE, apresentam comportamento viscoelástico, ou seja, possuem ângulo de fase entre $\tau(t)$ e $\gamma(t)$ entre 0 e 90° , ângulo esse que será representado por (δ) .

Desta forma, para materiais viscoelásticos, o módulo de cisalhamento complexo, G^* , será representado por duas componentes, uma real, denominada módulo de armazenagem, (G') e outra imaginária, dito como perdas (G''). Conforme Arranjo apresentado na figura 10.

Figura 10 – Representação complexa do Módulo de Cisalhamento



Fonte: Mezger (2014)

2.6 Projeto de um dispositivo MRE

Independente do modo de funcionamento do MRE que se deseja explorar, o principal é alterar a rigidez da estrutura momentaneamente, provocando uma alteração em sua frequência natural definida pela Equação 2.2. (RAO, 2011)

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.2)$$

Sendo k a rigidez e m a massa do sistema. Além disso, o amortecimento do sistema também é um pouco alterado, como dito anteriormente. Mas esse, por sua vez, altera pouco a frequência natural pois eles se relacionam através da equação 2.3. (RAO, 2011)

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (2.3)$$

Assim, ao se aumentar a razão de amortecimento ξ em 20%, por exemplo a frequência natural amortecida ω_d cai apenas por volta de 2% da frequência natural. Para um dispositivo que use o modo de cisalhamento do MRE, k pode ser escrito em função de G o módulo de cisalhamento, A a área da seção transversal, n o numero de camadas de MRE e h , a espessura do elastômero, assim temos a equação 2.4. Enquanto que para

o modo de tração/compressão, basta substituir G por E , o módulo de Young. (LI et al., 2014)

$$k = \frac{GA}{nh} \quad (2.4)$$

Em um sistema com um grau de liberdade, a vibração transmitida por uma base isolante pode ser expressada pela transmissibilidade de deslocamento (Equação 2.5) ou da força (Equação 2.6).

$$\frac{X}{Y} = \sqrt{\frac{1 + (2 * \omega_r * r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2 * \omega_r * r)^2}} \quad (2.5)$$

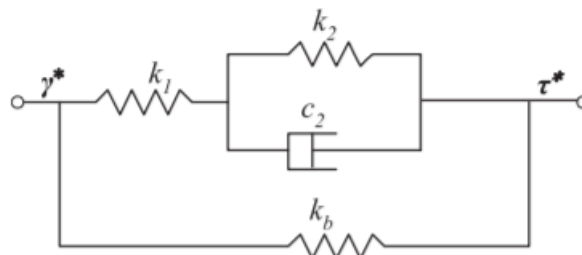
$$\frac{F_r}{kY} = r^2 \sqrt{\frac{1 + (2 * \omega_r * r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2 * \omega_r * r)^2}} \quad (2.6)$$

Para ambas as equações acima, $r = \frac{c}{2m\omega_n}$ e $\omega_r = \omega/\omega_n$. Nas quais, c é o amortecimento e ω a frequência de excitação.

Além dessas equações básicas, o MRE pode ser tratado como um típico material viscoelástico não-linear com amortecimento e rigidez dependentes do campo magnético . Um modelo clássico para esse tipo de material seria o modelo de Kelvin-Voigt, que consiste em uma mola e um amortecedor viscoso em paralelo. (LI et al., 2014; MEYERS; CHAWLA, 2009)

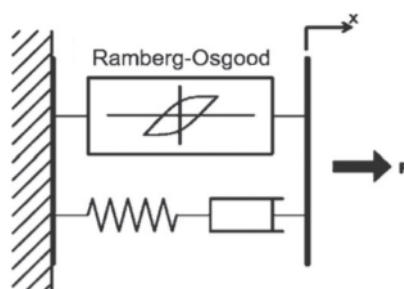
Em cima desse modelo, pesquisas mais recentes foram desenvolvidas para melhor capturar a dinâmica do MRE. Li, Zhou e Tian (2010) desenvolveram um modelo com 4 parâmetros, adicionando mais um elemento de rigidez em série e outro em paralelo ao modelo de Kelvin-Voigt, como mostrado na Figura 11 abaixo. Seus resultados mostram uma boa concordância entre o modelo e seu MRE para excitações harmônicas com frequências abaixo de 10Hz. Já Eem, Jung e Koo (2012) propuseram um modelo que combina a modelo de Maxwell e o de Ramberg-Osgood em paralelo, o primeiro descreve a viscoelasticidade e o segundo, a não linearidade do MRE, como pode ser visto na Figura 12.

Figura 11 – Modelo proposto por (LI; ZHOU; TIAN, 2010)



Fonte: Li, Zhou e Tian (2010)

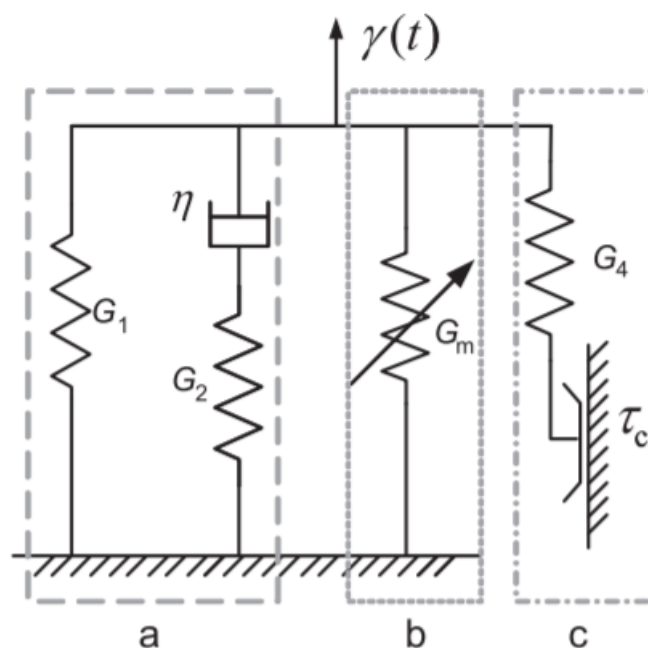
Figura 12 – Modelo de MRE proposto por Eem, Jung e Koo (2012)



Fonte: Eem, Jung e Koo (2012)

Em outro artigo, Chen e Jerrams (2011) sugerem um modelo que inclui o atrito da superfície das partículas magnéticas com a matriz polimérica. Veja a Figura 13. Nele, a viscoelasticidade do modelo é modelada por um sólido linear padrão com duas molas e um amortecedor. Para a rigidez e o amortecimento dependentes do campo magnético são descritos por uma mola de rigidez variável e um conjunto mola e atrito de Coloumb.

Figura 13 – Modelo de MRE proposto por Chen e Jerrams (2011)

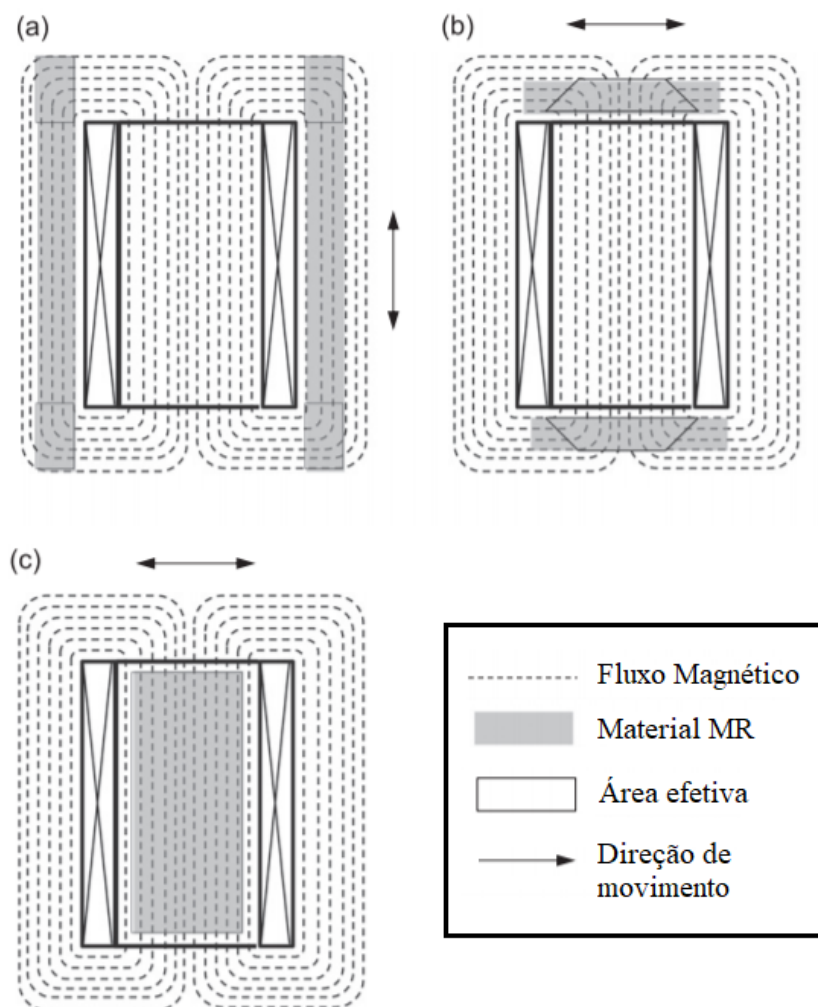


Fonte: modificado de Chen e Jerrams (2011)

Além do modelo, um dispositivo que utilize MRE precisa ter um bom projeto do circuito magnético que vai aplicar o campo ao elastômero. Um bom projeto de circuito magnético busca ser compacto e ao mesmo tempo eficiente para que haja pouco consumo de energia. Em geral, existem três tipos de configuração para projeto de um circuito magnético, como mostrado na Figura 14. (LI et al., 2014)

O primeiro tipo, item a) da Figura 14, é mais aplicado em amortecedores magnéticos que usam MRF. Nele, o material MR é colocado na parte de fora da bobina e seu movimento é paralelo à direção axial da bobina. Esse *design* permite apenas uma pequena seção onde

Figura 14 – Três tipos de circuitos magnéticos



Fonte: adaptado de [Li et al. \(2014\)](#)

o campo é mais intenso, limitando a carga do amortecedor.

O segundo tipo de configuração, mostrado na Figura 14b), faz um uso mais eficiente do campo magnético, colocando o material MR na parte superior e inferior da bobina, ou até mesmo em contato direto com a superfície dos fios. Essa configuração é usada em geral em absorvedores e isoladores de vibração como [Opie e Yim \(2011\)](#).

No terceiro e último tipo de configuração, o MRF ou MRE é colocado no dentro da bobina magnética, servindo como núcleo magnético do circuito. Isso porque o campo dentro do solenoide é mais forte e uniforme, enquanto na parte de fora ele tende a ser mais fraco e menos estável. A principal vantagem dessa configuração é que ela permite uma grande área ativa e um campo magnético aplicado mais forte. Um exemplo é [Li et al. \(2013\)](#).

Seja para a identificação dos parâmetros dos modelos que são propostos para o MRE ou para teste da configuração do dispositivo, ensaios dinâmicos são necessários. A seção seguinte cita alguns exemplos desses ensaios.

2.7 Ensaios dinâmicos para a caracterização das propriedades mecânicas

Antes de tudo, é importante destacar aqui que existem máquinas comerciais padronizadas para realização de ensaio em materiais poliméricos em geral e que podem ser aplicados ao MRE chamadas Reômetros. Como por exemplo, o Reômetro ANTON PAAR PHYSICA MCR-301, que, ao ser equipado com uma cela magnética MRD-180/ 1T (Physica Anton Paar, Alemanha), mostrado na Figura 15, pode ser usado para determinar propriedades reológicas como módulos de rigidez ao cisalhamento real e complexo em função da deformação e também do campo magnético aplicado (ELOY, 2018)

Figura 15 – Reômetro usado por Eloy (2018), à esquerda sem o aparato que aplica o campo magnético e à direita com o acoplamento dele ao reômetro



Fonte: Eloy (2018)

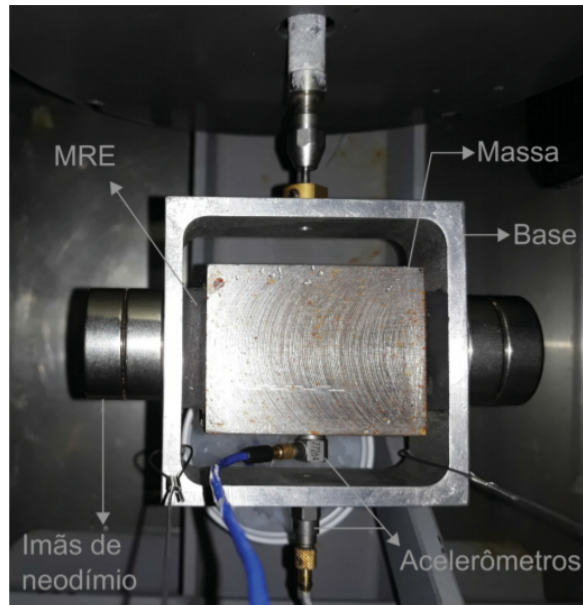
Contudo, erros de fabricação, colocação da amostra na aplicação ou ainda o método usado para aderir o MRE à superfície podem afetar suas propriedades, que vão diferir das encontradas em ensaios com reômetros. Assim, um equilíbrio entre teste do dispositivo MRE e do material MRE em si são modelos simples com poucos graus de liberdade.

Dentre os diversos métodos usados nos artigos citados acima para teste do MRE, os mais simples envolvem a comparação do comportamento do MRE no domínio da frequência em um aparato que apresente apenas um grau de liberdade. Ou seja, aplicar uma força ou deslocamento a uma massa para causar compressão/tração ou cisalhamento no elemento MRE e, com os dados obtidos, fazer comparação de frequências naturais e percentuais de amortecimento, usando aceleração ou deslocamentos mensurados.

Silva (2020) construiu um aparato, mostrado na Figura 16 para testar a resposta de duas formulações diferentes de MRE, uma com 7% e outra com 20% de ferro carbonila em volume em uma matriz de borracha butílica, a uma força cisalhante harmônica com diferentes frequências em diferentes temperaturas. Ele comparou as diversas situações

de ensaio em relação à mudança da frequência fundamental de seu aparato. Com isso, concluiu que a variação de temperatura teve mais influência nas propriedades dinâmicas do MRE e que o aumento da rigidez do polímero é maior para baixas frequências em altas temperaturas.

