

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO  
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Modelagem numérica de um amortecedor magneto-  
reológico**

**Carolina Romão Azevedo**

**Rio de Janeiro  
2019**

**Carolina Romão Azevedo**

# **Modelagem numérica de um amortecedor magneto- reológico**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Ensino Superior, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Silva de Lima

Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciana Loureiro  
da Silva Monteiro

**Rio de Janeiro**

**2019**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A994 Azevedo, Carolina Romão.  
Modelagem numérica de um amortecedor magneto-reológico /  
Carolina Romão Azevedo – 2019.  
xii, 50f. : il. color., grafs., tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2019.  
Bibliografia: f. 48-50.  
Orientador: Alexandre Silva de Lima.  
Co-orientadora: Luciana Loureiro da Silva Monteiro.

1. Engenharia mecânica. 2. Vibração. 3. amortecedor magneto-  
reológico. I. Lima, Alexandre Silva de (Orient.). II. Monteiro, Luciana  
Loureiro da Silva (Co-orient.). III. Título.

CDD 621

Elaborada pelo bibliotecário Leandro Mota de Menezes CRB-7/5281

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha família, principalmente à minha mãe, que foi uma grande incentivadora nesta trajetória acadêmica, à minha irmã e às minhas avós. Dedico também à minha namorada, que foi muito paciente e companheira durante o desenvolvimento de meu trabalho. Dedico ainda a todos os meus amigos e amigas que sempre me deram muito apoio para que fosse possível a conclusão de meu curso.

Carolina Romão Azevedo

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a todos os meus familiares, minhas avós, tias e todos os que colaboraram com a minha caminhada e incentivaram meu sucesso. Um agradecimento ainda maior à minha mãe, Genny Romão, e à minha irmã, Isabela Romão, por todo o apoio e paciência.

Também gostaria de agradecer à minha companheira de vida, Nabila Bellezzia, por todo o carinho e suporte nos momentos mais difíceis.

Agradeço a todos os professores pelos quais passei durante o meu curso. Sem eles, seria impossível sequer iniciar este trabalho. Entre eles, sou grata, principalmente, aos meus orientadores, Alexandre Silva de Lima e Luciana Loureiro da Silva Monteiro, que foram extremamente solícitos, dispostos e pacientes. Agradeço por todas as críticas que me proporcionaram a oportunidade de escrever este trabalho da melhor maneira possível, à toda dedicação e incentivo que me ofereceram.

Além disso, gostaria de agradecer também ao CEFET/RJ - Maracanã, por ter sido minha segunda casa durante essa trajetória e por ter me apresentado grandes amizades.

Carolina Romão Azevedo

## RESUMO

Os fluidos magneto-reológicos têm se apresentado como uma alternativa interessante que possibilita diversas aplicações, principalmente, na área de amortecimento e controle de vibrações mecânicas. Sua utilização é bastante ampla e envolve desde a suspensão de automóveis até o amortecimento em próteses transfemorais e o controle de vibrações sísmicas. Isso se dá devido ao fato de serem capazes de alterar, de forma reversível, uma de suas propriedades, no caso, a viscosidade. Essa característica tem sido alvo de importantes e numerosos estudos na área da engenharia. Levando-se em conta as possibilidades de uso dos amortecedores magneto-reológicos, este trabalho visa estudar numericamente o comportamento de um amortecedor magneto-reológico, utilizando o modelo matemático de histerese de Bouc-Wen modificado. O estudo é feito considerando que o amortecedor seja submetido a diferentes formas e valores de tensões elétricas. Desse modo, o trabalho fornece uma ampla visão do amortecimento utilizando fluidos magneto-reológicos, visando evitar a instabilidade de dispositivos, auxiliando métodos de controle de parâmetros construtivos.

**Palavras-chave:** fluidos magneto-reológicos, vibrações, amortecimento, Bouc-Wen.

## ABSTRACT

Magnetorheological fluids have been presented as an interesting alternative that allows several applications, mainly in the area of damping and mechanical vibration control. Its use is quite broad and involves from the suspension of automobiles to the cushioning in transfemoral prostheses and the control of seismic vibrations. This is a result of their ability to change one of its properties, the viscosity, in a reversible way. This characteristic has been the subject of important and numerous studies in engineering. Considering the possibilities of using the magnetorheological dampers, this work aims to numerically study the behavior of a magnetorheological damper using the modified Bouc-Wen hysteresis model. This study is made considering that the damper is subjected to different forms and values of applied voltages. Thus, the work provides a broad view of the damping using magnetorheological fluids, in order to avoid the instability of devices, aiding methods of control of constructive parameters.

