



Dissertação de Mestrado

Proposta de Construção de um Amortecedor
de Vibração Ajustável, TVA, Utilizando Fluido
Magnetoreológico

Camilo Mesquita Neto

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte do requisito exigido para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**

Orientador: Prof.Dr. Vicente Lopes Junior

Co-orientador: Prof. Dr. Michael J. Brennan

Ilha Solteira, fevereiro de 2008.

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

M582p	Mesquita Neto, Camilo. Proposta de construção de um amortecedor de vibração ajustável, TVA, utilizando fluido magnetoreológico / Camilo Mesquita Neto. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2008. 101 f. : il. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2008 Orientador: Vicente Lopes Júnior Co-orientador: Michael J. Brennan Bibliografia: p. 94-101 1. Fluido magnetoreológico. 2. Absorvedor de vibrações ajustáveis. 3. Viga sanduíche. 4. Campos magnéticos. 5. Método de predição de erros – PEM.
-------	--



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Proposta de Construção de um Amortecedor de Vibração Ajustável, TVA, Utilizando Fluido Magnetoreológico

AUTOR: CAMILO MESQUITA NETO

ORIENTADOR: Prof. Dr. VICENTE LOPES JUNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA MECÂNICA pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. VICENTE LOPES JUNIOR
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. HERMES ADOLFO DE AQUINO
Departamento de Física e Química / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. EDSON ANTONIO CAPELLO SOUSA
Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru

Data da realização: 29 de fevereiro de 2008.

Presidente da Comissão Examinadora
Prof. Dr. VICENTE LOPES JUNIOR

Dedicatória

Dedico este trabalho a minha família, principalmente a meus pais Walter e Virginia de Fátima, a meus irmãos Walter e Melina e a minha namorada Vivian pelo apoio e paciência.

AGRADECIMENTOS

A DEUS por me dar Saúde, bons amigos e uma família que sempre me apoiou.

Ao meu orientador Prof. Dr. Vicente Lopes Júnior pela oportunidade, confiança, paciência e por sempre estar disponível quando preciso.

A minha família e principalmente a minha namorada Vivian Testa pelo apoio e paciência.

Aos amigos e amigas do Grupo de Materiais e Sistemas Inteligentes (GMSINT), pelo apoio, por compartilhar seus conhecimentos. Em especial agradecer aos amigos Douglas Dominges Bueno, Rodrigo Borges Santos, Clayton Rodrigo Marqui e Fabrício César Lobato de Almeida por sempre me incentivar e me ajudar nos momentos que surgiram dúvidas no decorrer do projeto. Também, aos amigos Paulo Henrique Tozoni Palma, Samuel da Silva e Adriana Tavares pelo apoio e pela amizade.

Aos professores Márcio Antonio Bazani e Amarildo Tabone Paschoalini, por compartilhar parte de seus conhecimentos. Em especial ao professor Hermes Adolfo de Aquino, do Departamento de Física e Química da UNESP/Ilha Solteira, pois com sua amizade muito me incentivou e ajudou nos estudos.

Aos professores Antonio Eduardo Turra e Gilberto Pechoto de Melo que me ajudaram a dar continuidade ao meu trabalho quando meu orientador esteve ausente.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e a CAPES pelo suporte financeiro.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Mecânica que me ajudaram quando necessário, principalmente Carlos José Santana e Reginaldo Cordeiro da Silva.

Aos amigos da república Kabulete pelo apoio, amizade e pelos momentos de descontração.

Viva com simplicidade.

Porque complicar as coisas?

Você acabará atrapalhando sua própria vida, porque as complicações nos atrasam. Seja simples e eficaz.

A simplicidade olha a natureza sem colocar óculos. Quando puder resolva as coisas sem complicação, faça-o em seu próprio benefício.

Busque na simplicidade a solução de todos os seus problemas.

C. Torres Pastorino

MESQUITA NETO, C. **Proposta de Construção de um Amortecedor de Vibração Ajustável, TVA, Utilizando Fluido Magnetoreológico** 2008. Dissertação de Mestrado (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado uma proposta de absorvedor de vibrações ajustável tipo viga sanduíche utilizando fluido Magnetoreológico no centro. Para o desenvolvimento deste projeto foi realizada uma revisão sobre os vários tipos de absorvedores e algumas aplicações. Em seguida foi realizado um estudo sobre o comportamento do fluido magnetoreológico, mostrando como este material inteligente varia suas propriedades quando submetido a um campo magnético. O objetivo do estudo foi verificar as propriedades do sistema para realização de um futuro controle, que é realizado através da variação do campo magnético. Avaliou-se, também, a relação com a corrente elétrica, quais os parâmetros que o influenciam e como podemos produzir um campo magnético com a intensidade desejada. Para avaliar as características do sistema foi utilizado o modelo no programa Ansys, com o objetivo de se verificar o comportamento do sistema. Para encontrar as características reais do sistema foi utilizado o modelo na forma de espaço de estados modais, identificado através do método PEM, Método de Predição de Erros (do inglês *Prediction Error Methods* – PEM). Os testes experimentais foram realizados para se adquirir conhecimento do comportamento dinâmico deste tipo de fluido e, verificar se há repetibilidade nas medidas.

Palavras-chaves: Fluido Magnetoreológico, Absorvedor de Vibrações Ajustáveis, Viga Sanduíche, Campo magnético, Método de Predição de Erros – PEM.

MESQUITA NETO, C. **Proposal of a Tuned Vibration Absorber (TVA) Using Magnetorheologic Fluid.** 2008. Master of Science (Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

ABSTRACT

This work presents a proposal of a tunable vibrations absorber type sandwich beam, using the Magnetorheologic fluid in the intermediate layer. For the development of this study a revision of some types of absorber with some applications was carried out. After that, a study of the behavior of the magnetorheologic fluid was carried through, showing as this intelligent material tunable its properties when submitted to a magnetic field. The objective of this analysis was to verify the properties of the system for implementation of a future control, which is based on the variation of the magnetic field. It was realized an analysis of the relation of the electric current and the parameters that influence it, in order to produce a magnetic field with the desired intensity. The characteristics of the system were verified through a mathematical model obtained with the software Ansys. The real characteristics of the system were found through the identification method PEM, Prediction Error Methods, using modal space states formulation. Experimental tests were carried out in order to obtain know how of the dynamic behavior of this type of material.

Keywords: Magnetorheological Fluid, Tunable Vibrations Absorber, Sandwich Beam, Magnetic Field, Prediction Error Methods – PEM.

Lista de Figuras

- Figura 1.1 - Helicóptero Apache com canhão M230 que utiliza amortecedores com fluidos MR. 21
- Figura 2.1 - Fluido MR sem campo magnético (a), com campo magnético (b) -Lord Materials Division, (2004) 26
- Figura 2.2: Tensão de cisalhamento (τ) vs. Razão de deformação $\dot{\gamma}$ para fluidos MR com vários campos magnéticos (Srinivasan and D. M. McFarland 2001) 26
- Figura 2.3: Três formas básicas da resposta do Fluido MR: (a) direct sheer mode(modos de corte direto), (b) modo Válvula, (c) squeeze film mode(modos de filme comprimido), Milecki (2001) 27
- Figura 2.4: Características Tensão-deformação de fluidos MR (Srinivasan and McFarland (2001)) 28
- Figura 2.5: Propriedades de cisalhamento para o fluido MR [Harland, 1999] 29
- Figura 2.6: Elemento de corrente-comprimento $id\vec{s}$ produzindo um campo magnético diferencial $d\vec{B}$ no ponto P 30
- Figura 2.7: Calculo do campo magnético produzido por uma corrente i em um fio reto longo 31
- Figura 2.8: (a) Fio no formato de arco com centro em C transportando uma corrente i . (b) Para qualquer fio ao longo do arco, o ângulo entre as direções de $d\vec{s}$ e $\vec{r}$ é igual a 90° . (c) Determinação do sentido do campo magnético no centro de C devido à corrente no fio 33

Figura 2.9: Usando a Lei de Ampère para determinar o campo magnético produzido por uma corrente i em um fio reto longo. O laço de Ampère é um círculo concêntrico localizado do lado de fora do fio	34
Figura 2.10: Esquema de um solenóide ideal – comprimento muito maior que seu diâmetro	35
Figura 2.11: Representação de um corte vertical passando pelo eixo central em um solenóide	35
Figura 2.12 - Linhas de campo magnético para um solenóide real de comprimento finito	36
Figura 2.13: Aplicação da Lei de Ampère a um trecho de um solenóide ideal longo transportando uma corrente i . O laço de Ampère é o retângulo $abcd$	36
Figura 3.1: Figura retirada do programa Ansys, representando a viga sanduíche	47
Figura 3.2: Figura retirada do programa Ansys, representando a viga sanduíche com elementos diferentes	47
Figura 4.1: Dimensões da viga Sanduíche	58
Figura 4.2: Viga sanduíche utilizada nos testes experimentais	59
Figura 4.3: Figura esquemática da montagem experimental	59
Figura 4.4: Foto do Martelo de impacto e amplificadores	60
Figura 4.5: Foto do Acelerômetro PCB acoplado a viga sanduíche	60
Figura 4.6: Foto da Placa dSpace 1103	60

Figura 4.7: Dois solenóides, um de frente para o outro, para aplicação uniforme do campo magnético	61
Figura 4.8: Dimensões do Núcleo utilizado	62
Figura 4.9: Gerador de corrente modelo PS 3003 D	62
Figura 4.10: Gráfico mostrando o comportamento da estrutura em função da variação do o amortecimento do elemento 2	64
Figura 4.11: Gráfico da variação de amplitude para a primeira frequência natural em função do amortecimento	65
Figura 4.12: Foto do equipamento para medir o campo magnético – Gaussmeter	66
Figura 4.13: Figura esquemática com a posição dos pontos de medida do campo magnético, sendo $L = 35 \text{ mm}$ e $C = 55 \text{ mm}$	67
Figura 4.14: Foto da placa de acrílico entre os solenóides	67
Figura 4.15: Distribuição do Campo Magnético em relação aos Pontos de medida; (a) Vista tridimensional; (b) vista lateral; (c) vista superior	68
Figura 4.16: Relação entre variação da distância entre solenóides e campo magnético; (a) valor do campo no ponto 3A; (b) valor do campo no ponto 3D (centro do solenóide); (c) valor do campo no ponto 3G	70
Figura 4.17: Foto da viga sanduíche no centro dos solenóides	73
Figura 4.18: FFT do sinal de entrada; (a) sinal bom; (b) sinal encontrado em vários casos e que foram descartados	74

Figura 4.19: (a) Sinal de entrada (input); (b) Resposta ao impulso da viga sem silicone	76
Figura 4.20: Gráfico da Função de Resposta em Freqüência de uma viga de acrílico	77
Figura 4.21: Gráfico da Função de Resposta em Freqüência da viga sanduíche com silicone, sem o fluido magnetoreológico no centro	78
Figura 4.22: Gráfico da Função de Resposta em Freqüência da viga sanduíche com silicone, sem o fluido magnetoreológico no centro	79
Figura 4.23: Gráfico da Função de Resposta em Freqüência para seis amostras com o fluido magnetoreológico no centro das vigas e campo magnético igual a zero	80
Figura 4.24: FRF do absorvedor de vibrações ajustável (TVA) para diversas aquisições (a); detalhes da variação do segundo modo de vibrar para o campo magnético do teste 2 (0.010 Tesla)	82
Figura 4.25: FRF do TVA para diversas aquisições; (a) FRF para o campo 13 (0.081); (b) detalhes da variação do segundo modo de vibrar para o campo magnético do teste 13 (0.081 Tesla)	83
Figura 4.26: FRF média do TVA para os valores do campo magnético relativos aos testes de 0 a 5	85
Figura 4.27: (a) FRF do TVA para diversos valores do campo magnético; (b) zoom para visualizar o comportamento do segundo modo de vibrar	86
Figura 4.28: FRF do TVA para ensaios realizados com valores iguais do campo magnético; (a) ensaio para os campos magnético 1 e 25; (b) ensaio para os campos magnético 10 e 16 e (c) ensaio para os campos magnético 3 e 23	89

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Frequência natural e propriedades utilizadas no modelo do programa Ansys	63
Tabela 4.2: Valores do amortecimento utilizado no programa Ansys para cada ensaio	64
Tabela 4.3 Pontos de Medidas de Campo Magnético no Núcleo do Solenóide	66
Tabela 4.4: Distribuição do Campo Magnético no núcleo	69
Tabela 4.5: Valores do Campo magnético e distância entre os solenóides	69
Tabela 4.6: Dados necessários para o cálculo teórico do campo magnético	71
Tabela 4.7: Comparação entre o campo magnético teórico e experimental para o solenóide	71
Tabela 4.8: Valores do campo magnético e das respectivas corrente elétrica aplicada	81
Tabela 4.9: Valores de amortecimento para cada campo magnético estimados pelo método PEM	87

Lista de Símbolos

$\text{diag}(\mathbf{A}_{mi})$	Matriz diagonal com elementos de A_m na diagonal
TVA	“Tuned Vibration Absorber”
EDOL	Equações Diferenciais Ordinárias Lineares
$\ \ ^2$	Norma euclidiana

Letras Gregas

τ	Tensão de cisalhamento
ν	Viscosidade
ϕ	Razão de deformação
τ_y	Tensão de escoamento
θ_i	Ângulo entre $\dot{s}$ e r
θ	Vetor de parametrização
$\hat{\theta}_N$	Vetor com valor estimado para o vetor θ
μ_0	Constante de permeabilidade
ω_i	I-ésima frequência natural do sistema
ϕ_i	I-ésimo modo natural ou forma dos modos
α	Constantes
β	Constantes
Φ	Matriz modal
Φ^T	Matriz modal transposta
$\Phi_u(\omega)$	Espectro de entrada
$\Phi_v(\omega)$	Espectro do distúrbio adicionado v
Φ_{eu}	Espectro cruzado entre $e(t)$ e $u(t)$
Ω	Matriz de frequências naturais
ζ_i	Fator de amortecimento do i-ésimo modo
ω	Frequência

Letras Latinas

$\mathbf{A}_1$	Constantes
$\mathbf{A}_2$	Constantes
$\mathbf{A}_3$	Constantes
$\mathbf{A}_4$	Constantes
$\mathbf{A}_m$	Matriz dinâmica
$\mathbf{A}_{mk}$	Matriz dinâmica $\mathbf{A}_m$ na forma modal k
$\mathbf{B}_m$	Matriz de entrada modal
$\mathbf{B}_0$	Matriz de entrada do sinal de controle
$\mathbf{C}_{oq}$	Matriz de saída de deslocamento
$\mathbf{C}_{ov}$	Matriz de saída de velocidade
$\mathbf{C}_{mq}$	Matrizes de saída de deslocamento
$\mathbf{C}_{mv}$	Matrizes de saída de velocidade modal
$\mathbf{D}$	Matriz de amortecimento
$\mathbf{d}\dot{\mathbf{s}}$	Vetor deslocamento diferencial
$\mathbf{e}_i$	Vetor linha
$\mathbf{e}(t)$	Ruído branco
$\mathbf{f}$	Função arbitrária
$\mathbf{G}^*$	Módulo de cisalhamento complexo
$\mathbf{G}'$	Módulo de cisalhamento
$\mathbf{G}''$	Módulo de fator de perda
$\mathbf{G}'_0$	Módulo de cisalhamento no campo zero
$\mathbf{G}''_0$	Módulo de perda de campo
$\mathbf{G}(q, \theta)$	Matriz relacionada com o sinal de entrada $u(t)$
$\mathbf{H}$	Força de campo magnético
$\mathbf{H}(q, \theta)$	Matriz relacionada com o ruído $e(t)$
$\mathbf{I}$	Matriz identidade
$\mathbf{K}$	Matriz de rigidez

l	Medida de distância
M	Matriz de massa
nd	Número de graus de liberdade do sistema
P	Valor do campo magnético
$q(t)$	Vetor de deslocamento
r	Vetor que se estende de $d\mathbf{s}$ até P
r_s	Número de saídas
R_{kr}	Matriz que transforma a variável de estado $\mathbf{x}_k$ na variável $\mathbf{x}_r$
s	Número de entradas na estrutura
$u(t)$	Vetor do sinal de entrada na estrutura
V	Volume
V_i	Sub-domínio do volume V
$v(t)$	Vetor do ruído da saída
$x(t)$	Vetor de posição
$\dot{x}(t)$	Vetor de velocidade
x_1	Vetor de deslocamento modal
x_2	Vetor de velocidade modal
$w(t)$	Vetor de entrada de distúrbios
W_y	Filtros para o modelo LTI - Linear Invariante no Tempo
W_u	Filtros para o modelo LTI - Linear Invariante no Tempo
$y(t)$	Vetor de saídas
$\hat{y}_m(t/t-1)$	Vetor com valores de um passo adiante na predição da saída
Z^N	Matriz com dados coletados em um tempo N
0	Matriz nula

Sumário

Capítulo 1 - Estado da Arte de Absorvedores de Vibração

1.1. Introdução	17
1.2. Organização do trabalho	23

Capítulo 2 - Conceitos Básicos Envolvidos na Proposta do TVA

2.1. Características dos fluidos MR	25
2.2 Conceitos Básicos sobre Magnetismo	29
2.2.1 Cálculo do Campo magnético devido a uma corrente	29
2.2.2 Cálculo do campo magnético devido a uma corrente em um fio reto longo	31
2.2.3 Campo magnético devido a uma corrente em um arco circular de fio	32
2.2.4 Campo magnético fora de um fio reto longo com corrente	34
2.2.5 Solenóides	35

Capítulo 3 – Modelagem da Estrutura

3.1. Modelo Matemático – EDOL	38
3.2. Modelos Estruturais no Espaço de Estados	41
3.3 Modelagem por Elementos Finitos	44
3.4 Métodos de Identificação de Sistemas	48
3.4.1 Método de Predição de Erros	48
3.4.2. Parametrização de Modelos	50
3.4.3 Modelos Lineares	51
3.4.4 Modelo Linear Caixa – Preta	52
3.4.5 Técnica de Estimação	53
3.4.6 Propriedade de Convergência	54
3.4.7 Sistema Linear de Malha Aberta	55
3.4.8 Sistema Linear de malha fechada	56
3.4.9 Uso do Método de Predição de erro (PEM)	57

Capítulo 4 – Resultados Obtidos

4.1 Materiais	58
4.2 Resultados obtidos com o programa Ansys	62
4.3 Resultados obtidos experimentalmente	65

Capítulo 5 – Discussões Finais

5.1 Discussão	90
5.2 Conclusão	92
5.3 Propostas para trabalhos futuros	92
5.4 Artigos originados desta dissertação	93

Referências	94
--------------------	----

Capítulo 1 - Estado da Arte de Absorvedores de Vibração

1.1. Introdução

Nas últimas décadas tem aumentado o interesse de engenheiros e pesquisadores no uso de sistemas de controle para atenuar os efeitos nocivos de vibrações causadas pela própria dinâmica dos equipamentos ou por eventos sísmicos. Este controle pode ser feito através de três formas, por um absorvedor passivo; semi-ativo; ou ativo.

O absorvedor passivo pode ser feito de duas formas. Em uma delas se considera o material viscoelástico no sistema para diminuir a vibração, ou seja, isolar o sistema da fonte de excitação. Um exemplo deste tipo de absorvedor é o coxim em um motor de um automóvel, que isola a vibração do motor com relação ao chassi do carro. O outro tipo de absorvedor é o denominado geralmente, por absorvedor dinâmico. Neste caso é acoplada a estrutura um novo sistema que possui massa, amortecimento e rigidez. A principal vantagem dos absorvedores passivos está no seu baixo custo e a desvantagem é o fato de não possibilitarem uma alteração das suas propriedades (como massa, rigidez ou amortecimento) para se adaptar as variações que podem ocorrer no sistema original. Portanto só apresentam um bom desempenho para a faixa de frequência que foram projetados.

O absorvedor semi-ativo é similar ao passivo, no sentido em que remove energia do sistema. Contudo, o sistema semi-ativo é capaz de mudar uma ou mais propriedades em resposta a um sinal de comando (SRINIVASAN et al., 2001), ao contrário do passivo, onde as propriedades são constantes. Por ter a capacidade de mudar as propriedades do sistema, uma grande força dissipativa deve ser aplicada para retirar energia do sistema com pequena energia de entrada. Absorvedores semi-ativos podem apenas remover energia do sistema, portanto, são inerentemente estáveis. Um exemplo de sistema semi-ativo é o absorvedor de choque com um orifício variável, que permite a alteração do coeficiente de amortecimento quando necessário.

O sistema com absorvedor ativo é controlado por um computador através dos sinais de entrada dos sensores. Diferentemente do sistema passivo e semi-ativo, o sistema ativo é capaz de adicionar grande energia ao sistema. Um exemplo de sistema ativo é o atuador eletromecânico, que gera uma força em resposta a um sinal de retroação de velocidade ou deslocamento. A meta do absorvedor ativo é fornecer forças de igual magnitude e em fase oposta à da vibração de entrada. Neste sentido, um

sistema de absorvedor ativo pode promover um melhor desempenho para atenuação de ruído, por exemplo. Contudo, há desvantagens para sistemas ativos, pois são dependentes do projeto e necessitam de sensores e processos para fornecer dados em tempo real. Uma grande quantidade de energia é, freqüentemente, necessária para operar o absorvedor ativo. Estas características necessárias para este tipo de absorvedor tornam o projeto mais caro. Estabilidade é também uma questão importante para a escolha do projeto de absorvedor ativo de vibrações.

Neste contexto, atenção especial tem sido dada para pesquisas e desenvolvimento de sistemas de controle de vibrações semi-ativos, pois estes possuem menor custo, não desestabilizam o sistema e precisam de um pequeno suprimento de energia. Estes sistemas não oferecem apenas a confiabilidade do sistema de controle passivo, mas também a versatilidade e adaptabilidade do sistema de controle ativo. Vários equipamentos e materiais têm sido investigados para desenvolver estes novos sistemas, dois destes novas matérias são o fluido magnetoreológico (MR) e o eletroreológico (ER), que vêm sendo pesquisados e utilizados em aplicações de sistemas de absorvedores semi-ativos. Estes dois fluidos possuem comportamentos similares. A diferença entre fluidos MR e ER é que as propriedades do fluido MR são alteradas quando ele é exposto a um campo magnético, enquanto, as propriedades de fluidos ER são alteradas quando exposto a um campo elétrico. O número de estudos envolvendo fluidos MR tem crescido de maneira significativa ultimamente, pois as características de fluidos MR são consideradas mais benéficas que aquelas dos fluidos ER. Um estudo apresentado por Lord Materials Division (2004) mostrou que existem três importantes vantagens dos fluidos MR. Primeira, os fluidos MR exigem fontes de voltagem mais baixa que fluidos ER. Segunda, fluidos MR são menos sensíveis a contaminação que os fluidos ER. Por último, fluidos MR geralmente, suportam maiores tensões que fluidos ER. Na proposta desta pesquisa serão enfocados apenas os fluidos MR.

O fluido MR consiste de um fluido base com micro partículas magnéticas em suspensão (este fluido base pode ser água, óleo, silicone, ou qualquer fluido que tenha por característica não reagir com o campo magnético nem com as partículas em suspensão). Na presença de um campo magnético, as partículas magnéticas em suspensão se alinham com o campo formando uma “corrente”, como mostrado na figura (2.1). Este comportamento, em particular, é muito útil em absorvedores de vibrações, uma vez que entre as partículas desta “corrente” há uma força de cisalhamento. Quando esta estrutura é submetida a uma vibração, estas “correntes” se quebram, dissipando

energia, e o campo causa uma recomposição desta corrente. Esta continua quebra e reconstituição das correntes permite ao fluido dissipar energia do sistema (KARNOPP et al., 1984; SPENCER et al., 1997; JOLLY et al., 1998; SRINIVASAN et al., 2001). Além das características citadas acima como resposta rápida e baixa necessidade de energia, a capacidade de mudar a tensão, a ampla faixa de temperatura operacional e a facilidade de implementação com baixo custo, em relação à sistemas de absorvedores ativos, tornam este tipo de absorvedor uma ótima opção para projetos inovadores. Várias aplicações que utilizam o fluido MR na forma de amortecedor em absorvedores semi-ativos têm sido relatadas.

Na engenharia civil há uma grande preocupação em controlar a resposta das estruturas as excitações nocivas causadas por eventos naturais, como terremotos e ventos fortes. O sistema semi-ativo com amortecedor MR tem demonstrado ótimas características para estes casos. Dyke et. al.(1996) demonstram experimentalmente a habilidade do amortecedor MR para reduzir a vibração estrutural sobre uma ampla variedade de condições de carregamentos. Yoshida e Dyke (2005) estudaram o desempenho de um sistema de controle usando amortecedor MR quando aplicado a um modelo numérico em escala completa para edifícios irregulares. Wu e Cai (2006) estudaram a eficiência do amortecedor MR para controle de vibração em cabos sujeitos a diferentes condições de carregamentos, incluindo corrente elétrica, frequência de excitação, tipos de onda de excitação e temperatura de trabalho. Cai et. al.(2006) propuseram uma teoria linear para o problema de vibrações livres e forçadas em cabos de pontes levemente inclinados com um sistema de amortecimento com massas ajustáveis. Exemplo destes tipos de dispositivos estão atualmente implementados na Ponte de Dong Ting Lake na China (AMAZING, 2003). Unsal et. al.(2006) trabalharam com um modelo de absorvedor (isolador) de vibrações com 6 GL (graus de liberdade) com controle semi-ativo para plataformas paralelas.

Na área automobilística há preocupação em melhorar o conforto, controlabilidade e dirigibilidade dos veículos. Os sistemas de suspensão semi-ativas com amortecedores MR estão sendo pesquisados e implementados. Simon (1998) estudou o sistema de atenuação de vibração utilizando uma suspensão semi-ativa com amortecedor de fluido MR em um veículo Scania Volvo VN. A proposta foi baseada no controlador “skyhook”. Paré (1998) realizou um estudo teórico do fluido e do amortecedor MR fabricado pela Lord© para um sistema de um grau de liberdade. Foi proposto um modelo teórico e, via Matlab se efetuou o controle “Skyhook”, “ground-

hook” e híbrido. Simon e Ahmadian (2001) utilizaram o mesmo sistema de suspensão e controle proposto por Simon (1998), mas agora para um veículo *off-road* (fora da estrada) da Scania. Yao et. al.(2002) projetaram, fabricaram e desenvolveram um modelo para estimar os parâmetros experimentalmente do amortecedor com MR, para aplicação em uma suspensão de veículo utilizando o método de controle “Skyhook”. Moura et. al.(2002) estudaram a utilização de suspensões ativa, semi-ativa com fluido magnetoreológico e passiva para um modelo de meio veículo com 4 GL utilizando o método de controle linear quadrático(LQR). Deivys (2003) faz uma comparação entre três tipos de suspensão veicular: ativa utilizando a teoria de controle ótimo (LQR); semi-ativa utilizando amortecedor com fluido MR e; a técnica de controle continuamente variável baseado nas velocidades relativas entre carroceria e eixos. Zribi e Karkoub (2004) propuseram um esquema de controle robusto para a suspensão de carros considerando um modelo de meio veículo e a dinâmica do passageiro. Shen, et. al.(2006(a)) investigaram três métodos de controle semi-ativo usando amortecedor com fluido MR comercial. Os métodos foram o de deslocamento relativo limitado (LRD), o método Rakheja-Sankar (R-S) modificado e o de controle “Skyhook” (MSK) modificado.

Exemplos de aplicações destes sistemas de suspensão semi-ativa usando fluido MR podem ser encontrados em veículos militares do exército Norte Americano (MAGNETORHEOLOGICAL, 2004). Amortecedores similares, também, foram usados em um helicóptero Apache AH 64 para controlar (absorver) a vibração provocada pela força de recuo existente depois dos disparos, figura 1.1 (MAGNETORHEOLOGICAL (MR) RECOIL, 2004). Shen et. al.(2006b) propuseram um sistema de suspensão semi-ativa com amortecedor MR em uma locomotiva e compararam a eficiência deste sistema com relação as suspensões passiva e ativa.