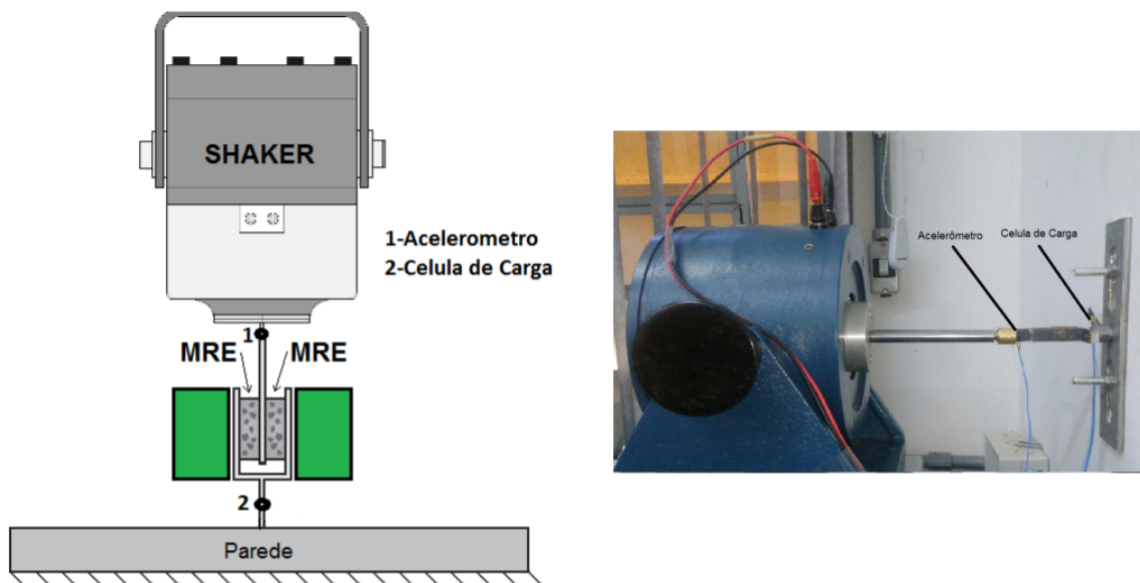
Figura 16 – Aparato de testes usados por [Silva \(2020\)](#)



Fonte: [Silva \(2020\)](#)

[Fukushima \(2016\)](#) construiu um aparato semelhante, mas com uma chapa no lugar do bloco, como mostrado na Figura 17. Ele fez a aquisição da força aplicada na amostra pelo *shaker* e da aceleração resultante na chapa. Seus resultados no domínio da frequência mostram que, quando aplicado o campo magnético, houve aumento da rigidez do sistema.

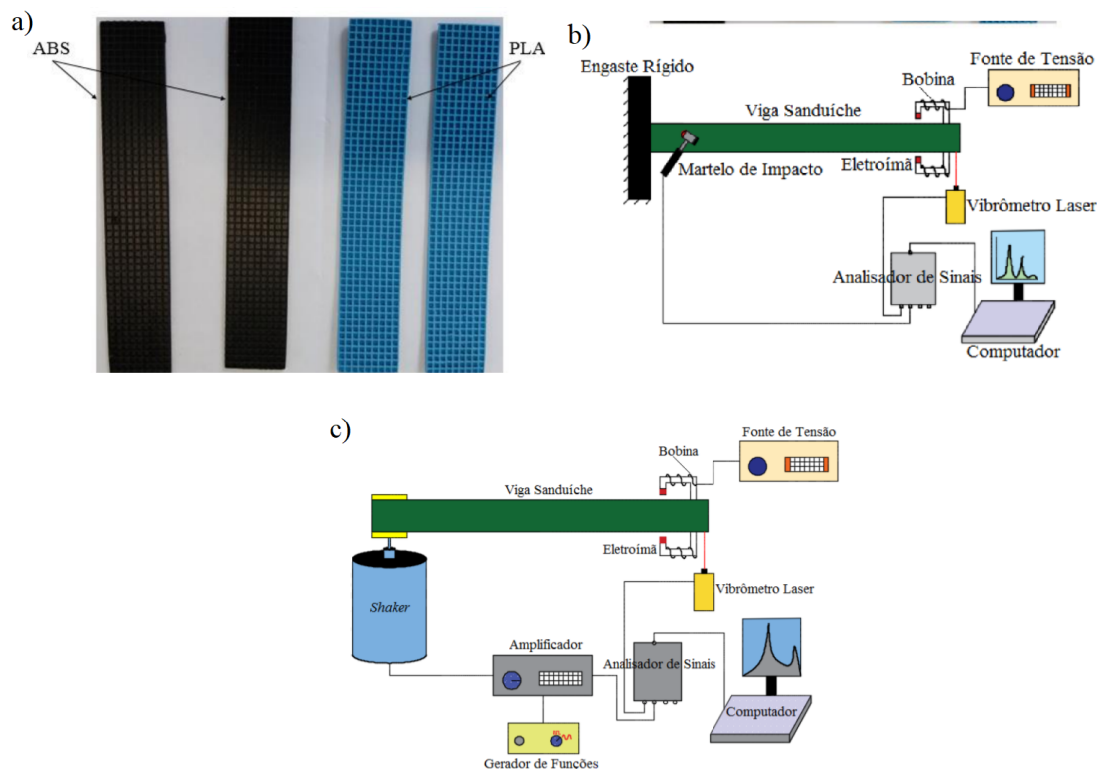
Figura 17 – Aparato experimental desenvolvido por [Fukushima \(2016\)](#)



Fonte: [Fukushima \(2016\)](#)

Em experimentos com mais de um grau de liberdade, ensaios padrão de vibrações podem ser aplicados, como por exemplo: ensaios de vibração livre e vibração forçada com *shaker*. Para caracterizar dinamicamente vigas colmeia preenchidas com MRE (Figura 18a)), Eloy (2018) realizou dois ensaios. Primeiro, com a configuração experimental mostrada na Figura 18b), mediu a resposta livre das vigas a um impacto provocado por martelo e, analisando os dados no domínio da frequência comparou a mudança das frequências naturais do sistema entre as diferentes vigas testadas para diferentes intensidades de campo magnético. Depois, usando o aparato da Figura 18c), ensaiou as vigas em condição de vibração forçada, excitando-as em sua frequência natural, e comparou a resposta de deslocamento de cada uma delas no tempo, notando que quanto maior o campo aplicado, menor o deslocamento.

Figura 18 – a) Vigas colmeia preenchidas com MRE b) Ensaio de vibração livre c) Ensaio de vibração forçada



Fonte: Eloy (2018)

2.8 Tópicos em aberto

Para concluir essa revisão, são listados abaixo alguns tópicos de pesquisa pouco investigados na literatura e que ainda permitem uma investigação mais aprofundada ou definitiva. São sugestões de artigos de revisão, bem como algumas observações vindas da leitura dos artigos citados acima.

O maior desafio quando se trata de desenvolver dispositivos que apliquem MREs é fazê-los ser efetivos para uma grande faixa de frequência, com baixo consumo de energia e que sejam compactos. Pesquisas que investiguem a aplicação de cargas combinadas são necessárias para aumentar as possibilidades de aplicação do MRE. Outras aplicações com o uso do MRE, como um sensor-atuador simultâneo também são promissoras, pois podem levar ao desenvolvimento de sistemas de controle com *feedback* em tempo real. (LI et al., 2014)

Segundo Cantera et al. (2017), os modelos atuais falham ao não incorporar condições ambientais ao modelo de resposta do MRE como temperatura e umidade, além da porcentagem de aditivos aplicado à matriz polimérica. Modelos analíticos ou numéricos que considerem relaxamento, fadiga e fratura estão começando a ser desenvolvidas, encontrando-se em um estágio muito inicial quando comparados com materiais mais convencionais, como metais e compósitos. Testes de *benchmark* acelerados, especialmente para fadiga, precisam ser mais bem definidos.

Resultados indicam que partículas magnéticas maiores melhoram o efeito MR, o que aparenta ser uma opção para o desenvolvimento de MREs de mais alta performance (STEPANOV et al., 2007). Porém, o modelo analítico desenvolvido por Shen, Golnaraghi e Heppler (2004) indica que MREs com partículas menores só que em grande volume levam a um aumento maior de rigidez quando um campo magnético é aplicado ao elastômero. Esse efeito foi verificado por Landa (2013) usando partículas de níquel. Trabalhos mais recentes também parecem se contradizer.

Jin et al. (2014) demonstraram que o aumento do tamanho da partícula faz com que o módulo de cisalhamento seja menor sem campo magnético. Já na presença deles, o material se torna mais rígido até um certo tamanho de partícula, depois começa a diminuir. Enquanto que os resultados obtidos por Hegde, Poojary e Gangadharan (2014), usando uma matriz de silicone, indicam que o efeito MR é mais forte com partículas menores.

Por fim, em conclusão, a influência do tamanho da partícula parece ainda não ter sido bem definida, variando de acordo com o material usado como matriz, o volume de partículas e a configuração do aparato experimental.

3 Estado da Arte

3.1 Campos para pesquisa

Considerando todas as colocações do capítulo 2, tem-se o estado atual das pesquisas sobre o MRE e quais os pontos mais passíveis de estudo.

Como campos para estudos na área temos:

3.1.1 Configurações dos dispositivos

Diversas montagens foram apresentadas durante o capítulo 2, para aplicação do campo. Duas maneiras bem distintas podem ser observadas nas Figuras 16 e 17, em que uma usa eletroímãs com o MRE posicionado em seu GAP, enquanto a outras usam ímãs permanentes com MRE situado entre os dois polos.

Assim o estudo do tipo de ímã e a localização do MRE mostra-se um campo promissor, uma vez que não há uma definição clara de qual é a maneira é mais viável para se obterem resultados mais efetivos.

Como explicitado na seção 2.3, para uma menor perda do campo magnético, deve-se manter o comprimento do entreferro o menor possível. Entretanto, quando menor este espaçamento, menor a quantidade de material Magnetoreológico poderá ser usado no dispositivo, podendo prejudicar seu funcionamento. Dessa forma, um segundo ponto de estudo seria qual o ponto ótimo do GAP, para garantir pouca perda de energia do campo, sem comprometer a funcionamento dos dispositivos.

3.1.2 Propriedades magnéticas do elastômero

Um fato observado na seção 2.3 é a a reologia de MRE, definida pelas propriedades das partículas magnéticas usadas. Para isso, um terceiro campo de estudo é a definição de qual a partícula magnética a ser usada, qual sua porcentagem no elastômero e sua uniformidade (com cura orientada ou não).

3.1.3 Propriedades do Elastômero base

Tão importante quanto definir a montagem dos dispositivos e as propriedades magnéticas do MRE é definir as propriedades do elastômero, como rigidez e dureza. Para isso, um estudo pode ser feito sobre qual é o elastômero mais adequado, e propriedades de cura, como tempo e condições de cura, e porcentagem de catalisador.

3.1.4 Modelagem

Conforme apresentado na seção 2.5, um ponto muito importante para o estudo de um dispositivo MRE é o correto uso do modelo matemático. Assim, uma vez definida a configuração do dispositivo, deve-se definir qual o melhor modelo se adapta a ele.

3.1.5 Caracterização

Uma vez definidas as configurações do dispositivo, as características do Elastômero e um modelo adequado, o próximo campo de estudo é a caracterização do material, estudando a interferência de elementos, como intensidade, orientação e frequência do campo.

3.1.6 Controle

Finalmente, o último campo para pesquisa são mecanismos para controle dos parâmetros do MRE.

3.2 Pesquisa no LabSiN

A pesquisa do LabSiN com o MRE iniciou-se em 2014, como projeto de mestrado do discente JEFERSON CAMARGO FUKUSHIMA. Em seu primeiro trabalho, intitulado "Desenvolvimento e caracterização de um Elastômero Magneto-Reológico para aplicação em absorvedores de vibração mecânica" [Fukushima \(2016\)](#).

[Fukushima \(2016\)](#) construiu a base para todos os futuros projetos a serem realizados. Realizou diversos testes com o elastômero e a partículas magnéticas, realizando a análise química e espectrometria das amostras produzidas, além de desenvolver os primeiros modelos de dispositivos.

Nesse trabalho, [Fukushima \(2016\)](#) constata a viabilidade de aplicação do MRE para absorvedores de vibração, e podem ser colocados como principais pontos agregados à linha de pesquisa:

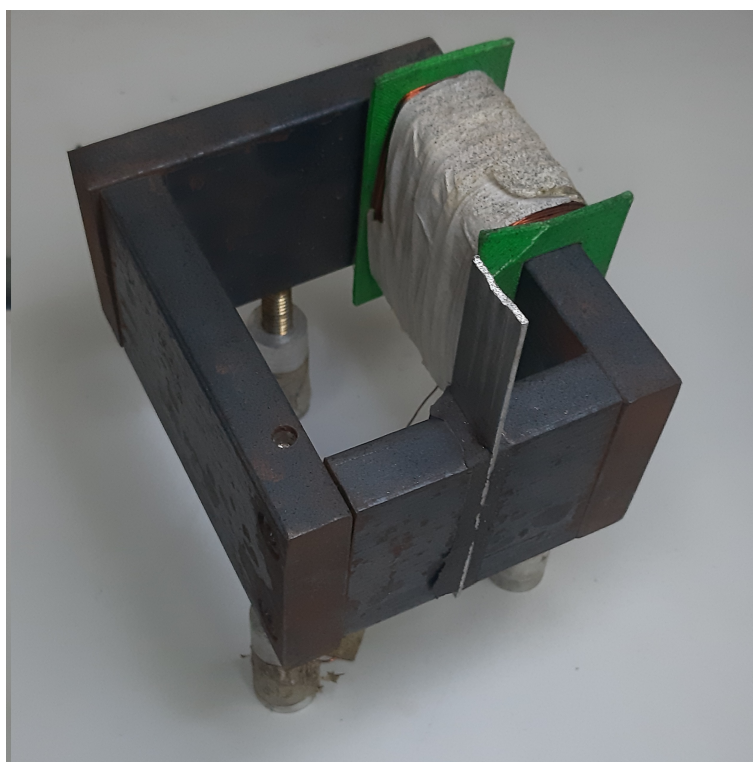
- Definição dos Elastômero base a ser usado, tal como quais os parâmetros (como tempo de cura e porcentagem de catalisador) que apresentaram melhores resultados.
- Definição das quantidade de partícula magnética ideal, onde se obtêm variações significativas das propriedades dinâmicas do Material quando submetido ao campo.
- Constatação de que as partículas, quando curadas, ficam uniformemente distribuídas na amostra e não interagem quimicamente com o elastômero base
- Caracterização do material para futura modelagem

Também, nesse trabalho foram levantados os aperfeiçoamentos necessários para o avanço da pesquisa, entre eles:

- a necessidade de melhoria do dispositivo, garantindo que o campo magnético obtivesse maior efeito sobre o MRE;
- projetar um dispositivo funcional para aplicação prática.