**Keywords:** magnetorheological fluids, vibrations, cushioning, Bouc-Wen.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Aplicação eletro-reológica: Amortecedor hidráulico eletro-reológico bitubular (Cherif et al, 2007).....	2
<b>Figura 2:</b> Suspensão automotiva MR do Ferrari 599 GTB Fiorano (Ferrari N.V., 2019).....	3
<b>Figura 3:</b> Amortecedor sísmico magneto-reológico (Teuber & Novak, 2013). ....	3
<b>Figura 4:</b> Esquema de atuador MR e vista 3D de uma prótese de joelho com atuador MR (Leal Jr & Alves, 2015).....	3
<b>Figura 5:</b> Esquema de montagem de um amortecedor magneto-reológico (Castão, 2008).....	8
<b>Figura 6:</b> Luva CyberGrasp - Exemplo de dispositivo háptico (Soares, 2016).....	9
<b>Figura 7:</b> Modelo de sistema de dois graus de liberdade (Zhang et al., 2016). ....	10
<b>Figura 8:</b> FMRs sob ação de um campo magnético. (Yang, 2001) .....	14
<b>Figura 9:</b> Representação mecânica do modelo de Bingham (Spencer Jr. et al., 1997).....	17
<b>Figura 10:</b> Comparação entre a resposta experimental e numérica, utilizando o modelo de Bingham (Spencer Jr., 1997). ....	18
<b>Figura 11:</b> Modelo de Gamota e Filisko (Castão et al., 2008).....	18
<b>Figura 12:</b> Comparação entre a resposta experimental e numérica, utilizando o modelo de Gamota e Filisko (Spencer Jr. et al., 1997).....	19
<b>Figura 13:</b> Modelo de Bouc-Wen (Castão, 2008).....	20
<b>Figura 14:</b> Comparação entre a resposta experimental e numérica, utilizando o modelo de Bouc-Wen (Spencer Jr. et at., 1997). ....	21
<b>Figura 15:</b> Modelo mecânico de Bouc-Wen modificado (Spencer Jr. et al., 1997). ....	21
<b>Figura 16:</b> Comparação entre a resposta experimental e numérica, utilizando o modelo de Bouc-Wen modificado (Spencer Jr., 1997).....	22
<b>Figura 17:</b> Esquema que representa o modelo de Bouc-Wen (Spencer Jr. et al., 1997). ....	23
<b>Figura 18:</b> Esquema que representa o modelo de Bouc-Wen modificado( Spencer Jr., 1997) .	25
<b>Figura 19:</b> Comportamento deslocamento x tempo utilizado na análise.....	28
<b>Figura 20:</b> Comparativo do comportamento força x deslocamento do amortecedor com e sem implementação de Bouc-Wen, em que a linha representa o espaço de fase e o ponto representa a seção de Poincaré. ....	29
<b>Figura 21:</b> Comparativo do comportamento força x tempo do amortecedor com e sem implementação de Bouc-Wen. ....	30

<b>Figura 22:</b> Comparativo do comportamento força x velocidade do amortecedor com e sem implementação de Bouc-Wen. ....	30
<b>Figura 23:</b> Comparativo do comportamento força x deslocamento para diferentes valores de $\gamma$ . ....	31
<b>Figura 24:</b> Comparativo do comportamento força x velocidade para diferentes valores de $\gamma$ . ..	32
<b>Figura 25:</b> Comparativo do comportamento força x deslocamento para diferentes valores de $\beta$ . ....	32
<b>Figura 26:</b> Comparativo do comportamento força x velocidade para diferentes valores de $\beta$ . ..	33
<b>Figura 27:</b> Comparativo do comportamento força x deslocamento para diferentes valores de $n$ . ....	33
<b>Figura 28:</b> Comparativo do comportamento força x velocidade para diferentes valores de $n$ . ..	34
<b>Figura 29:</b> Comparativo do comportamento força x deslocamento para diferentes valores de $A$ . ....	34
<b>Figura 30:</b> Comparativo do comportamento força x velocidade para diferentes valores de $A$ . ..	35
<b>Figura 31:</b> Comparativo do comportamento força x deslocamento para diferentes valores de $f$ . ....	35
<b>Figura 32:</b> Comparativo do comportamento força x velocidade para diferentes valores de $f$ . ..	36
<b>Figura 33:</b> Comparativo do comportamento força x deslocamento para diferentes valores de $c_0$ . ....	36
<b>Figura 34:</b> Comparativo do comportamento força x velocidade para diferentes valores de $c_0$ . ..	37
<b>Figura 35:</b> Comparativo do comportamento força x deslocamento para diferentes valores de $k_0$ . ....	37
<b>Figura 36:</b> Comparativo do comportamento força x velocidade para diferentes valores de $k_0$ . ....	38
<b>Figura 37:</b> Comportamento do deslocamento aplicado x tempo. ....	39
<b>Figura 38:</b> Comportamento tensão elétrica aplicada x tempo. ....	39
<b>Figura 39:</b> Comportamento força x tempo para diferentes tensões elétricas. ....	40
<b>Figura 40:</b> Comportamento força x deslocamento para diferentes tensões elétricas. ....	40
<b>Figura 41:</b> Comportamento força x velocidade para diferentes tensões elétricas. ....	41
<b>Figura 42:</b> Comportamento tensão elétrica x tempo, para tensões numéricas. ....	41
<b>Figura 43:</b> Comportamento força x tempo para diferentes tensões elétricas numéricas. ....	42
<b>Figura 44:</b> Comportamento força x deslocamento para diferentes tensões elétricas numéricas. ....	42
<b>Figura 45:</b> Comportamento força x velocidade para diferentes tensões elétricas numéricas. ....	43

<b>Figura 46:</b> Comportamento tensão elétrica x tempo para diferentes valores de $\varphi$ . .....	43
<b>Figura 47:</b> Comportamento força x tempo para diferentes valores de $\varphi$ . .....	44
<b>Figura 48:</b> Comportamento força x deslocamento para diferentes valores de $\varphi$ . .....	45
<b>Figura 49:</b> Comportamento força x velocidade para diferentes valores de $\varphi$ . .....	45