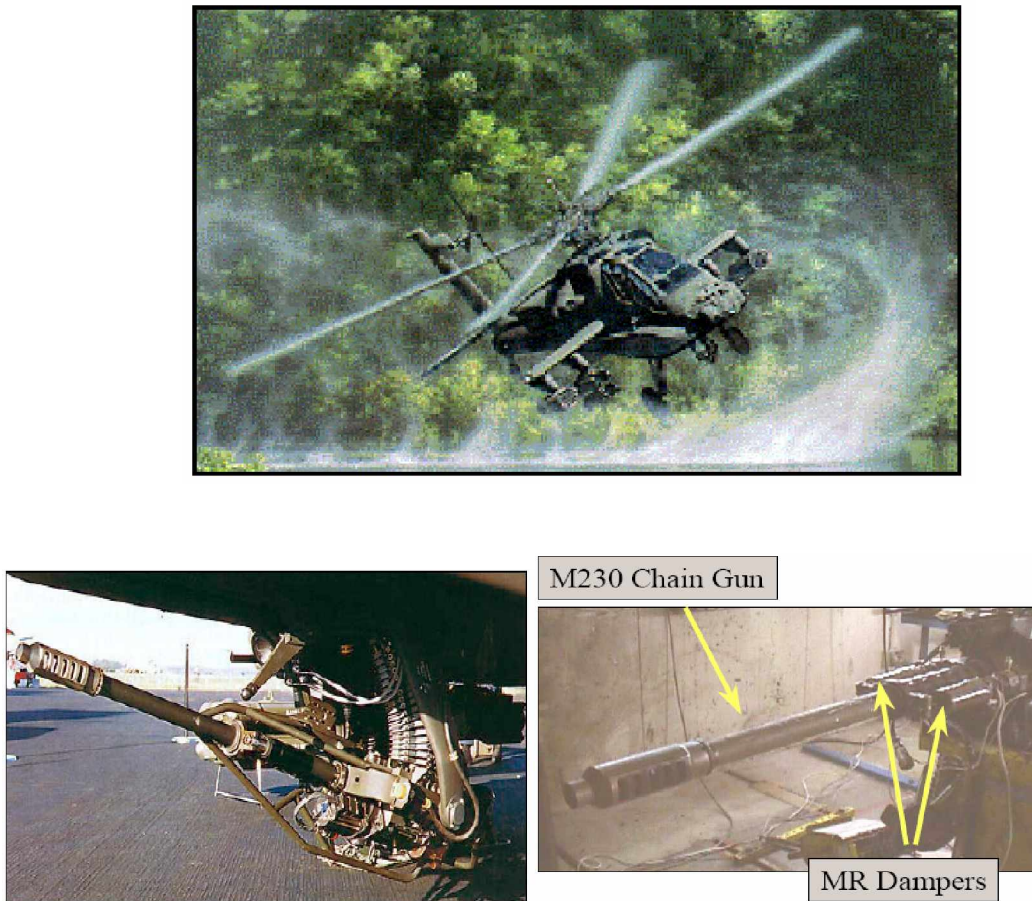


Figura 1.1: Helicóptero Apache com canhão M230 que utiliza amortecedores com fluidos MR.

Na aeronáutica, Wereley et. al.(1999) compararam dois modelos de amortecedores MR não lineares para aplicações no controle de vibrações da hélice em rotores de helicópteros. Os testes experimentais foram realizados em um túnel de vento utilizando um modelo em escala de 1/6 do rotor do helicóptero Comanche. Gandhi et. al.(2001) investigaram a viabilidade de aplicar uma lei de controle robusto linear com retro-alimentação para estabilizar o helicóptero e reduzir os efeitos de forças periódicas.

Na área de absorção de vibrações em sistemas mecânicos, o fluido MR está sendo usado para controlar a vibração de rotores, principalmente, quando passam pela velocidade crítica. Wang e Meng (2005) propuseram um modelo usando o modo de cisalhamento da resposta do fluido MR para controle de vibrações de um rotor. Carmignani e Rustighi (2006) apresentam um modelo teórico para a película de filme do amortecedor MR. Resultados simulados foram mostrados para diferentes tipos de fluido.

Outra aplicação interessante para o fluido MR é na área médica, no tratamento de câncer. Nesta proposta de aplicação, o fluido é injetado no sangue pelas veias e levado até o tumor. É aplicado um campo magnético externo na área do tumor para formar a magnetização das partículas (óxido de ferro) do fluido MR. Estas minúsculas partículas formam um sólido próximo dos pólos magnéticos e bloqueiam o fluxo de sangue que chega ao tumor, fazendo com que ele necrose (FLORES ; LIU, 2002).

Diversas são as aplicações em próteses. O Rheo foi o primeiro sistema de joelho artificial inteligente que tem a habilidade de aprender e se adaptar com os movimentos dos usuários. O joelho usa o fluido MR entre as placas de aço que deslizam para gerar o movimento. Com a aplicação de um campo magnético, pode-se controlar a espessura do fluido. No Rheo, a espessura do fluido determina a resistência do joelho. Isso faz com que o sistema bio-mecânico funcione próximo ao real, com um constante ajuste das pressões. Desta forma pode-se reduzir as pressões, e assim a ausência de fluidos de altas pressões elimina a necessidade de lacres e válvulas (CASUALTIES, 2005). Na página da NASA podem ser encontradas outras aplicações que estão em desenvolvimento, ou idéias para futuras aplicações.

Outro tipo de absorvedores de vibrações ajustáveis (TVA, em inglês “Tuned Vibration Absorber”), são aqueles composto de estruturas acopladas, por exemplo, vigas sanduíches. Esta estrutura é composta por duas vigas, que podem ser do mesmo material ou não, que no seu interior possui um material com características ajustáveis, possibilitando a alteração da rigidez ou do amortecimento do sistema. Vários autores estudaram métodos para variar a rigidez do TVA. Flatau et. al. (1998) estudaram um absorvedor de vibração magnetostrictive Terfenol-D e concluíram que a alteração do campo magnético, com conseqüente variação na corrente no solenóide, causa mudanças na rigidez do TVA. Tentor (2001) demonstrou a aplicabilidade de um TVA eletromagnético cuja rigidez pode ser alterada pela variação de correntes. Morgan e Wang (2002) desenvolveram um absorvedor de vibração adaptativo piezelétrico multifrequência cuja rigidez pode ser variada através de uma indutância variável ativa. Hill e Snyder (2002) projetaram um TVA para controlar a radiação de ruído de um transformador elétrico. O TVA consistiu em duas barras com massas nas extremidades. A ressonância do absorvedor pôde ser alterada movendo as massas nas extremidades das barras. Rustighi et. al. (2003) estudaram a liga de memória de forma (SMA) e encontraram que mudança da temperatura do SMA ocasiona alteração no módulo de elasticidade e, conseqüentemente, a rigidez do TVA. Jalili e Esmailzadeh (2003)

desenvolveram um TVA em uma viga bi-engastada utilizando massas concentradas. A rigidez podia ser alterada movimentando as massas na viga. Carneal et. al. (2004) propuseram um TVA para minimizar a radiação de som em chapas excitadas com frequência harmônica. Eles utilizaram um motor de passo para agir como uma massa ativa. Para ajustar a frequência do absorvedor, o motor de passo muda a rigidez do eixo do suporte variando a distância entre o motor de passo e as extremidades. Harland et al (2001) investigaram o controle passivo-adaptativo de vibração em uma viga composta de duas placas elásticas e um núcleo central preenchido com fluido ER ou MR. A vibração da viga pode ser controlada ajustando o campo elétrico ou magnético aplicado ao fluido ER ou MR. Phani e Venkatraman (2003) investigaram o comportamento de uma viga sanduíche com fluido ER no centro. As propriedades de amortecimento dos elementos estruturais foram melhoradas mudando a amplitude do campo elétrico aplicado.

Neste trabalho é estudado o comportamento de um absorvedor de vibrações ajustável (TVA) do tipo viga sanduíche utilizando o fluido Magnetoreológico para variar suas características, com o objetivo de estudar a viabilidade da utilização deste dispositivo no controle de vibrações.

1.2. Organização do trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- No primeiro capítulo é realizada uma introdução sobre absorvedores de vibrações, tipos de amortecimento, materiais com propriedades ajustáveis e, exemplos de aplicações;
- O segundo capítulo apresenta um estudo sobre o fluido Magnetoreológico, mostrando o comportamento e a forma como varia suas características quando submetido ao campo magnético;
- O terceiro capítulo aborda os conceitos sobre campo magnético e a forma de se obter um campo magnético ajustável. Neste capítulo também é apresentada a modelagem da estrutura usando o modelo dinâmico de segunda ordem em coordenadas física e modal, a realização no espaço de estados e, ainda, o modelo representativo no programa Ansys. Neste capítulo são mostradas as vantagens da metodologia proposta;

- No quarto capítulo são mostrados os resultados experimentais, apresentando o comportamento do absorvedor e mostrando o estudo realizado para garantir que o campo magnético seja uniforme na região onde o absorvedor se encontra.
- O capítulo cinco apresenta as conclusões finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Conceitos Básicos Envolvidos na Proposta do TVA

Neste capítulo são estudados os conceitos básicos utilizados na proposta de construção do absorvedor de vibrações ajustável tipo viga sanduíche. Este absorvedor consiste de duas vigas com o fluido magnetoreológico (MR) no seu interior. As propriedades deste absorvedor serão ajustadas variando as propriedades do fluido MR. Também é estudado como o fluido varia suas propriedades em função do campo magnético aplicado e os conceitos eletromagnéticos.

2.1. Características dos fluidos MR

Srinivasan e McFarland (2001) mostraram que fluidos MR são suspensões de micro partículas de polarização imersos em líquidos inertes. Os fluidos MR se comportam como fluidos Newtonianos quando não existe campo externo. Comportamento Newtoniano é quando a tensão de cisalhamento é proporcional ao produto da viscosidade e da deformação. O comportamento do fluido MR muda de Newtoniano para Bingham quando um campo magnético externo é aplicado. Comportamento plástico de Bingham é quando a tensão de cisalhamento é proporcional ao produto da viscosidade e da razão de deformação mais a tensão de escoamento. Os modelos Newtoniano e de Bingham podem ser escritos nas seguintes formas:

$$\text{Modelo Newtoniano:} \quad \tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

$$\text{Modelo de Bingham:} \quad \tau = \tau_y(H) + \eta \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

onde τ , η , $\dot{\gamma}$, τ_y e H são a tensão de cisalhamento, viscosidade, razão de deformação, tensão de escoamento e força de campo magnético, respectivamente.

Quando existir um campo magnético aplicado a um fluido MR, as partículas se alinham na direção do campo magnético aplicado e adquirem uma forma de corrente, como mostrado na figura (2.1). Estas correntes são resistentes ao cisalhamento e causam tensão de escoamento quando uma força de cisalhamento é aplicada. Pradeep (2001) mostra que os fluidos MR podem desenvolver uma tensão de cisalhamento de até 100 KPa, dependendo da composição das partículas no fluido MR e a densidade de fluxo.

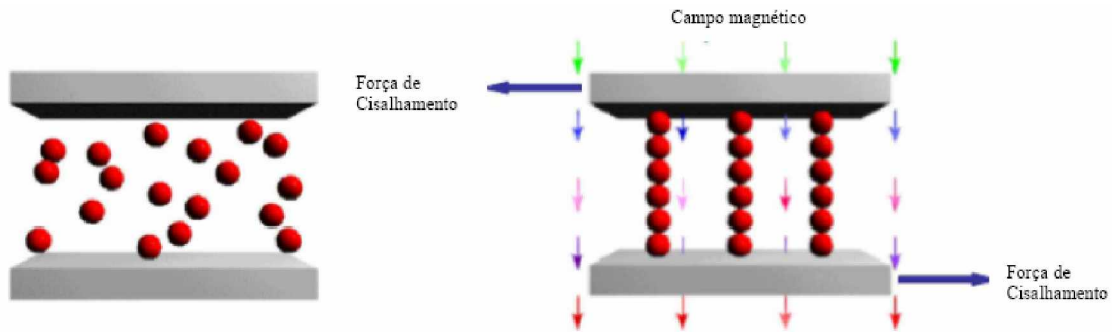


Figura 2.1: Fluido MR sem campo magnético (a), com campo magnético (b) -Lord Materials Division, (2004).

A figura (2.2) mostra a tensão de escoamento dos fluidos MR em função do campo magnético. Pode ser visto nesta figura que o campo magnético causa uma mudança na tensão de escoamento dentro do fluido. Quanto maior o campo magnético, maior o limite da tensão de escoamento que pode ser alcançada.

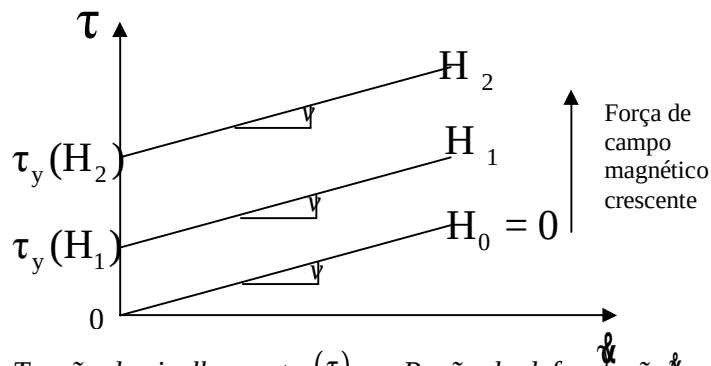


Figura 2.2: Tensão de cisalhamento (τ) vs. Razão de deformação $\dot{\gamma}$ para fluidos MR com vários campos magnéticos (SRINIVASAN ;MCFARLAND, 2001).

Tao (2001) mostra que o tempo de resposta de fluidos MR é geralmente de mais ou menos 10 milissegundos. Isto significa que as partículas magnéticas se alinham em forma de correntes 10 milissegundos depois que um campo magnético é aplicado. Embora fluidos MR tenham um tempo de resposta rápido, este será maior quanto maior for o campo magnético aplicado. Em geral, existem eletroímãs dentro do mecanismo do fluido MR. Se um elevado campo magnético é exigido, os eletroímãs são pesados e volumosos e, neste caso resultam em um tempo de atraso. Este tempo de atraso pode causar problemas para aplicações que exijam campo magnético elevado.

Segundo Milecki (2001) e Yao et. al.(2002), fluidos MR respondem ao campo magnético aplicado de três formas, que são mostradas na figura (2.3):

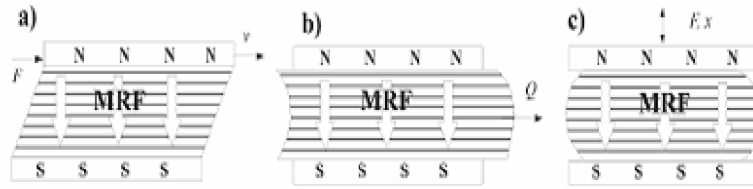


Figura 2.3: Três formas básicas da resposta do Fluido MR: (a) direct shear mode(modos de corte direto), (b) modo Válvula, (c) squeeze film mode(modos de filme comprimido)(MILECKI, 2001).

Em modo válvula os pólos magnéticos são fixos e o fluido é forçado a passar entre os pólos. Este tipo de sistema pode ser considerado para uso em amortecedores com válvula de controle hidráulico, pois os pólos exercem a função de válvula a medida que a intensidade do campo magnético varia, alterando a viscosidade do fluido que passa entre os pólos. Já o modo de corte direto, possui um pólo móvel, que é adequado para embreagens, freios e amortecedores. A última possibilidade, modo de filme comprimido pode ser usado para controle de pequenos movimentos. Este pode ser configurado para operação axial ou rotatória.

O comportamento de fluidos MR também pode ser descrito em termos de modelos pré e pós-tensão de escoamento. Neste trabalho será considerado apenas o modelo pré-tensão de escoamento. Este modelo é definido quando a tensão de cisalhamento é proporcional à deformação de cisalhamento. A figura (2.4) ilustra o comportamento destes modelos.

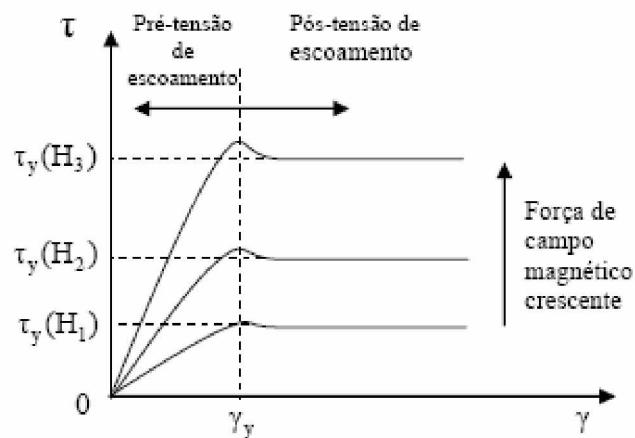


Figura 2.4: Características Tensão-deformação de fluidos MR (SRINIVASAN AND MCFARLAND, 2001)).

Existem relativamente poucas pesquisas que buscam caracterizar as propriedades dos fluidos MR no estado de pré-tensão de escoamento. As características de cisalhamento na fase pré-tensão podem ser modeladas por:

$$G^* = G' + jG'' \quad (2.3)$$

onde

$$G' = G'_0 + A_1 H^{A_2} \quad (2.4)$$

e

$$G'' = G''_0 + A_3 H^{A_4} \quad (2.5)$$

onde G^*, G', G'', G'_0 , e G''_0 são módulo de cisalhamento complexo, módulo de cisalhamento, módulo de fator de perda, módulo de cisalhamento no campo zero, módulo de perda de campo, respectivamente e A_1, A_2, A_3 , e A_4 são constantes (HIRUNYAPRUK, 2004) .

Um modelo para descrever as propriedades de cisalhamento dos fluidos MR foi proposto por Harland (1999). Este modelo tem a forma dada pela equação:

$$G' = G'' = 7.96 \times 10^5 H^{1.65} + 4 \times 10^3 \quad (2.6)$$

A figura (2.5) mostra os valores do cisalhamento, dado em Pascal (Pa), em função do campo magnético, dado em kOe/mm (Oerted), para um fluido eletroreológico (HARLAND, 1999).

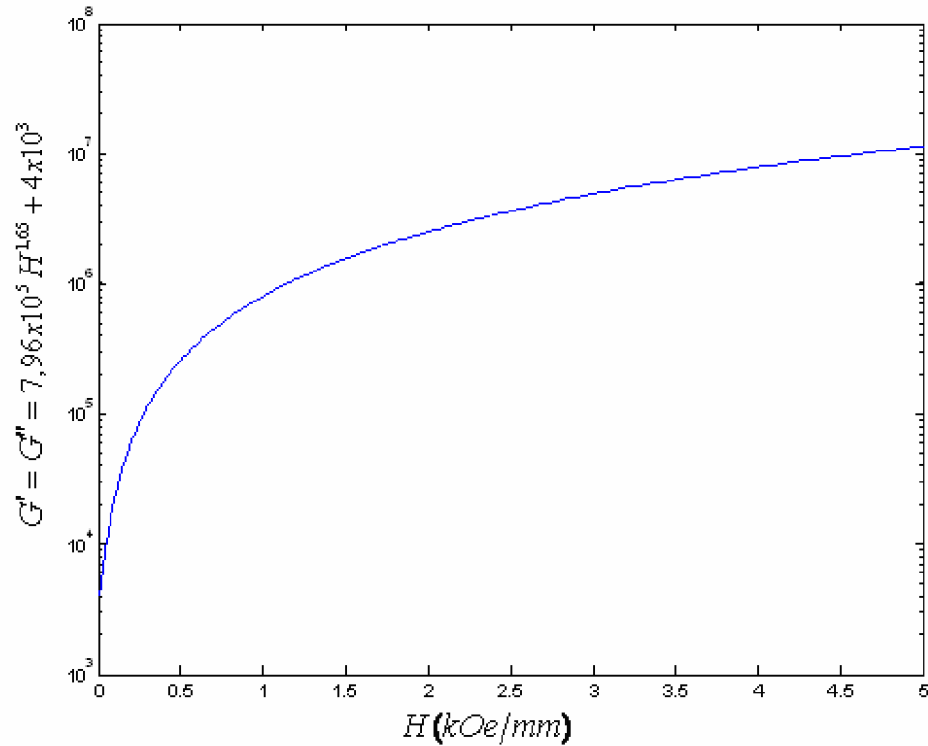


Figura 2.5: Propriedades de cisalhamento para o fluido MR (HARLAND, 1999).

2.2 Conceitos Básicos sobre Magnetismo

O objetivo desta seção é propor um dispositivo para fornecer o campo magnético necessário para conseguir as variações das propriedades do fluido MR desejadas, e avaliar a relação entre a corrente elétrica e o campo magnético. Esta análise é importante porque em aplicações de controle é fornecido ao sistema corrente elétrica, portanto, é necessário estabelecer a relação entre corrente elétrica e campo magnético.

2.2.1 Cálculo do Campo magnético devido a uma corrente

A figura (2.6) mostra a divisão de um fio em elementos diferenciais $d\vec{s}$. Defini-se para cada elemento, um vetor $d\vec{s}$ cuja direção é a do elemento $d\vec{s}$ e o sentido é o mesmo da corrente no elemento. Com isso, pode-se definir um elemento de corrente-comprimento diferencial como $id\vec{s}$.

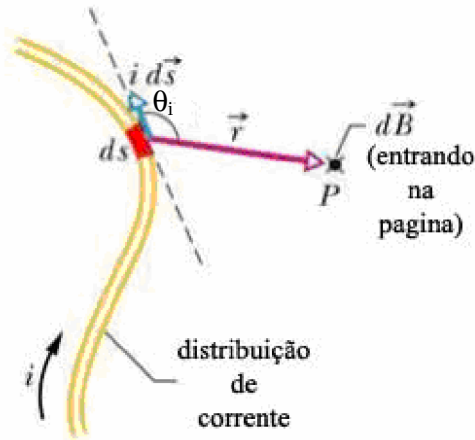


Figura 2.6: Elemento de corrente-comprimento $i d\vec{s}$ produzindo um campo magnético diferencial $d\vec{B}$ no ponto P.

A intensidade do campo magnético $d\vec{B}$ produzida no ponto P por um elemento $i d\vec{s}$ é dado por:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i ds \cdot \sin\theta_i}{r^2} \quad (2.7)$$

onde θ_i é o ângulo entre $d\vec{s}$ e r , sendo r o vetor que se estende de $d\vec{s}$ até P e μ_0 é uma constante denominada constante de permeabilidade, cujo valor para o ar é próximo ao do vácuo:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Tm/A} \approx 1,26 \times 10^{-6} \text{ Tm/A} \quad (2.8)$$

Como a direção e o sentido de $d\vec{B}$ são dados pelo produto vetorial $d\vec{s} \times \vec{r}$, podemos escrever a equação anterior como (WALKER, 1996):

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3} \quad (2.9)$$

Esta equação e sua forma escalar são conhecidas como Lei de Biot-Savart e é usada para o cálculo do campo magnético resultante $\vec{B}$ produzido em um ponto por várias distribuições de corrente. O campo resultante produzido por todos os elementos $i d\vec{s}$ é obtido através da integração de todos os $d\vec{B}$.

2.2.2 Cálculo do campo magnético devido a uma corrente em um fio reto longo

Para o caso de um fio reto longo o módulo do campo magnético diferencial criado, no ponto P, pelo elemento de corrente ids é dado por:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{ids \sin\theta}{r^2} \quad (2.10)$$

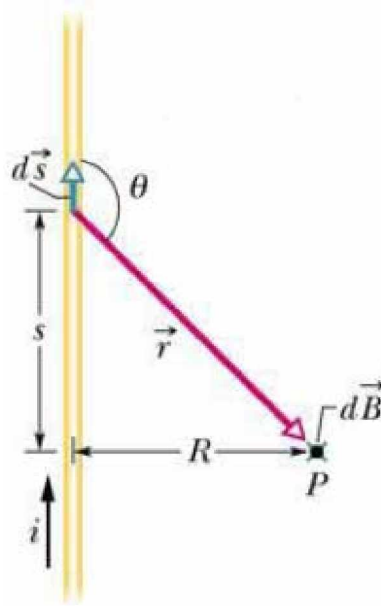


Figura 2.7: Cálculo do campo magnético produzido por uma corrente i em um fio reto longo.

A direção e o sentido de $d\vec{B}$ são os mesmos do vetor $d\vec{s} \times \vec{r}$, isto é, perpendicular ao plano da figura apontando para dentro da página, figura (2.7), para todos os elementos de corrente-comprimento nos quais o fio pode ser dividido. Assim podemos determinar a intensidade do campo magnético produzido em P pelos elementos de corrente-comprimento na metade superior do fio infinitamente longo integrando-se dB de 0 a ∞ . De acordo com a equação (2.9) temos que o campo magnético produzido pelo elemento de corrente da metade inferior do fio tem módulo, direção e sentido idênticos ao campo da metade superior. Deste modo, para determinar o módulo do campo total B no ponto P, multiplicamos o lado direito da equação (2.10) por dois:

$$B = 2 \int_0^{\infty} dB = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin\theta ds}{r^2} \quad (2.11)$$

As variáveis θ , s e r nesta equação não são independentes e, estão relacionadas por:

$$\sin\theta = \sin(\pi - \theta) = \frac{R}{\sqrt{s^2 + R^2}} \quad (2.12)$$

e

$$r = \sqrt{s^2 + R^2} \quad (2.13)$$

Com estas substituições e a solução da integral, temos:

$$\begin{aligned} B &= \frac{\mu_0 i}{2\pi} \int_0^\infty \frac{R}{(s^2 + R^2)^{3/2}} ds \\ &= \frac{\mu_0 i}{2\pi R} \left[\frac{s}{(s^2 + R^2)^{1/2}} \right]_0^\infty = \frac{\mu_0 i}{2\pi R} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Observa-se que tanto a metade superior quanto a metade inferior do campo magnético em P é a metade deste valor, isto é:

$$B = \frac{\mu_0 i}{4\pi R} \quad (2.15)$$

2.2.3 Campo magnético devido a uma corrente em um arco circular de fio

A figura (2.8a) mostra um fio em forma de arco de círculo com ângulo central ϕ (em radianos), raio R e centro C , transportando uma corrente i .

Como no exemplo do fio reto, cada elemento de corrente-comprimento $id\mathbf{s}$ do fio produz um campo magnético de intensidade $d\mathbf{B}$ em um ponto, neste caso no ponto central C .

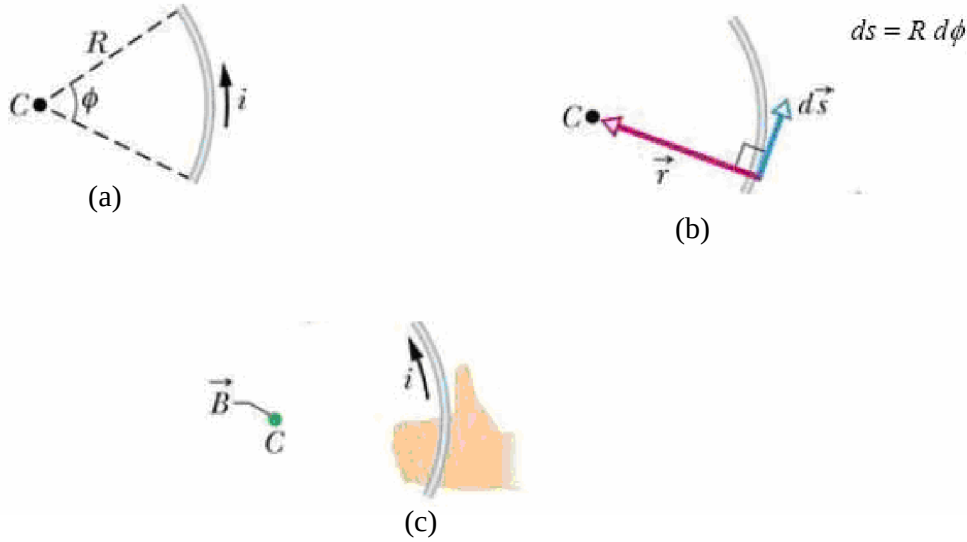


Figura 2.8: (a) Fio no formato de arco com centro em C transportando uma corrente i . (b) Para qualquer fio ao longo do arco, o ângulo entre as direções de $d\vec{s}$ e $\vec{r}$ é igual a 90° . (c) Determinação do sentido do campo magnético no centro de C devido à corrente no fio.