Tais pontos foram aprimorados na continuação de seu trabalho, agora em seu projeto de Doutorado, ainda a ser finalizado no ano de 2021. Em seu segundo trabalho, outros pontos fundamentais foram acrescentados. Definiu-se o uso do eletroímã na configuração C, utilizando a amostra de MRE preenchendo a área do entreferro, como melhor maneira de garantir a não dispersão do campo. Definiu-se também que um espaçamento de entreferro adequado é de 10mm, garantido assim uma parede de elastômero de 4mm, como apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Eletroímã tipo C como MRE preenchendo o entreferro

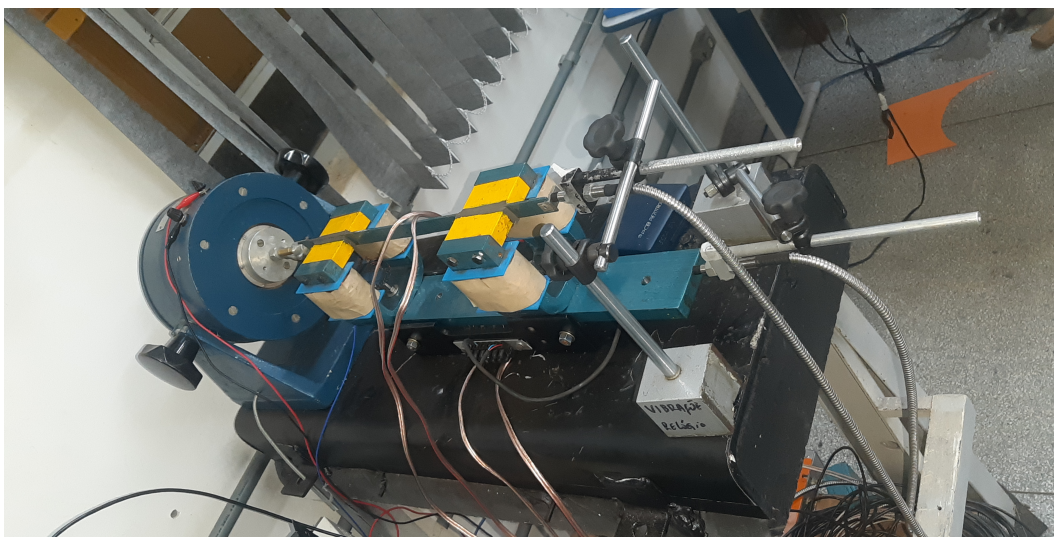


Fonte: Próprio Autor

O segundo trabalho na área foi desenvolvido pelo discente HENRIQUE EDNO LEONCINI DE CARVALHO, em sua Trabalho de Graduação, Intitulado "CARACTERIZAÇÃO DE UM MATERIAL MAGNETOREOLÓGICO PARA AMORTECIMENTO SEMIATIVO DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS" [Carvalho \(2019\)](#). Nesse trabalho, uma continuação direta da caracterização realizada por FUKUSHIMA foi realizado e definiu-se o modelo de Kevin-Voight como o mais adequado para as configurações definidas.

O trabalho seguinte foi desenvolvido por FERNANDA CAROLINA DE ALMEIDA em seu mestrado, com o título "ISOLAMENTO DE VIBRAÇÕES EM ESTRUTURAS DE PONTES UTILIZANDO ELASTÔMERO MAGNETO-REOLÓGICO" Almeida (2020). Este foi o primeiro estudo de aplicação prática do MRE, utilizando todos os parâmetros de configuração definidos por FUKUSHIMA. Na Figura 20, apresenta-se o aparato experimental utilizado neste trabalho, sendo este o mais complexo desenvolvido até então. Assim foi possível validar os aspectos construtivos e o modelo numérico, comparando-os com o resultado experimental.

Figura 20 – Aparato experimental usado por Almeida (2020)



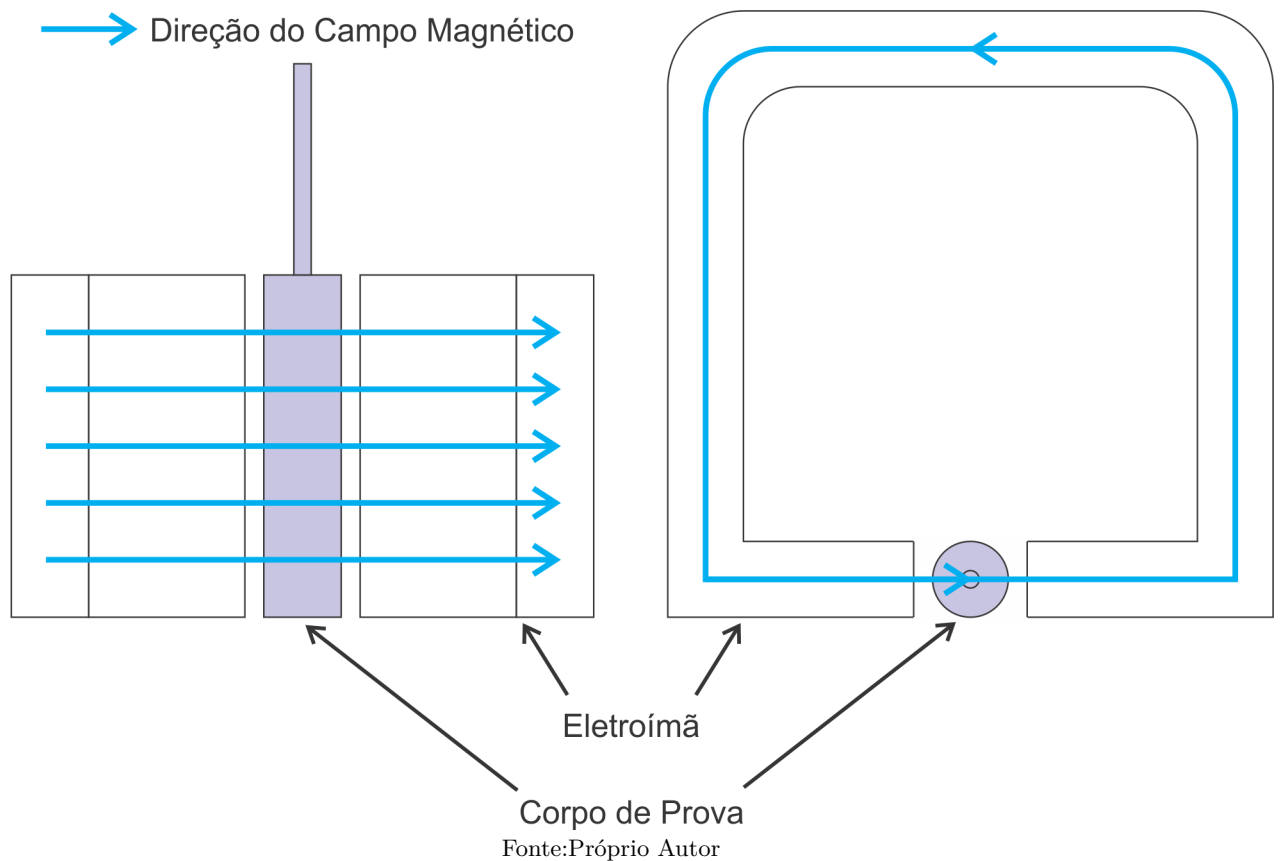
Fonte: Almeida (2020)

Por fim, o trabalho mais recente foi produzido por LEONARDO PUPIN MACHADO, também em seu mestrado, com o título "Elastômeros Magneto-Reológicos: Influência da orientação das partículas na capacidade de amortecimento de vibrações" Machado (2021). Machado aprofunda um ponto iniciado por FUKUSHIMA em seu trabalho inicial, mas pouco explorado até então, a cura orientada por campo, mudando a uniformidade das partículas no MRE. Suas principais conclusões foram que os MRE submetidos ao campo durante a cura apresentavam maior elasticidade e eram mais suscetíveis ao campo magnético aplicado futuramente, sendo que, com um mesmo campo aplicado, apresentava uma maior variação na rigidez quando comparado ao MRE que não sofreu orientação de campo.

4 Materiais e Métodos

O ensaio em questão consiste em uma segunda fase do experimento realizado por Fukushima (2016), apresentado na Figura 17 em que um corpo de prova é colocado na região do GAP de um eletroímã do tipo "c". Para este ensaio serão usados dois corpos, de igual dimensão e com igual composição do MRE, contudo em um deles a cura do elastômero será realizada sobre a presença de campo magnético no sentido radial, conforme a Figura 21, fazendo assim com que as partículas magnéticas sofrem sem uma orientação durante a cura (Este processo de orientação é melhor explanado por Machado2021) e o outro, usado como controle, sofrerá cura sem a presença de campo, gerando assim uma dispersão uniforme das partículas magnéticas, servindo como referência para o experimento.

Figura 21 – Esquemático da Orientação de Cura



4.1 Corpos de prova

Na Figura 22, observam-se as dimensões do corpos de prova , confeccionados com um tubo de cobre de diâmetro externo de 16mm, parede de 1mm e comprimento de 45mm,

com eixo interno composto por uma barra roscada de aço zincado de 1/4" e 145mm, dos quais 26mm estão no interior do corpo cilindro de cobre e 119mm externos.

Figura 22 – Esquemático das dimensões do corpo de prova



Fonte:Próprio Autor

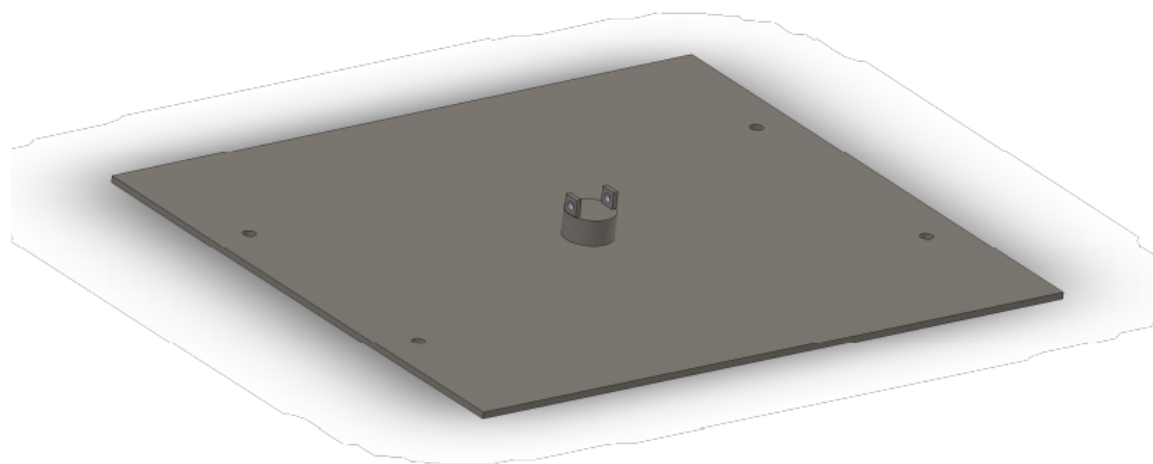
Ambos os corpos de provas serão preenchidos por MRE com base de silicone Branco PS da Marca Redelease, com 3% de catalisador em massa adicionado de partículas de iron carbonyl Sigma C3518 com 76 por cento em massa. Primeiramente, adicionam-se as partículas metálicas a a base do silicone e, após a homogeneização da mistura, acrescenta-se o catalisador e deposita-se a mistura no corpo de prova, sendo este levado à câmara de vácuo onde permanecerá por 10 minutos e depois irá ficar em repouso por 48 horas até sua cura completa. Durante o processo de cura, dentro da câmara de vácuo, um dos corpos de provas ficará submetido a um campo de 0,3T, para garantir a orientação do campo.

4.2 Aparato experimental

Para a realização do ensaio será desenvolvido um aparato experimental que consistirá em uma base com eixo perpendicular de 19mm onde será fixado o corpo de prova (conforme pode ser observado na Figura 23), eixo o qual se encontrará interno a um, que por sua vez estará acoplado a uma bandeja circular, onde será fixado o eletroímã. Ao se rotacionar a bandeja, a direção do campo rotaciona em relação ao corpo de prova, de maneira que a incidência do campo magnético permaneça sempre radial, porém variando

o angulo em relação ao ângulo de orientação de cura.

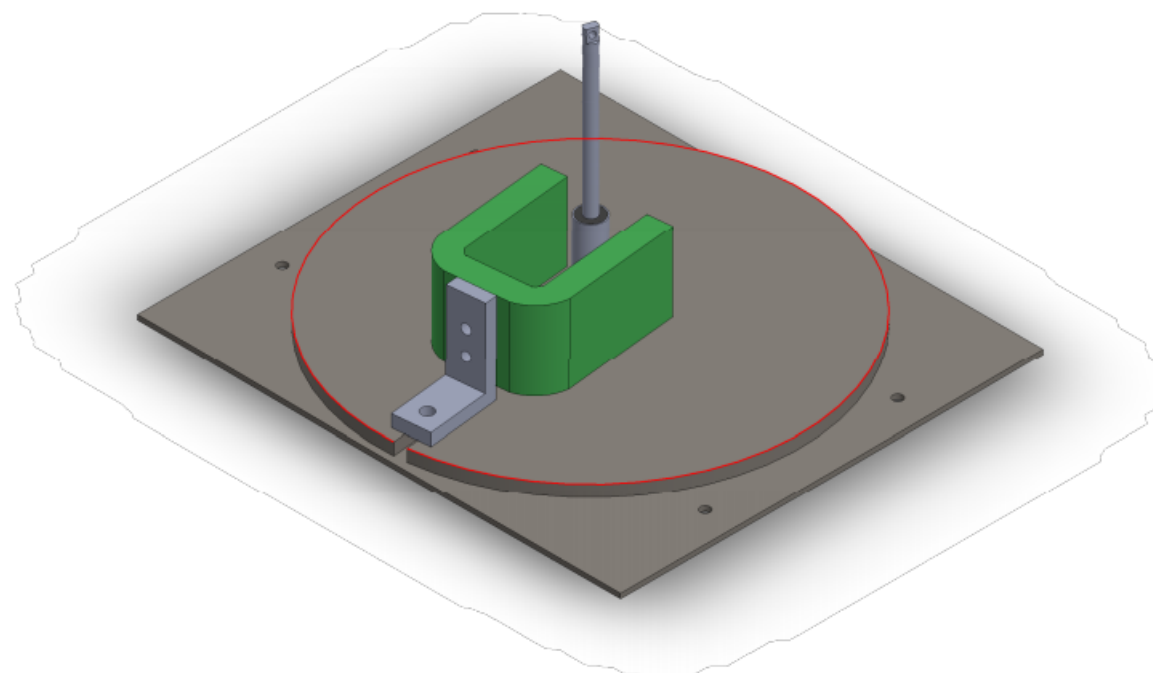
Figura 23 – Aparato Experimento - Base



Fonte:Próprio Autor

Na Figura 24 podemos observar o aparato experimental completo, com a mesa giratória fixada à base e o eletroímã e o corpo de prova devidamente posicionados

Figura 24 – Aparato Experimental - Completo



Fonte:Próprio Autor

É importante atentar-se para o detalhe de que ou a mesa giratória ou o suporte em "L" do eletroímã devem possuir um rasgo para que haja uma liberdade para se ajustar o ímã, garantindo o correto alinhamento ao corpo de prova.