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Propriedades de alguns FERs e FMRs. (Butz & Von Stryk, 2002) .....	15
<b>Tabela 2:</b> Tabela de parâmetros do modelo de Bouc-Wen (Spencer Jr.et al., 1997). .....	24
<b>Tabela 3:</b> Tabela de parâmetros do modelo de Bouc-Wen modificado (Spencer Jr.et al., 1997).....	26

## Sumário

Capítulo 1	1
1. Introdução	1
1.1. Objetivo e organização do trabalho	4
Capítulo 2	5
2. Revisão bibliográfica	5
2.1. Tipos de dispositivos de controle de vibrações	5
2.1.1. Controle de vibrações passivo	5
2.1.2. Controle de vibrações ativo	6
2.1.3. Controle de vibrações semiativo	6
2.2. Amortecedores magneto-reológicos	7
Capítulo 3	13
3. Fundamentos teóricos	13
3.1. Materiais inteligentes	13
3.2. Fluidos magneto-reológicos	13
3.3. Modelos matemáticos de amortecedores magneto-reológicos	16
3.3.1. Modelo de Bingham	16
3.3.2. Modelo de Gamota e Filisko	18
3.3.3. Modelo de Bouc-Wen	19
3.3.4. Modelo de Bouc-Wen Modificado	21
Capítulo 4	23
4. Metodologia	23
4.1. Estudo utilizando o modelo de Bouc-Wen simples	23
4.2. Estudo utilizando o modelo de Bouc-Wen modificado	24
Capítulo 5	28
5. Resultados	28
5.1. Estudo utilizando o modelo de Bouc-Wen simples	28

5.1.1.	Análise inicial com e sem o modelo de Bouc-Wen	28
5.1.2.	Análise da influência de cada parâmetro no modelo	31
5.2.	Estudo utilizando o modelo de Bouc-Wen modificado	38
5.2.1.	Comparativo entre a aplicação de tensões elétricas numéricas e senoidais	38
5.2.2.	Comparativo entre diferentes tensões elétricas numéricas	41
5.2.3.	Comparativo entre diferentes tensões elétricas senoidais variando $\varphi$	43
Capítulo 6		46
6.	Conclusões	46
6.1.	Comentários finais	46
6.2.	Sugestão para trabalhos futuros	47
Referências bibliográficas		48

# Capítulo 1

## 1. Introdução

A história da humanidade sempre esteve diretamente relacionada com a evolução da tecnologia dos materiais. A cada descoberta de novos materiais ou de novas maneiras de utilizá-los, foram determinados marcos importantes no desenvolvimento de nossa sociedade, como, por exemplo, a Idade da Pedra, a Idade da Argila, a Idade do Ferro, a Idade do Aço e, a mais recente, Era do Silício (Navarro, 2006).

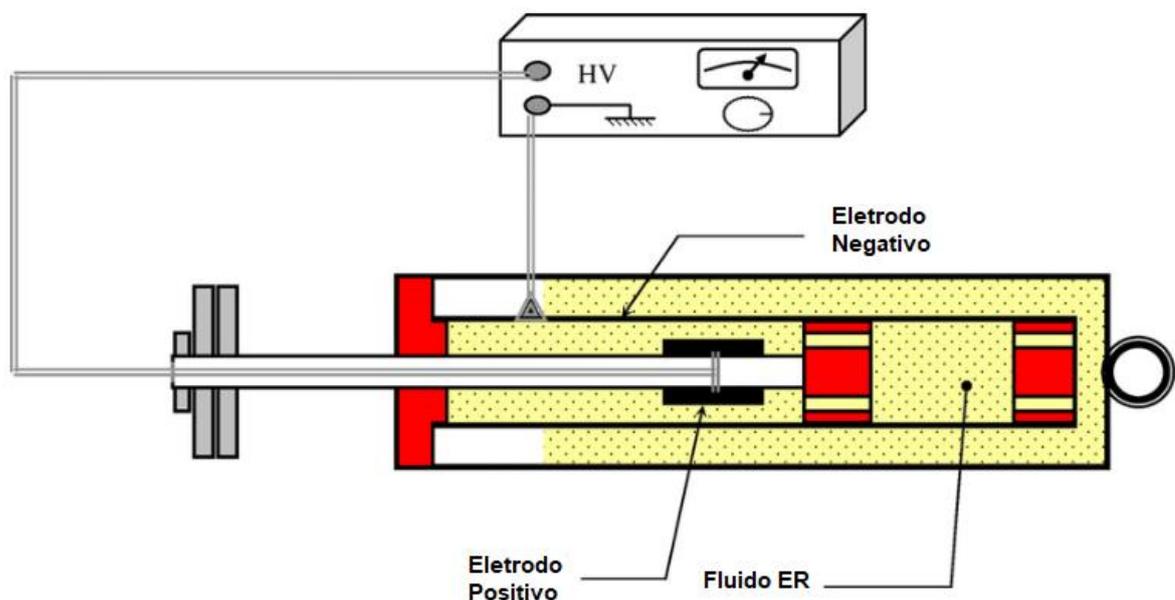
A ciência dos materiais tem, desde o final do século XX, avançado significativamente no estudo da possibilidade de criar novos materiais ou de realizar a alteração de suas propriedades com a utilização de ações extrínsecas. Entre estas ações, podem ser citadas a aplicação de campos elétricos, de campos magnéticos, de estímulos termomecânicos e de estímulos químicos. Os novos materiais gerados têm sido classificados como Materiais Inteligentes e possuem diversas aplicações tecnológicas. Alguns desses materiais são os materiais piezelétricos, os fluidos magneto-reológicos, os eletro-reológicos e as ligas com memória de forma. A palavra grega Rheos, que possui o significado de fluir ou escoar, dá origem à palavra reologia, que é a ciência responsável pelo estudo de escoamentos sob a aplicação de algum tipo de carregamento. (Soares, 2016).