Além disto, como mostra a figura (2.8b), qualquer que seja a localização do elemento sobre o fio, o ângulo θ entre os vetores $d\vec{s}$ e $\vec{r}$ é de 90° e r é igual a R . Assim,

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{id\vec{s} \cdot \vec{r}}{R^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{id\vec{s}}{R^2} \quad (2.16)$$

Aplicando a regra da mão direita, figura (2.8c) em qualquer ponto ao longo do fio concluímos que todos os campos diferenciais dB possuem a mesma direção e o mesmo sentido que em C (perpendicular a página e para fora dela). Assim o campo total em C é simplesmente a soma de todos os campos diferenciais dB .

Fazendo $ds = R d\phi$ e usando a variável de integração $d\phi$ obtemos a equação:

$$B = \int dB = \int_0^\phi \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{iR d\phi}{R^2} = \frac{\mu_0 i}{4\pi R} \int_0^\phi d\phi \quad (2.17)$$

Integrando, concluímos que a intensidade do campo magnético é dada por:

$$B = \frac{\mu_0 i \phi}{4\pi R} \quad (2.18)$$

Observe que esta equação fornece o campo magnético apenas no centro de curvatura de um arco circular de corrente. Ao se inserir os dados nesta equação, deve-se ter cuidado de expressar ϕ em radianos e não em graus.

2.2.4 Campo magnético fora de um fio reto longo com corrente

A figura (2.9) mostra um fio circular com a corrente saindo do plano da folha. O campo magnético que fica em volta do fio possui a mesma intensidade em todos os pontos equidistantes do fio, ou seja no raio r . Aproveitando este fato, podemos posicionar o laço de Ampère com formato circular, ao redor do fio, com raio r . Então, verifica-se que o campo possui a mesma intensidade em todos os pontos em cima do laço. Resolvendo a integral no sentido anti-horário, conforme a figura (2.9), tem-se:

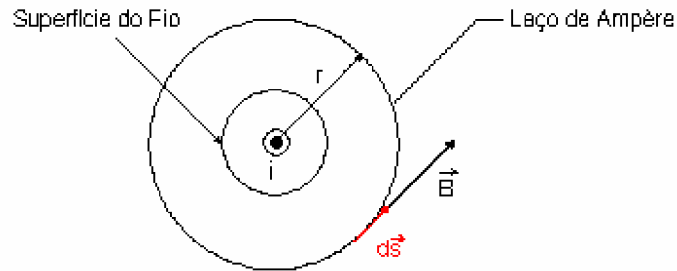


Figura 2.9: Usando a Lei de Ampère para determinar o campo magnético produzido por uma corrente i em um fio reto longo. O laço de Ampère é um círculo concêntrico localizado do lado de fora do fio.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \oint B \cos\theta \, ds = B \oint ds = B(2\pi) \quad (2.19)$$

Podemos observar que a integral soma todos os comprimentos ds ao longo do laço circular, fornecendo assim o comprimento total do laço que é $2\pi r$ (r referente ao laço). Na seqüência utilizamos a regra da mão direita para determinar o sentido da corrente, a qual fica positiva. E então completamos a Lei de Ampère com:

$$B(2\pi) = \mu_0 i \quad (2.20)$$

ou

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \quad (2.21)$$

2.2.5 Solenóides

Utilizando a lei de Ampère, determina-se o campo magnético em um solenóide. Solenóides são fios longos enrolados de forma bem aproximada, também são conhecidos como bobinas. Considerando um solenóide que possua o comprimento muito maior do que o seu diâmetro, figura (2.10).

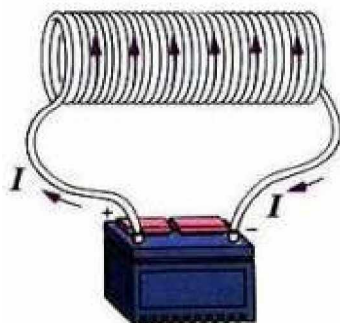


Figura 2.10: Esquema de um solenóide ideal – comprimento muito maior que seu diâmetro.

O Campo Magnético de um solenóide será a soma vetorial de todos os campos magnéticos gerados pelas espiras que o formam. Em cada volta, se observarmos os pontos que ficam muito próximos, o fio se comportará como um fio longo reto e as linhas de campo magnético podem ser consideradas como círculos concêntricos. Dessa forma o campo em pontos mais afastados do fio fica paralelo ao eixo do solenóide, como podemos observar na figura (2.10).

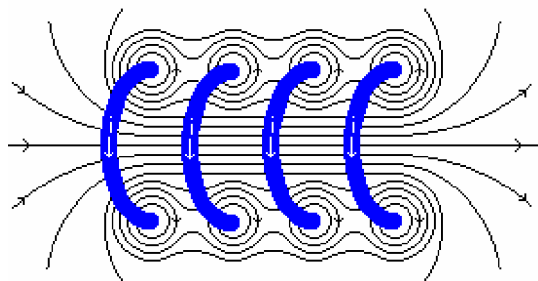


Figura 2.11: Representação de um corte vertical passando pelo eixo central em um solenóide.

Um solenóide será ideal se o seu comprimento for muito maior do que o seu diâmetro e o campo magnético no seu interior é uniforme e paralelo ao seu eixo. O campo magnético na parte de fora do solenóide, se forma hora para um sentido, na parte de cima hora para outro sentido, na parte de baixo, o que acaba fazendo com que as resultantes acabem se cancelando. No caso de um solenóide ideal, o campo externo é nulo. Este comportamento pode ser assumido para o campo magnético de um solenóide real. Na figura (2.12) se observa o campo em um solenóide real, onde vemos que o mesmo é forte e relativamente uniforme em seu interior e fraco na sua parte externa.

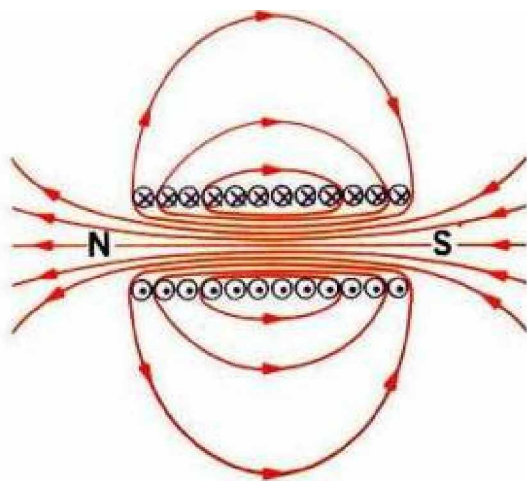


Figura 2.12: Linhas de campo magnético para um solenóide real de comprimento finito.

Aplicando a Lei de Ampère ao solenóide ideal que está representado na figura (2.13) e, utilizando o laço de Ampère como uma área retangular de extremidades a b c d, aplicamos a lei em cada segmento e, portanto, obtemos 4 integrais:

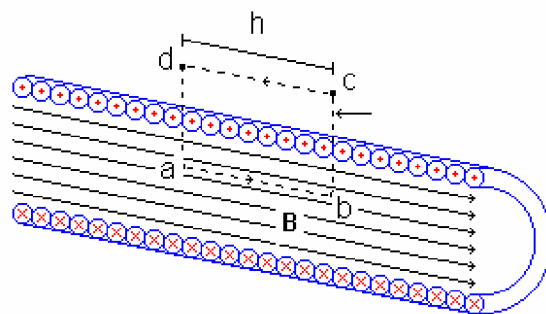


Figura 2.13: Aplicação da Lei de Ampère a um trecho de um solenóide ideal longo transportando uma corrente i . O laço de Ampère é o retângulo $abcd$.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \int_a^b \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_b^c \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_c^d \vec{B} \cdot d\vec{s} + \int_d^a \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad (2.22)$$

A primeira integral do lado direito representa o trecho de a até b, trecho este localizado no interior do campo magnético e terá como resultado uma intensidade de $B \cdot h$, onde h é o tamanho do segmento onde foi aplicado o laço de Ampère. A segunda integral, assim como a quarta, é nula pelo fato de que os elementos diferenciais vetoriais $d\vec{s}$ ao longo desse trecho são perpendiculares ao campo $\vec{B}$. A terceira integral é nula, pois é calculada em um local onde o campo, por definição é nulo. Portanto, o lado direito da Lei de Ampère é $B \cdot h$.

No lado esquerdo da equação, para determinarmos a corrente resultante i_{env} (corrente envolvida pelo laço de Ampère), observamos que ela não será igual à corrente i que circula pelo fio, pelo fato de que este fio passa várias vezes dentro do espaço delimitado pelo laço. Chamando de n o número de voltas por unidade de comprimento, ou seja, o número de voltas em que o fio passa pelo laço, então o laço envolverá um número de voltas igual a nh e, então, a corrente resultante será:

$$i_{env} = i(nh) \quad (2.23)$$

O campo magnético para um solenóide ideal terá então sua intensidade representada por:

$$Bh = \mu_0 i n h \quad (2.24)$$

Ou ainda

$$B = \mu_0 i n \quad (2.25)$$

Esta consideração, foi feita para um solenóide ideal, mas pode ser utilizada para solenóides reais. Ainda, podemos destacar que a intensidade do campo é independente do diâmetro ou do comprimento do solenóide. Este dispositivo é útil todas as vezes em que se deseja criar um campo magnético uniforme conhecido e tem, portanto, diversas aplicações.

Capítulo 3 – Modelagem da Estrutura

Pode-se estudar o comportamento de uma estrutura por dois caminhos, um é através do modelo em elementos finitos e o outro é através do modelo na forma modal, que nos possibilita identificar as propriedades do modelo real. Para o modelo em elementos finitos representar fielmente a estrutura é necessário conhecer as propriedades dos materiais utilizados e, também, conhecer o comportamento da estrutura. Este tipo de modelo pode ser utilizado quando a estrutura ainda não foi construída, ou é de difícil representação (uma estrutura difícil de identificar). No caso de não se conhecer o sistema, ou seja, de não conhecer muito bem o material ou o comportamento da estrutura, a alternativa para encontrar o modelo é utilizar métodos de identificação que nos forneça o modelo do sistema na forma modal. Neste trabalho, o estudo do comportamento da estrutura é realizado através do modelo modal identificado.

O objetivo deste capítulo é fornecer as ferramentas para representar o modelo da estrutura na forma modal, e além disso, representa-lo na forma de espaço de estado. A importância do modelo na forma de espaço de estado está no fato de facilitar a manipulação dos resultados encontrados para conseguir as propriedades do sistema.

3.1. Modelo Matemático - EDOL

Os modelos estruturais de segunda ordem descritos por equações diferenciais ordinárias lineares (EDOL) são muito utilizados em problemas de dinâmica estrutural. A representação do modelo depende da escolha das coordenadas. Alguns autores utilizam estes modelos em coordenadas físicas, conhecidos como modelos físicos, no entanto, neste trabalho os modelos são escritos em coordenadas modais e são conhecidos como modelos modais.

Os modelos escritos em coordenadas físicas são formulados em termos de deslocamento, velocidade e aceleração. Tais modelos são caracterizados pelas matrizes de massa, de rigidez, de amortecimento e pelas matrizes de localização dos sensores e atuadores. A forma mais utilizada para encontrar este modelo é via FEM (método de elementos finitos) uma vez que na maioria dos casos as características da estrutura são conhecidas, equação (3.1).

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{D}\dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{q}(t) &= \mathbf{B}_0\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}_{oq}\mathbf{q}(t) + \mathbf{C}_{ov}\dot{\mathbf{q}}(t) \end{aligned} \quad (3.1)$$

onde $\mathbf{q}(t)$ é o vetor de deslocamento $nd \times 1$, $\mathbf{u}(t)$ é o vetor do sinal de entrada na estrutura $s \times 1$, $\mathbf{y}(t)$ é o vetor de saídas $r_s \times 1$, $\mathbf{M}$ é a matriz de massa $nd \times nd$, $\mathbf{D}$ é a matriz de amortecimento $nd \times nd$, $\mathbf{K}$ é a matriz de rigidez $nd \times nd$. A matriz de entrada do sinal de controle $\mathbf{B}_0$ é $nd \times s$, a matriz de saída de deslocamento $\mathbf{C}_{oq}$ é $r_s \times nd$ e a matriz de saída de velocidade $\mathbf{C}_{ov}$ é $r_s \times nd$. A matriz de massa é positiva definida e as matrizes de amortecimento e rigidez são positivas semidefinidas. Também, nd é o número de GL do sistema, r_s é o número de saídas, s é o número de entradas na estrutura.

Em geral as matrizes de massa e rigidez são estimadas em coordenadas físicas, por exemplo, via MEF (KWON; BANG, 1997), sendo a matriz de amortecimento proporcional a elas (BHASKAR, 1995). Em particular o amortecimento será estudado neste trabalho. Deve-se lembrar que para este modelo MEF ser bem representativo, a estrutura deve se comportar de forma linear e ter todas as propriedades conhecidas.

Quando não conhecemos a estrutura que será estudada, ou seja, quando não sabemos se seu comportamento pode ser aproximado de um comportamento linear ou quando não conhecemos as características da estrutura, uma maneira alternativa que possibilita encontrar este modelo, é utilizar o modelo na forma modal que podem ser obtidos via procedimentos de ensaio de identificação (MAIA et al., 1996). Outra utilização para o modelo modal seria quando conhecemos a estrutura e temos o modelo físico mas, a estrutura é muito complexa e queremos estudar apenas alguns modos, então, através de uma transformação podemos obter o modelo modal a partir do modelo físico. As idéias desta formulação são apresentadas a seguir.

Considerando o caso de vibrações livres da equação (3.1) para um sistema sem amortecimento, sabe-se que a solução da EDOL (3.1) é da forma:

$$\mathbf{q}(t) = \Phi e^{j\omega t} \quad (3.2)$$

assim, substituindo em (3.1), tem-se (EWINS, 1984):

$$(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \Phi e^{j\omega t} = 0 \quad (3.3)$$

A solução não trivial desta equação existe se:

$$\det(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) = 0 \quad (3.4)$$

onde são encontrados n valores de $\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2$ tal que esta equação seja satisfeita. Estas soluções são conhecidas também como autovalores da equação (3.3), sendo n

menor ou igual à nd . A frequência ω_i é chamada i -ésima frequência natural do sistema. Substituindo ω_i em (3.3) obtém-se as soluções correspondentes $\{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n\}$ para cada frequência natural, ϕ_i é chamado de i -ésimo modo natural ou forma dos modos. Estas soluções não são únicas, e podem ser normalizadas de várias formas. Comumente se define a matriz de frequências naturais (MAIA et al., 1996):

$$\mathbf{\Omega} = \text{diag}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \quad (3.5)$$

E a matriz modal Φ ($nd \times n$), que consiste dos n modos naturais da estrutura:

$$\mathbf{\Phi} = [\phi_1 \quad \phi_2 \quad \dots \quad \phi_n] \quad (3.6)$$

As matrizes modais de massa podem ser diagonalizadas através das seguintes equações:

$$\mathbf{M}_m = \mathbf{\Phi}^T \mathbf{M} \mathbf{\Phi} \quad (3.7a)$$

$$\mathbf{K}_m = \mathbf{\Phi}^T \mathbf{K} \mathbf{\Phi} \quad (3.7b)$$

$$\mathbf{D}_m = \mathbf{\Phi}^T \mathbf{D}_a \mathbf{\Phi} \quad (3.7c)$$

A matriz $\mathbf{D}_a$ é a matriz de amortecimento proporcional dada por:

$$\mathbf{D}_a = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (3.8)$$

Onde α e β são constantes. Pode-se introduzir uma transformação de coordenadas no problema, $\mathbf{q}_m(t)$, tal que:

$$\mathbf{q}_m(t) = \mathbf{\Phi} \mathbf{q}(t) \quad (3.9)$$

Assim, pré-multiplicando a equação (3.1) por $\mathbf{\Phi}^T$ e utilizando a transformação da equação (3.8), obtém-se:

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{q}}_m(t) + 2\mathbf{Z}\mathbf{\Omega}\dot{\mathbf{q}}_m(t) + \mathbf{\Omega}^2\mathbf{q}_m(t) &= \mathbf{B}_m \mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}_{mq}\mathbf{q}_m(t) + \mathbf{C}_{mv}\dot{\mathbf{q}}_m(t) \end{aligned} \quad (3.10)$$

sendo:

$$\mathbf{\Omega}^2 = \mathbf{M}_m^{-1} \mathbf{K}_m \quad (3.11)$$

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{2} \mathbf{M}_m^{-1} \mathbf{D}_m \mathbf{\Omega}^{-1} = \frac{1}{2} \mathbf{M}_m^{-1/2} \mathbf{K}_m^{-1/2} \mathbf{D}_m \quad (3.12)$$

A matriz de entrada modal $\mathbf{B}_m$ é dada por:

$$\mathbf{B}_m = \mathbf{M}_m^{-1} \Phi^T \mathbf{B}_0 \quad (3.13a)$$

e $\mathbf{C}_{mq}$ e $\mathbf{C}_{mv}$ são as matrizes de saída de deslocamento e velocidade modal, respectivamente:

$$\mathbf{C}_{mq} = \mathbf{C}_{oq} \Phi \quad (3.14a)$$

$$\mathbf{C}_{mv} = \mathbf{C}_{ov} \Phi \quad (3.14b)$$

A matriz modal de saída equivalente é definida por:

$$\mathbf{C}_m = \mathbf{C}_{mq} \Omega^{-1} + \mathbf{C}_{mv} \quad (3.15a)$$

que tem a seguinte propriedade:

$$\|\mathbf{C}_m\|_2^2 = \|\mathbf{C}_{mq} \Omega^{-1}\|_2^2 + \|\mathbf{C}_{mv}\|_2^2 \quad (3.15b)$$

onde $\|\cdot\|_2^2$ é a norma euclidiana.

3.2. Modelos Estruturais no Espaço de Estados

Em algumas aplicações como, por exemplo, na aplicação deste trabalho, para conseguirmos os parâmetros modais da estrutura através do modelo modal, é mais interessante utilizar o modelo na forma de espaço de estados. O modelo na forma de espaço de estados também é bastante utilizado para controle e o método de identificação que foi utilizado neste trabalho fornece a resposta nesta forma. A representação no espaço de estados é determinada pelo trio de matrizes ($\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$) e pelo vetor de estados $\mathbf{x}(t)$, (MOREIRA, 1998).

Ressalta-se que a formulação no espaço de estados não é única, o que deve valer são as relações de entrada-saída que sempre são mantidas independentemente da formulação feita. Entretanto, faz diferença qual representação no espaço de estados é escolhida para análise de um sistema e projeto do controlador, podendo facilitar ou dificultar o processamento de informações. A seguir descreve-se a realização no espaço de estados de modelos modais.

A modelagem de estruturas por MEF exige elevado número de graus de liberdade. Com isto a ordem N da representação física é geralmente muito grande (WANG et al., 1999), gerando dificuldades numéricas adicionais. Além disto, a

representação no espaço de estados física é menos utilizada em aplicações práticas de controle em engenharia, uma vez que a estimativa de parâmetros modais é muito mais fácil de ser implementada do que de parâmetros físicos. Uma forma alternativa é obter a realização no espaço de estados a partir do modelo de segunda ordem na forma modal, representado pela equação (3.16).

Definindo o vetor de estados modal:

$$\mathbf{x}(t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}_1(t) \\ \mathbf{x}_2(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_m(t) \\ \dot{\mathbf{q}}_m(t) \end{Bmatrix} \quad (3.16)$$

A equação (3.16) pode ser reescrita como um conjunto de equações de primeira ordem na forma da equação (3.17a):

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \end{aligned} \quad (3.17a)$$

sendo as matrizes ($\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{C}$):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\Omega^2 & -2\mathbf{Z}\Omega \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{B}_m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = [\mathbf{C}_{mq} \quad \mathbf{C}_{mv}] \quad (3.17b)$$

onde $\mathbf{0}$ é a matriz nula $n \times n$ e $\mathbf{I}$ é a matriz identidade de ordem n . Nesta realização $\mathbf{x}_1$ é o vetor de deslocamento modal e $\mathbf{x}_2$ é o vetor de velocidade modal. A dimensão desta representação é $2n$, enquanto a representação física é $2nd$, sendo, $n \ll nd$.

Vale ressaltar que a equação (3.17b) não é uma representação modal, uma vez que as equações não se desacoplaram. A realização no espaço de estados modal é caracterizada por uma matriz de bloco diagonal, $\mathbf{A}_m$, e as matrizes de entrada e saída relacionadas:

$$\mathbf{A}_m = \text{diag}(\mathbf{A}_{mi}), \quad \mathbf{B}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{m1} \\ \mathbf{B}_{m2} \\ \vdots \\ \mathbf{B}_{mn} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_m = [\mathbf{C}_{m1} \quad \mathbf{C}_{m2} \quad \mathbf{L} \quad \mathbf{C}_{mn}] \quad (3.18)$$

sendo $i = 1, 2, \dots, n$ e $\mathbf{A}_{mi}$, $\mathbf{B}_{mi}$, $\mathbf{B}_{mwi}$ e $\mathbf{C}_{mi}$ são blocos 2×2 , $2 \times s$, $2 \times sd$ e $r \times 2$, respectivamente. Estes blocos podem ser arranjados de diversas formas diferentes através da utilização de uma transformação linear. Isto pode ser feito usando a seguinte matriz de transformação:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_1 & 0 \\ 0 & \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_2 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \mathbf{e}_n \\ \mathbf{e}_n & 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

onde $\mathbf{e}_i$ é um vetor linha com todos os elementos iguais a zero, exceto no i -ésimo. Denota-se $\mathbf{A}_{mk}$ como sendo a matriz dinâmica $\mathbf{A}_m$ na forma modal k . Em geral se trabalha com quatro formas diferentes, portanto, $k=1, 2, 3$ ou 4 . A matriz de transformação $\mathbf{R}_{kr}$ transforma a variável de estado $\mathbf{x}_k$ na variável $\mathbf{x}_r$:

$$\mathbf{x}_r = \mathbf{R}_{kr} \mathbf{x}_k, \quad k, r = 1, 2, 3 \text{ ou } 4 \quad (3.20)$$

sendo:

$$\mathbf{R}_{kr} = \text{diag}(\mathbf{R}_{kri}) \quad (3.21)$$

Assumindo um amortecimento pequeno, i. e., $\zeta_i \ll 1$, $i=1, \dots, n$, com j sendo a unidade imaginária (GAWRONSKI, 1998), obtém-se:

$$\mathbf{R}_{12i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \zeta_i & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_{13i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \omega_i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_{14i} = \begin{bmatrix} 1 - j\zeta_i & -j \\ 1 + j\zeta_i & j \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{R}_{23i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\zeta_i \omega_i & \omega_i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_{24i} = \begin{bmatrix} 1 & -j \\ 1 & j \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_{34i} = \begin{bmatrix} 1 - j\zeta_i & -j/\omega_i \\ 1 + j\zeta_i & j/\omega_i \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

A transformação inversa pode ser derivada pelas seguintes relações:

$$\mathbf{R}_{kpi} = \mathbf{R}_{pji}^{-1} \quad (3.24a)$$

$$\mathbf{R}_{kji} = \mathbf{R}_{rji} \mathbf{R}_{kri}, \quad r, k, j = 1, 2, 3, 4. \quad (3.24b)$$

Uma nova representação pode ser obtida da seguinte maneira, sendo $\mathbf{R}$ uma matriz não singular:

$$\mathbf{A}_n = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{R}, \quad \mathbf{B}_n = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}, \quad \mathbf{C}_n = \mathbf{C} \mathbf{R} \quad (3.25)$$

Os blocos $\mathbf{A}_{mi}$ utilizados são geralmente de quatro diferentes formas (GAWRONSKI, 1998). A seguir, apresentam-se estas formas e os respectivos estados modais para cada realização:

- Forma Modal 1:

$$\mathbf{A}_{mi} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_i \\ -\omega_i & -2\zeta_i\omega_i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_i = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_{mi} \\ \dot{\mathbf{q}}_{mi}/\omega_i \end{Bmatrix} \quad (3.26)$$

- Forma Modal 2:

$$\mathbf{A}_{mi} = \begin{bmatrix} -\zeta_i\omega_i & \omega_i \\ -\omega_i(\zeta_i^2 - 1) & -\zeta_i\omega_i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_i = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_{mi} \\ \mathbf{q}_{moi} \end{Bmatrix}, \quad \text{sendo } \mathbf{q}_{moi} = \zeta_i\mathbf{q}_{mi} + \dot{\mathbf{q}}_{mi}/\omega_i \quad (3.27)$$

- Forma Modal 3:

$$\mathbf{A}_{mi} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_i^2 & -2\zeta_i\omega_i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_i = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_{mi} \\ \dot{\mathbf{q}}_{mi} \end{Bmatrix} \quad (3.28)$$

- Forma Modal 4:

$$\mathbf{A}_{mi} = \begin{bmatrix} -\zeta_i\omega_i + j\omega_i\sqrt{1-\zeta_i^2} & 0 \\ 0 & -\zeta_i\omega_i - j\omega_i\sqrt{1-\zeta_i^2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_i = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_{mi} - j\mathbf{q}_{moi} \\ \mathbf{q}_{mi} + j\mathbf{q}_{moi} \end{Bmatrix} \quad (3.29)$$

O vetor $\mathbf{x}$ da representação modal consiste de n componentes $\mathbf{x}_i$ independentes que representam o estado de cada modo. A forma 4 em geral não é muito interessante, uma vez que é uma representação imaginária, o que aumenta as dificuldades numéricas e analíticas. Porém ela pode ser usada como base para encontrar a representação de qualquer estado na forma de representação 2, equação (3.27).

3.3 Modelagem por Elementos Finitos

No âmbito da Engenharia de Estruturas, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como objetivo a determinação da dinâmica do sistema, estado de tensão e de deformação de uma estrutura de geometria arbitrária sujeito a ações exteriores. Este tipo de cálculo tem a designação genérica de análise de estruturas e surge, por exemplo, no estudo de edifícios, pontes, barragens, etc. Quando existe a necessidade de projetar uma estrutura, é habitual proceder-se a uma sucessão de análises e modificações das suas características, com o objetivo de se alcançar uma solução satisfatória, quer em termos económicos, quer na verificação dos pré-requisitos funcionais e regulamentares.

Antes do aparecimento do MEF, a análise dos meios contínuos era efetuada por resolução direta dos sistemas de equações de derivadas parciais que regem o fenómeno, tendo em consideração as necessárias condições de restrição. Para facilitar a aplicação

desta técnica a problemas não elementares, era comum recorrer a séries de Fourier. Devido à sua complexidade, estes procedimentos só eram aplicáveis a meios contínuos homogêneos e de geometria simples. Para tentar ultrapassar algumas destas limitações, era freqüente a substituição de derivadas exatas por aproximadas, calculadas com base em grelhas de pontos (AZEVEDO, 2003). Da aplicação desta técnica resulta o método das diferenças finitas, que, antes do aparecimento dos computadores, apresentava o inconveniente de requerer a resolução de grandes sistemas de equações lineares. Para evitar este inconveniente, foram propostos diversos métodos de relaxação baseados na sucessiva diminuição de um conjunto de resíduos. Devido ao longo tempo de solução de qualquer um destes métodos, tornava-se mais atrativa a substituição do problema real por outro semelhante, de modo a se poder recorrer a resultados publicados em tabelas ou ábacos.

Com o grande desenvolvimento que o MEF teve na década de 60 e com a disponibilidade de computadores, passou a ser prática corrente a análise de estruturas de geometria arbitrária, constituídas por múltiplos materiais e sujeitas a qualquer tipo de carregamento. Atualmente, o interesse se restringe ao de fornecer soluções teóricas de problemas simples para validar métodos aproximados.