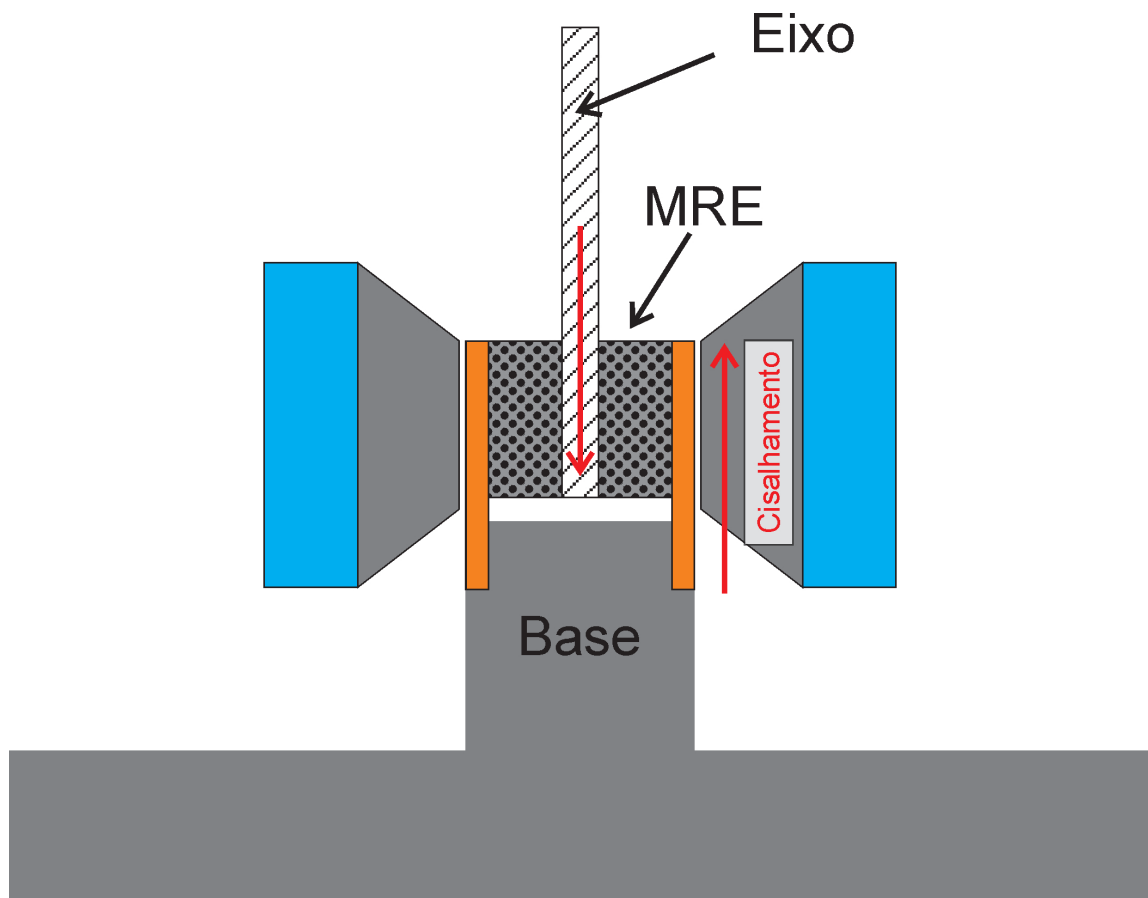
4.3 Procedimento experimental

4.3.1 Realização do Ensaio

Este experimento, tem como objetivo observar a variação do comportamento do material, quando submetido a campos magnéticos de diferentes intensidades e orientação, por meio da observação da sua rigidez e módulo de cisalhamento. Para isso será usado o aparato experimental já descrito, onde o corpo de prova terá o seu tubo externo fixado ao aparato e por sua vez será considerado como fixo, e o eixo central será fixado ao Shaker, de modo que se torne um grau de liberdade.

Ao movimentar o eixo central do corpo de prova, o material MRE presente entre o eixo e as paredes do tubo sofre cisalhamento, como apresenta na Figura 25, gerando assim uma restrição ao movimento. Quando submetidos ao campo magnético externo, as propriedades do material se alteram, gerando assim uma maior ou menor resistência ao movimento. É importante ressaltar que a presença do campo magnéticos não gera o cisalhamento do material, e sim a força aplicada pelo shaker.

Figura 25 – Cisalhamento do MRE no corpo de prova



Fonte:Próprio Autor

4.3.2 Aquisição dos dados

Para definir as propriedades, serão aferidas as grandezas de força aplicada, usando uma célula de carga acoplada entre o eixo do corpo de prova e o eixo do shaker e um acelerômetro, responsável por medir a aceleração do eixo e por consequência o seu deslocamento, de modo que com esses dados é possível extrair a tensão e a deformação.

Para definir o módulo de elasticidade do material irá ser considerado como massa o conjunto do eixo do corpo de prova e dos sensores a ele fixados.

Uma vez fixados os elementos e sensores, irá se realizar a variações dos três parâmetros em estudo, a intensidade do campo aplicado pelo eletroímã, a frequência da excitação e por fim, diferindo do trabalho citado, o ângulo de incidência do campo sobre o corpo de prova.

Inicialmente será analisado um range de frequência entre 5 e 500 Hz, adotado baseado nas faixas de operação indicadas dos instrumentos de medição. Para uma primeira análise arbitrou-se o uso de 12 frequências de excitação para um conhecimento prévio do comportamento do material, São estas: 5, 10, 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450 e 500 Hz. Com base na análise dos dados com essas frequências serão determinados os pontos onde as informações foram melhor ou pior observadas para definição dos valores, permitindo assim uma melhor visualização da mudança de comportamento do material.

Considerando também a limitação do campo magnético capaz de ser aplicado pelo eletroímã como 0,5T, devido ao surgimento de um alto aquecimento, optou-se por aplicar-se campos de intensidade nula, máxima (0,5T) e intermediário (0,25T) Dessa forma, serão 12 diferentes frequências para 3 diferentes magnitudes de campo, resultando em 36 rodadas de teste. Embora o limite de intensidade do campo não permita provocar uma maior variação nas propriedades do material, a capacidade disponível está na ordem de grandeza de diversas aplicações práticas, não sendo assim fator desqualificante para os resultados.

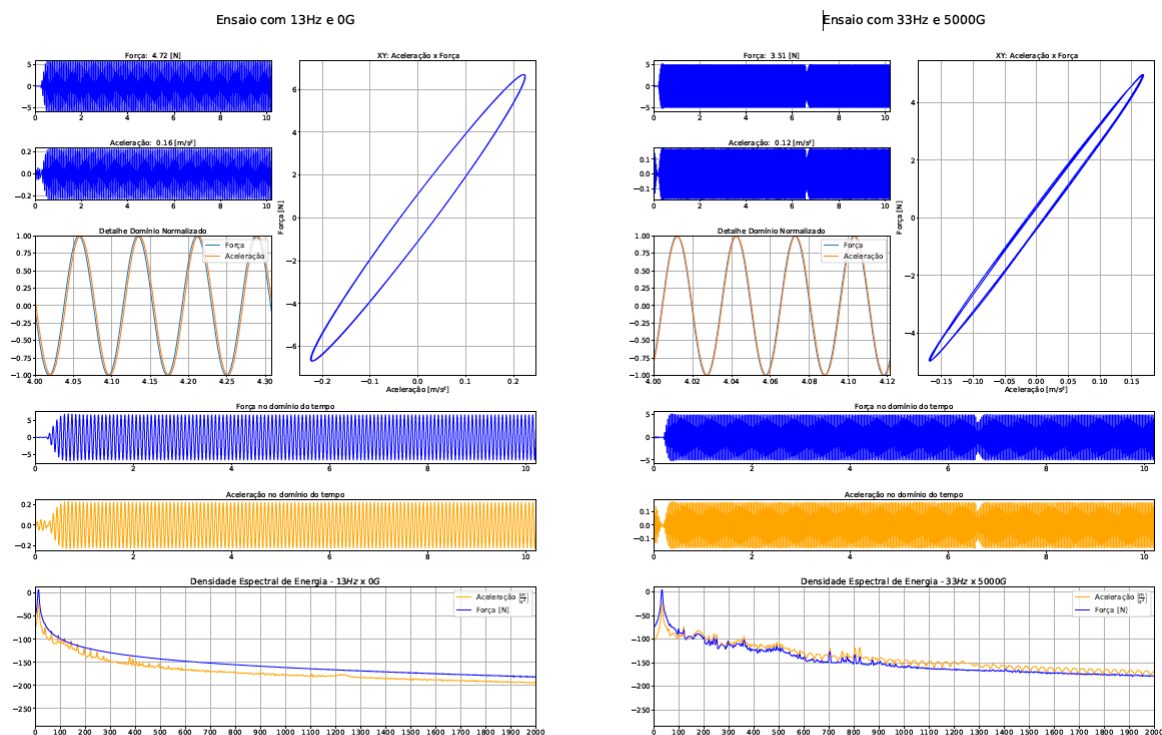
Por fim, adiciona-se o elemento alvo desta pesquisa, cada uma das 36 combinações entre intensidade de campo, a frequência de excitação será realizada sobre um ângulo de incidência diferente, primeiramente com o campo paralelo ao campo de cura, em seguida a 45 graus e por fim perpendicular à orientação de cura.

Também, para cada uma das intensidades de campo e ângulos diferentes, será realizado um ensaio usando como entrada um sinal chirp, que irá permitir uma varredura em frequência e permitira a extração da função de transferência, usada para determinar a rigidez aparente do sistema.

4.3.3 Rotina Computacional

Com uso do Software MatlabMathworks(2017), será gerado um sinal senoidal para excitação do Shaker, nas frequências já descritas anteriormente. Esses sinais serão então aplicados ao Shaker via saída de áudio do computador, passando por um amplificador analógico devidamente calibrado. Uma vez confeccionados os sinais de entrada, estes serão aplicados ao corpo de prova e então será realizada a aquisição dos dados do acelerômetro e da célula de carga. Esses dados então serão enviados novamente ao Matlab, onde serão apresentados individualmente nos domínios do tempo e frequência e na forma de curva Aceleração x Força e também sua densidade espectral, conforme apresentado na Figura 26, onde os dados poderão ser observados antes de serem utilizados. Neste tipo de apresentação será possível visualizar a viabilidade de uso destes dados, como por exemplo se as frequências observadas são coerentes com a excitação, ou se apresentam descontinuidades devido a problemas de acoplamento mecânico do aparato.

Figura 26 – Critério de aceite dos dados



(a) Resultado Aceitável

(b) Ensaio precisa ser refeito.

Fonte: Machado2021

4.3.4 Análise dos dados

Os primeiros dados a serem analisados foram os de varredura em frequência realizada com o sinal de entrada tipo chirp. Com base neste sinal, será determinada a função de transferência entre os sinais de força e deslocamento do sistema, por meio da função

"tfestimate" do Matlab, a qual pode ser diretamente relacionada à rigidez aparente do sistema.

Baseado na Rigidez do sistema será possível observar de maneira significativa as alterações no comportamento do material e, por se tratar de uma varredura em frequência, poderão ser definidos os intervalos de frequência alvos de estudo.

Com base na força aplicada pelo Shaker e suas características geométricas, é possível identificar a tensão de cisalhamento aplicado sobre a amostra, apresentada como τ . Conhecido também o deslocamento sofrido pelo acelerômetro, pode-se definir a deformação sofrida pelo corpo de prova, apresentada por γ .

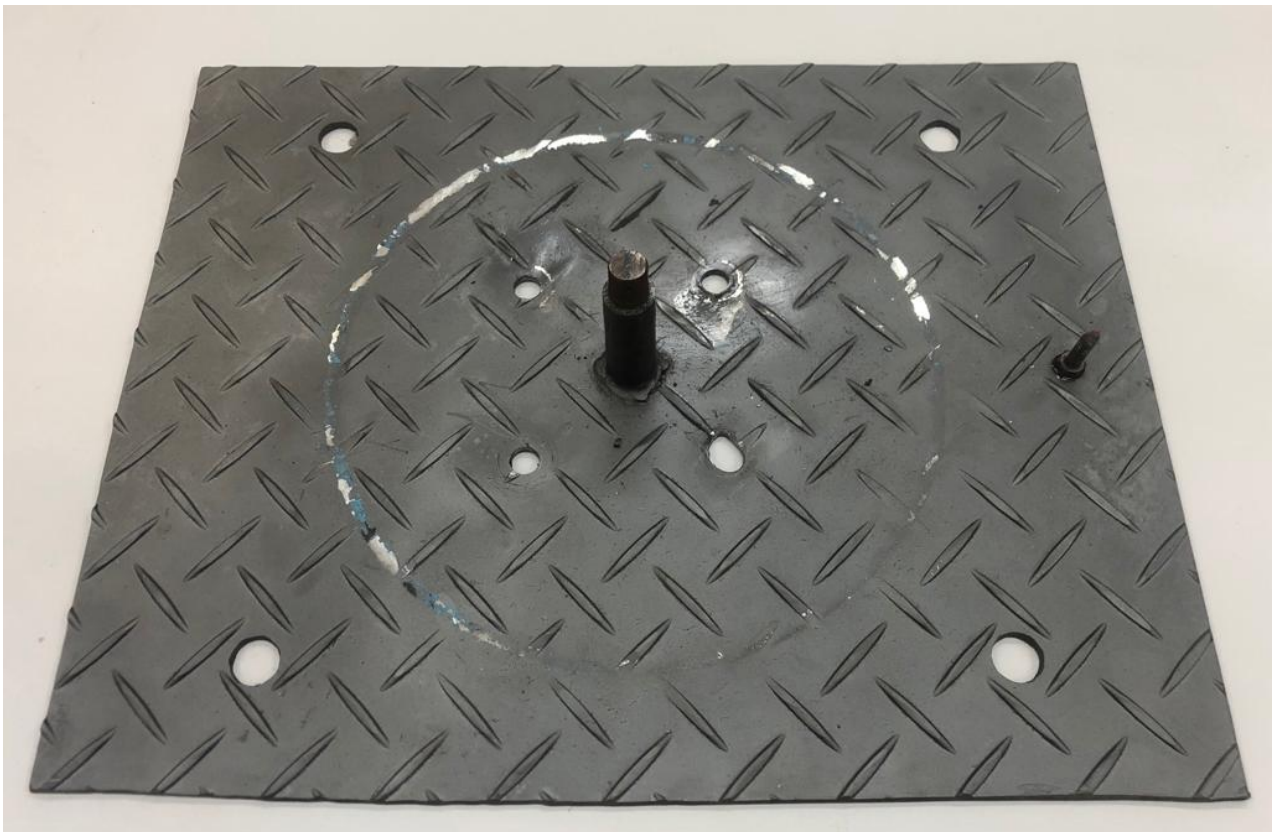
Uma vez conhecidos τ e γ por meio dos dados adquiridos, podemos então definir para cada uma das condições experimentais o Módulo de cisalhamento complexo G^* , e também o ângulo de fase σ , definindo assim como as variações dos parâmetros interferem na característica viscoelástica do MRE.