Os materiais inteligentes são capazes de alterar, de forma reversível, uma ou mais propriedades mecânicas de acordo com mudanças de grandezas físicas às quais são submetidos. Entre estas grandezas estão temperatura, pressão, campo elétrico e campo magnético, por exemplo (Yang *et al.*, 2002). Dentro desta classe estão os fluidos eletro-reológicos e os fluidos magneto-reológicos que integram um grupo de materiais chamado de fluidos controláveis

No caso dos fluidos eletro-reológicos (FER), a propriedade que se altera é a viscosidade aparente, com a aplicação de um campo elétrico. Essa viscosidade retorna ao estado original quando o campo elétrico é retirado. Esses fluidos são formados por finas partículas de materiais orgânicos (entre eles resinas trocadoras íons, tensoativos com grupos metálicos ou celulose microcristalina) ou inorgânicos (entre eles sílica, titânio, óxidos metálicos) suspensas em líquidos isolantes elétricos (óleos de silicone e mineral, querosene, hidrocarbonetos halogenados). Em grande parte destas suspensões é necessária a adição de água, em pequenas quantidades, para que se obtenha uma melhor resposta. No entanto, a água aumenta a condutividade do material, tornando a faixa de temperatura de trabalho mais restrita e, dessa forma, desfavorecendo a resposta global (Mendes, 1996).

As aplicações de fluidos eletro-reológicos são diversas, mas são mais comuns em dispositivos que têm o objetivo de controlar a transmissão de forças com níveis de energia elétrica reduzidos. Logo, são encontrados em embreagens, válvulas hidráulicas, amortecedores de choque, vibradores e sistemas que posicionam e retêm peças de trabalho em uma posição (Estados Unidos da América Patente N° 293.536, 1996).

Um amortecedor eletro-reológico esquematizado, que é utilizado no amortecimento de vibrações em suspensões de automóveis, é apresentado na Figura 1. Este sistema amortece os choques com a variação do fluxo do fluido eletro-reológico (Lima, 2011).



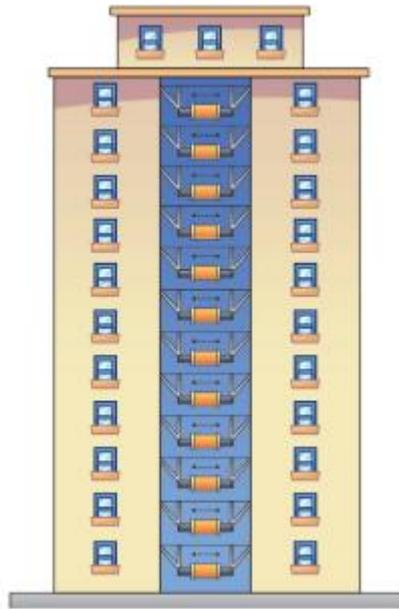
**Figura 1:** Aplicação eletro-reológica: Amortecedor hidráulico eletro-reológico bitubular (Cherif et al, 2007).

Quando tratamos de fluidos magneto-reológicos (FMR), a propriedade que se altera é a mesma dos FERs: a viscosidade aparente. No entanto, a grandeza física imposta é um campo magnético, em vez de um campo elétrico. Dessa forma, ao se aplicar um campo magnético, o fluido sai de um estado original semilíquido, para um estado semissólido. Essa mudança ocorre rapidamente, em um intervalo na ordem de 15 ms (Soares, 2016).

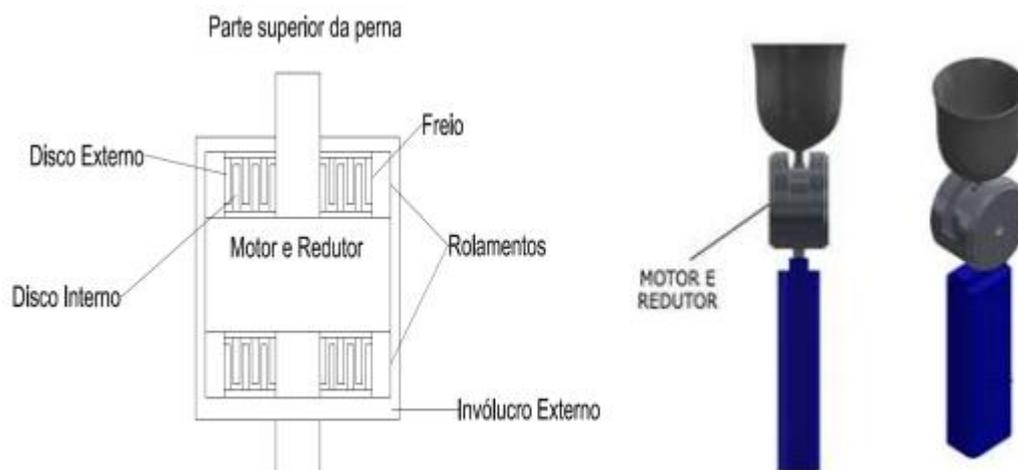
A descoberta e desenvolvimento dos FMRs data da década de 50, pelo estadunidense Jacob Rabinow. O principal uso dos fluidos magneto-reológicos se dá em suspensões automotivas, em amortecedores sísmicos de vibrações, em amortecedores em veículos pesados e em realimentação tátil. Alguns exemplos podem ser observados nas Figuras 2, 3 e 4.