A formulação do MEF pode ser baseada no método dos deslocamentos, em modelos de equilíbrio, ou em métodos híbridos e mistos (KWON; BANG, 1997). De todos estes métodos, aquele que apresenta uma maior simplicidade e, conseqüentemente, uma maior versatilidade é o método dos deslocamentos. Associados ao método dos deslocamentos surgem muitos outros conceitos, como por exemplo, as noções de grau de liberdade, deslocamento generalizado, força generalizada, equilíbrio, matriz de rigidez, vetor solicitação, montagem, introdução de condições de apoio, etc.

Quando surge a necessidade de resolver um problema de análise de uma estrutura, a primeira questão que se coloca é a sua classificação quanto à geometria, modelo do material constituinte e ações aplicadas (AZEVEDO, 2003).

A formulação do MEF requer a existência de uma equação integral, de modo que seja possível substituir a integral sobre um domínio complexo (de volume V) por um somatório de integrais estendidos a sub-domínios de geometria simples (de volume V_i). Esta técnica é ilustrada com o seguinte exemplo, que corresponde a integral de volume de uma função f :

$$\int_V f \, dV = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} f \, dV \quad (3.30)$$

Em (3.30) pressupõe-se que

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad (3.31)$$

Se for possível calcular todas as integrais estendidas aos sub-domínios V_i , basta efetuar o somatório correspondente ao segundo membro de (3.30) para se obter a integral estendida a todo o domínio. Cada sub-domínio V_i corresponde a um elemento finito de geometria simples (isto é., segmento de reta, triângulo, quadrilátero, tetraedro, paralelepípedo). O somatório indicado em (3.30) vai dar origem à operação designada montagem, ou montagem da matriz global.

A equação integral referida no início desta secção é proveniente da aplicação do método dos resíduos ou de um princípio variacional. No caso da aplicação do MEF à análise de estruturas, a formulação mais intuitiva é a que se baseia no Princípio dos Trabalhos Virtuais (PTV) (AZEVEDO, 2003).

Neste trabalho, os conceitos do MEF foram utilizados para construir um modelo para a viga sanduíche, utilizando o software Ansys. Esta análise não teve por objetivo fornecer as características exatas do sistema, matrizes A, B, C e por este motivo não foi realizado um ajuste do modelo, mas sim fornecer uma representação de como o sistema se comporta, para verificar se a resposta encontrada experimentalmente é coerente.

A figura (3.1) mostra o modelo ensaiado. Neste modelo foi utilizado o elemento Solid45 do programa Ansys, que possui 8 nós e três graus de liberdade por nós.

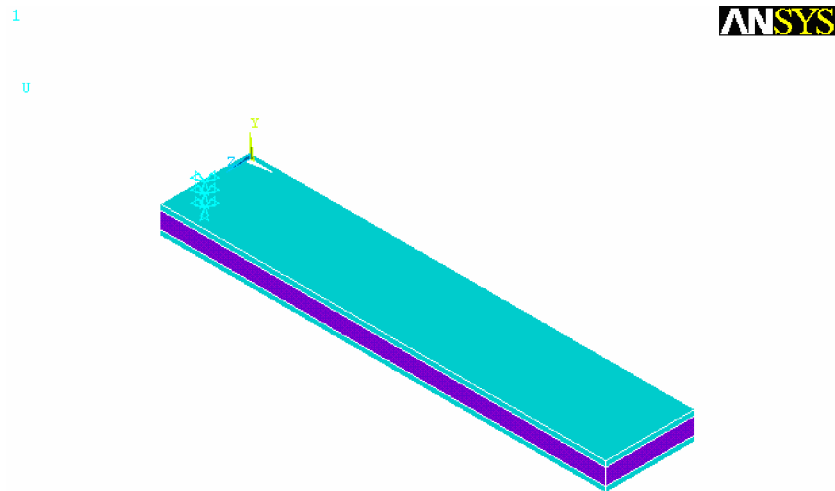


Figura 3.1: Figura retirada do programa Ansys, representando a viga sanduíche.

Pode-se ver na figura (3.1) que a viga possui dois materiais diferentes, um representa a chapa de acrílico e o outro o fluido MR com o silicone. Os dois materiais foram representados com o elemento solid45, mas com propriedades diferentes para cada um deles.

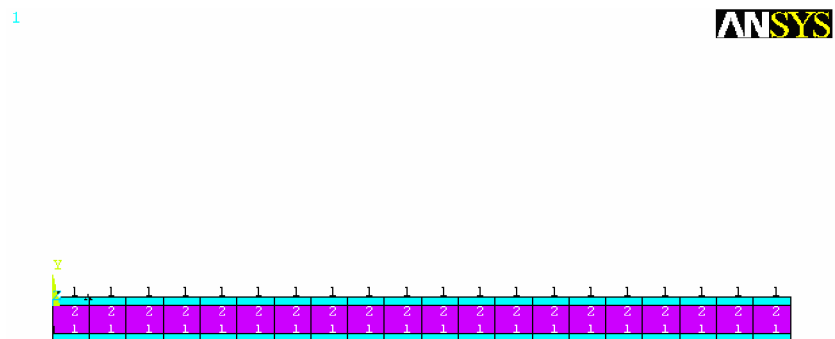


Figura 3.2: Figura retirada do programa Ansys, representando a viga sanduíche com elementos diferentes.

O material 2 representa o fluido MR com o silicone e está representado na figura (3.2) na camada intermediária. Neste elemento foi introduzida a propriedade de amortecimento, que variou para simular o comportamento da viga quando variamos o campo magnético e, por conseguinte, a viscosidade do material MR.

3.4 Métodos de Identificação de Sistemas

Durante estas últimas três décadas muitos estudiosos têm direcionado seus esforços para o desenvolvimento de metodologias que resultem na identificação de um modelo estrutural com boa representatividade das propriedades dinâmicas reais de uma estrutura. O desenvolvimento dos computadores e dos equipamentos de aquisição e de processamento de dados; além da aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT – do inglês Fast Fourier Transform) estimularam estes estudos. As técnicas de identificação podem ser para sistemas SISO (uma - entrada e uma - saída; do inglês simple-input simple-output); ou para sistemas MIMO (múltiplas - entradas e múltiplas - saídas; do inglês multi-input multi-output). Os métodos de identificação, ainda, podem ser classificados em dois grupos básicos: métodos no domínio do tempo; e métodos no domínio da frequência. Em geral, os métodos baseados no domínio do tempo fornecem resultados melhores quando é grande a faixa de frequência, ou seja, quando é grande o número de modos presentes nos dados. Já os métodos no domínio da frequência são mais interessantes para a identificação de um número relativamente pequeno de modos (MAIA et al., 1997).

Neste capítulo serão abordados unicamente os conceitos do método de predição de erros (PEM), sendo este método utilizado para identificar sistemas SISO. O método PEM foi utilizado neste trabalho para identificar o modelo modal da estrutura, pois utiliza o sinal de entrada e de saída no domínio do tempo, sendo o sinal de entrada um sinal qualquer. Além disto, este método fornece diretamente as matrizes A, B e C, ou seja, fornece o modelo diretamente na forma de espaço de estado. O método PEM utilizado neste trabalho, foi implementado usando as funções do toolbox do Matlab. A teoria mostrada a seguir foi apresentada inicialmente em Ljung, (2002).

3.4.1 Método de Predição de Erros

Identificação de sistemas é na verdade construir modelos matemáticos de sistemas dinâmicos usando dados de entrada e saída (input/output). Isso pode ser feito usando várias técnicas diferentes, neste trabalho é utilizado o Método de Predição de

Erros (Prediction Error Methods – PEM). Este método de estimação pertence a família de modelos de parametrização arbitrários e tem similaridades com o método da máxima probabilidade (LJUNG, 2002). As propriedades básicas do PEM são descritas a seguir.

A saída no tempo t é $\mathbf{y}(t)$ e a entrada é $\mathbf{u}(t)$. Estes sinais são vetores com dimensões (finitas) arbitrárias. O caso de sinal de entrada nulo ($\mathbf{u}(t) = 0$) corresponde a série no tempo. Sendo, $\mathbf{Z}^N = \{u(1), y(1), u(2), y(2), \dots, u(N), y(N)\}$ dados coletados em um tempo N . Os dados normalmente são obtidos em tempo discreto, contudo, pode-se utilizar séries contínuas no tempo.

A idéia básica por trás da aproximação por predição de erros é descrever o modelo como uma predição da próxima saída:

$$\hat{\mathbf{y}}_m(t/t-1) = f(\mathbf{Z}^{t-1}) \quad (3.32)$$

sendo que $\hat{\mathbf{y}}_m(t/t-1)$ denota um passo adiante na predição da saída, e f é uma função arbitrária que descreve os dados passados.

Pode-se parametrizar a predição em termos de um parâmetro de dimensões finitas, um vetor θ , por exemplo:

$$\hat{\mathbf{y}}(t/\theta) = f(\mathbf{Z}^{t-1}, \theta) \quad (3.33)$$

Para utilizar esta parametrização deve-se impor algumas condições de regularidade (LJUNG, 2002).

Basicamente o método PEM funciona da seguinte forma; primeiro determina-se um valor estimado para o vetor θ (denotado por $\hat{\theta}_N$) através do modelo parametrizado e, compara-se este vetor com os dados coletados $\mathbf{Z}^N$. O objetivo desta análise é minimizar a distância entre os valores estimados $\hat{\mathbf{y}}(1/\theta), \dots, \hat{\mathbf{y}}(N/\theta)$ e os valores coletados $\mathbf{y}(1), \dots, \mathbf{y}(N)$ através de uma norma adequada.

Se a norma for escolhida de forma a igualar a função densidade de probabilidade, a estimativa de $\hat{\theta}_N$ coincidirá com o da Estimativa da Máxima Probabilidade.

O PEM tem um número de vantagens:

- Este método pode ser aplicado para um amplo espectro de parametrização de modelos;

- Fornece modelos com propriedades assintóticas excelentes, devido sua similaridade com a Máxima Probabilidade;
- Pode tratar sistemas que operam em malha fechada (“Closed loop”). Onde a entrada é parcialmente determinada como saída realimentada, quando os dados são coletados.

Como todo método, existem algumas desvantagens:

- Exige uma parametrização explícita do modelo. Para estimar, por exemplo, um modelo linear arbitrário de ordem 5, algum tipo de parametrização que incluem todos os modelos de quinta ordem devem ser introduzidos;
- A busca de parâmetros que fornecem uma melhor predição da saída adequada, dependendo da ordem do sistema, pode ser demorada e envolve uma superfície de pesquisa com muitos mínimos locais.

Nos tópicos que se seguem é mostrado de forma simplificada algumas características do método PEM.

3.4.2. Parametrização de Modelos

O modelo geral de predição é dado por (3.33):

$$\hat{\mathbf{y}}(t/\theta) = f(\mathbf{Z}^{t-1}, \theta)$$

Um exemplo desta parametrização é assumir que a forma base do modelo é dada por uma simples equação diferencial linear do tipo:

$$\mathbf{y}(t) + a_1 \mathbf{y}(t-1) + \dots + a_n \mathbf{y}(t-n) = b_1 \mathbf{u}(t-1) + \dots + b_m \mathbf{u}(t-m) \quad (3.34)$$

Ignorando qualquer contribuição de ruídos para essa equação, ou assumindo que o termo de ruído não pode ser previsto, a predição natural é:

$$\hat{\mathbf{y}}(t/\theta) = -a_1 \mathbf{y}(t-1) - \dots - a_n \mathbf{y}(t-n) + b_1 \mathbf{u}(t-1) + \dots + b_m \mathbf{u}(t-m) \quad (3.35)$$

onde

$$\theta = [a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_m]^T \quad (3.36)$$

Que corresponde a:

$$f(\mathbf{Z}^{t-1}, \theta) = \theta^T \phi(t) \quad (3.37)$$

e

$$\varphi(t) = [-\mathbf{y}(t-1) \dots -\mathbf{y}(t-n) \dots \mathbf{u}(t-1) \dots \mathbf{u}(t-m)]^T \quad (3.38)$$

Através desta parametrização, dependendo da relação entre $f(\mathbf{Z}^{t-1}, \boldsymbol{\theta})$ e $\mathbf{Z}^N$, pode-se ter três possibilidades diferentes para encontrar o modelo estimado do sistema:

- Modelo Linear Invariante no Tempo (LTI). $f(\mathbf{Z}^{t-1}, \boldsymbol{\theta})$ é linear em $\mathbf{Z}^{t-1}$ e não depende explicitamente do tempo, podemos escrever na forma:

$$f(\mathbf{Z}^{t-1}, \boldsymbol{\theta}) = W_y(q, \boldsymbol{\theta})\mathbf{y}(t) + W_u(q, \boldsymbol{\theta})\mathbf{u}(t) \quad (3.39)$$

$$= \sum_{k=1}^{t-1} w_y(k)\mathbf{y}(t-k) + \sum_{k=1}^{t-1} w_u(k)\mathbf{u}(t-k) \quad (3.40)$$

para alguns filtros LTI W_y e W_u que começam com um atraso. Onde, q é a variável de operação.

- Modelo de Regressão Linear. $f(\mathbf{Z}^{t-1}, \boldsymbol{\theta})$ é linear em $\boldsymbol{\theta}$, mas possivelmente não linear em $\mathbf{Z}^N$. A equação (4.3) é um modelo linear e um modelo de regressão linear.
- Modelo não Linear. $f(\mathbf{Z}^{t-1}, \boldsymbol{\theta})$ é não linear em $\mathbf{Z}^N$

Neste trabalho não é abordado modelos não lineares mas, como mostrado acima, o método PEM pode ser utilizado para encontrar o modelo deste tipo de sistema.

3.4.3 Modelos Lineares

O modelo de predição linear (3.39) é equivalente a assumirmos que os dados tenham sido gerados de acordo com:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{G}(q, \boldsymbol{\theta})\mathbf{u}(t) + \mathbf{H}(q, \boldsymbol{\theta})\mathbf{e}(t) \quad (3.41)$$

onde $\mathbf{e}(t)$ é um ruído branco (que não pode ser previsto), $\mathbf{H}(q, \boldsymbol{\theta})$ é uma matriz onde a expansão em q^{-1} começa com uma matriz identidade. Aqui, também, é assumido que $\mathbf{G}(q, \boldsymbol{\theta})$ contém uma defasagem. Esta equação pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\mathbf{y}(t) = [\mathbf{I} - \mathbf{H}^{-1}(q, \boldsymbol{\theta})]\mathbf{y}(t) + \mathbf{H}^{-1}(q, \boldsymbol{\theta})\mathbf{G}(q, \boldsymbol{\theta})\mathbf{u}(t) + \mathbf{e}(t) \quad (3.42)$$

O primeiro termo do lado direito apenas contém $\mathbf{y}(t-k)$, $k \leq 1$, que é predição natural para $\mathbf{y}(t)$ baseada nos dados passados. Comparando a equação (3.39) com a (3.42) podemos verificar que os filtros W_y e W_u são dados por :

$$W_y(q, \theta) = [I - H^{-1}(q, \theta)], \quad W_u(q, \theta) = H^{-1}(q, \theta)G(q, \theta) \quad (3.43)$$

É necessário que θ seja restrito a valores tal que os filtros $H^{-1}G$ e H^{-1} sejam estáveis. Note que a parametrização de G e H é de maneira bastante arbitrária. Por exemplo, ela pode ser baseada no tempo contínuo, modelo no espaço de estados com matrizes de parâmetros físicos, conhecidos ou desconhecidos, na entrada:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(\theta)\mathbf{u}(t) \quad (3.44)$$

$$y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + v(t) \quad (3.45)$$

onde $v(t)$ é o ruído de saída e o estado $\mathbf{x}(t)$ pode ter interpretação física, isto é, posição e velocidade e θ corresponde as constantes desconhecidas do material, etc.

3.4.4 Modelo Linear Caixa -Preta

Algumas vezes, os sistemas ou subsistemas não podem ser modelados baseados em percepções físicas. Esta dificuldade ocorre em sistemas muito complexo onde não é conhecida a função que descreve seu comportamento, ou seja, em sistemas onde as relações físicas são muito complexas e dificultam a elaboração do modelo. Para estes sistemas é possível usar um modelo padrão, que por experiência é conhecido por ser capaz de tratar uma ampla gama de sistemas mecânicos diferentes.

Uma aproximação que torna possível encontrar o modelo destes sistemas é utilizar o o método denominada por modelo linear caixa-preta. Este método funciona da seguinte forma:

$$G(q, \theta) = \frac{B(q)}{F(q)} = \frac{b_1 q^{-nk} + b_2 q^{-nk-1} + \dots + b_{nb} q^{-nk-nb+1}}{1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{nf} q^{-nf}} \quad (3.46)$$

onde

$$\eta(t) = G(q, \theta)\mathbf{u}(t) \quad (3.47)$$

é uma notação compacta da relação é:

$$\eta(t) + f_1 \eta(t-1) + \dots + f_{nf} \eta(t-nf) = b_1 u(t-nk) + \dots + b_{nb} u(t-(nb+nk-1)) \quad (3.48)$$

Na equação acima a defasagem no tempo é de nk amostras.

Similarmente, a função de transferência do distúrbio pode ser escrita como:

$$\mathbf{H}(q, \theta) = \frac{\mathbf{C}(q)}{\mathbf{D}(q)} = \frac{1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc}}{1 + d_1 q^{-1} + \dots + d_{nd} q^{-nd}} \quad (3.49)$$

Portanto, o vetor de parâmetros θ contém os coeficientes b_i , c_i , d_i e f_i da função de transferência. Este modelo é assim descrito por cinco parâmetros estruturais: nb, nc, nf, nd e nk e é conhecido como modelo Box-Jenkins (BJ).

Um caso especial importante é quando as propriedades do sinal do distúrbio não são modeladas e o modelo do ruído $\mathbf{H}(q)$ é escolhido como $\mathbf{H}(q)=1$; que implica em $nc = nd = 0$. Este caso especial é conhecido como um modelo de erro de saída (Output error) porque a fonte de ruído $e(t) = v(t)$ será a diferença entre a saída real e a saída do ruído livre.

Uma variação comum é usar o mesmo denominador para $\mathbf{G}$ e $\mathbf{H}$:

$$\mathbf{F}(q) = \mathbf{D}(q) = \mathbf{A}(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na} \quad (3.50)$$

Multiplicando ambos os lados das equações (3.45) a (3.48) por $\mathbf{A}(q)$ temos:

$$\mathbf{A}(q)\mathbf{y}(t) = \mathbf{B}(q)\mathbf{u}(t) + \mathbf{C}(q)e(t) \quad (3.51)$$

Este modelo é conhecido como ARMAX. O nome é derivado do fato de $\mathbf{A}(q)\mathbf{y}(t)$ representar uma **A**uto **R**egressão e $\mathbf{C}(q)e(t)$ um movimento médio (**M**oving **A**verage) do ruído branco, enquanto $\mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t)$ representa uma entrada e**X**tra (uma variável e**X**ogena).

O caso especial onde $\mathbf{C}(q) = 1$ é chamado modelo ARX, que é muito utilizado.

3.4.5 Técnica de Estimação

Uma vez que o modelo da estrutura, isto é, a parametrização da função $f(\mathbf{Z}^t, \theta)$ foi definida e os dados $\mathbf{Z}^N$ coletados, a estimativa dos parâmetros θ é conceitualmente simples: basta minimizar a distância entre a saída predita (de acordo com os parâmetros θ) e a saída medida:

$$\hat{\theta}_N = \arg \min_{\theta} V_N(\theta) \quad (3.52)$$

onde

$$V_N(\theta) = \sum_{t=1}^N I(y(t) - f(\mathbf{Z}^{t-1}, \theta)) \quad (3.53)$$

onde $\mathbf{I}$ é uma medida de distância, como por exemplo $\mathbf{I}(\epsilon) = \|\epsilon\|^2$. A conexão entre o método da máxima probabilidade é obtida por uma escolha particular da norma. Assumindo que os dados são produzidos pela seguinte equação:

$$\mathbf{y}(t) = f(\mathbf{Z}^{t-1}, \theta) + e(t) \quad (3.54)$$

onde $\{e(t)\}$ é uma seqüência randômica com variável independente com densidade da função probabilidade $p(x)$. Então, com $\mathbf{I}(x) = -\log p(x)$, o critério (3.52) é o negativo do logaritmo da função probabilidade para o problema estimado. Isso faz $\hat{\theta}_N$ igual a estimativa da máxima probabilidade.

3.4.6 Propriedade de Convergência

Uma questão essencial é: Qual será a propriedade dos resultados estimados na equação (3.52)? Isto depende naturalmente das propriedades dos dados registrados em $\mathbf{Z}^N$. Em geral é difícil caracterizar a qualidade exata de $\hat{\theta}_N$. Uma forma de melhorar a qualidade de $\hat{\theta}_N$ é melhorar suas propriedades assintóticas utilizando um número maior de dados, ou seja, fazer N tendendo ao infinito. Este é um aspecto importante do método de identificação geral da equação (3.52), que a propriedade assintóticas dos resultados estimados possam ser expressos em termos gerais para modelos de parametrização arbitrária.

O primeiro resultado básico é o que se segue:

$$\hat{\theta}_N \rightarrow \theta^* \quad \text{quando} \quad N \rightarrow \infty \quad (3.55)$$

onde

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} E \mathbf{I}(\epsilon(t, \theta)) \quad (3.56)$$

quanto maior o número de dados avaliados, melhor será a convergência estimada para o valor θ^* , que minimiza o valor da “norma” do erro de predição. Isto é de certo modo a melhor aproximação possível do sistema real que é disponível sem o modelo estrutural. A expectativa E da equação (3.56) é calculada com respeito a todos os distúrbios randômicos que afetam os dados e, também inclui uma média sobre as propriedades da entrada. Isso significa que θ^* fará $\hat{y}(t/\theta^*)$ uma boa aproximação para $y(t)$ com respeito

a estes aspectos de sistemas que são melhorados quando utilizado bons sinais de entrada.

A caracterização do limite estimado pode ser mais precisa no caso de um modelo linear da estrutura.

3.4.7 Sistema Linear de Malha Aberta

Suponha que os dados reais tenham sido gerados por:

$$y(t) = G_0(q)u(t) + v(t) \quad (3.57)$$

onde $u(t)$ e $v(t)$ são independentes. Isso significa que a entrada u tem sido gerada em malha aberta, isto é, independente de y . Considerando $\Phi_u(\omega)$ como espectro de entrada e $\Phi_v(\omega)$ o espectro do distúrbio adicionado, v . Então a predição de erro pode ser escrito como;

$$\begin{aligned} \varepsilon_F(t, \theta) &= \frac{1}{H(q, \theta)} [y(t) - G(q, \theta)u(t)] \\ &= \frac{1}{H(q, \theta)} [G_0(q) - G(q, \theta)u(t) + v(t)] \end{aligned} \quad (3.58)$$

Pela relação de Parseval, a variância da predição de erro pode ser escrita como uma integral sobre o espectro da predição de erro. Esse espectro, por sua vez, é obtido diretamente da equação (3.58) então o limite de θ^* na equação (3.56) pode ser definido como:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \left[\int_{-\pi}^{\pi} |G_0 - G_{\theta}|^2 \frac{\Phi_u(\omega)}{|H_{\theta}|^2} d\omega + \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\Phi_v(\omega)}{|H_{\theta}|^2} d\omega \right] \quad (3.59)$$

Na equação acima, por simplicidade, foi adotado que $G_{\theta} = G(e^{i\omega}, \theta)$ e similarmente H_{θ}

Se o ruído modelado $H(q, \theta) = H_*(q)$ não depende de θ (como no caso do modelo de erro na saída-) expressão (3.59), portanto mostra que o modelo resultante $G(e^{i\omega}, \theta^*)$ dará a função da frequência que é a mais próxima da verdadeira, em uma norma quadrática da frequência com função de ponderação:

$$Q(\omega) = \frac{\Phi_u(\omega)}{|H_*(e^{i\omega})|^2} \quad (3.60)$$

Isso mostra claramente que o ajuste pode ser afetado pelo espectro de entrada Φ_u e pelo ruído do modelo H_* .

3.4.8 Sistema Linear de malha fechada

Assumindo agora que os dados estão sendo gerados por (3.57) e a entrada tem sido parcialmente determinada com realimentação da saída, da forma:

$$u(t) = r(t) - F_y(q)y(t) \quad (3.61)$$

E considerando que o ruído é descrito por:

$$v(t) = H_0(q)e(t) \quad (3.62)$$

onde $e(t)$ é o ruído branco com variância λ . O sinal de referência $r(t)$ é considerado independente do ruído $e(t)$. Usando este fato, junto com a relação de Parseval, obtém-se o seguinte resultado:

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{|G_0 + B_{\theta} - G_{\theta}|^2 \Phi_u + |H_0 - H_{\theta}|^2 \Phi_e^r}{|H_{\theta}|^2} d\omega \quad (3.63)$$

onde

$$B_{\theta} = \frac{(H_0 - H_{\theta}) \overline{\Phi_{ue}}}{\Phi_u} \quad (3.64)$$

$$\Phi_e^r = \lambda \frac{|\Phi_{eu}|^2}{\Phi_u} \quad (3.65)$$

onde Φ_{eu} é o espectro cruzado entre $e(t)$ e $u(t)$, que no caso de (3.61) – (3.62) será:

$$\Phi_{ue}(\omega) = -\lambda \frac{F_y(e^{i\omega})H_0(e^{i\omega})}{1 + F_y(e^{i\omega})G_0(e^{i\omega})} \quad (3.66)$$

o resultado da equação (4.32) contém informações importantes;

- Se existe um θ_0 tal que $H_0 = H_{\theta_0}$ e $G_0 = G_{\theta_0}$, então este valor é sempre um ponto de possível convergência. Se $\Phi_e^r > 0 \forall \omega$ (que de acordo com (3.66) significa que $u(t)$ não pode ser determinado inteiramente de $e(t)$ por filtros lineares), então isso é apenas um ponto de possível convergência.

- Se H_θ não pode atingir o valor H_0 (isto é, se H_θ é fixo como um modelo de erro de saída), e $\Phi_{ue} \neq 0$, então há sempre um erro permanente (bias) B_θ com relação a função de transferência G_0 verdadeira. Portanto, é necessário que o modelo do ruído possa ser, também, descrito corretamente no modelo da estrutura para se obter uma função de transferência estimada no caso de malha-fechada sem erro permanente.

Contudo, a principal conclusão é que o PEM, aplicado de uma maneira simples e direta (straightforward), não sendo considerado possíveis efeitos de realimentação, fornecerá estimativas sem erro permanente sempre que o sistema real estiver representado no modelo. O único requisito é que a entrada $u(t)$ não pode ser formada apenas por $e(t)$ filtros lineares invariantes no tempo.

3.4.9 Uso do Método de Predição de erro (PEM)

A família de métodos PEM tem a vantagem de ser aplicável a uma grande variedade de modelos de estruturas. Ele também trata dados de malha fechada de uma maneira direta e fornece os melhores resultados possíveis (matriz de covariância mínima), desde que o sistema real esteja contido no modelo. As propriedades são aproximadas quando o sistema verdadeiro não pode ser representado pelo modelo estrutural.

A principal desvantagem do PEM é que a busca numérica em (3.53) pode ser trabalhosa e necessita de uma boa estimativa inicial. Para múltiplas variáveis, o modelo linear de caixa-preta para modelos no espaço de estados pode ser obtido de maneira conveniente, combinando o uso do PEM com os chamados Métodos do Subespaço (VAN OVERSCHE ; MOOR, 1996)

Capítulo 4 – Resultados Obtidos

Este capítulo tem o objetivo de mostrar como foi projetado e avaliado o absorvedor tipo viga sanduíche. A proposta do absorvedor TVA foi avaliada através dos resultados obtidos com o programa Ansys e da bancada experimental.

4.1 Materiais

A estrutura “sanduíche” utilizada nos testes experimentais é formada por duas vigas de acrílico com dimensões 80x15x1mm. Este material foi escolhido por ser de fácil manipulação e por não possuir propriedades magnéticas, ou seja, não interfere no campo magnético aplicado. Entre as vigas há um vão (espaço vazio) de 3mm onde é colocado o fluido Magnetoreológico, figura (4.1). Para o fluido ficar contido no interior destas vigas, foi utilizado uma borracha de silicone, como a usada para vedar estruturas como aquários, por exemplo. Esta borracha de silicone foi escolhida porque não reage com o campo magnético e com o fluido, figura (4.2).