5 Resultados

5.1 Montagem do experimento

Para a montagem final do experimento foi usada como base uma chapa de 3mm de espessura, com 320x400mm. No centro da chapa foi soldado um eixo de 19mm de diâmetro e 72mm de altura, sendo, nos últimos 17mm do eixo, feita uma redução de diâmetro para 14mm, para encaixe do corpo de prova. Devido ao processo de usinagem do eixo, na região de encaixe do corpo de prova, onde o diâmetro é de 14mm, próximo à base, houve um ligeiro aumento do diâmetro, de modo que o corpo de prova não consegue encostar na parte de maior diâmetro do eixo, ficando assim 3mm distantes, gerando uma altura de interferência de 15mm. Na Figura 27, podemos observar uma foto da base do aparato experimental.

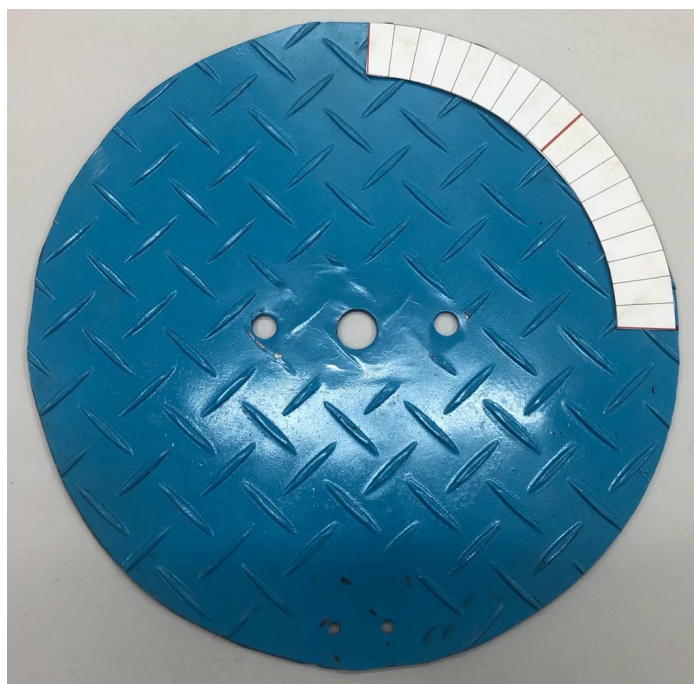
Figura 27 – Base do aparato experimental



Fonte:Próprio Autor

Sobre a base, instalou-se uma plataforma giratória circular, com diâmetro de 320mm, e em seu centro foi fixado um mancal Oval de Flange Modelo FL204 com rolamento para eixo de 3/4", modelo UC204, da marca Jmarol. Na Figura 28 está apresentado o conjunto da plataforma giratória e mancal.

Figura 28 – Plataforma Giratória



Fonte:Próprio Autor

Entre a plataforma giratória e a mesa, usou-se um rodízio Giratório para prato de micro-ondas de modelo genérico e diâmetro de 270mm, apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Rodízio para prato de Micro-ondas



Fonte:Próprio Autor

Sobre a plataforma giratória, fixou-se um suporte em L, para fixação do eletroímã. o uporte possui largura de 50mm, com altura de 100mm e base de 40mm. Na base foram feitos dois rasgos de de 10mm para parafusos M6, permitindo assim um ajuste da

posição do eletroímã em relação ao eixo. Os parafusos usados para fixar o suporte em L à plataforma foram dois M6x15. A Figura 30 mostra o suporte e os parafusos utilizados.

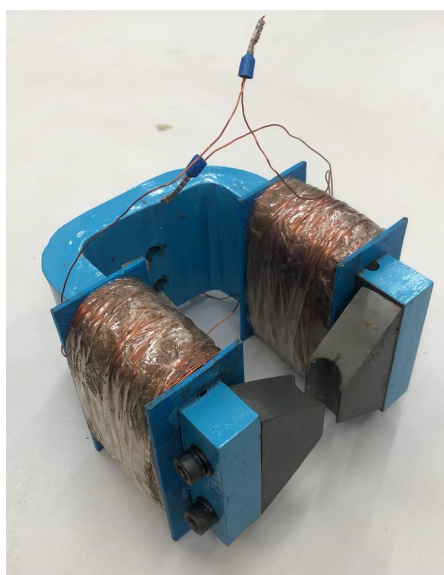
Figura 30 – Suporte em L para o Eletroímã



Fonte:Próprio Autor

Por fim, fixou-se o eletroímã sobre o suporte em L, por meio de dois parafusos M6x30. O Eletroímã utilizado foi do tipo "C" ou ferradura de ferro, com altura de 60mm, largura de 100mm e comprimento de 120mm, com chapa de 17mm. Nesse eletroímã foram adicionadas duas bobinas com x voltas de enrolamento e dois concentradores de campos, que reduzem a altura do eletroímã de 60 para 26mm. Foi deixado um gap circular de diâmetro igual a 16mm para que o corpo de prova cilíndrico pudesse se acomodar sem que houvesse ar no gap, conforme apresentado na Figura 31.

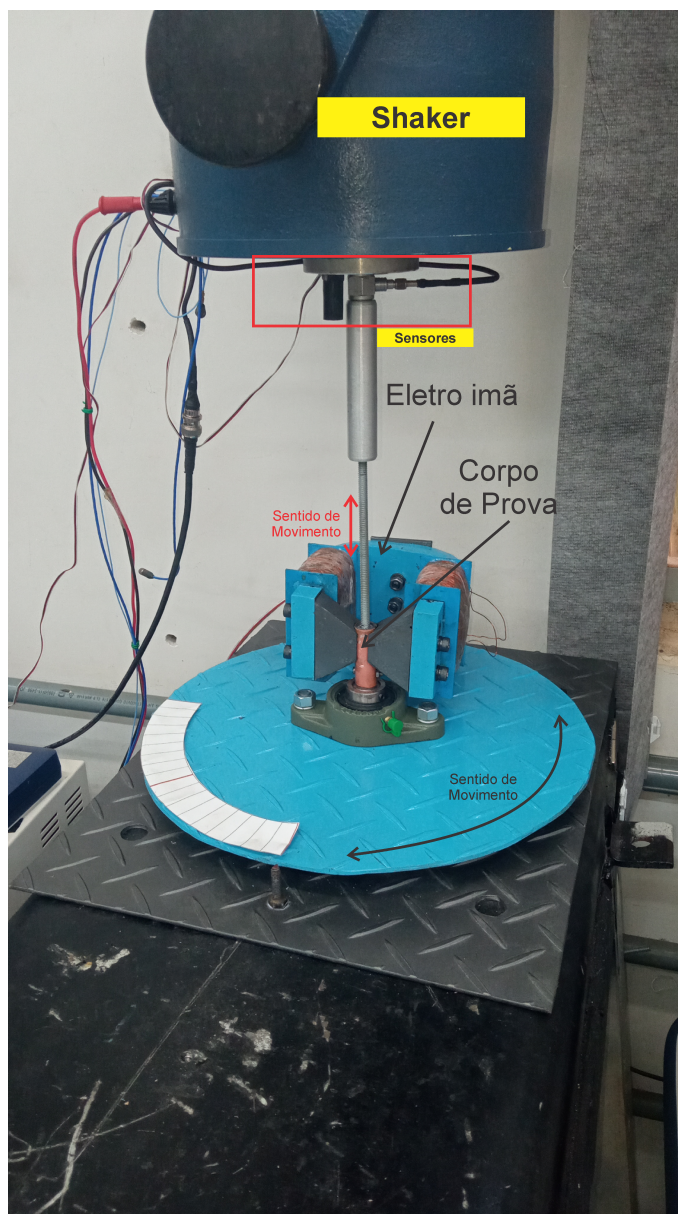
Figura 31 – Eletroímã



Fonte:Próprio Autor

O conjunto montado está apresentado na Figura 32, já com o corpo de prova, ainda sem o MRE, posicionado no local correto.

Figura 32 – Aparato Montado



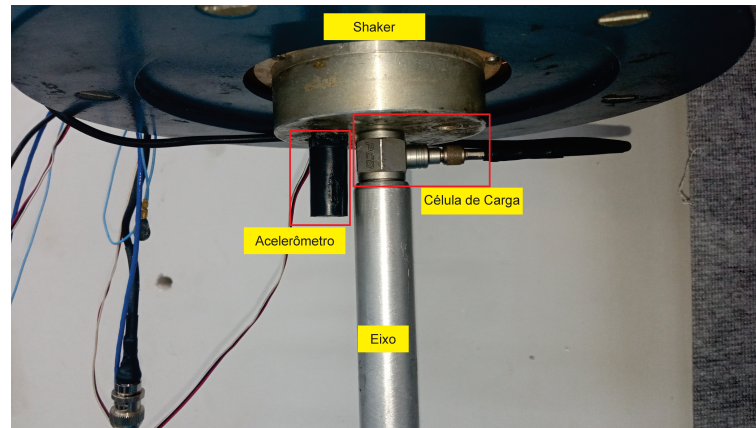
Fonte:Próprio Autor

Para a fixação do tubo externo do corpo de prova ao eixo da base do aparato, foi feito um furo passante de 3mm, a uma distância de 5mm do topo do eixo. O mesmo furo passante foi feito no tubo do corpo de prova, permitindo a passagem de um parafuso M3x20 para fixação do mesmo.

Para o acoplamento do eixo móvel do corpo de prova ao shaker foi usado um cilindro de alumínio de 20mm de diâmetro e de 100mm de comprimento. Em uma extremidade do eixo foi usinada uma rosca 1/4 onde foi rosqueado o eixo do corpo de prova, e a na outra uma rosca N10UNF.32, onde foi rosqueado a célula de carga, que por sua vez está presa ao eixo do shaker.

Por fim, o acelerômetro uniaxial foi colado ao acoplamento de alumínio, como a finalidade de se monitorar a aceleração do grau de liberdade, compreendido pelo conjunto: célula de carga, acoplamento e eixo do corpo de prova. Na Figura 33 é possível observar a posição do acelerômetro e da célula de carga.

Figura 33 – Sensores do aparato experimental



Fonte:Próprio Autor

5.2 Corpo de prova

5.2.1 Características

O corpo de prova, compreendido por um tubo de cobre de 14mm de diâmetro interno e 45mm de comprimento, foi preenchido por MRE em seus 26mm superiores, sendo a parte inferior usada para acoplamento ao aparato experimental. Para manter o MRE na parte superior foi introduzido na parte inferior do tubo um suporte de 19mm de altura, no qual havia um rebaixo de 6,5mm em seu centro para garantir a centralização do eixo do corpo de prova, que consiste em um barra roscada de 1/4.

Considerando o diâmetro interno do tubo como 14mm, o diâmetro externo médio do eixo como 6,5mm, a área da seção transversal do MRE é de 177mm², e considerando a altura de 22mm, seu volume é de 3894mm³ ou 3,9 cm³.

5.2.2 Processo de cura

Para garantir maior variação das propriedades, como exposto por Bellucci (2013), foi usado o limite de percolação do Ironcarbonyl na matriz de silicone, devendo assim haver um MRE com 33% de Ironcarbonyl em volume, sendo necessário, para a fabricação de 5cm³ de MRE, 1,65cm³ de Ironcarbonyl e 3,35cm³ de silicone.

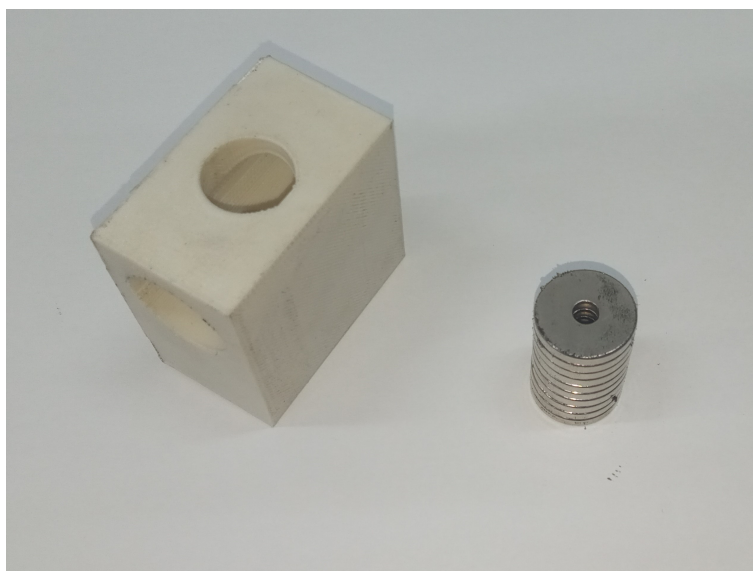
Considerando que a massa específica do silicone usado é 1,20g/cm³ e do Ironcarbonyl é 7,73 g/cm³, temos respectivamente 4,02g e 12,70g

Conhecidas as massas a serem utilizadas, e fazendo uso de uma balança de precisão, misturou-se o Ironcarbonyl ao silicone até que se obtivesse uma mistura homogênea e então levou-se a mistura até a câmara de vácuo para a retirada das bolhas. Após retirada da câmara de vácuo, adicionou-se o catalisador, em 3% de massa em relação ao silicone. Para isso, usou-se uma seringa de insulina graduada em 0,1 ml, uma vez que a densidade do catalisador é conhecida e igual a 1g/ml.