**Figura 2:** Suspensão automotiva MR do Ferrari 599 GTB Fiorano (Ferrari N.V., 2019).



**Figura 3:** Amortecedor sísmico magneto-reológico (Teuber & Novak, 2013).



**Figura 4:** Esquema de atuador MR e vista 3D de uma prótese de joelho com atuador MR (Leal Jr & Alves, 2015).

## 1.1. Objetivo e organização do trabalho

Este trabalho tem como objetivo realizar o estudo de um amortecedor magneto-reológico (MR) e modelar numericamente um sistema capaz de descrever o comportamento do mesmo quando submetido a diferentes tensões elétricas. Este amortecedor é constituído por um fluido magneto-reológico, que possui certa resistência ao cisalhamento. Essa resistência é variável com a aplicação de um campo magnético sobre o fluido. Dessa maneira, é possível controlar os níveis de amortecimento de um dispositivo, aplicando-se ao mesmo um campo magnético controlado.

Os amortecedores MRs têm sua modelagem matemática baseada em diversos modelos matemáticos. No entanto, há quatro modelos mais comumente utilizados, que são paramétricos e fornecem resultados com uma menor complexidade matemática, são eles o modelo de Bingham, o modelo de Gamota e Filisko, o modelo de Bouc-Wen e o modelo de Bouc-Wen Modificado. Todos estes modelos são constituídos por parâmetros dos quais os valores foram obtidos de maneira experimental, representando o comportamento do amortecedor.

Para que seja possível atingir o objetivo geral do trabalho, serão realizados: a conceituação dos fluidos magneto-reológicos, bem como os modelos numéricos e tipos de amortecedores; o desenvolvimento do modelo numérico utilizando os métodos de Bouc-Wen e a análise e comparação de resultados para diferentes tensões elétricas.

Dessa forma, o trabalho será organizado, apresentando, no capítulo 2, os tipos de dispositivos de controle de vibrações e alguns dos estudos realizados com amortecedores magneto-reológicos. No capítulo 3, será feita uma introdução sobre materiais inteligentes, serão estudados os fluidos magneto-reológicos e serão apresentados os modelos matemáticos de amortecedores MRs. No capítulo 4, será feita a descrição do modelo utilizado, a implementação numérica do mesmo e serão estabelecidos os tipos de análise a serem realizadas. No capítulo 5, serão mostrados os resultados obtidos e sua análise. As conclusões do trabalho, a partir das análises feitas e dos resultados obtidos, bem como sugestões para trabalhos futuros, serão apresentadas no capítulo 6.

## Capítulo 2

### 2.Revisão bibliográfica

#### 2.1. Tipos de dispositivos de controle de vibrações

Os dispositivos de controle de vibrações são muito utilizados no amortecimento de vibrações e na atenuação de ruídos. De acordo com a forma como atuam, eles podem ser subdivididos em três diferentes grupos de dispositivos: de controle passivo, ativo e semiativo.

##### 2.1.1. Controle de vibrações passivo

Os mais simples e antigos dispositivos de controle de vibrações são os de controle passivo. Nestes, não é necessária uma fonte externa de energia para atuar no sistema. Nesse caso, o sistema funciona à base de armazenamento e dissipação de energia do mesmo.

Um sistema de suspensão passiva tem a capacidade de armazenar energia através de uma mola e de dissipá-la através de um amortecedor. Os parâmetros utilizados são geralmente fixos e são escolhidos de forma que o dispositivo alcance um desempenho satisfatório. Uma vez que a mola é selecionada com base na sua capacidade de carga, o amortecedor é a única variável restante a ser especificada (Yu, 2000).

A energia controlada passivamente em um sistema não pode sofrer variações através da ação do dispositivo. No entanto, o dispositivo é dependente do projeto inicial do sistema, possuindo restrições na sua faixa operacional para as quais foram definidas a elasticidade, rigidez e amortecimento, não permitindo mudanças durante a operação (Lima, 2011).

O baixo amortecimento produz um fraco controle da ressonância nas frequências naturais do sistema, mas fornece o isolamento de altas frequências. Inversamente, um alto amortecimento resulta em bom controle de ressonância às custas do isolamento de altas frequências (Yu, 2000).

As principais vantagens do controle passivo incluem a simplicidade, baixo custo, estabilidade e confiabilidade do sistema. No entanto, devido às restrições da faixa de frequências de atuação, não se adaptam a condições diversas de operação (Lima, 2011).

Esses dispositivos, em geral, são compostos por elementos como molas, amortecedores, freios e coxins, que possuem propriedades constantes. Sua aplicação mais comum é nas suspensões automotivas, que utilizam amortecedores e molas helicoidais ou de feixe (Lima, 2011).