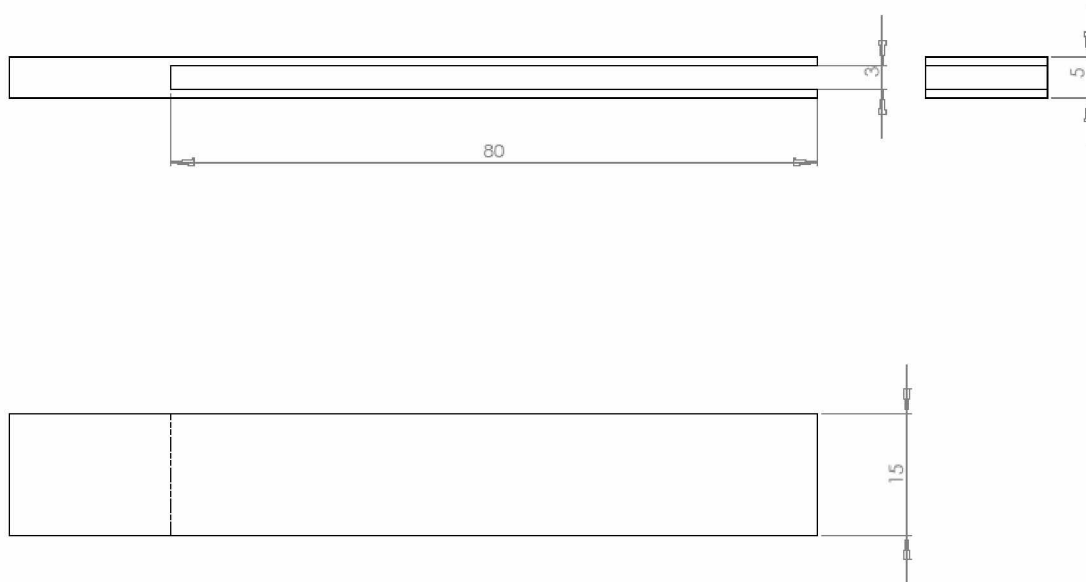


Figura 4.1: Dimensões da viga Sanduíche

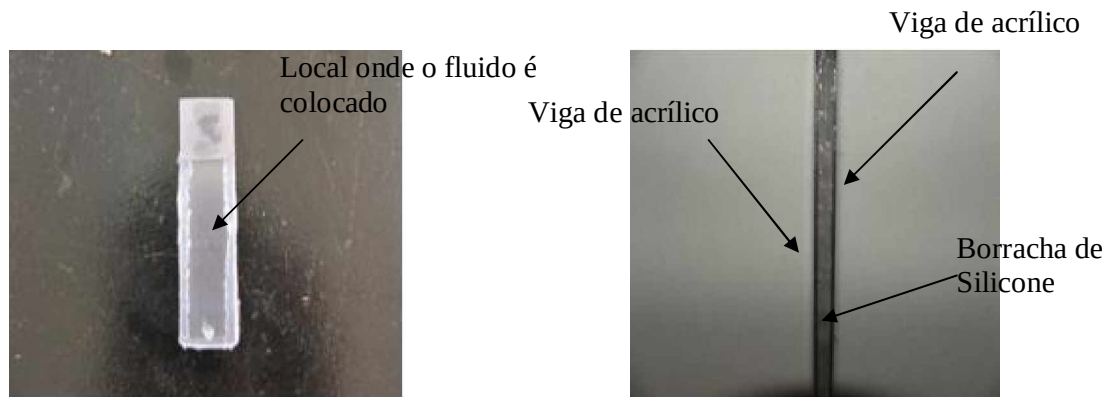


Figura 4.2: Viga sanduíche utilizada nos testes experimentais

Para encontrar o modelo da estrutura foi utilizando o método de identificação PEM, com excitação impulsiva. A figura (4.3) mostra um desenho esquemático da montagem experimental utilizando o martelo de impacto. O ensaio foi realizado utilizando um martelo de impacto PCB 086C20 figura (4.4), que fornece a energia de entrada no sistema (excitação), e um acelerômetro da PBC modelo 352C22 Piezotronics®, figura (4.5), que fornece a resposta da estrutura. Para a aquisição do sinal foi utilizada a placa da dSpace modelo 1103 figura (4.6) através do programa Simulink/Matlab. Com os dados medidos, pode-se encontrar a função de resposta em frequência (FRF) do sistema. Os parâmetros (características) da estrutura, incluindo o coeficiente de amortecimento, foram estimados através do método de identificação PEM. A rotina foi implementada no programa Matlab utilizando a função `ident`.

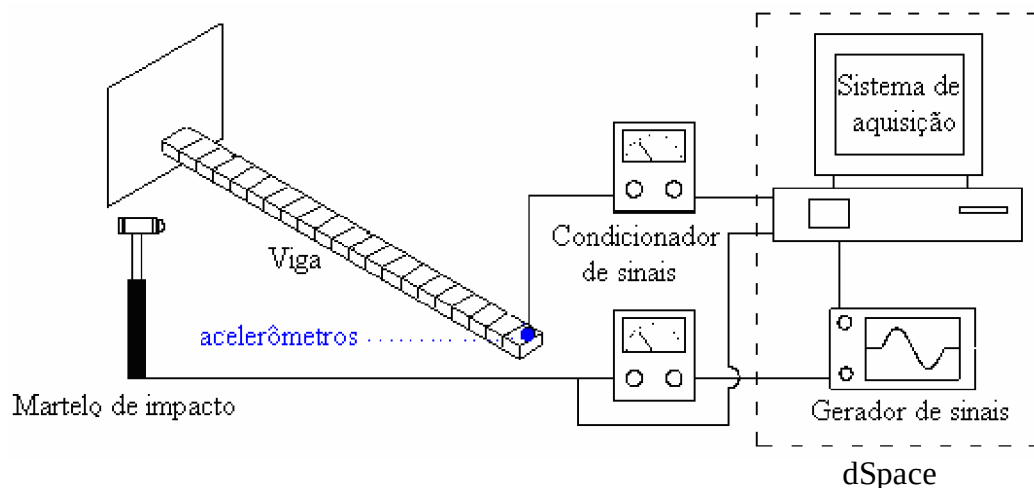


Figura 4.3: Figura esquemática da montagem experimental

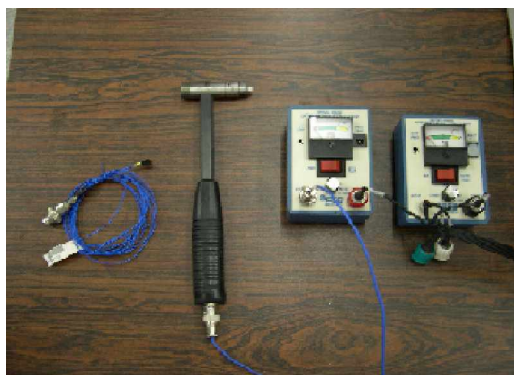


Figura 4.4: Foto do Martelo de impacto e amplificadores

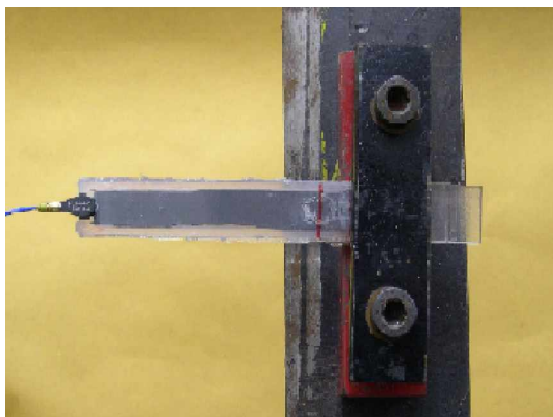


Figura 4.5: Foto do Acelerômetro PCB acoplado a viga sanduíche

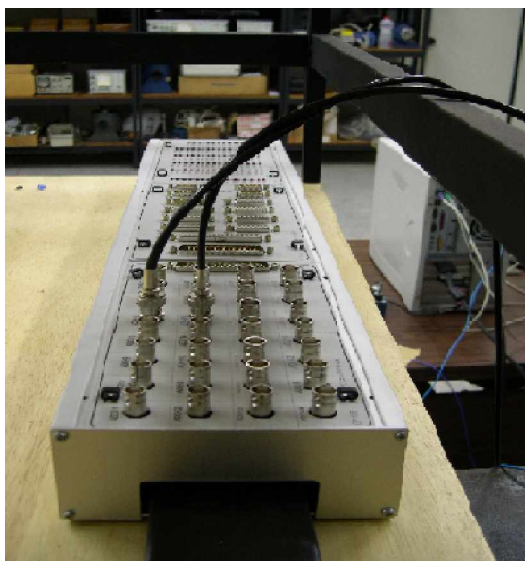


Figura 4.6:Foto da Placa dSpace 1103

A variação das propriedades do fluido MR é obtida através da variação do campo magnético, portanto, foi necessário montar um sistema que fornecesse este

campo. Depois de se avaliar algumas possibilidades, o uso de solenóides se mostrou a melhor opção, uma vez que é relativamente fácil de ser construído e fornece uma boa faixa de trabalho. Para a aplicação do campo foi necessário utilizar dois solenóides, um de frente para o outro para garantir a uniformidade do campo magnético, figura (4.7). Nesta configuração, como visto no capítulo 2, o campo magnético no centro do solenóide é mais intenso e uniforme e na parte externa se dissipa. Esta distorção aumenta quando a distância entre o ponto onde queremos o campo magnético e o solenóide é aumentada. No entanto, utilizando a configuração com dois solenóides com polaridade diferentes (um norte e outro sul), pode-se diminuir esta dissipação e manter a faixa no centro do solenóide com um campo magnético uniforme. Além disso, esta configuração é equivalente a se colocar dois solenóides em série e, portanto, o campo magnético entre eles é a soma do campo magnético dos dois.

Na construção destes solenóides foi utilizados um fio de cobre esmaltado, como os utilizado no enrolamento de motores elétricos e transformadores, e no centro foram utilizadas chapas de aço-silício, encontradas em núcleo de transformadores. A figura (4.8) mostra as dimensões do núcleo utilizado. Foi escolhido utilizar um núcleo de aço, porque, como mostra a equação (2.25), o campo magnético depende da corrente, do número de espiras e do coeficiente de permeabilidade magnético do meio. Como a corrente elétrica é limitada pelo gerador de corrente elétrica, modelo PS 3003 D figura (4.9), e o número de espiras estava limitado ao comprimento do fio disponível, a alternativa foi encontrar um meio de propagação com um coeficiente de permeabilidade que possibilitasse atingir um campo magnético com a magnitude desejada. O número de espiras utilizado em cada solenóide foi de 370.

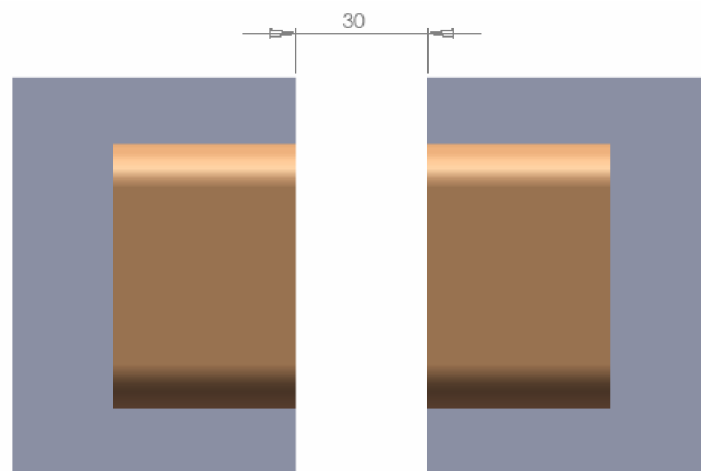


Figura 4.7: Dois solenóides, um de frente para o outro, para aplicação uniforme do campo magnético.

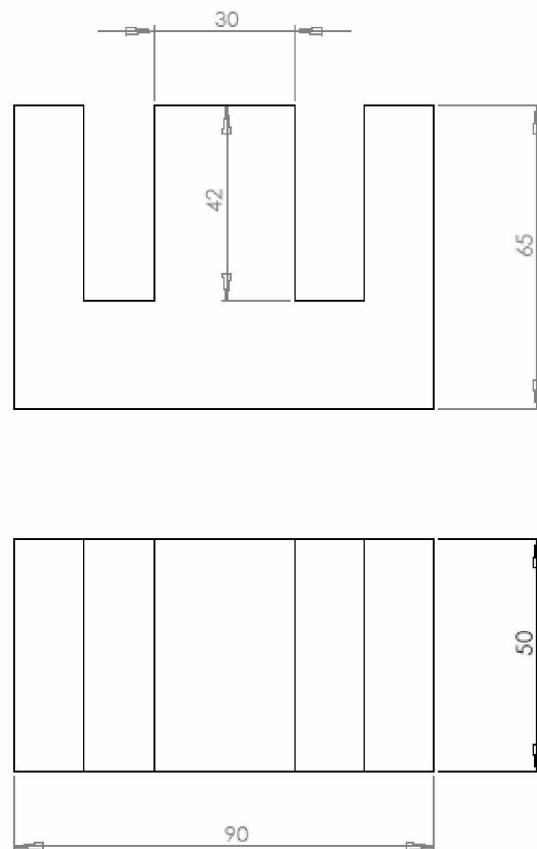


Figura 4.8: Dimensões do Núcleo utilizado



Figura 4.9: Gerador de corrente modelo PS 3003 D

4.2 Resultados obtidos com o programa Ansys

Como mencionado no capítulo 3, o programa Ansys foi utilizado com o objetivo de fornecer uma comparação entre o comportamento previsto pelo modelo no Ansys e o obtido experimentalmente. Por não possuir as propriedades exatas da viga de acrílico, do silicone e do fluido MR, foi utilizado algumas propriedades obtidas nos catálogos fornecidas pelo fabricante como pontos de partida. A partir desta estimativa inicial, foi

realizado um ajuste para aproximar as propriedades do sistema real na faixa de interesse ao sistema modelado. A tabela 4.1 mostra as propriedades utilizadas no programa Ansys para aproximar as frequências naturais obtidas experimentalmente das obtidas com o modelo.

Tabela 4.1: Frequência natural e propriedades utilizadas no modelo do programa Ansys

Frequências Naturais	Propriedade do Acrílico	Propriedade do Fluido MR com o Silicone
38.9 Hz	Densidade – 1450 kg/m^3	Densidade – 3570 kg/m^3
151.63 Hz	Módulo de Elasticidade – $3.3 \times 10^9 \text{ Pa}$	Módulo de Elasticidade – $5.4 \times 10^5 \text{ Pa}$
216.72 Hz	Coeficiente de Poisson – 0.39	Coeficiente de Poisson – 0.25

As frequências naturais obtidas no Ansys diferem das medidas experimentais. A diferença se deve, principalmente, ao fato de não conhecermos exatamente as propriedades do acrílico, também ao fato do silicone não ser representado separadamente, pois não temos dados sobre suas propriedades. Outro fator importante é o fato do fluido MR apresentar um comportamento não linear e, por este motivo, de difícil representação através do método de elementos finitos. Assim, o modelo no programa Ansys foi utilizado apenas para comparar o comportamento da estrutura qualitativamente.

Na figura (4.10) pode-se ver como o sistema se comporta quando variamos o amortecimento do elemento 2, isto é, o elemento que representa o fluido MR com silicone. A tabela 4.2 mostra os valores do amortecimento utilizado em cada ensaio.

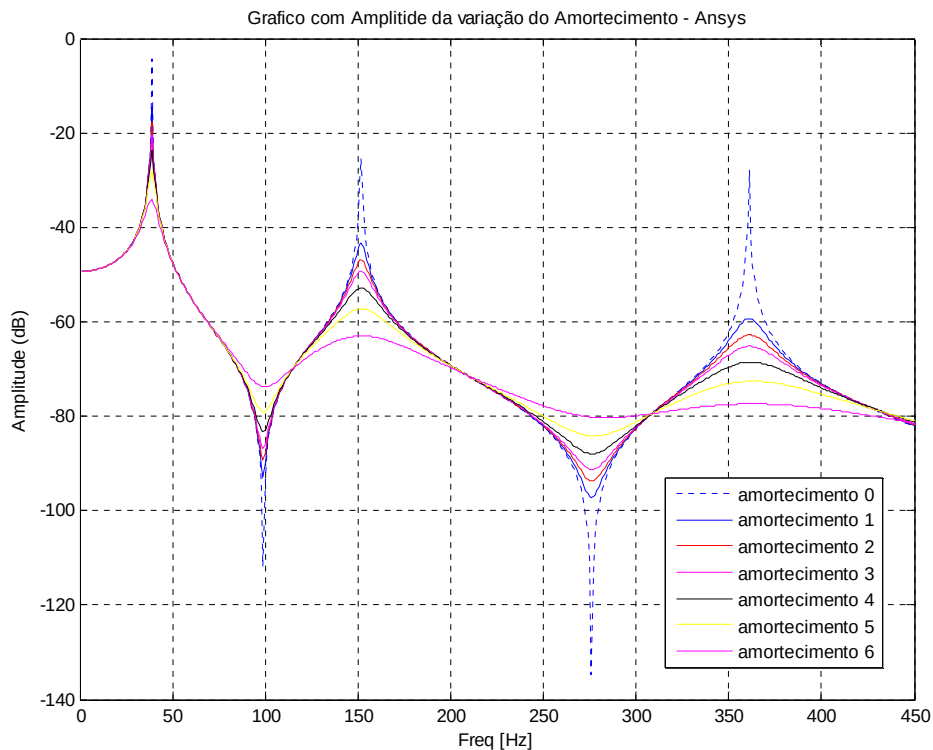


Figura 4.10: Gráfico mostrando o comportamento da estrutura em função da variação do o amortecimento do elemento 2.

Tabela 4.2: Valores do amortecimento utilizado no programa Ansys para cada ensaio.

Legenda	Valor do Amortecimento (Ns/m)
Amortecimento 0	0
Amortecimento 1	0.0001
Amortecimento 2	0.00015
Amortecimento 3	0.0002
Amortecimento 4	0.0003
Amortecimento 5	0.0005
Amortecimento 6	0.001

A figura (4.11) mostra em detalhes a variação das amplitudes para a primeira frequência natural e, nota-se que o amortecimento interfere na amplitude de vibração e não nas frequências naturais do sistema.

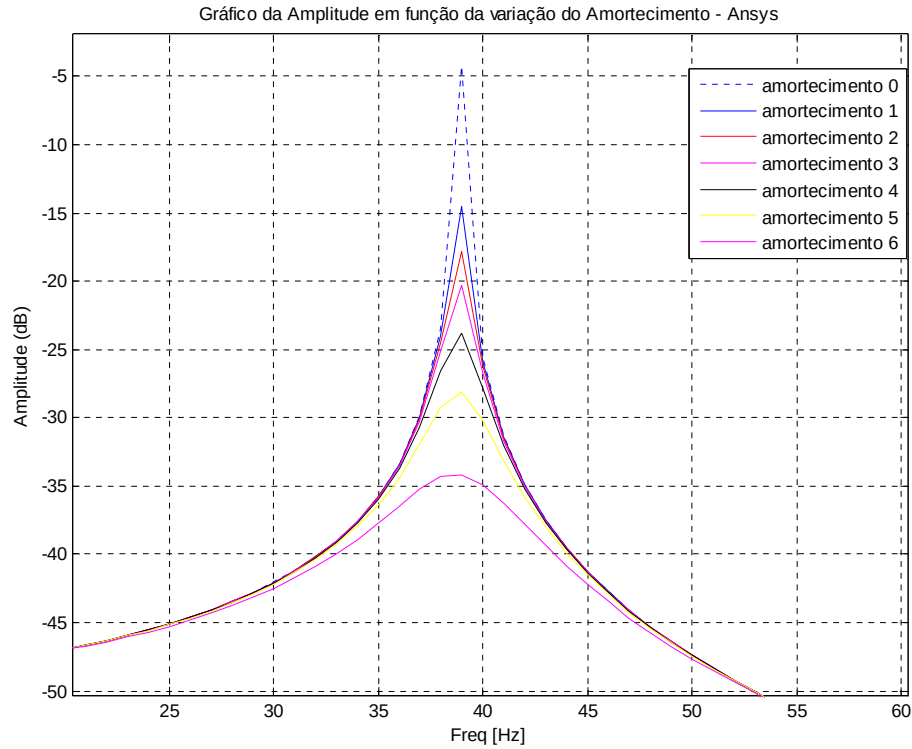


Figura 4.11: Gráfico da variação de amplitude para a primeira frequência natural em função do amortecimento.

Com estes dados foi possível realizar a parte experimental, tendo uma idéia prévia do comportamento esperado para o sistema. Deve-se destacar que os resultados do programa Ansys foram obtidos utilizando as propriedades de sistemas lineares.

4.3 Resultados obtidos experimentalmente

Antes de iniciar a avaliação do comportamento da viga sanduíche, foi preciso realizar o estudo sobre o campo magnético, para garantir um campo magnético uniforme na região onde a viga será colocada. Com este estudo, também, foi possível estimar o coeficiente de permeabilidade magnética do núcleo. O núcleo usado no experimento foi reutilizado de um núcleo de um equipamento com defeito, substituindo a bobina defeituosa pela bobina com 370 espiras. Como não se possuía a composição do material do núcleo, foi necessário encontrar experimentalmente o coeficiente de permeabilidade magnética do material. Para estas medidas foi utilizado um Gaussmeter modelo MG2000-20, fabricado pela empresa Magnetos Gerais, figura (4.12). Estas medidas possibilitaram a verificação da equação (2.25) para se obter uma relação

confiável entre corrente elétrica aplicada e campo magnético e, possibilitou ainda verificar qual a relação entre campo magnético e distância entre os núcleos.

Para verificar se o campo magnético realmente é uniforme no centro do solenóide, este foi dividido em 35 pontos, mostrados na tabela (4.3) e figura (4.13). Nestes pontos foram realizadas medidas para se verificar como o campo magnético varia entre estas posições. Estes pontos foram colocados (desenhados) em uma placa de acrílico e esta placa posicionada entre os dois solenóides, figura (4.14). É importante destacar que a corrente aplicada nos solenóides e a distância entre os solenóides se manteve constante enquanto as medidas foram realizadas. A distância entre os solenóides foi de 30 mm, mostrada na figura (4.7), e a corrente elétrica aplicada de 1A. A figura (4.15) mostra a distribuição do campo magnético com relação ao núcleo.



Figura 4.12: Foto do equipamento para medir o campo magnético - Gaussmeter

Tabela 4.3: Pontos de Medidas de Campo Magnético no Núcleo do Solenóide

Linhas	Coluna	A	B	C	D	E	F	G
1		1A	1B	1C	1D	1E	1F	1G
2		2A	2B	2C	2D	2E	2F	2G
3		3A	3B	3C	3D	3E	3F	3G
4		4A	4B	4C	4D	4E	4F	4G
5		5A	5B	5C	5D	5E	5F	5G

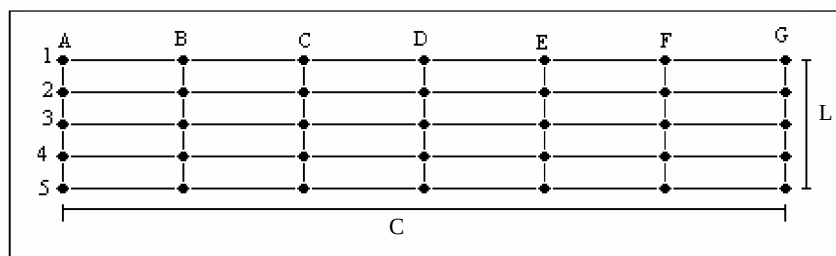


Figura 4.13: Figura esquemática com a posição dos pontos de medida do campo magnético, sendo $L = 35 \text{ mm}$ e $C = 55 \text{ mm}$.