Uma vez misturado o catalisador, o MRE foi adicionado ao corpo de prova e novamente levado à câmara de vácuo.

Após a retirada da câmara de vácuo, um dos corpos de prova curou por 48 horas normalmente enquanto outro foi introduzido dentro de um suporte, apresentado na Figura 34, juntamente com dois ímãs permanentes, gerando um campo médio de 0,3T no MRE, também por 48 horas .

Figura 34 – Suporte dos ímãs para orientação do corpo de prova



Fonte:Próprio Autor

5.3 Calibração do Eletroímã

Para a calibração do eletroímã foi realizada medição do campo gerado pelo mesmo, para diferentes intensidades de corrente, próximos ao tubo de cobre externo e, em seguida, próximo ao eixo central, usando um gaussímetro. A tabela 2 apresenta os valores de campo relacionados a cada corrente para os dois pontos de medição e em seguida o valor médio.

Por questão de aquecimento, optou-se por usar o campo máximo médio como 0,4T, ou seja, corrente máxima de 2,23(A) na fonte.

Tabela 2 – Curva de Calibração do Eletroímã

Campo (T)	Corrente Centro (A)	Corrente Parede (A)	Média (A)
0,1	0,30	0,64	0,47
0,2	0,80	1,44	1,12
0,3	1,24	2,25	1,75
0,4	1,54	2,52	2,23
0,5	2,10	3,36	2,73

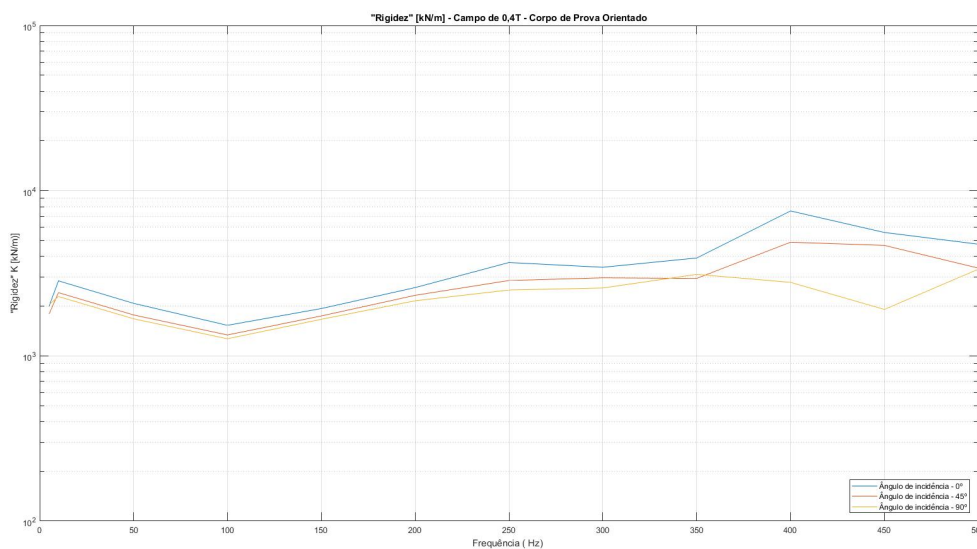
Fonte: Próprio autor

5.4 Variação das propriedades com a direção e intensidade do campo

5.4.1 Rigidez

Inicialmente considerando os dados com frequências fixas, optou-se por uma análise preliminar do comportamento dos corpos de prova por meio de um parâmetro mais simples, uma simples razão entre a força aplicada pelo shaker e a aceleração promovida ao eixo, desprezando o efeito do amortecimento no sistema. Na Figura 35, pode-se ver como o parâmetro denominado "Rigidez" em função da variação do ângulo do campo magnético de intensidade 0,4T.

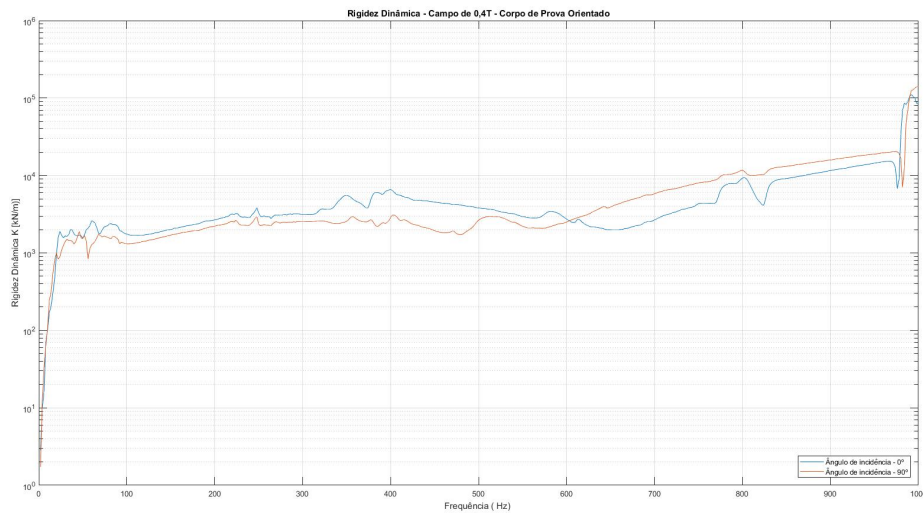
Figura 35 – Corpos de prova Orientado Submetido a campo de 0,4T com variação de ângulo



Fonte: Próprio Autor

Com a finalidade de se validar os resultados da referida "Rigidez", realizou-se então a Varredura em frequência por meio de um ensaio com sinal de entrada do tipo chirp, de 5 a 1000Hz. Na Figura 36, podemos observar a rigidez aparente do sistema, obtida por meio da função de transferência entre o sinal de entrada e saída.

Figura 36 – Corpos de prova Orientado Submetido a campo de 0,4T com variação de ângulo

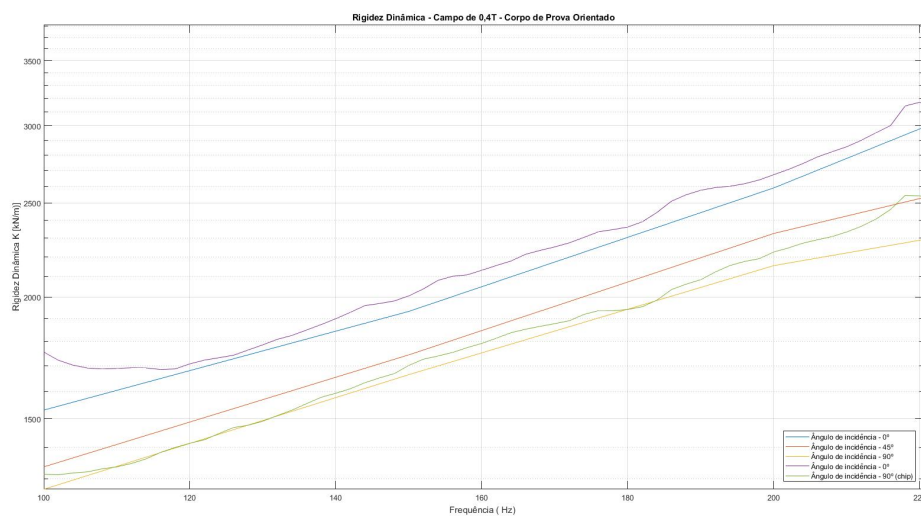


Fonte:Próprio Autor

Os resultados analisados mostram o mesmo comportamento do material quando comparados os resultados em frequências fixas e na varredura. O melhor campo de atuação do dispositivo em questão foi definido para entradas no intervalo de frequência entre 100 e 250Hz, onde a variação das propriedades permitem melhor modelagem da variação de direção do campo.

A Figura 37 apresenta em um único gráfico a rigidez para os ensaios com frequências fixas e também com o ensaio chirp, dentro da faixa de interesse citada .

Figura 37 – Corpos de prova Orientado Submetido a campo de 0,4T com variação de ângulo - Comparativo entre frequências fixas e chirp



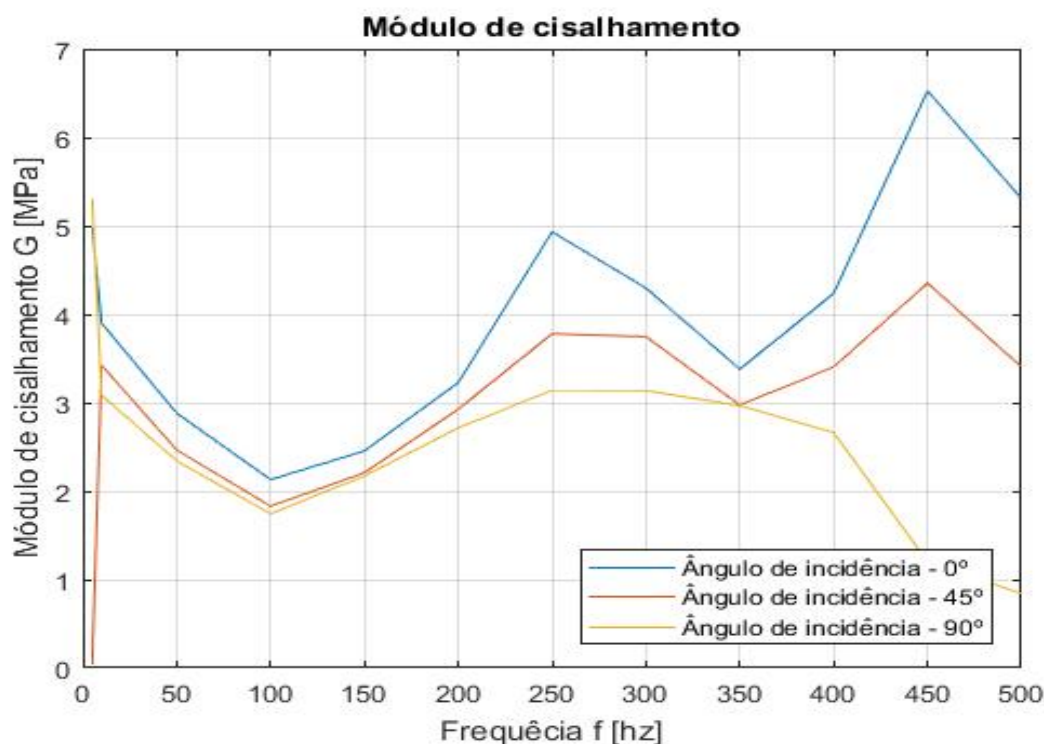
Fonte:Próprio Autor

Podemos observar para esta faixa de frequência, além do caráter linear apresentado pela rigidez, a coerência entre os dados obtidos por dois métodos diferentes de ensaio, validando assim os dados coletados e assegurando a existência de uma reação entre a rigidez e o ângulo de aplicação do campo.

5.4.2 Módulo de cisalhamento e Regime de escoamento

Usando o modelo de Kevin-Voigth, calculou-se o módulo de cisalhamento complexo para os ensaios com frequências fixas. Na Figura 38, está apresentado o valor absoluto do módulo de cisalhamento complexo G^* para cada uma das frequências de excitação nos três diferentes ângulos de incidência e, na Figura 39, está apresentado o erro percentual de adaptação ao modelo, em que foi comparada a tensão experimental com a calculada pelo modelo.

Figura 38 – Corpos de prova Orientado Submetido a campo de 0,4T com variação de ângulo - Módulo de Cisalhamento

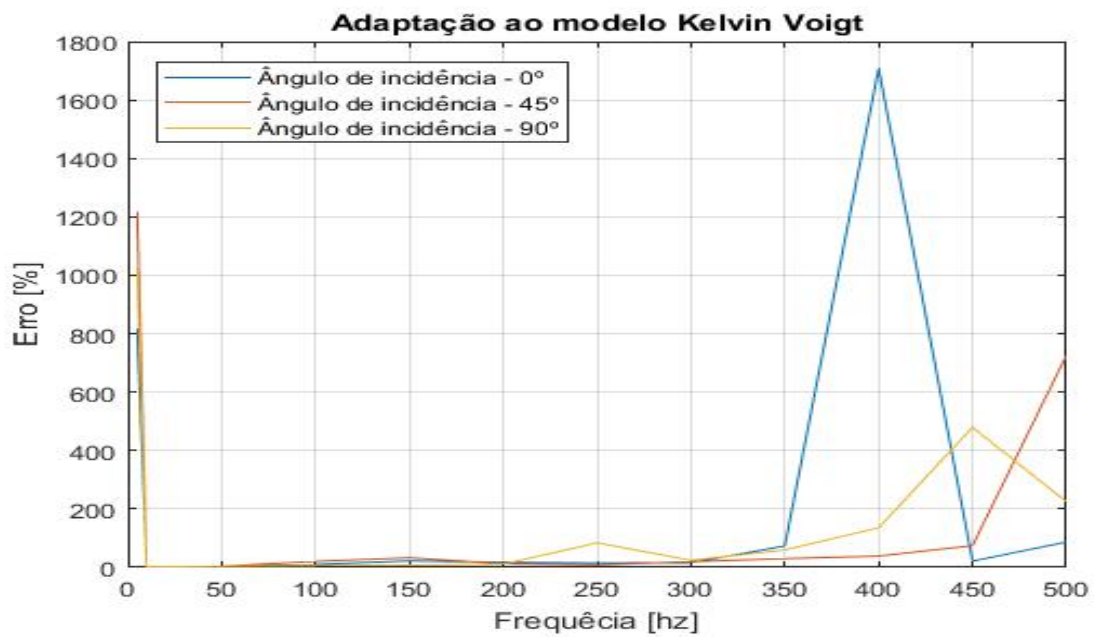


Fonte:Próprio Autor

Podemos observar que o Módulo de Cisalhamento apresenta um comportamento análogo à rigidez. Pode-se observar que o modelo usado para calculá-lo não se adapta para frequências menores de 5Hz e nem maiores que 300HZ, mais um fator que limita a análise dos dados ao Range já referido.