### **2.1.2. Controle de vibrações ativo**

Assim como os dispositivos de controle passivos, os dispositivos de controle ativo também possuem a capacidade de armazenar ou dissipar energia. No entanto, além disso, estes dispositivos também são capazes de inserir energia no sistema a ser controlado. Desse modo, é necessária uma fonte externa de energia agindo nos atuadores para que estes executem as ações de controle do sistema. As forças de controle são utilizadas para a redução da energia inserida no sistema, via excitação externa, ou para a dissipação da energia. O funcionamento deste dispositivo se dá de forma que sejam medidos os valores de vibração no sistema. Ou seja, além da necessidade de uma fonte de energia externa, também são necessários sensores e atuadores (Lima, 2011).

Os controladores ativos têm sido de grande interesse nos últimos anos. O seu uso mais comum é em atuadores hidráulicos, pneumáticos e eletromagnéticos. A vantagem de seu uso ocorre na capacidade de adaptação às variações do sistema, se mostrando muito mais efetivos do que os controladores passivos. No entanto, esse sistema exige grandes quantidades de energia e, portanto, se torna impraticável para algumas aplicações. Ademais, se esse sistema falhar, não apresentará amortecimento significativo, o que pode gerar uma condição instável (Yu, 2000).

As maiores desvantagens desse tipo de controle estão relacionadas com a necessidade de fonte de energia externa em grande quantidade, que, por apresentarem tal dependência, tornam o sistema menos confiável. Além disso, apresentam alta complexidade e altos custos, tanto de manutenção, quanto de implementação (Lima, 2011).

Apesar de apresentarem um melhor desempenho e possibilitarem o trabalho em uma faixa de frequências mais ampla, também apresentam limitações significativas.

### **2.1.3. Controle de vibrações semiativo**

Devido às dificuldades de utilização de um sistema de controle puramente ativo, tem sido mais vantajoso o uso de dispositivos de controle chamados de semiativos. O controle semiativo é realizado por dispositivos que não inserem energia no sistema, mas que são adaptáveis, combinando, assim, as melhores características dos sistemas passivo e ativo (Yu, 2000).

O funcionamento desse dispositivo não utiliza a inserção de energia no sistema, mas, sim, a dissipação da mesma de forma controlada, garantindo estabilidade à operação. Desse modo, ele se caracteriza por demandar uma pequena quantidade de energia de atuação e apresentar uma baixa complexidade. Com isso, o dispositivo mantém a capacidade de atuar em

uma faixa de operação mais ampla que a de dispositivos de controle passivos e a um custo energético menor do que os de dispositivos de controle ativos (Lima, 2011).

Existem duas formas de criar um amortecedor de amortecimento variável. A primeira é alterar o tamanho do orifício por onde o fluido hidráulico escoar. A segunda é alterar as propriedades do próprio fluido. Os fluidos magneto-reológicos são utilizados na implementação de amortecedores se apresentando como fluidos que mudam sua propriedade, para garantir a variação no amortecimento (Yu, 2000).

A confiabilidade dos dispositivos semiativos é similar à dos de controle passivo, pois, mesmo que haja uma perda de energia do sistema, ele segue fornecendo certo nível de amortecimento, o que o torna mais seguro que os dispositivos de controle ativo (Yu, 2000).

## **2.2. Amortecedores magneto-reológicos**

É considerado um atuador magneto-reológico todo dispositivo mecânico que possua circuitos elétricos e magnéticos capazes de alterar o comportamento reológico de fluidos magneto-reológicos e que utilize essa capacidade para a geração de forças dissipativas (Crivellaro, 2008).

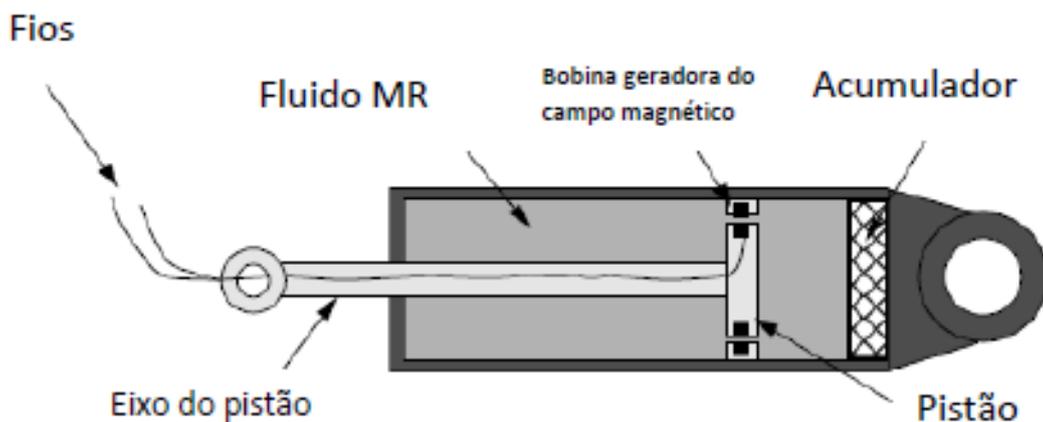
O tipo de dispositivo de aplicação mais comum é o amortecedor magneto-reológico (MR). Com as características dos fluidos MRs de alterarem sua viscosidade de forma reversível, surgem possibilidades de utilização na área de controle de vibrações.