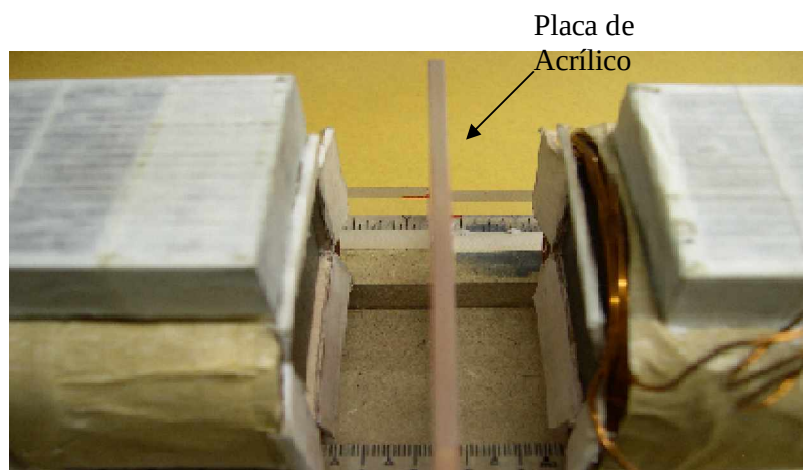
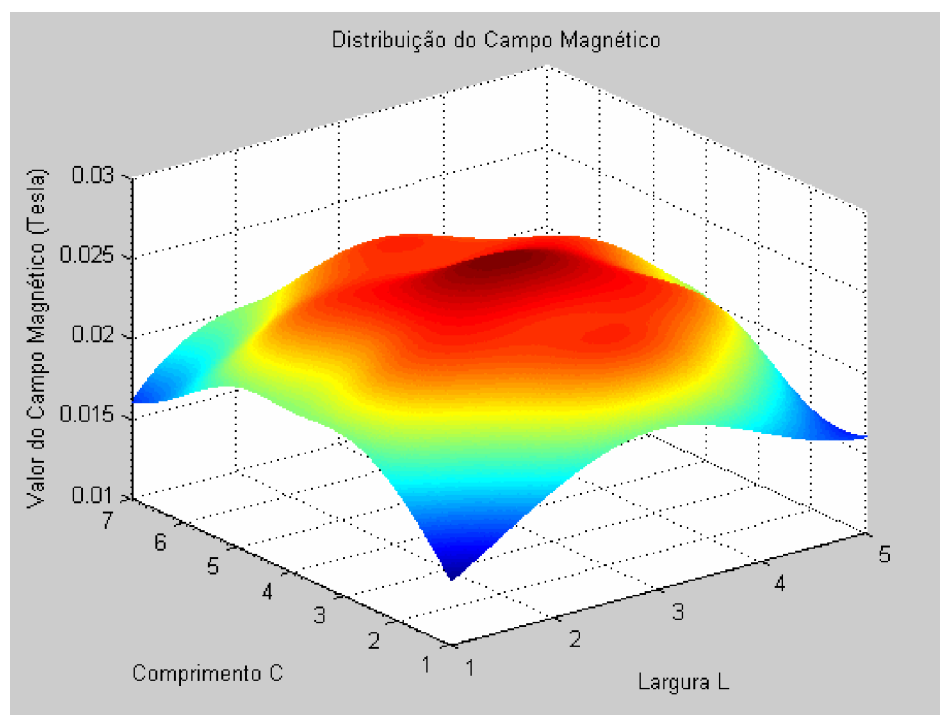
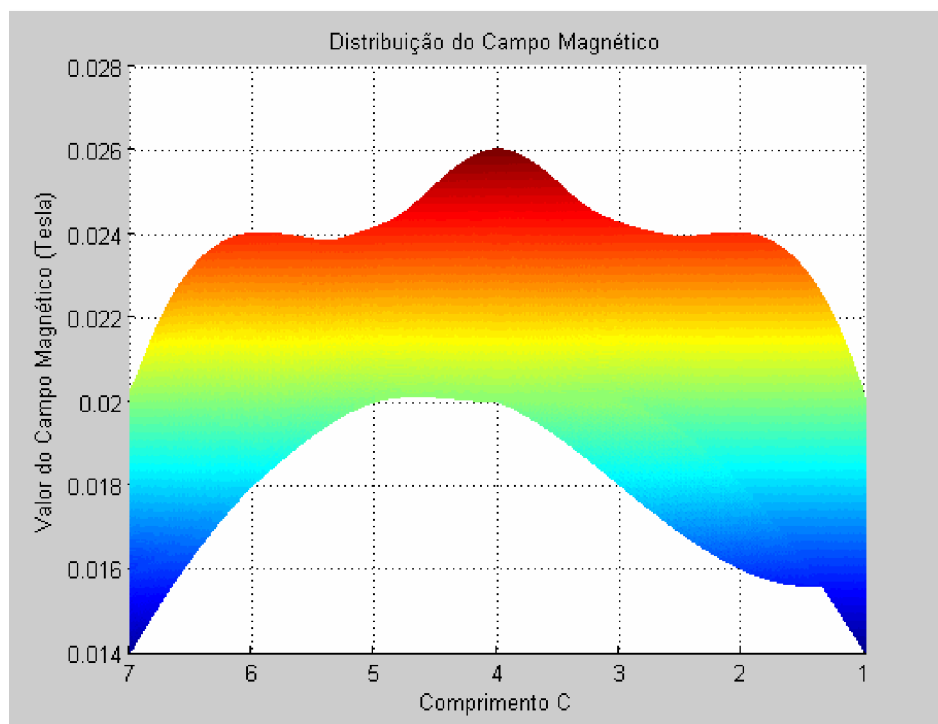


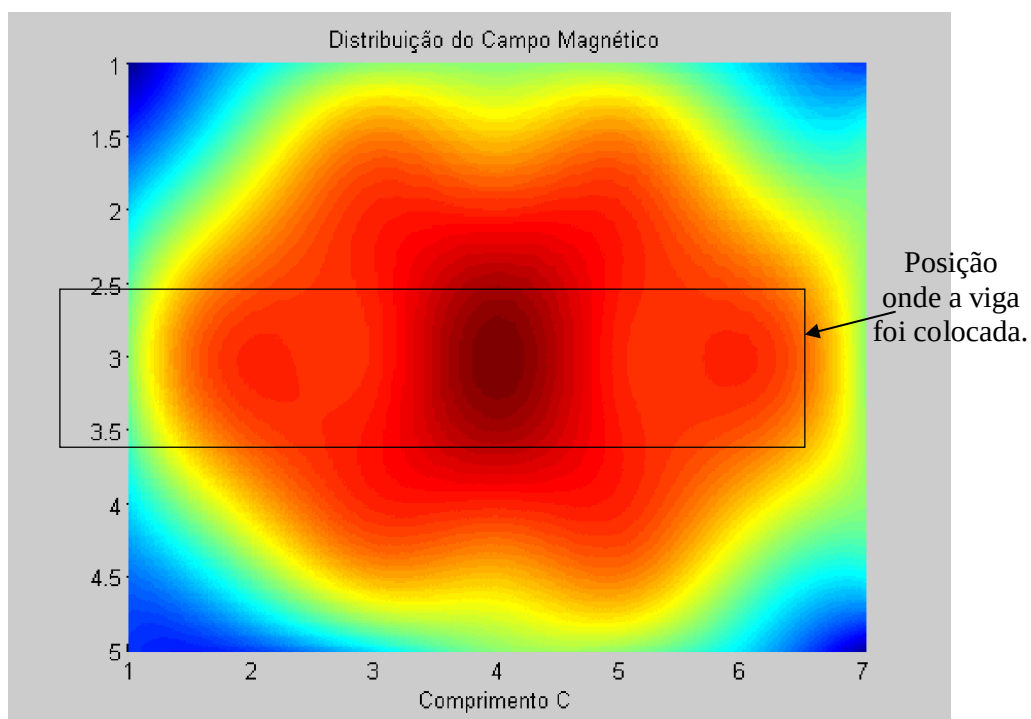
Figura 4.14: Foto da placa de acrílico entre os solenóides



(a)



(b)



(c)

Figura 4.15: Distribuição do Campo Magnético em relação aos Pontos de medida; (a) Vista tridimensional; (b) vista lateral; (c) vista superior.

Através das figuras (4.15) (a), (b) e (c), podemos confirmar que o campo magnético no centro do solenóide, possui uma distribuição aproximadamente uniforme.

Como podemos ver na figura (4.15 c) a variação do campo entre os valores de 2 a 4 no eixo vertical é bem pequena e está concentrada próxima das extremidade. Esta diferença é menor que 0.004 (Tesla). A tabela 4.4 mostra os valores medidos nas posições no centro do núcleo. O equipamento utilizado tem como valor de fundo de escala 0,002. A viga será posicionada nesta região, entre os valores 2 a 4 no eixo vertical da figura (4.15c), portanto, podemos considerar que a viga é submetida a um campo magnético uniforme. Como esperado, nas extremidades do solenóide, onde há uma maior dispersão das linhas do campo magnético, os valores são menores e, ao se aproximar do centro do solenóide, onde há uma concentração das linhas de campo, tanto verticalmente como horizontalmente, o campo aumenta, tendo o maior valor no centro.

Tabela 4.4: Distribuição do Campo Magnético no núcleo (Tesla)

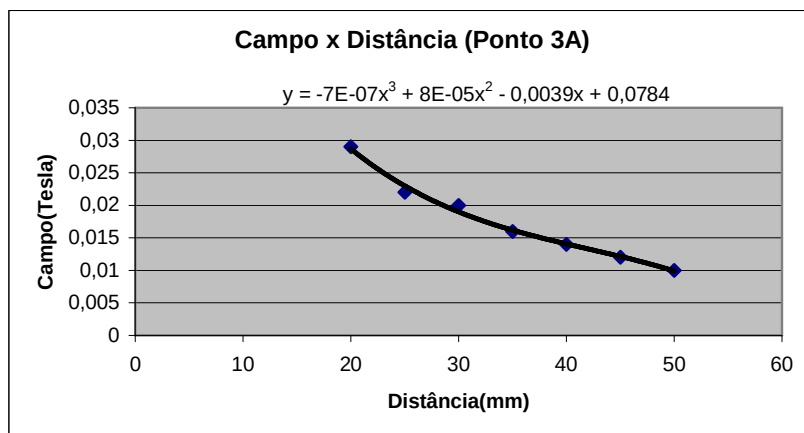
Pontos para campo com 1A e distância de 30mm							
LinhasColuna	A	B	C	D	E	F	G
1	0,014	0,018	0,02	0,02	0,02	0,018	0,016
2	0,018	0,022	0,024	0,024	0,024	0,022	0,02
3	0,02	0,024	0,024	0,026	0,024	0,024	0,02
4	0,018	0,022	0,024	0,024	0,024	0,022	0,02
5	0,016	0,016	0,018	0,02	0,02	0,018	0,014

Para se analisar a influência da variação da distância entre os solenóides sobre o campo magnético, foram utilizados os mesmos pontos de medidas. O campo magnético foi mantido constante e a corrente aplicada no solenóide foi de 1A. O valor do campo obtido e da distância entre o solenóide estão na tabela 4.5.

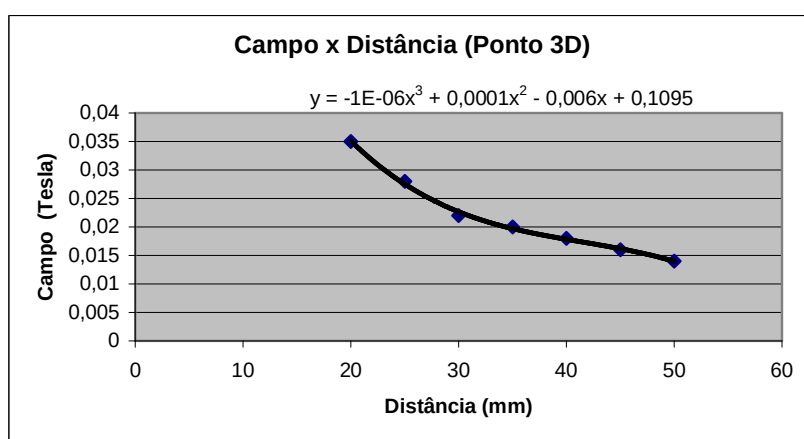
Tabela 4.5: Valores do Campo magnético (Tesla) e distância entre os solenóides

Corrente no Solenóide 1A	Pontos onde foi feita a medida								
Distância (mm)	1A	3A	5A	1D	3D	5D	1G	3G	5G
20	0,024	0,029	0,024	0,024	0,035	0,024	0,024	0,024	0,024
25	0,016	0,022	0,018	0,022	0,028	0,022	0,016	0,022	0,016
30	0,014	0,02	0,015	0,019	0,026	0,018	0,016	0,020	0,014
35	0,012	0,016	0,013	0,014	0,02	0,014	0,012	0,014	0,012
40	0,01	0,014	0,01	0,014	0,018	0,014	0,01	0,014	0,01
45	0,01	0,012	0,01	0,012	0,016	0,012	0,01	0,012	0,01
50		0,01		0,01	0,014	0,01		0,01	

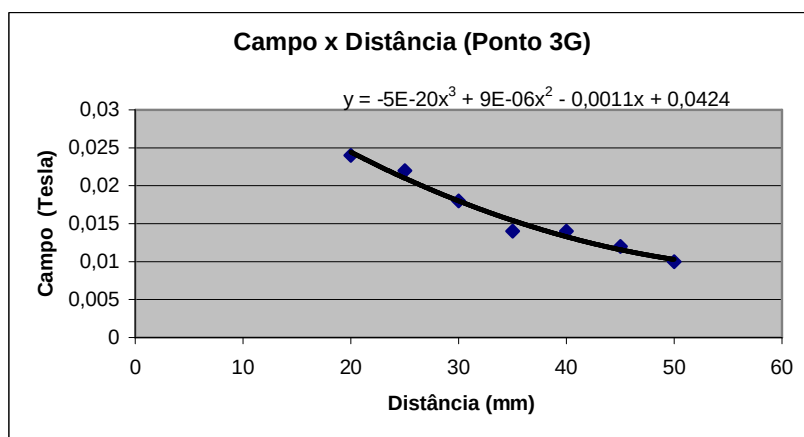
Utilizando os dados da tabela (4.5) e o software Excel, foram estimadas curvas para mostrar a relação entre a variação da distância e a variação do campo magnético. A figura (4.16) mostra a relação entre distância e campo magnético para os pontos 3A, 3D e 3G.



(a)



(c)



(c)

Figura 4.16: Relação entre variação da distância entre solenóides e campo magnético; (a) valor do campo no ponto 3A; (b) valor do campo no ponto 3D (centro do solenóide); (c) valor do campo no ponto 3G

Os gráficos mostrados nas figuras (4.16) mostram que a relação entre a distância e a variação do campo magnético pode ser representada por uma equação do terceiro grau do tipo:

$$y = ax^3 + bx^2 + cx + d \quad (4.1)$$

onde y é o valor do campo magnético e x a distância entre os núcleos e, a, b, c e d são constantes. Comparando a equação (4.1) com as equações encontradas nos gráficos da figura (4.16) podemos ver que os valores das constantes a, b, c e d , são valores pequenos, da ordem de 10^{-2} ou menores, o que mostra que para pequenas variações nas distâncias o campo permanece praticamente constante.

De posse dos valores da permeabilidade magnética do núcleo, do número de espiras e da corrente elétrica, mostrados na tabela (4.6), pode-se comparar o valor do campo magnético encontrado através da equação (2.25) com os encontrados experimentalmente, tabela (4.7).

Tabela 4.6: Dados necessários para o cálculo teórico do campo magnético

Número de Espiras	370
Permeabilidade Magnética do Núcleo	$4,547e^{-5} \pm 0,2e^{-5} \text{Tm/A}$
Corrente Elétrica	0 a 2,4A

Tabela 4.7: Comparação entre o campo magnético teórico e experimental para o solenóide.

Corrente(A)	Campo Magnético (Tesla) - Calculado	Campo Magnético (Tesla) - Experimental	Porcentagem de Erro
0.55	0.009	0.010	11.10
0.83	0.014	0.015	7.14
1.0	0.017	0.018	5.88
1.2	0.020	0.020	0
1.7	0.029	0.28	-3.44
2.0	0.034	0.32	-5.88
2.5	0.042	0.38	-9.52

O valor da permeabilidade magnética do núcleo, mostrado na tabela (4.6), é um valor médio experimental, uma vez que não se conhece, exatamente, o material do núcleo utilizado. A tabela (4.7) mostra que o erro entre os valores estimados e experimentais variam em função do campo magnético. Isto se deve ao fato do valor $4,547e^{-5} \text{Tm/A}$ ser um valor médio para a permeabilidade magnética. Um fator

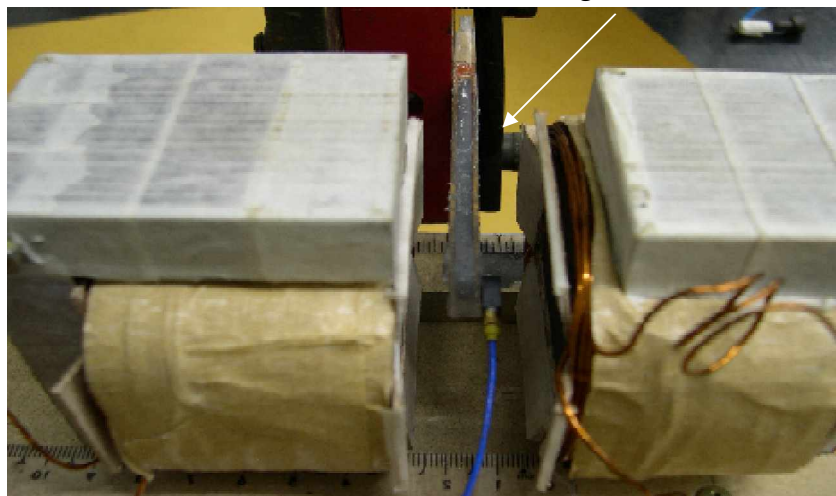
importante que explica a variação do erro é o fato da escala do equipamento variar de 0,002 e, os valores ímpares experimentais são valores aproximados quando o gaussmeter não estabilizava o valor do campo em um valor fixo. Esta tabela mostra que a equação (2.25) nos fornece uma boa aproximação para o campo de apenas um solenóide.

Neste trabalho, para calcular o valor do campo magnético utilizando a equação (2.25), como os solenóides estão em série, bastaria multiplicar o valor encontrado por 2, que fornece o valor do campo magnético no centro dos solenóides, ou seja, para 1 A o valor será 0.034 Tesla. Se compararmos este valor com o encontrado na tabela (4.5), na linha de 30mm na coluna do ponto 3G, vamos encontrar o valor experimental de 0,020. Esta diferença ocorre porque na equação (2.25) não se considera a perda devido a distância entre os solenóides.

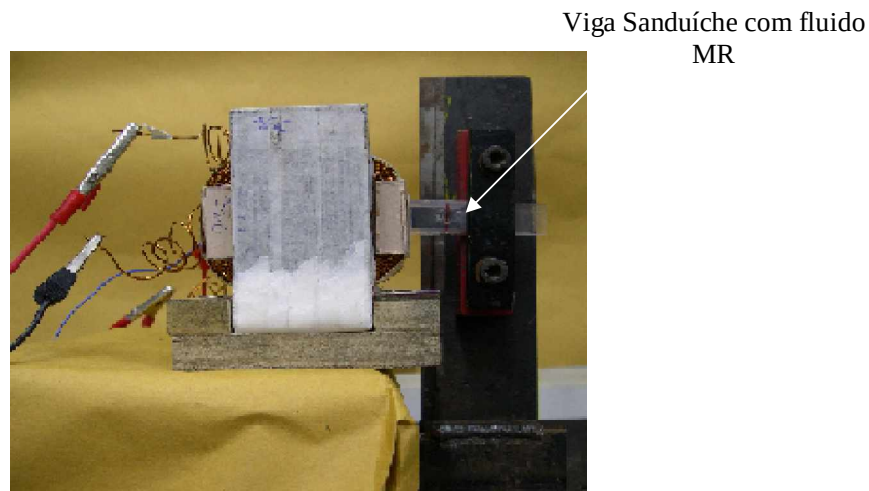
O estudo do campo magnético foi importante, pois mostrou que para uma distância fixa, como no caso deste trabalho, o campo magnético pode ser considerado constante na região onde a viga foi posicionada. Também se verificou que a equação (2.25) proporciona um resultado aproximado para o campo magnético na superfície do solenóide e que é preciso ser levado em consideração o distanciamento dos núcleos.

Depois de se verificar que a região onde a viga sanduíche será colocada é uma região com o campo magnético uniforme, foi iniciada a análise do comportamento do absorvedor tipo viga sanduíche quando submetido a um campo magnético variável. A figura (4.17) mostra a foto com a viga posicionada no centro dos solenóides, com a distância entre eles de 30mm.

Viga Sanduíche com fluido MR



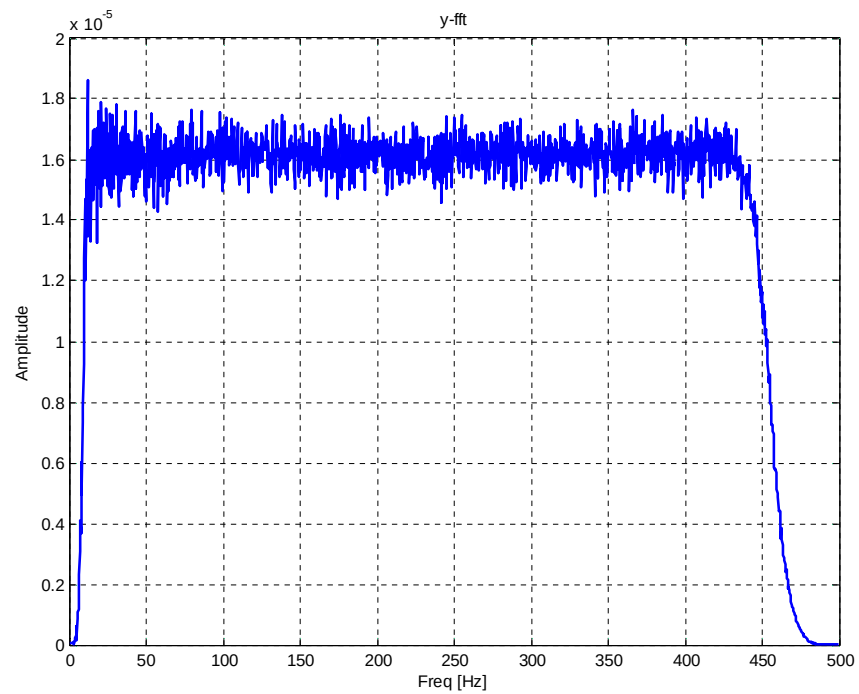
(a)



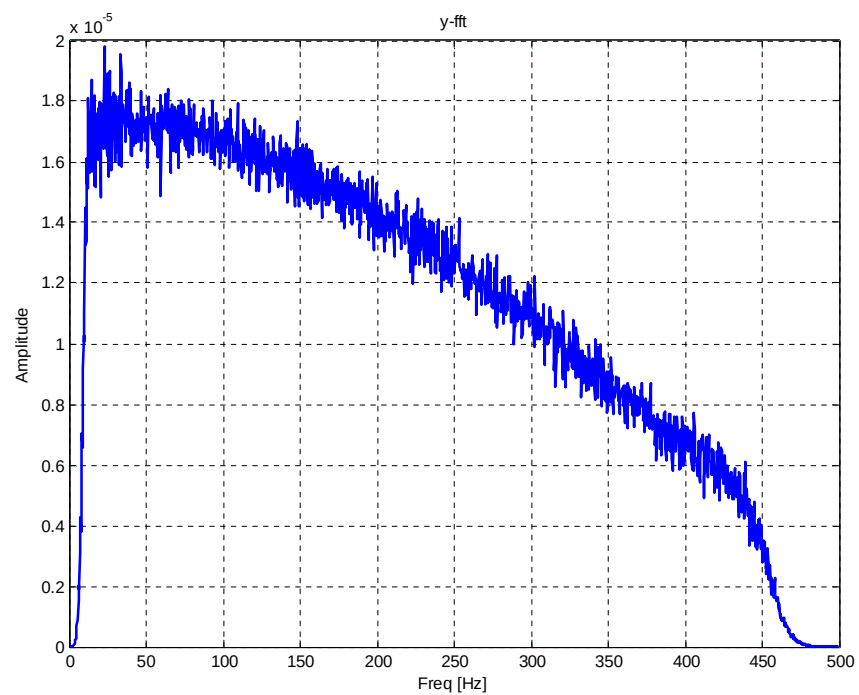
(b)

Figura 4.17: Foto da viga sanduíche no centro dos solenóides

Como citado anteriormente, a aquisição de dados foi realizada utilizando a placa dSpace. Pelo fato do software da placa não possuir um programa específico para aquisição de dados, foi preciso implementar este programa. Uma rotina, que neste caso, apenas possibilitou a gravação do sinal no domínio do tempo. Foi utilizado um filtro passa banda de 5 a 450 Hz, mas o programa possuía algumas limitações, como por exemplo, não possui função para ajustar automaticamente a escala do sinal de entrada e de saída. Este fato causou algumas dificuldades, pois para o tipo de teste realizado (impacto) é difícil conseguir a mesma energia de entrada para todos os testes e foi preciso realizar várias medidas para o mesmo teste até encontrar um valor de energia de entrada que estivesse na escala pré-determinada. Como o objetivo do trabalho é avaliar o comportamento do absorvedor, foi estipulado que para cada campo magnético será utilizado (armazenado) 6 sinais de entrada e de saída. Com estes sinais foi possível realizar um estudo sobre a repetibilidade do ensaio e também, assegurar que pelo menos um destes sinais estivesse em boas condições. O processamento do sinal foi realizado utilizando programas implementados no Matlab. A figura (4.18) mostra a Transformada Rápida de Furrie (FFT) de dois tipos de sinais de entrada obtidos experimentalmente. No primeiro sinal a distribuição da energia é praticamente constante na faixa de interesse, o que não acontece no segundo tipo de sinal.



(a)



(b)

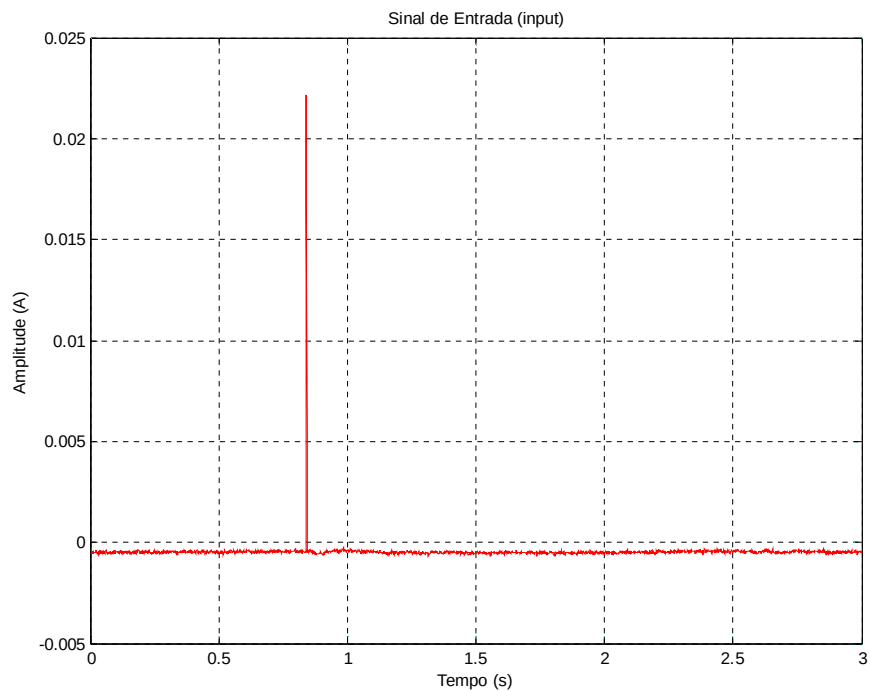
Figura 4.18: FFT do sinal de entrada; (a) sinal bom; (b) sinal encontrado em vários casos e que foram descartados.

A figura (4.18) (a) mostra o sinal obtido em um dos ensaios considerado como “bom” e a figura (4.18) (b) mostra o tipo de excitação encontrada nos casos que foram descartados.

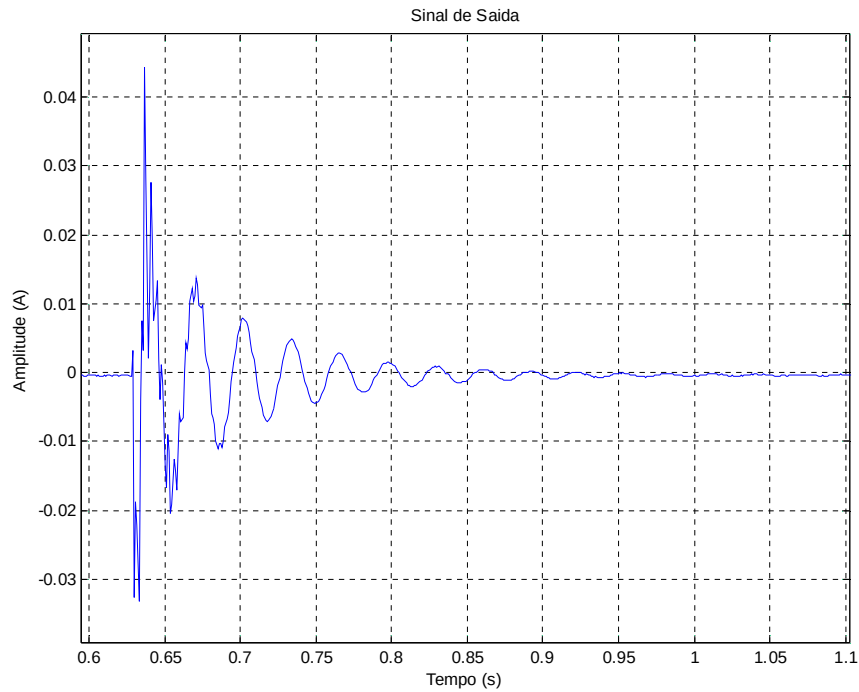
Com o sinal de entrada e saída foi possível encontrar a Função de Resposta em Frequência (FRF) do sistema e, utilizando o método de identificação PEM, foi possível encontrar o modelo modal na forma de espaço de estados e, com este modelo, o coeficiente de amortecimento para cada campo magnético aplicado.

Inicialmente, os testes foram realizados apenas em uma viga, com o objetivo de se verificar quais as frequências naturais do acrílico. Na sequência foram realizados testes na estrutura projetada, para as condições sem fluido MR, com fluido MR e, finalmente, com o fluido MR considerando a variação do campo magnético.

A figura (4.19) mostra os resultados no domínio do tempo para a viga de acrílico. Nota-se que o acrílico possui uma grande capacidade de amortecimento.



(a)



(b)

Figura 4.19: (a) Sinal de entrada (input); (b) Resposta ao impulso da viga sem silicone

Como se pode ver na figura (4.19) (b), o acrílico absorve a energia da excitação em menos de 0,6 segundos. Esta alta capacidade de absorver energia dificultou a visualização das frequências naturais quando a viga foi submetida a uma excitação randômica, através de um excitador eletro-mecânico (shaker). Por este motivo, a análise do comportamento do sistema foi realizada através da resposta ao impulso. A figura (4.20) mostra o gráfico da Função de Resposta em Frequência (FRF) de uma viga isoladamente.