Outro parâmetro importante analisado foi o regime de escoamento do material. Conforme referido na seção 2.5.1, o ângulo entre o Vetor módulo e o vetor Real do módulo de cisalhamento determina o regime do material, para o dispositivo em questão. Pode-se

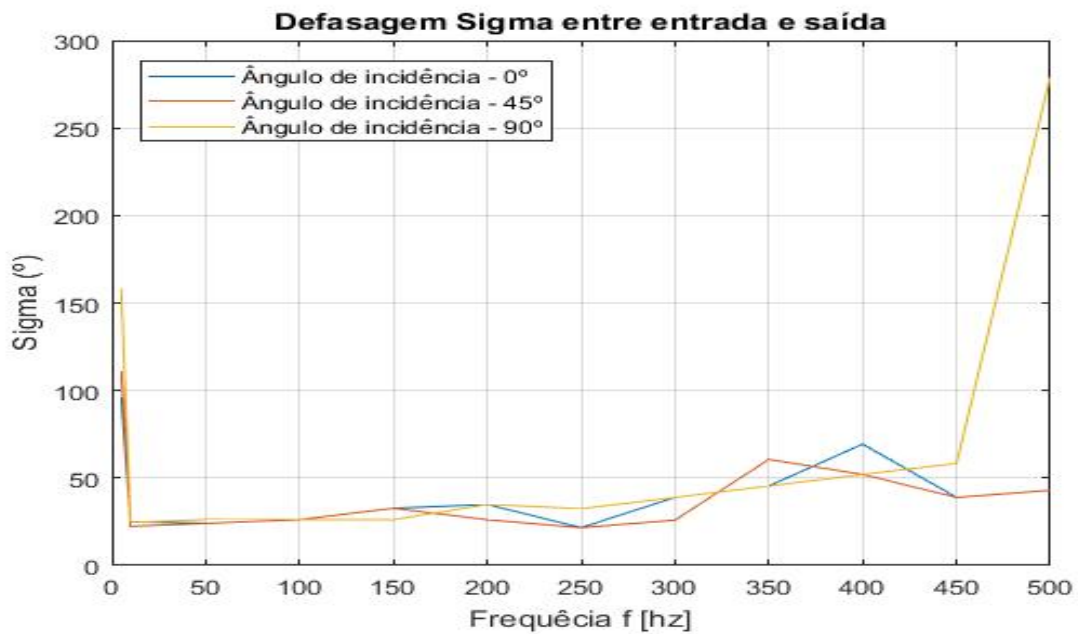
Figura 39 – Corpos de prova Orientado Submetido a campo de 0,4T com variação de ângulo - Adaptação ao modelo Kelvin-Voigt



Fonte:Próprio Autor

observar, na Figura 40, que este parâmetro não sofre variação significativa em relação à direção do campo, sendo sua variação associada à variação da deformação imprimida pelo shaker, que varia com a frequência.

Figura 40 – Corpos de prova Orientado Submetido a campo de 0,4T com variação de ângulo - Variação da Defasagem σ



Fonte:Próprio Autor

5.5 Validação da Cura orientada

A fim de se verificar se o processo de cura orientada exerceu influência sobre o MRE, foi analisado o comportamento dos dois corpos de prova, orientado e não orientado em das situações. A primeira, apresentada na Figura 41, quando submetidos ao ensaio chirp sem a presença de campo magnético algum. Em seguida, apresentado na Figura 42, há os dois corpos de provas submetidos ao campo magnético de 0,4T paralelo à direção da cura.

Figura 41 – Corpos de prova Orientado e não Orientados sem presença de campo magnético

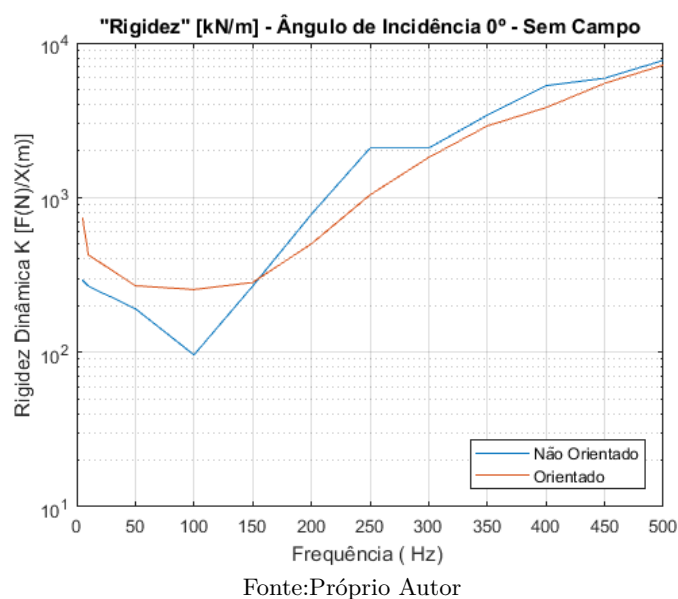
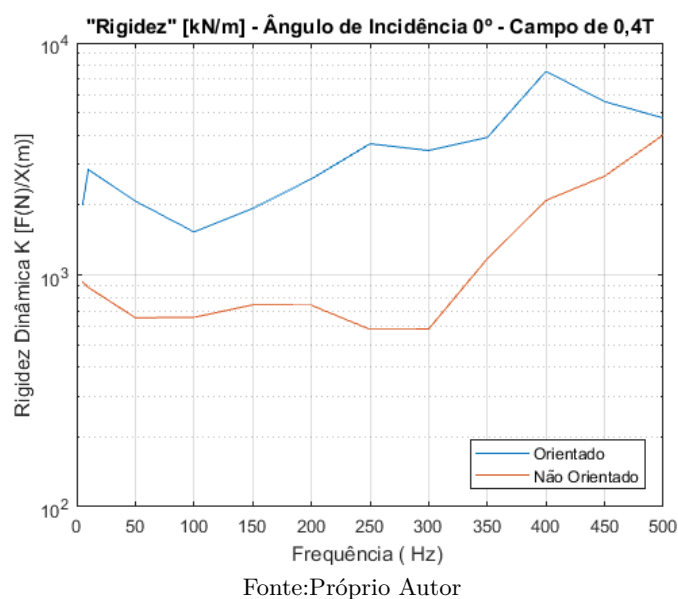


Figura 42 – Corpos de prova Orientado e não Orientados sob campo magnético de 0,4T



É possível observar que, quando não submetidos ao campo magnético, ambos os materiais apresentam propriedades semelhantes, porém, quando o campo magnético é

aplicadas. Por outro lado, é possível visualizar claramente o efeito da orientação, sendo observado claramente a variação na rigidez do material.

Nas Figuras 43 e 44 pode-se observar como os corpos de prova não orientado e orientado se comportam, respectivamente, quando submetidos a diferentes intensidades de campos magnéticos.

Figura 43 – Corpos de prova não Orientado com variação de campo magnético

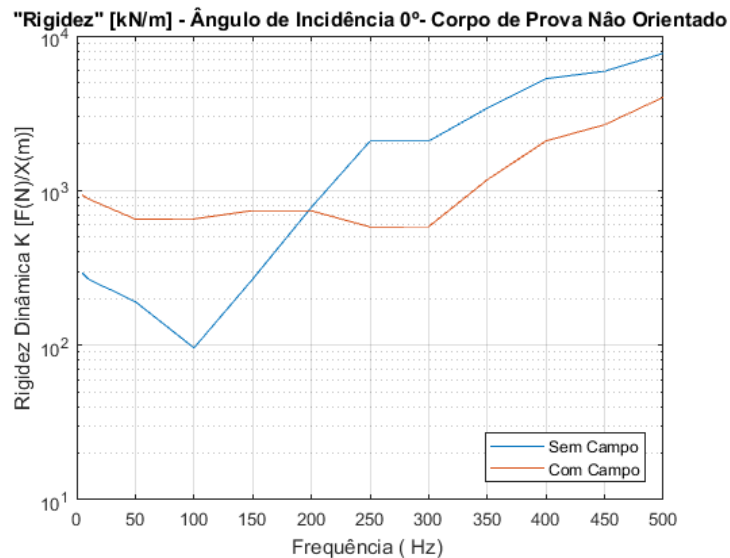
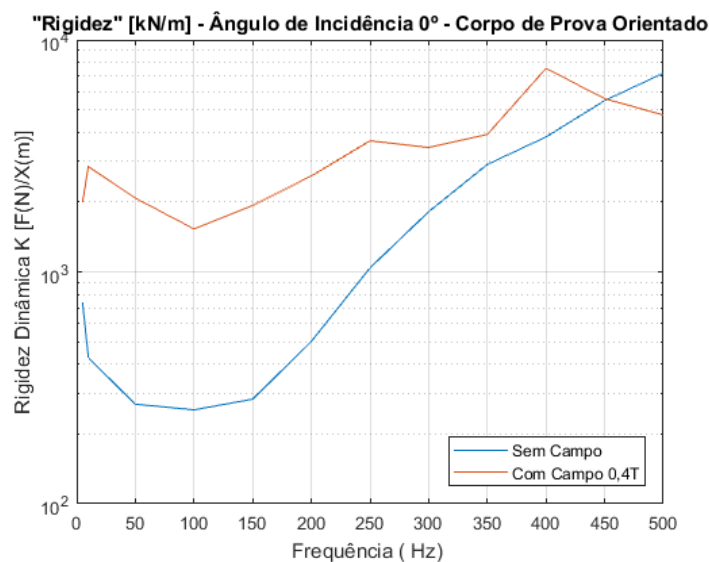


Figura 44 – Corpos de prova Orientado com variação de campo magnético



Nota-se que o corpo de prova orientado é mais sensível à presença da campo magnético e que do ponto de vista de aplicação permite uma mesma variação nas propriedades, sem a necessidade de um campo magnético tão intenso.

6 Conclusão

Uma vez que o objetivo do trabalho era estudar as variações do comportamento do Elastômero Magneto-Reológico quando submetido à variação da direção do campo magnético, pode-se considerar os resultados encontrados como satisfatórios. O dispositivo projetado funcionou adequadamente, permitindo a obtenção de gráficos que explicitaram que há, realmente, variações de propriedades.

Embora uma análise minuciosa da variação das propriedades, unicamente em função deste parâmetro, não foi possível em todo o espectro de frequência analisado, uma vez que o shaker utilizado para a excitação do sistema não possui controle de força aplicada ou deslocamento, isso não impediu a visualização da influência da direção do campo, apenas apontou uma necessidade de evolução para trabalhos futuros.

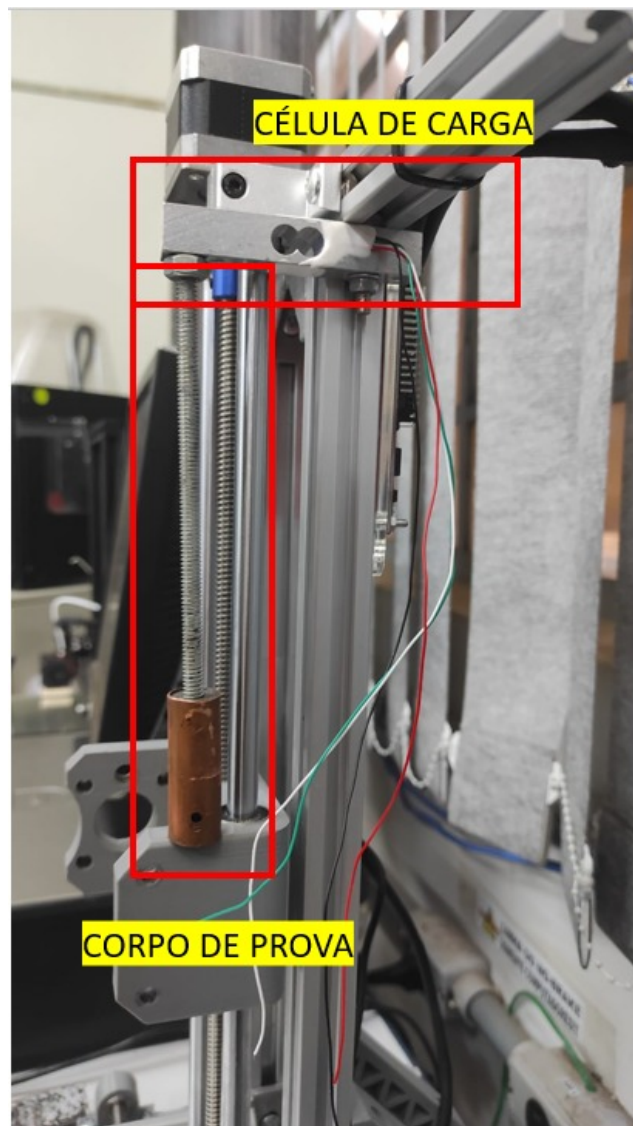
Outra dificuldade encontrada foi a limitação de trabalhos na literatura que busquem analisar as variações das propriedades mecânicas com MRE orientados, dificultando uma validação completa do experimento e abrindo assim oportunidade para que novos trabalhos sejam desenvolvidos pelo laboratório, os quais corroborem os resultados já obtidos.

7 Sugestão para trabalhos futuros

Para a sequência do trabalho, os próximos passos para poder garantir a caracterização do dispositivo e dos corpos de prova, deverão ser realizados de um ensaio de carga estática dos corpos de prova, a fim de se determinar por meio da curva de tensão e deformação quais os limites de deformação para a transição dos regimes elástico, viscoelástico e viscoso, assim como estudar mais profundamente os resultados dos ensaios experimentais, buscando extrair mais informações sobre o comportamento das propriedades.

A Figura 45 mostra o aparato experimental desenvolvido para realizar o ensaio estático no corpo de prova.

Figura 45 – Dispositivo para ensaio de Compressão



Fonte:Próprio Autor

Uma vez conhecidos os limites de variação do regime, deve-se adaptar a metodologia de ensaio, aplicando um ganho diferente ao shaker em cada uma das frequências, buscando garantir uma força mais controlada e conseqüentemente uma deformação constante em todas as frequências, eliminando assim a variação das propriedades em função da deformação, o que permitirá analisar mais detalhadamente a influência do ângulo de incidência do campo.