Unsal (2002) fez uma ampla revisão sobre amortecedores semiativos, como os amortecedores de atrito, amortecedores hidráulicos e amortecedores de comportamento reológico. Também foi desenvolvido um estudo experimental identificando e caracterizando o comportamento de um amortecedor piezelétrico. Esse estudo mostrou a eficácia do sistema no controle de vibrações e que com a alteração da força normal sobre o controlador piezelétrico, que controla o atrito dentro do amortecedor, as características de amortecimento são alteradas. Além disso, notou-se que a amplitude da força de atrito no amortecedor não possui relação direta com a frequência. Ela se comporta de forma linear se relacionando mais fortemente com a tensão aplicada ao controlador.

Braz-César e Barros (2010) fizeram um estudo numérico e experimental de um amortecedor magneto-reológico para ser utilizado na área da engenharia civil, trabalhando como um dissipador de vibrações sísmicas. Foram utilizados dois sistemas, um deles trabalhando com um algoritmo de controle baseado na teoria de estabilidade de Lyapunov e outro sem ele. Os resultados mostraram que o sistema controlado apresentou uma redução

significativa dos efeitos vibratórios, gerando uma melhoria em relação ao sistema não controlado.

Castão (2008) estudou a dinâmica não linear de um sistema não ideal sob o efeito de amortecedores magneto-reológicos, com o objetivo de verificar a eficiência desse tipo de amortecimento e de minimizar o Efeito Sommerfeld nesse tipo de sistema. Ele realizou uma série de simulações numéricas e buscou estudar o comportamento deste sistema em algumas regiões específicas da frequência de excitação, que neste caso, foram geradas por um motor de corrente contínua. Concluiu-se que conforme se aumenta o valor do amortecimento, percebe-se o controle efetuado pelo dispositivo aplicado, sendo observadas mudanças nas características do movimento, saindo de um movimento caótico para um movimento periódico, comprovando a utilização eficiente de amortecedores magneto-reológicos como dispositivos de controle de vibrações. Na Figura 5, é possível observar o diagrama esquemático do amortecedor MR utilizado no trabalho.



**Figura 5:** Esquema de montagem de um amortecedor magneto-reológico (Castão, 2008).

Pascoal (2016) trabalhou em um protótipo de bicicleta equipada com um amortecedor MR semiativo. Com o auxílio de sensores estrategicamente posicionados, foi possível estudar o comportamento da suspensão adaptada com um amortecedor magneto-reológico. Dessa forma, foram obtidos diversos dados para diferentes tipos de pisos, declives e velocidades, que permitiram a compreensão do desempenho do sistema para cada uma das situações. Ele concluiu que o aumento da tensão de alimentação do amortecedor MR aumenta a resistência à compressão que este oferece. Logo, o amortecedor MR se apresenta como uma opção bastante válida quando se trata da redução de vibrações.

Shirazi et al. (2010) investigaram um método integrado de identificação e controle de um amortecedor MR, para isolar uma massa vibratória. Foi utilizado o modelo da histerese de Bouc-Wen para realizar a caracterização do comportamento não-linear do amortecedor, que

representa o seu comportamento dinâmico. A força de controle de entrada foi alimentada por um modelo inverso desenvolvido em seu trabalho, para obter a tensão necessária para conduzir o amortecedor MR. Os resultados obtidos estabeleceram que o sistema possui excelente desempenho para a absorção de vibrações da massa observada.

Soares (2016) desenvolveu um dispositivo de feedback de força utilizando fluidos magneto-reológicos. Esse tipo de dispositivo é cada vez mais usado nas interações homem-máquina, sejam elas locais ou remotas. A possibilidade de ter acesso ao feedback de força, além de permitir ao utilizador sentir os esforços que atuam sobre o sistema, permite uma interação mais rápida e natural. Dispositivos desse tipo, como o observado na Figura 6, se enquadram na classe de dispositivos chamados de hápticos, que se referem à manipulação e sensibilidade através do tato/toque, como os dispositivos móveis (smartphones) e videogames. Nestes, é muito comum que o método de acionamento seja através de motores elétricos, mas também é possível encontrar atuadores pneumáticos ou que utilizem outros métodos, como, neste caso, foram utilizados materiais inteligentes. O desempenho de todo o sistema foi avaliado experimentalmente utilizando um robô ABB IRB2400/16, para impor um movimento a velocidade constante. Apesar de ser apenas um protótipo inicial, os resultados obtidos foram bastante positivos.



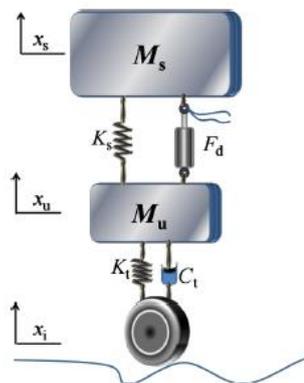
**Figura 6:** Luva CyberGrasp - Exemplo de dispositivo háptico (Soares, 2016).