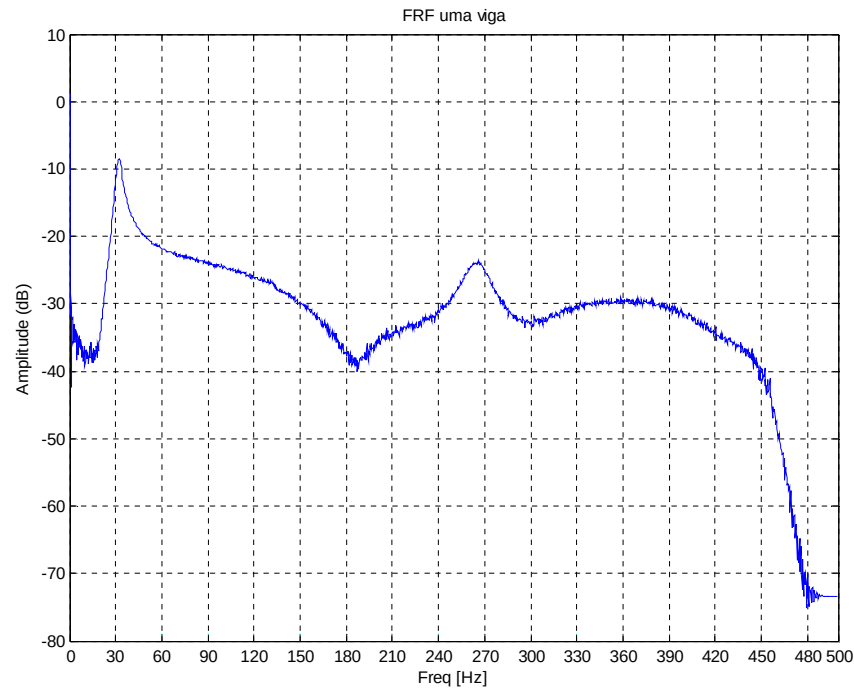


Figura 4.20: Gráfico da Função de Resposta em Frequência de uma viga de acrílico

A frequência natural do primeiro modo de vibrar é de aproximadamente 32 Hz; também, pode-se ver que há outra frequência, próxima de 270 Hz.

O próximo passo foi a realização dos testes para a viga sanduíche “colada” com o silicone mas, sem introduzir o fluido MR. Este ensaio teve como objetivo comparar a resposta da viga sem e com o silicone, para verificar qual influência do silicone no sistema. A figura (4.21) mostra a FRF do sistema.

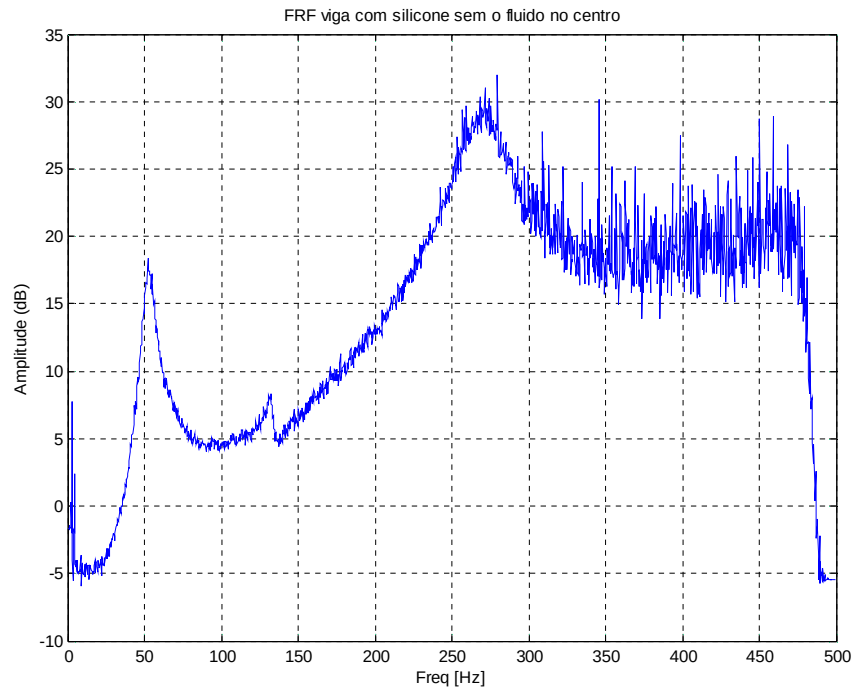


Figura 4.21: Gráfico da Função de Resposta em Frequência da viga sanduíche com silicone, sem o fluido magnetoreológico no centro.

Como esperado, quando se uniu as duas vigas com o silicone, houve uma alteração nas frequências naturais, decorrente do fato do novo sistema possuir a rigidez de duas vigas de acrílico e a influência do silicone. Como a primeira frequência natural passou de 32 Hz para 50 Hz, isto mostra que a união das vigas com o silicone aumentou a rigidez da estrutura.

Em uma terceira etapa, os testes foram realizados na mesma estrutura com introdução do fluido MR, mas sem aplicar o campo magnético.

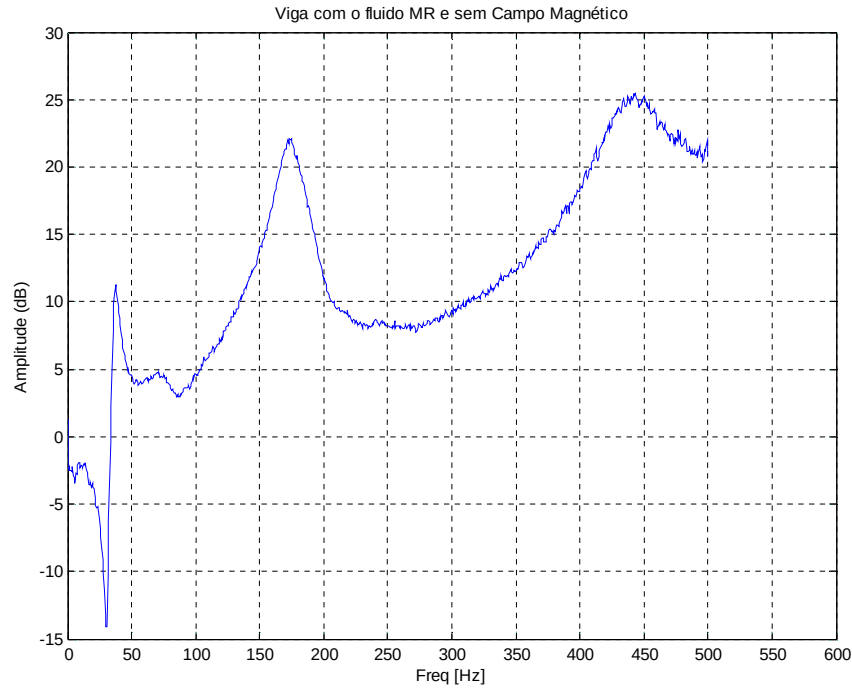


Figura 4.22: Gráfico da Função de Resposta em Frequência para a viga sanduíche com o fluido magnetoreológico no centro e campo magnético igual a zero.

A figura (4.22) mostra que a introdução do fluido MR provocou uma variação nas características do sistema, mas diferentemente da introdução do silicone, a introdução do fluido MR diminuiu a primeira frequência de 50 Hz para 36 Hz. Isto mostra que o fluido MR tem maior influência no acréscimo de massa ao sistema. A figura (4.23) mostra a FRF do sistema para diversos testes nas mesmas condições. Nota-se que o fluido MR também acrescentou uma característica não linear ao sistema, pois, para a mesma configuração, a FRF não nos fornece o mesmo valor para a amplitude, ou seja, não tem repetibilidade, o que é uma característica de sistemas não lineares.

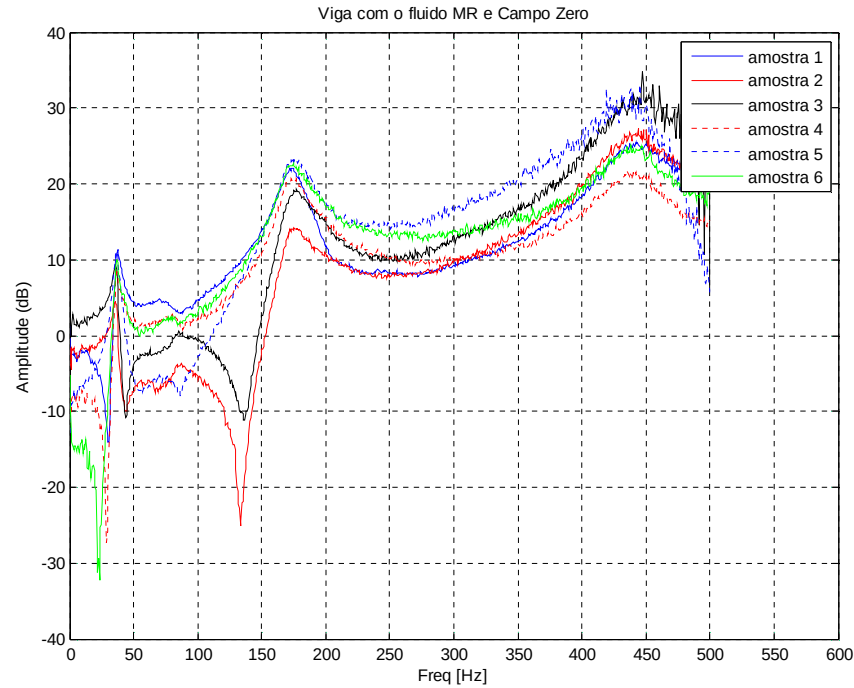


Figura 4.23: Gráfico da Função de Resposta em Frequência para seis amostras com o fluido magnetoreológico no centro das vigas e campo magnético igual a zero.

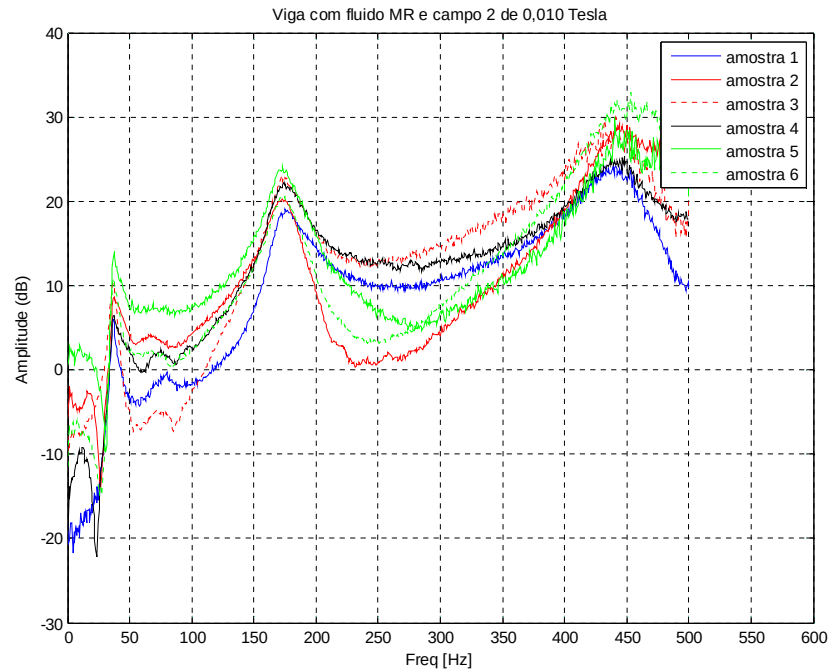
Esta característica de não linearidade do fluido MR deveria ser encontrada depois de aplicar o campo magnético, pois o fluido possui comportamento Newtoniano antes do campo ser aplicado e, comportamento plástico de Bingham depois do campo magnético ser aplicado. No entanto, a característica de não linearidade nesta fase é atribuída ao sistema.

Na última fase de testes, procurou-se avaliar a influência da variação do campo magnético na resposta do sistema. Inicialmente, a viga foi submetida a um campo magnético que variou de 0 a 0,081 Tesla. Este campo magnético teve um aumento gradual sem interrupções, ou seja, em momento algum o campo magnético foi desligado. Na segunda fase, o campo magnético variou de 0,081 a 0 Tesla, similarmente não houve interrupções no campo magnético aplicado. Nesta segunda etapa o objetivo foi verificar se o fluido MR possui magnetização residual, o que seria um problema em aplicações de controle de vibrações. A tabela (4.8) mostra o valor do campo magnético e a corrente elétrica para cada teste realizado.

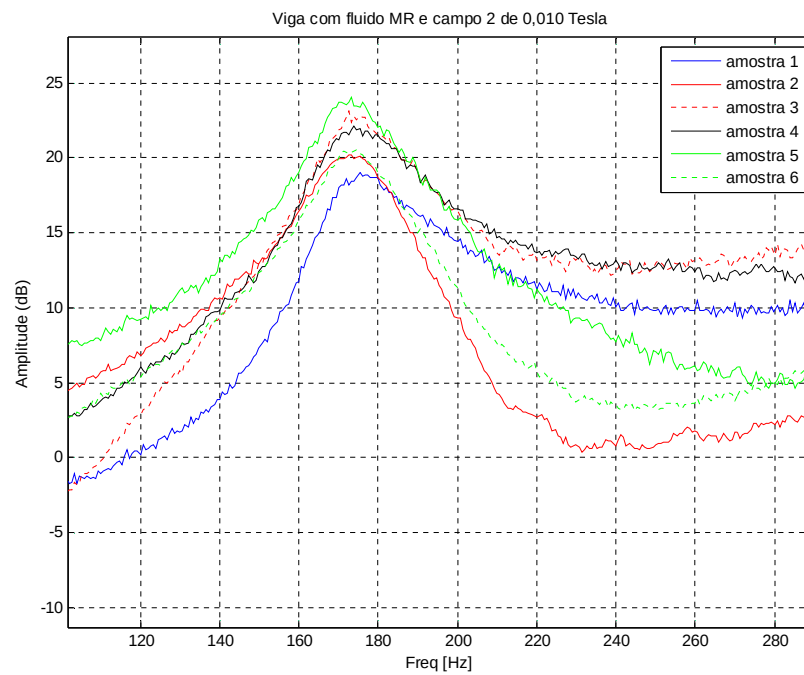
Tabela 4.8: Valores do campo magnético e das respectivas correntes elétrica aplicada

Teste	Corrente Elétrica(A)	Valor do Campo Magnético (Tesla)
0	0	0
1	0.15	0.004
2	0.30	0.010
3	0.45	0.014
4	0.60	0.018
5	0.75	0.022
6	0.90	0.026
7	1.05	0.030
8	1.20	0.034
9	1.35	0.037
10	1.50	0.041
11	2.00	0.054
12	2.50	0.066
13	3.00	0.081
14	2.50	0.066
15	2.00	0.054
16	1.50	0.041
17	1.35	0.037
18	1.20	0.034
19	1.05	0.029
20	0.90	0.024
21	0.75	0.020
22	0.60	0.016
23	0.45	0.014
24	0.30	0.010
25	0.15	0.006
26	0.00	0.000

As figuras a seguir mostram as respostas obtidas para diversos valores do campo magnético. Uma característica importante encontrada nos ensaios foi o comportamento similar a figura (4.23). Este comportamento se repetiu para todos os ensaios, o que mostra que o fluido possui características não lineares. A figura (4.24) mostra a resposta para um campo magnético de 0.010 Tesla e, a figura (4.25) a resposta para o campo magnético de 0.0081 Tesla. Estas figuras mostram que o comportamento do fluido MR foi similar para toda a faixa de campo magnético analisada.

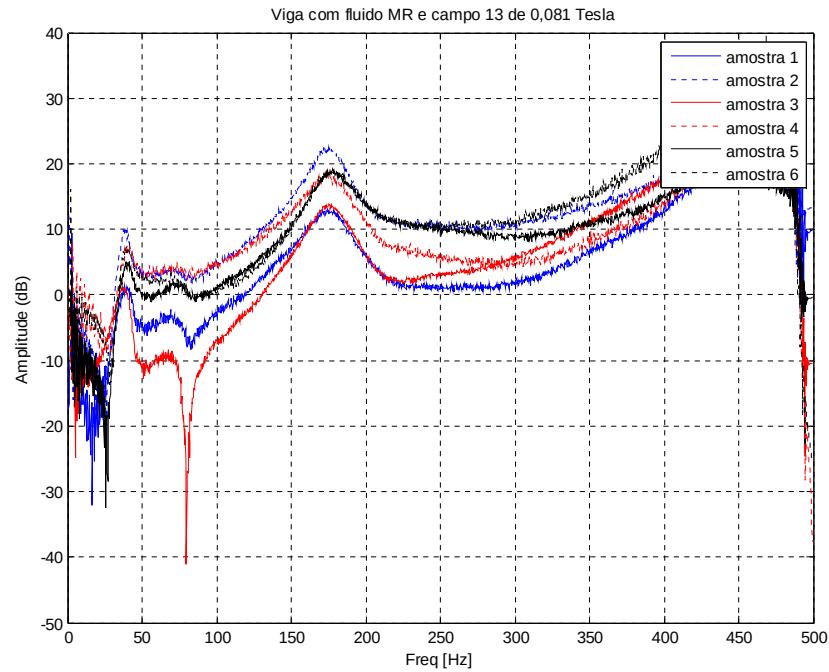


(a)

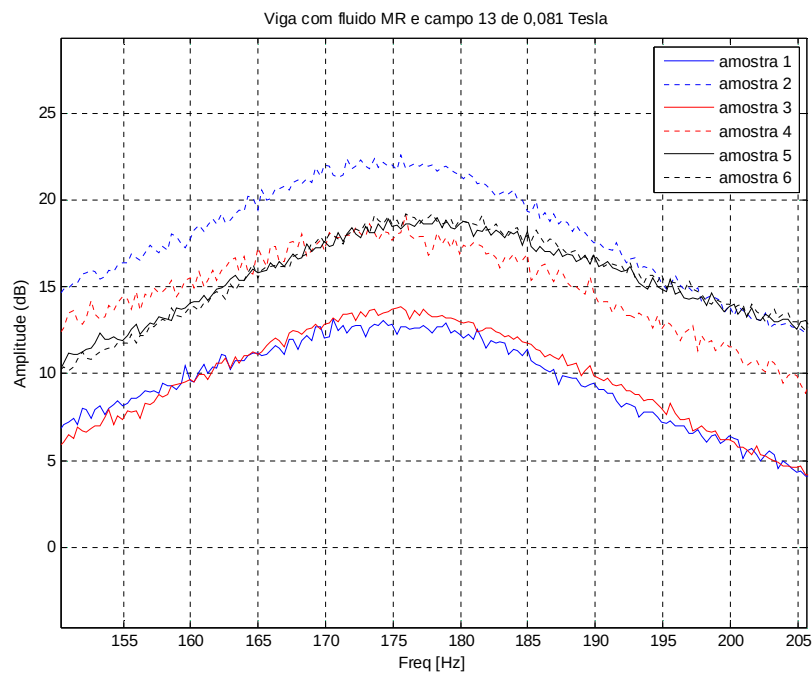


(b)

Figura 4.24: FRF do absorvedor de vibrações ajustável para diversas aquisições (a); detalhes da variação do segundo modo de vibrar para o campo magnético do teste 2 (0.010 Tesla).



(a)



(b)

Figura 4.25: FRF do TVA para diversas aquisições; (a) FRF para o campo 13 (0.081); (b) detalhes da variação do segundo modo de vibrar para o campo magnético do teste 13 (0.081 Tesla).

Como podemos verificar nas figuras anteriores o fluido não apresentou o mesmo valor de amplitude ou o mesmo amortecimento em todas as amostras. Podemos ver

também que em algumas amostras o valor se repetiu, por exemplo, na figura (4.25)(b) o valor para as amostras 5,6 e 4 se repetiram com amplitudes próximas de 20 dB e, os valores das amostras 1 e 3 também tiveram o mesmo valor de amplitudes próximas de 13 db.

Comportamento similar ocorreu em todos os ensaios, por este motivo foi utilizado as amostras que se repetiram em maior número para avaliar o comportamento da viga para cada ensaio.

Através destas curvas também podemos observar que o fluido não possui magnetização residual, pois o valor de maior ou menor amplitude (amortecimento) não dependem do tempo que o fluido ficou submetido ao campo magnético. Por exemplo, na figura (4.25) (b) o maior amortecimento aconteceu para a primeira amostra e, a sexta amostra teve um valor de amplitude maior que a primeira, isto mostra que um maior tempo de exposição ao campo magnético não resultou em um maior amortecimento.

A figura (4.26) mostra a amplitude para os campos 0,1,2,3,4 e 5. Podemos ver que de maneira geral quando aumentamos o campo magnético, aumentamos o amortecimento. No entanto, pelo fato do fluido possuir um comportamento não linear, notou-se que em alguns casos (como do campo 1) a amplitude de vibração foi menor que em amostras submetidas a um campo maior.

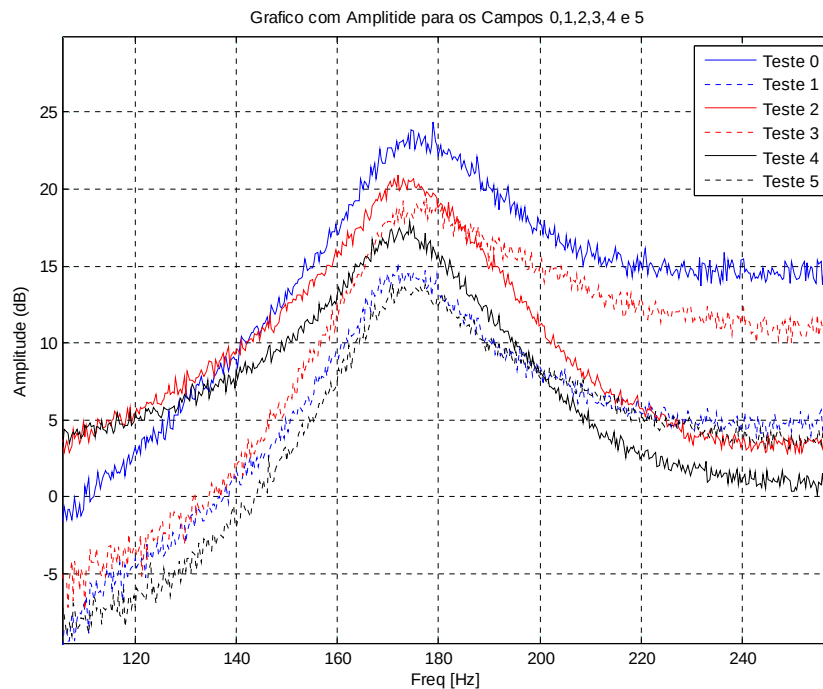
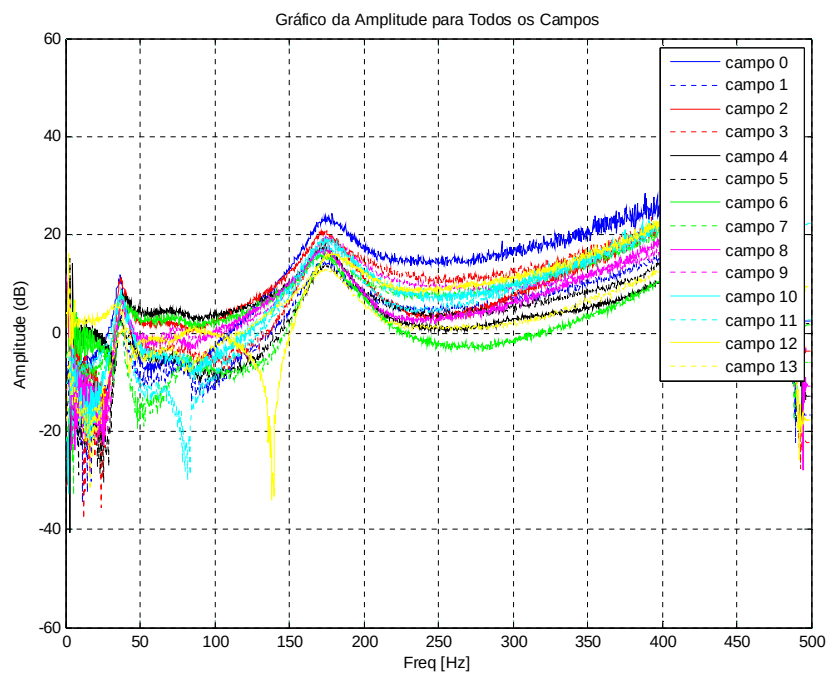
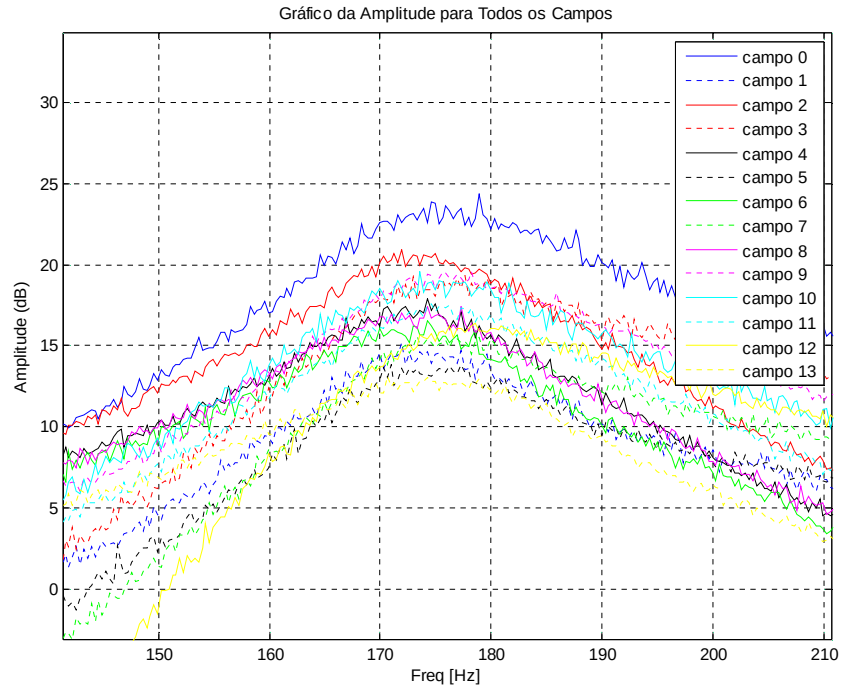


Figura 4.26: FRF média do TVA para os valores do campo magnético relativos aos testes de 0 a 5.

A figura (4.27) mostra as FRF média do TVA para os testes de 0 a 13, isto é, no sentido de acréscimo do campo magnético.



(a)



(b)

Figura 4.27: (a) FRF do TVA para diversos valores do campo magnético; (b) zoom para visualizar o comportamento do segundo modo de vibrar.

Podemos ver que de maneira geral, quando aplicamos um campo magnético no fluido MR este varia suas propriedades e aumenta o amortecimento da estrutura. Este fato mostra que é possível construir um absorvedor de vibrações com este material mas, é necessária a identificação exata do material e do sistema.

Outra característica importante é o fato do fluido MR apenas influenciar no amortecimento da estrutura, isso pode ser visto na figura (4.27a), uma vez que, quando aumentamos o campo magnético podemos notar um aumento do amortecimento da estrutura mas, as frequências naturais permanecem as mesmas. Esta é uma característica importante de sistemas de controle semi-ativos, pois, como não fornecem energia ao sistema, este tipo de controle sempre será estável.

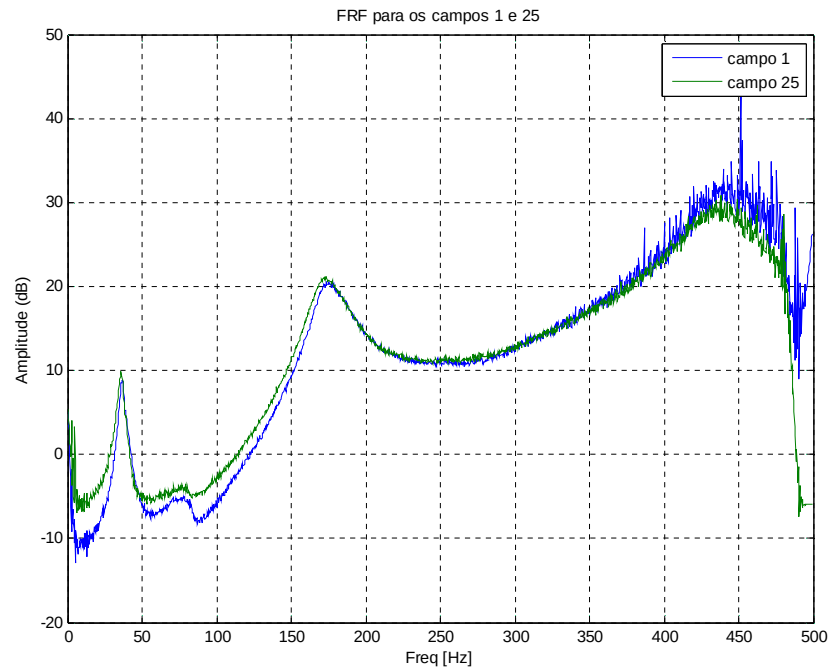
A tabela 4.9 mostra os valores do amortecimento médio para cada campo magnético. Para encontrar este amortecimento foi utilizado o modelo modal na forma de espaço de estados obtido através do método de identificação PEM. Na tabela 4.9 podemos ver como o amortecimento varia com o campo magnético e, também observar como o amortecimento variou de forma não linear, pois em alguns casos o aumento do campo magnético não resultou em um aumento do amortecimento.