Referências

- ALMEIDA, F. C. de. *Isolamento de Vibração de Estruturas de /pontes Utilizando Elastômero Magneto Reológicos*. Dissertação de Mestrado — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 39.
- BEHROOZ, M.; WANG, X.; GORDANINEJAD, F. Performance of a new magnetorheological elastomer isolation system. *Smart Materials and Structures, Bristol*, v. 23, p. 045014, 2014. Citado na página 24.
- BELLUCCI, F. S. Preparação e caracterização de nanocompósitos multifuncionais obtidos com nanopartículas ferroelétricas e paramagnéticas em filmes de borracha natural: Preparación y caracterización de nanocompuestos multifuncionales obtenidos con nanopartículas ferroelétricas y paramagnéticas en películas de caucho natural. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente - SP, 2013. Citado na página 51.
- CANTERA, M. A. et al. Modeling of magneto-mechanical response of magnetorheological elastomers (mre) and mrebased systems: a review. *Smart Materials and Structures, Bristol*, v. 26, p. 21, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 35.
- CARVALHO, H. E. L. de. *Caracterização de um material Magneto Reológico para amortecimento semiativo de vibração em estruturas*. Trabalho de Graduação — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2019. Citado na página 38.
- CHEN, L. et al. Investigation on magnetorheological elastomers based on natural rubber. *Journal of Materials Science, Connecticut, USA*, v. 42, p. 5483–9, 2007. Citado na página 21.
- CHEN, L.; JERRAMS, S. A rheological model of the dynamic behavior of magnetorheological elastomers. *J. Appl. Phys., Melville, NY, USA*, v. 110, p. 013513, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 30.
- CONCILIO, A.; ANTONUCCI, V.; SACCO, E. *Shape Memory Alloy Engineering: for Aerospace, Structural, and Biomedical Applications*. Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2021. Citado na página 16.
- DENG, H. X.; GONG, X. L. Adaptive tuned vibration absorber based on magnetorheological elastomer. *Journal of Intelligent Materials, Systems and Structures, Warrendale, USA*, v. 18, p. 1205–1210, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 24.
- DYE, D. Shape memory alloys: Towards practical actuators. *Nature materials, UK*, v. 14, n. 8, p. 760, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 17.
- EEM, S.-H.; JUNG, H.-J.; KOO, J.-H. Modeling of magnetorheological elastomers for harmonic shear deformation. *IEEE Transactions Magnetics, San Diego, USA*, v. 48, p. 3080–3, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 6, 29 e 30.
- ELISHAKOFF, I. *Mechanical Vibration: where do we stand?* Nova Iorque: Springer, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 17.

- ELOY, F. de S. *Estudo do comportamento dinâmico de vigas sanduíche com núcleo honeycomb preenchido com elastômero magneto reológico*. Tese de Doutorado — Universidade Federal de Itajubá, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 6, 32 e 34.
- FAN, Y. et al. Interfacial friction damping properties in magnetorheological elastomers. *Smart Materials and Structures, Bristol*, v. 20, p. 035007, 2011. Citado na página 22.
- FARIA, R. N.; LIMA, E. L. F. C. P. *Introdução ao magnetismo dos materiais*. 1. ed. São Paulo: Livraria da Física, 2014. 198 p. Citado na página 20.
- FERRARA, M.; BENGISU, M. *Materials that change color*. Nova Iorque: Springer, 2014. v. 1. 9-60 p. Citado na página 16.
- FUKUSHIMA, J. C. *Desenvolvimento e caracterização de um Elastômero Magneto-Reológico para aplicação em absorvedores de vibração mecânica*. Dissertação de Mestrado — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 6, 33, 37 e 40.
- GERSTENBERGER, W. The rotary round table: Practical aspects of vibration control. *Journal of the American Helicopter Society, Fairfax, USA*, v. 2, n. 3, p. 3–4, 1957. Citado na página 14.
- GINDER, J. M. et al. Controllable-stiffness components based on magnetorheological elastomers. *Smart Structures and Material 2000: Smart Structures and Integrated Systems, Small City, USA*, Proc. SPIE 3985, p. 418–425, 2000. Citado na página 23.
- GONCALVES, F. D.; KOO, J. H.; AHMADIAN, M. A review of the state of the art in magnetorheological fluid technologies – part 1: Mr fluid and mr fluid models. *The Shock and Vibration Digest, Washington DC, USA*, v. 38, n. 3, p. 203–219, 2006. Citado na página 19.
- GONG, X. et al. Control of the damping properties of magnetorheological elastomers by using polycaprolactone as a temperature-controlling component. *Ind. Eng. Chem. Res., Turku, Finland*, v. 51, p. 6395–403, 2012. Citado na página 22.
- GUR, S.; FRANTZISKONIS, G. Thermally modulated superelastic sma dampers for vibration control. *Athens: ATINER's Conference Paper Series, Athens, Greece*, n. CIV2016-2124, 2016. Citado na página 17.
- HEGDE, S.; POOJARY, U. R.; GANGADHARAN, K. V. Experimental investigation of effect of ingredient particle size on dynamic damping of rtv silicone base magnetorheological elastomers. *Procedia Materials Science, Ostrava-Poruba, Czech Republic*, v. 5, p. 2301–2309, 2014. Citado na página 35.
- HEYWANG, W.; LUBITZ, K.; WERSING, W. Piezoelectricity: evolution and future of a technology. *Springer Science Business Media, Berlim, Alemanha*, v. 114, p. 321, 2008. Citado na página 17.
- JIN, Q. et al. Influence of the particle size on the rheology of magnetorheological elastomer. *Materials Science Forum, China*, v. 809, p. 757–763, 2014. Citado na página 35.
- JOLLY, M. R.; CARLSON, J. D.; MUNOZ, B. C. A model of the behaviour of magnetorheological materials. *Smart Materials and Structures, Bristol*, v. 5, p. 607–614, 1996. Citado 3 vezes nas páginas 19, 21 e 22.

- JORGE, A. et al. Characterisation, modelling and simulation of magnetorheological damper behaviour under triangular excitation. *AZojomo – Journal of Materials Online*, v. 1, 2005. Citado na página 17.
- KALETA, J.; KROLEWICZ, M.; LEWANDOWSKI, D. Magnetomechanical properties of anisotropic and isotropic magnetorheological composites with thermoplastic elastomer matrices. *Smart Materials and Structures, Bristol*, v. 20, p. 12, 2011. Citado na página 22.
- KALLIO, M. *The Elastic and Damping Properties of Magnetorheological Elastomers*. Helsinki: VTT publications, 2005. p. 7 p. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- KANDASAMYA, R. et al. A review of vibration control methods for marine offshore structures. *Ocean Engineering, Glasgow, UK*, v. 127, p. 279–297, 2016. Citado na página 14.
- KATU, U. S.; DESAVALE, R. G.; KANAI, R. A. *Effect Of Vehicle Vibration On Human Body – RIT Experience*. [S.l.], 2003. Disponível em: <<http://www.nacomm03.ammindia.org/Articles/Nav001.pdf>>. Citado na página 14.
- KAVLICOGLU, B. et al. Magnetorheological elastomer mount for shock and vibration isolation. *Proc. SPIE*, v. 7977, p. 79770Y, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- KIM, Y. K. et al. Developing a real time controlled adaptive mre-based tunable vibration absorber system for a linear cryogenic cooler. *IEEE/ASME Int. Conf. Advanced Intelligent Mechatronics*, Budapeste, Julho de 2011, p. 287–90, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 24.
- KUMAR, D. *Design and Analysis of Composite Rotor Blades for Active/Passive Vibration Reduction*. Tese de Doutorado — Universidade de Michigan, 2013. Citado na página 15.
- LANDA, R. A. Magnetic and elastic anisotropy in magnetorheological elastomers using nickel-based nanoparticles and nanochains. *Journal Applied Physics, Maryland, USA*, v. 114, p. 213912, 2013. Citado na página 35.
- LANOTTE, L. et al. The potentiality of composite elastic magnets as novel materials for sensors and actuators. *Sensors Actuators A, Dublin*, v. 106, p. 56–60, 2003. Citado na página 20.
- LEAO, F. B. *Material didático da disciplina Eletrotécnica*. Ilha Solteira, São Paulo: Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2011. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.
- LERNER, A. A.; CUNEFARE, K. A. Performance of mre-based vibration absorber. *Journal of Intelligent Materials, Systems and Structures, Warrendale, USA*, v. 19, p. 551–563, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 18, 23 e 24.
- LI, W. H.; Z., X.; DU, H. Magnetorheological elastomers and their applications. *Adv. Struct. Mater., London*, v. 11, p. 357–374, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 21.
- LI, W. H.; ZHOU, Y.; TIAN, T. F. Viscoelastic properties of mr elastomers under harmonic loading. *Rheology Acta, Berlin, Germany*, v. 49, p. 733–740, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 29.

- LI, Y.; LI, J. Finite element design and analysis of adaptive base isolator utilizing laminated multiple magnetorheological elastomer layers. *14th Int. Conf. on Electrorheological Fluids and Magnetorheological Suspensions, Granada, Espanha*, v. 14, 2014. Citado na página 20.
- LI, Y. et al. A state-of-the-art review on magnetorheological elastomer devices. *Smart Materials and Structures, Small City, USA*, v. 23, p. 24p, 2014. Citado 8 vezes nas páginas 18, 20, 22, 23, 29, 30, 31 e 35.
- LI, Y. et al. A highly adjustable magnetorheological elastomer base isolator for applications of real-time adaptive control. *Smart Mater. Struct., Small City, USA*, v. 22, p. 95–120, 2013. Citado 6 vezes nas páginas 6, 20, 22, 24, 25 e 31.
- LIAO, G. J. et al. Development of a real-time tunable stiffness and damping vibration isolator based on magnetorheological elastomer. *Journal of Intelligent Materials, Systems and Structures, Warrendale, USA*, v. 23, p. 25–33, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 18, 21, 24 e 25.
- LOKANDER, M. *Performance of magnetorheological rubber materials*. Tese de Doutorado — KTH, Estocolmo, 2004. Citado na página 22.
- LOKANDER, M.; STENBERG, B. Performance of isotropic magnetorheological rubber materials. *Polym. Test, UK*, v. 22, p. 245–251, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- MACHADO, L. P. *Elastômeros Magneto-Reológicos: Influência da orientação das partículas na capacidade de amortecimento de vibrações*. Dissertação de Mestrado — Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2021. Citado na página 39.
- MEYERS, M. A.; CHAWLA, K. K. *Mechanical Behaviors of Materials*. 2^a. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 880 p. Citado na página 29.
- MEZGER, T. *The rheology handbook : 4th edition*. Vincentz Network, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- MUNOZ, B. C.; JOLLY, M. R. *Composites with field responsive rheology Performance of Plastics*. Berlin: Munich Carl Hanser Verlag, 2001. 553–574 p. Citado na página 20.
- OPIE, S.; YIM, W. Design and control of a real-time variable modulus vibration isolator. *Intelligent Matererials, Systems and Structures, Warrendale, USA*, v. 22, p. 113–125, 2011. Citado 4 vezes nas páginas 22, 24, 25 e 31.
- PARIDA, B.; INIYAN, S.; GOIC, R. A review of solar photovoltaic technologies. *Renewable and sustainable energy reviews, UK*, v. 15, p. 1625–1636, 2011. Citado na página 15.
- POPP, K. et al. Mre properties under shear and squeeze modes and applications. *Journal of Intelligent Materials, Systems and Structures, Warrendale, USA*, v. 21, p. 1471–1477, 2010. Citado na página 19.
- QADER, I. N. et al. A review of smart materials: Researches and applications. *El-Cezerî Journal of Science and Engineering, Ankara turkey*, v. 6, n. 3, p. 755–788, 2019. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 17.

- RABINOW, J. The magnetic fluid clutch. *AIEE Transactions*, v. 67, p. 1308–1315, 1948. Citado na página 18.
- RAO, S. *Mechanical Vibrations*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 28.
- RUDDY, C.; AHEARNE, E.; BYRNE, G. A review of magnetorheological elastomers: properties and applications. In: . [S.l.: s.n.], 2007. Citado 3 vezes nas páginas 15, 18 e 19.
- SHEN, Y.; GOLNARAGHI, M. F.; HEPPLER, G. R. Experimental research and modeling of magnetorheological elastomers. *Journal of Intelligent Materials, Systems and Structures, Warrendale, USA*, v. 15, p. 27–35, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 35.
- SILVA, T. da. *Caracterização dinâmica de elastômeros magneto-reológicos*. Tese de Doutorado — Universidade Federal do Paraná (UFP), 2020. Citado 3 vezes nas páginas 6, 32 e 33.
- SINKO, R. et al. Design and test of an adaptive vibration absorber based on magnetorheological elastomers and a hybrid electromagnet. *Journal of Intelligent Materials, Systems and Structures, Warrendale, USA*, v. 24, p. 803–812, 2013. Citado na página 22.
- STEPANOV, G. V. et al. Effect of a homogeneous magnetic field on the viscoelastic behavior of magnetic elastomers. *Polymer, Austi, Texas, USA*, v. 48, p. 488–495, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 35.
- SUI, L.; SHI, X. X. G. Piezoelectric actuator design and application on active vibration control. *Physics Procedia, Fort Worth, USA*, v. 25, p. 1388 – 1396, 2012. Citado na página 17.
- TAKEWAKI, I. Earthquake input energy to two buildings connected by viscous dampers. *Journal of Structural Engineering, New York, N.Y.*, v. 133, p. 620–628, 2007. Citado na página 17.
- TIAN, T. F.; LI, W. H.; DENG, Y. M. Sensing capabilities of graphite based mr elastomers smart mater. *Smart Materials and Structures, Bristol*, v. 20, p. 025022, 2011. Citado na página 22.
- WANG, J.; MENG, G. Magnetorheological fluid devices: principles, characteristics and applications in mechanical engineering. *Proc. Inst. Mech. Eng. L J. Mater. Des. Appl., United Kingdom*, v. 215, p. 165–174, 2001. Citado na página 23.
- WANG, Y. et al. Effects of rubber/magnetic particle interactions on the performance of magnetorheological elastomers. *Polymer Testing, Lausanne, Switzerland*, v. 25, p. 262–7, 2006. Citado na página 22.
- YALCINTAS, M.; DAI, H. Magnetorheological and electrorheological materials in adaptive structures and their performance comparison. *Smart Materials and Structures, Bristol*, v. 8, 1999. Citado na página 19.
- YANG, J. *An introduction to the theory of piezoelectricity*. Berlim, Alemanha: Springer Science Business Media, 2004. v. 9. Citado na página 16.

YING, Z. G.; NI, Y. Q. Micro-vibration response of a stochastically excited sandwich beam with a magnetorheological elastomer core and mass. *Smart Materials and Structures, Bristol*, v. 18, p. 095005, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 6, 24, 25 e 26.

ZHANG, X.; LI, W.; GONG, X. L. An effective permeability model to predict field-dependent modulus of magnetorheological elastomers. *Communications Nonlinear Science and Numerical Simulations, Madrid, Spain*, v. 13, p. 1920–6, 2008. Citado na página 20.

ZHOU, G. Y.; WANG, Q. Study on the adjustable rigidity of magnetorheological-elastomer-based sandwich beams. *Smart Materials and Structures, Bristol*, v. 15, p. 59–74, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 26.