Tabela 4.9: Valores de amortecimento para cada campo magnético estimados pelo método PEM

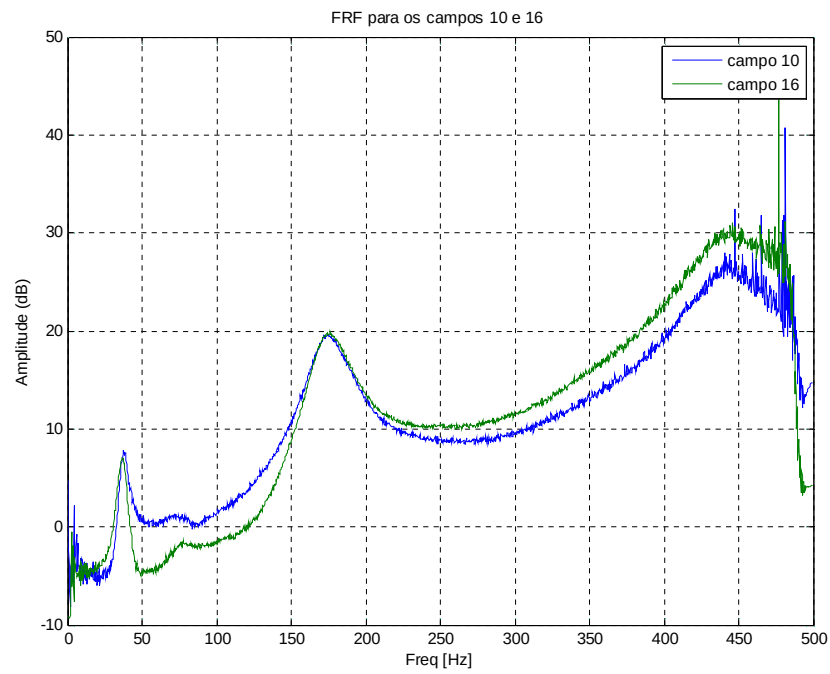
Campo	Campo (Tesla)	Amortecimento 1º modo	Amortecimento 2º modo
0	0	0.0566	0.0592
1	0.004	0.0628	0.0599
2	0.010	0.0635	0.0622
3	0.014	0.0592	0.0641
4	0.018	0.0643	0.0621
5	0.022	0.0632	0.0625
6	0.026	0.0640	0.0615
7	0.030	0.0658	0.0615
8	0.034	0.0645	0.0609
9	0.036	0.0641	0.0631
10	0.041	0.0732	0.0639
11	0.054	0.0734	0.0713
12	0.066	0.1075	0.0704
13	0.081	0.1207	0.0781
14	0.066	0.1043	0.0735
15	0.054	0.0801	0.0675
16	0.041	0.0740	0.0671
17	0.037	0.0711	0.0646
18	0.034	0.0631	0.0648
19	0.029	0.0641	0.0619
20	0.024	0.0662	0.0646
21	0.020	0.0641	0.0637
22	0.016	0.0626	0.0655
23	0.014	0.0590	0.0618
24	0.010	0.0586	0.0604
25	0.060	0.0607	0.0621
26	0	0.0556	0.0602

Na tabela 4.9, nota-se, também que foram realizados 26 ensaios. Nos ensaios de 0 a 13, o campo magnético aumentou gradativamente e sem interrupções. Já nos ensaios de 14 a 26 ocorreu o inverso, ou seja, o campo diminuiu sem interrupções. Estes ensaios foram realizados com o objetivo de avaliar se o fluido MR apresenta uma magnetização residual e, se o fluido MR se desmagnetiza rapidamente.

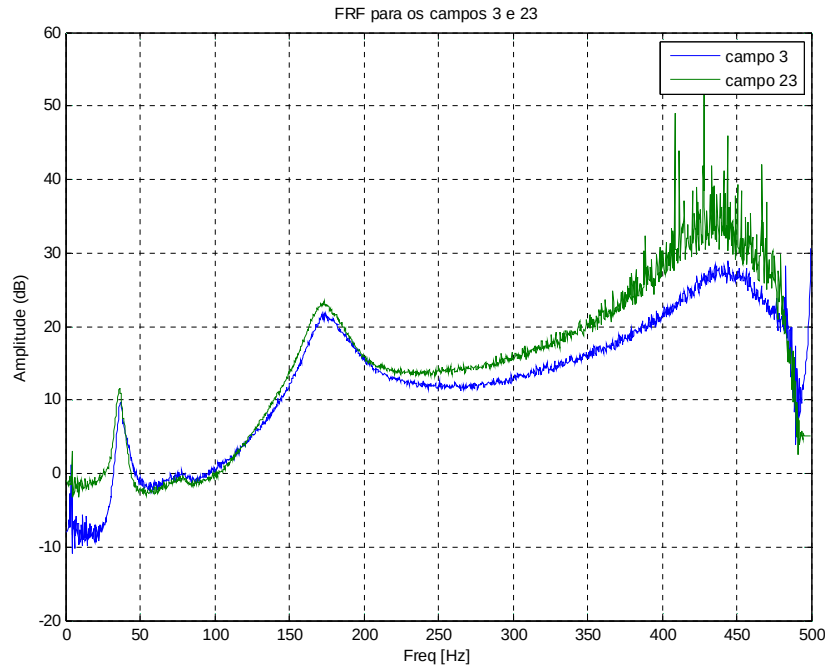
A figura (4.28) mostra algumas curvas comparando o valor da FRF quando aumentamos e quando diminuimos o campo magnético.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.28: FRF do TVA para ensaios realizados com valores iguais do campo magnético; (a) ensaio para os campos magnético 1 e 25; (b) ensaio para os campos magnético 10 e 16 e (c) ensaio para os campos magnético 3 e 23.

Nota-se nas figuras (4.28) que os valores de amplitudes e frequências quando aumentamos ou diminuimos o valor do campo magnético são similares. Isto mostra que o fluido MR não possui magnetização residual e ainda que este se desmagnetiza rapidamente. O comportamento observado nestas três curvas serve de exemplo para todos os ensaios, sendo que na figura (4.28) (c) pode-se notar que as curvas não são exatamente iguais em amplitude e que a diferença não passa de 1 dB. Como estas curvas são uma média das amostras de cada ensaio e, o fluido MR apresenta comportamento não linear, pode-se assumir que esta diferença de 1 dB é pequena.

Capítulo 5 – Discussões Finais

5.1 Discussão

Com o modelo no programa Ansys foi possível encontrar o comportamento esperado para o sistema. Através do modelo foi possível verificar que variando apenas o amortecimento da estrutura, pode –se variar as amplitudes de vibração e não varia as frequências naturais do sistema. Para um sistema com comportamento linear, sempre que ocorre aumento no valor do amortecimento a consequência é uma diminuição na amplitude de vibração do sistema. Através deste modelo foi possível representar o sistema. Para melhorar a resposta e obter o comportamento real do sistema, basta encontrar as propriedades físicas reais dos materiais utilizados.

Com relação ao fluido Magnetoreológico, foi possível verificar algumas das características mostradas na teoria como: o fluido MR se magnetiza e desmagnetiza rapidamente, não sendo necessárias grandes fontes de energia para realizar o controle das propriedades do fluido MR e, também, que pequenas variações do campo magnético promovem grandes alterações nas propriedades do fluido. Outra característica importante encontrada foi o fato do fluido apresentar comportamento não linear, o que é um problema, pois para encontrar um modelo que represente o comportamento deste material é necessário levar em consideração estas não linearidades. O fluido mostrou ter influência apenas sobre o amortecimento do sistema não variando sua frequência natural, o que é uma característica importante para fins de controle, pois o controle semi-ativo não desestabiliza o sistema.

O fluido MR utilizado neste trabalho apresentou uma desvantagem, o fato do fluido ser a base de água dificultou a reprodução dos ensaios, pois a água evapora com facilidade e depois de construído o absorvedor, este deveria ser submetido a todos os ensaios no mesmo dia, pois de um dia para o outro o fluido MR perde sua viscosidade (água evapora) e, para continuar os ensaios seria necessário construir outra estrutura.

Pelas características apresentadas, foi possível demonstrar que este material inteligente pode ser utilizado na construção de absorvedores de vibrações ajustáveis, mas para isso será necessário encontrar um modelo matemático que descreva o comportamento do fluido MR, levando em consideração seu comportamento não linear.

A utilização da viga sanduíche para realizar o estudo de um absorvedor ajustável mostrou ser adequada, mas os materiais utilizados neste trabalho acrescentaram

dificuldades ao estudo. As principais dificuldades encontradas foram: a alta capacidade de absorção de energia do acrílico e a dificuldade de reproduzir a estrutura.

A alta capacidade de absorção de energia do acrílico não permitiu que fossem realizados ensaios utilizando um excitador eletromecânico, o que possibilitaria aplicar ao sistema uma excitação com amplitudes conhecidas e iguais. A dificuldade de reproduzir o sistema foi provocada pela utilização do silicone, já que para cada viga construída a quantidade de silicone utilizada variava e, conseqüentemente, provocava variações no volume de fluido MR.

O fato de se ter utilizado uma excitação impulsiva para estudar o comportamento do fluido pode também ter influenciado os resultados obtidos. Como visto no capítulo 2, o fluido MR apresenta três formas básicas de absorver energia: modo de corte direto, modo válvula e modo de filme comprimido, figura (2.3). Como não é possível garantir que a excitação foi aplicada com a mesma intensidade e na mesma posição para todos os ensaios, dependendo da energia introduzida no sistema pode ter ocorrido excitações de flexão pura, ou flexão e torção, se o ponto de contato do martelo não foi no eixo mediano da viga. O fato de não garantir que a energia foi aplicada sempre na mesma posição pode ter provocado a excitação de modos de vibrar de flexão ou de torção. No caso de modos de flexão, o fluido responde dissipando energia pelo modo de corte direto que é o comportamento desejado neste sistema e que proporcionaria as maiores dissipações de energia. Já quando excitado com maior intensidade os modos de torção, o fluido irá dissipar energia no modo de fluido comprimido, o que explicaria a menor dissipação de energia em alguns casos.

Apesar de algumas dificuldades encontradas, o objetivo de se avaliar o comportamento do absorvedor de vibrações ajustável foi atingido. Através deste estudo é possível afirmar que a utilização do fluido MR na construção de absorvedores de vibrações ajustável é viável, já que podemos fornecer ao sistema o campo magnético desejado com uma corrente elétrica.

Para construir um modelo mais eficiente é necessário representar o silicone com suas propriedades e, adicionar um elemento que mostre o comportamento não linear do fluido.

Para projetar um controlador eficaz, será preciso encontrar um modelo para a relação entre corrente elétrica e campo magnético, levando em consideração a distância entre os solenóides e, também, um modelo para o fluido MR que leve em consideração

suas não linearidades. Outro ponto que deve ser considerado para melhorar o modelo é a inclusão da influência do silicone.

5.2. Conclusão

O objetivo deste trabalho foi avaliar o comportamento do fluido MR, a relação entre corrente elétrica e campo magnético e principalmente, estudar se é possível construir um absorvedor ajustável de vibrações tipo viga sanduíche com estes materiais.

Através do estudo iniciado neste trabalho, foi possível verificar que utilizando solenóides é possível conseguir o campo magnético desejado para controlar a estrutura. Se utilizarmos materiais com grande permeabilidade magnética e, com um número de espiras adequado, podemos conseguir um grande campo magnético com uma corrente elétrica pequena. O fato de não precisar de grandes fontes de corrente elétrica é muito importante para futuras aplicações de controle, pois quando se trabalha com controle, é fornecido para o sistema corrente elétrica de controle e não campo magnético e, além disto, esta corrente elétrica é limitada pela capacidade da placa de controle.

Outra característica importante do campo magnético que foi estudada é o fato do campo magnético depender da distância entre os solenóides. Apesar de se ter mostrado que pequenas variações na distância entre os solenóides não causam grandes variações no campo magnético, para a implementação de controle, deverá ser encontrada qual a relação entre o campo magnético e a distância entre os solenóides. Neste trabalho esta relação foi encontrada de forma experimental, mas para fins de controle é necessário saber esta relação para casos gerais, pois o campo magnético é função do número de espiras, da permeabilidade do campo magnético, da corrente elétrica e da distância entre o local onde desejamos saber o campo magnético e o solenóide.

5.3 Propostas para trabalhos futuros

Para novos trabalhos seria interessante repetir este estudo utilizando uma viga com um perfil “oco” retangular ou cilíndrico, isso evitaria o uso do silicone. Utilizando um perfil conhecido seria mais fácil separar o comportamento do fluido MR do comportamento da viga. O material poderia ser acrílico ou um material não ferromagnético como o alumínio, por exemplo. No caso de se utilizar o acrílico deveria ser realizado um estudo para encontrar um comprimento que possibilite uma melhor visualização da resposta do sistema. Conhecer as propriedades de todos os materiais envolvidos no sistema facilita a modelagem e, possibilita encontrar um modelo (no

programa Ansys) que realmente represente a estrutura. Outra alteração que ajudaria neste estudo é utilizar um elemento de fluido para representar o fluido MR, pois este novo elemento possibilitaria estudar a interação fluido estrutura que ocorre no sistema.

Outra mudança interessante seria utilizar uma excitação com amplitude conhecida, ou seja, usar um excitador eletromecânico para fornecer uma excitação randômica ou senoidal para o sistema, com isto seria possível verificar se a excitação impulsiva teve influência sobre o comportamento do fluido, pois com este tipo de excitação poderíamos garantir que a excitação seria aplicada sempre no mesmo ponto e com a mesma energia (amplitude).

Poderia ser estudada a influência da temperatura no comportamento do fluido e, se possível, adquirir um novo fluido com composição diferente do utilizado neste trabalho, para verificar se independente da composição o comportamento dos fluidos magnetoreológico permanece o mesmo. A relação entre corrente elétrica e campo magnético que considere a distância entre os solenóides, também, deve ser reavaliada em trabalhos futuros.

5.4 Artigos originados desta dissertação

MESQUITA NETO C.; SANTOS R. B.; BUENO D. D.; MARQUI C. R., LOPES JUNIOR, V., Atenuação de Vibrações em edifícios devido a abalos sísmicos utilizando amortecedores magnetoreológicos. **Revista Controle & Automação**. (artigo com aceite parcial), 2007.

MESQUITA NETO C.; SANTOS R. B.; BUENO D. D.; MARQUI C. R.; LOPES JUNIOR, V. Controle semi-ativo de uma estrutura de dois graus de liberdade utilizando fluido MR. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON DYNAMICS, CONTROL AND THEIR APPLICATIONS, 6, 2007, São Jose do Rio Preto. 2007.

MESQUITA NETO C.; TAVARES M. A.; SANTOS R. B.; LOPES JUNIOR V. Identificação de parâmetros de uma estrutura flexível de dois andares utilizando o método de predição de erros. In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA - POSMEC, 16, 2006, Uberlândia, 2006.

Referências

AMAZING Magnetic Fluids,. Disponível em: http://science.nasa.gov/headlines/y2003/02apr_robotblood.htm>. Acesso em: 13 out. 2005.

AZEVEDO, A. F. M. Método dos elementos finitos. Disponível em : <http://www.fe.up.pt/~alvaro>. Acesso em: 25 mar. 2006.

BRENNAN M. J. Vibration control using a tunable vibration neutralizer. **Journal of Mechanical Engineering Science**, London, v.211, p.91-108, 1997.

BHASKAR, A. Estimates of error in the frequency response of non-classically damped systems. **Journal of Sound and Vibration**, London, v. 184, p. 59-72, 1995

CAI, C. S.; WU, W. J. ; SHI, X. M. Cable vibration reduction with a Hung-on TMD system. Part I: Theoretical study. **Journal of Vibration and Control**, Thousand Oaks, v.12, n.7, p. 801-814, 2006.

CARMIGNANI, C. ;RUSTIGHI, E. Design of a novel magnetorheological squeeze-film damper. **Smart Materials and Structures**, New York, v.15, p.164-170, 2006.

CARNEAL, J. P.; CHARETTE, F.; FULLER, C. R. Minimization of sound radiation from plates using adaptive tuned vibration absorbers. **Journal of Sound and Vibration**, London, v.270, p. 781-792, 2004.

CASUALTIES of War. Disponível em: http://www.nationaldefensemagazine.org/issues/2005/May/Casualties_of_War.htm>. Acesso em: 13 out. 2005.

DYKE, S. J.; SPENCER, B.F.; SAIN, M. K. ; CARLSON, J. D. An experimental study of MR damper for seismic protection. **Smart Materials and Structures: Special Issue on Large Civil Structures**, New York, 1996.

DEIVYS, E. A. M. **Estudo de suspensões passivas, semi-ativas MR e ativas**. 2003.Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, 2003.

EWINS, D.J. **Modal testing**. New York: Wiley, 1984.

FLORES, G. A.; LIU, J. In-vitro blockage of simulated vascular system using magnetorheological fluids as a cancer therapy. **European Cells and Materials**, v. 3, p.9-11, 2002.

GANDHI, F.; WANG, K. W. ; XIA, L. Magnetorheological fluid damper feedback linearization control for helicopter rotor application. **Smart Materials and Structures**, New York, v.10, p. 96-103, 2001.

GAWRONSKI, W. Actuator and sensor placement for structural testing and control. **Journal of Sound and Vibration**, London, v.208, n.1, p.101-109, 1997.

GAWRONSKI, W. **Dynamics and control of structures: a modal approach**. New York: Springer Verlag, 1998.

HARLAND, N. R. **Control of vibration transmission using tunable fluid beam inserts**. Auckland: Department of Mechanical Engineering, 1999. (Australia, University of Auckland, 1999).

HARLAND, N. R.; MACE, B. R.; JONES, R. W. Adaptive-passive control of vibration transmission in beams using electro/magnetorheological fluid filled inserts. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, New York, v.9, p. 9-220, 2001.

HILL, S. G. ; SNYDER, S. D. Design of an adaptive vibration absorber to reduce electrical transformer structural vibration. **Journal of Vibration and Acoustics**, New York, v.124, p. 606-611, 2002.

HIRUNYAPRUK, C. **Vibration control using a tunable fluid vibration absorber**. 2004. Master Science (Thesis) - University of Southampton, December, 2004.

INMAN, D. J. Distributed parameter systems. In: _____. **Engineering vibration**. 2.ed. Upper Saddle River: Printice Hall, 2001. p. 447 – 466.

JALILI, N. ; ESMAILZADEH, E. A nonlinear double-winged adaptive neutralizer for optimum structural vibration suppression. **Journal of Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, v.8, p. 113-134, 2003.

JOLLY, MARK R.; BENDER, J.W. ;CARLSON, J. D. Properties and applications of commercial magnetorheological fluids. **SPIE Journal**, Redondo Beach, v. 3327, p.262-275, 1998.

KARNOPP, D.; MARGOLIS, D. Adaptive suspension concepts for road vehicles. **Vehicles System Dynamics**, v.13, 1984.

KWON, Y.W.; BANG, H. **The finite element method using matlab**. Boca Raton: CRC Press, 1997.

LJUNG, L. Prediction error methods. **Circuits Systems and Signal Processing**, Cambridge, v.21, n.1, p. 11-21, 2002.

LORD MATERIALS DIVISION. Technology. 2004. Disponível em: <<http://www.lord.com/Default.aspx?tabid=757>>. Acesso em: 15 mar. 2006.

LORD MATERIALS DIVISION. What is the difference between MR and ER fluid?. 2004. Disponível em: <http://literature.lord.com/root/other/rheonetic/MRvsER.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2006.

MAGNETORHEOLOGICAL (MR). Compressible fluid (CF) strut research, 2004. Disponível em: <http://www.spa.com/aedp_cmr.htm>. Acesso em: 13 out. 2005.

MAGNETORHEOLOGICAL (MR) RECOIL Damper for the apache helicopter chain gun, 2004. Disponível em: <http://www.spa.com/aedp_mr_apache.htm>. Acesso em: 13 out. 2005.

MAIA, N.; SILVA, J. et al. **Theoretical and experimental modal analysis**. Baldock: Research Studies Press, 1996.

MEAD D. J. ; MARKUS, S. The forced vibration of a three-layer, damped sandwich beam with arbitrary boundary conditions. **Journal of Sound and Vibration**, London, v.10, p.163-175, 1969.

MILIECKI, A. Investigation and control of magneto-rheological fluid damper. PERGAMON, **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Oxford, v.41, p.379-391, 2001.

MESQUITA, C. N.; BORGES, R. S.; DOMINGUES, D. B.; MARQUI, C. R. ; LOPES JUNIOR, V. Controle semi-ativo de uma estrutura de dois graus de liberdade utilizando fluido MR. In: BRASILIAN CONFERENCE ON DYNAMICS, CONTROL AND THEIR APPLICATIONS, DINCON, 6, 2007, São José do Rio Preto. **Conference...** São José do Rio Preto: DINCON, 2007. p.798-805

MOURA, E. D. A.; LIMA JR, J. J.; PINHEIRO, C. A. M. Estudo de uma suspensão veicular passiva, semi-ativa e ativa. **Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico**, Itajubá, v.26, p 43-49, 2002.

MOURA, E. D. A. **Estudo de suspensões passiva semi-ativa MR e ativa**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

MORGAN, R. A. ; WANG, K. W. Active-passive piezoelectric absorbers for systems under multiple non-stationary harmonic excitations. **Journal of Sound and Vibration**, London, v.225, p. 685-700, 2002.

MOREIRA, F.J.O. **Um controlador h_∞ de banda limitada para o controle ativo de vibração estrutural**. 1998. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

PARÉ, C. A. **Experimental evaluation of semi-active magneto-rheological suspensions for passenger vehicles**. 1998. Master of Science (Mechanical Engineering) - Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 1998.

PHANI, A. S.; VENKATRAMAN, K. Vibration control of sandwich beams using electro-rheological fluids. **Mechanical Systems and Signal Processing**, London, v.17, p.1083-1095, 2003

PRADEEP, P. P. Magnetorheological (MR) fluids: principles and applications. **Smart Materials Bulletin**, New York, p. 7-10, 2001.

RUSTIGHI, E.; BRENNAN, M. J.; MACE, B. R. Design of an adaptive vibration absorber using shape memory alloy. Disponível em: <http://www.isvr.soton.ac.uk/STAFF/Pubs/Pubpdfs/Pub2134.pdf>. 2003. Acesso em 10 jun. 2007. (ISVR Technical memorandum, 920).

SHEN, Y.; GOLNARAGHI, M. F. ; HEPPLER, G. R. Semi-active vibration control schemes for suspension systems using magnetorheological damper. **Journal of Vibration and Control**, Thousand Oaks, v.12, p.3-24, 2006a.

SHEN, Y.; YANG, S. ; YIN, W. Application of magnetorheological damper in vibration control of locomotive. In: PROCEEDINGS OF THE WORLD CONGRESS ON INTELLIGENT CONTROL AND AUTOMATION, 6, 2006, Dalian. **Proceedings of the...** Dalian: IEEE, 2006b. p.8113-8116. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/11210/36092/01713554.pdf?isnumber=36092&pro>

d=CNF&arnumber=1713554&arSt=+8113&ared=+8116&arAuthor=+Yongjun+Shen%3B++Shaopu+Yang%3B++Wanjian+Yin>. Acesso em 10 dez. 2007.

SIMON, D. E. **Experimental evaluation of semi-active magnetorheological primary suspension for heavy applications**. 1998. Master of Science (Mechanical Engineering) - Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 1998.

SIMON, D. E. ;AHMADIAN, M. Vehicle evaluate of the performance of magnetorheological dampers for heavy truck suspentions. **Journal of Vibration and Acoustics**, New York, v.123, n.3, p.365-375, 2001.

SPENCER, JR, B.F.; DYKE, S.J.; SAIN, M.K. ;CARLSON, J.D. Phenomenological model of a magnetorheological damper. **Journal of Engineering Mechanics**, New York, v.123, n.3, p.230-238, 1997.

SRINIVASAN, A. V. ; MCFARLAND, D. M. **Smart structures: analysis and design**: Cambridge: Cambridge University press, 2001.

STEVENS, N. G.; SPROSTON, J. L.; STANWAY, R. On the mechanical properties of electro-rheological fluids. **Journal of Applied Mechanics Transactionis of the ASME**, New york, v.54, p. 456-458, 1987.

TAO, R. Super-strong magnetorheological fluids. **Journal of Physics Condensed Matter**, Bristol, v.13, n.50, p.R579-599, 2001.

TAVARES, M. A.; MESQUITA NETO, C.; SANTOS, R. B. ;LOPES JUNIOR, V.; Experimental control of na inverted pendulum using fuzzy takagi-sugeno model. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING, 9, 2007, Brasília. **Proceedings of the...** Brasília: S.n.

TAVARES, M. A.; MESQUITA NETO, C.; SANTOS, R. B. ;LOPES JUNIOR, V. Controle de um pêndulo invertido utilizando o modelo Fuzzy Takagi-Sugeno.

In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, POSMEC, 16, 2006, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU, 2006.

TENTOR, L. B. **Characterization of an electromagnetic tuned vibration absorber**. 2001. Master Science. (Mechanical Engineering) - Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2001.

UNSAL, M.; CRANE, C. D. ; NIEZRECKI, C. Vibration control of parallel based on magnetorheological damping. In: FLORIDA CONFERENCE ON RECENT ADVANCES IN ROBOTICS, 2006, Florida. **Conference...** Florida: S.n, 2006. Disponível em: <<http://www.eng.fiu.edu/mme/robotics/fcrar2006/papers/FCRAR2006-P61-Unsal-Crane-Niezrecki-UF.pdf>>. Acesso em: 12 dez.2006.

OVERSCHEE, P. V. ; MOOR, B. **Subspace identification of linear systems: theory, implementation: applications**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

WALKER, H, R. **Fundamentos de física: eletro magnetismo**. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos, 1996. v.3, p.183 – 198, 1996.

WANG, J. ;MENG, G. Study of the vibration control of a rotor system using a magnetorheological fluid damper. **Journal of Vibration and Control**, Thousand Oaks, v.11, p.263-276, 2005.

WANG, Z.; CHEN, S.; HAN, W. Integrated structural and control optimization of intelligent structures. **Engineering Structures**, Guildford, v.21, p.183-191, 1999.
WERELEY N. M.; KAMATH, G. M. ;MADHAVAN V. Hysteresis modeling of semi-active magnetorheological helicopter damper. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Lancaster, v.10, p.624-10, 1999.

WU, W. J. ; CAI, C. S. Experimental study of magnetorheological dampers and application to cable vibration control. **Journal of Vibration and Control**, Thousand Oaks, v.12, n.1, p. 67-82, 2006.

YAO, G. Z.; YAP, F. F.; CHEN, G., LI, W. H. ; YEO, S. H. MR damper its application for semi-active control of vehicle suspension system. **Mechatronics**, Oxford, v.12, n.7, p. 963-973, 2002.

YOSHIDA, O. ; DYKE S. J. Response control in full scale irregular buildings using MR damper. **Journal of Structural Engineering**, v.131, n.5, p.734-742, 2005.

ZRIBI, M. ; KARKOUB, M. Robust control of a car suspension system using magnetorheological damper. **Journal of Vibration and Control**, Thousand Oaks, v.10, p.507-524, 2004.