Tusset (2008) apresentou um modelo para o controle da suspensão veicular utilizando amortecedores magneto-reológicos. Esse controle foi composto pela associação de duas estratégias, o controle ótimo e o controle *fuzzy*. O primeiro é utilizado na determinação da força a ser utilizada pelo amortecedor MR e o segundo é utilizado na determinação de sua corrente elétrica, sendo obtido pelo modelo de Mandani. Para demonstrar a eficiência do controle utilizado, foram consideradas simulações computacionais geradas com o uso do Matlab e Simulink. Elas levaram em conta a possibilidade de erros paramétricos, mostrando que, mesmo sujeito a incertezas, o sistema se mostra estável. Assim sendo, conclui-se que o controle

proposto aumentou a segurança do veículo, melhorou sua dirigibilidade, reduziu o deslocamento vertical do conjunto eixo-roda e reduziu as oscilações da carroceria, contribuindo para o maior conforto dos passageiros.

Zayed et al. (2014) investigaram experimentalmente o efeito de utilizar um amortecedor magneto-reológico na resposta dinâmica de um sistema de um grau de liberdade, com massas de desequilíbrio rotativo. Foi adotado o modelo de Bouc-Wen para realizar a caracterização do desempenho do amortecedor. Além disso, foi introduzida a análise teórica do sistema passivo não-amortecido e foram realizadas as devidas simulações. Também foi construído um equipamento de teste para o sistema de desequilíbrio rotativo, obtido com o uso de duas engrenagens que carregavam massas de desequilíbrio. Os resultados foram comparados para os sistemas não-amortecido e amortecido com fluidos magneto-reológicos. Desse modo, observou-se que os amortecedores MR pode suprimir de forma efetiva a amplitude de vibração do sistema, mesmo em condição de ressonância.

Zhang et al. (2016) também investigaram o efeito de um amortecedor MR, mas o fizeram para um sistema de dois graus de liberdade (conforme Figura 7), com excitação externa harmônica. Assim como Zayed et al. (2014), empregaram o modelo de Bouc-Wen para a identificação do amortecedor. Foram traçados o histórico temporal e a trajetória de fase para certos valores de frequência da excitação harmônica, para verificar a evolução dinâmica não-linear das bifurcações de duplicação de período até o caos. Além disso, o amortecimento MR ocorre em um modo passivo, conduzido com uma corrente constante. Tanto os resultados experimentais quanto numéricos indicaram que o intervalo da região não-linear está na baixa frequência, e demonstraram os comportamentos dinâmicos complexos causados pelas características não-lineares do amortecedor MR. Esse estudo forneceu uma referência importante para a otimização dos parâmetros de sistemas que aplicam amortecedores MRs, com o objetivo de evitar o movimento instável não-linear.



**Figura 7:** Modelo de sistema de dois graus de liberdade (Zhang *et al.*, 2016).

Yuan et al. (2019) realizaram uma revisão das características estruturais de um amortecedor MR e seus efeitos significativos no seu desempenho. Assim, foram capazes de compreender o desenvolvimento estrutural em três percursos técnicos, considerando, principalmente, as posições e voltas das bobinas, a melhoria no circuito magnético e os modos de fluxo inovadores. Ao adotar diferentes modos de fluxo, como o radial e circunferencial, pode ser obtido um maior comprimento dos canais de amortecimento. Especialmente, ao combinar esses dois modos, são obtidas performances de maior excelência. Esse estudo estabeleceu que um amortecedor futuro pode ser antecipado, com a combinação de requisitos como canais de amortecimento mais longos, utilização de altos campos magnéticos, faixas de amortecimento mais amplas, fracas excitações de campo magnético, menor volume, menor consumo de energia, melhores aspectos gerais e menores custos.

Ashtiani et al. (2015) fizeram uma ampla revisão sobre a preparação e estabilização de fluidos MR. Dessa forma, estabeleceram dois importantes desafios: a obtenção de grandes tensões de escoamento (forte efeito magneto-reológico) e a redução da sedimentação de partículas magnetizáveis, devido à gravidade. Estes problemas influenciam de forma significativa as propriedades reológicas desses fluidos e dependem, principalmente, do tipo, forma, tamanho e fração de volume das partículas magnetizáveis. A escolha dessas partículas depende de vários fatores, como compatibilidade com o fluido transportador, considerações de estabilidade, efeito magneto-reológico exigido, entre outros. No entanto, as micropartículas de ferro carbonil são as partículas mais promissoras para a fase dispersa dos fluidos MRs e sua seleção contribui para a alta saturação de magnetização, baixa coercividade, custo relativamente baixo e ampla disponibilidade.

Inúmeros métodos foram introduzidos, até o momento, para a melhoria da estabilidade, bem como o efeito magneto-reológico dos fluidos. Os mais importantes destes métodos são: a diminuição da densidade da partícula magnetizável através do seu revestimento, aumentando a viscosidade do fluido transportador, usando líquidos de alta viscosidade e materiais nano-estruturados e a modificação da superfície da partícula adicionando estabilizadores surfactantes. Além disso, alguns estudos indicam que o fluido transportador tem um papel de grande importância na magneto-reologia. A utilização de fluidos com maior densidade contribui para minimizar a diferença de densidade entre o fluido base e as partículas metálicas, como principal fator efetivo na sedimentação e instabilidade dessas suspensões. Apesar disso, a viscosidade destes fluidos aumenta na ausência de campo magnético, o que não é desejável. No entanto, o óleo de silício é conhecido como a primeira escolha para a preparação de fluidos magneto-

reológicos, devido a várias características como sua disponibilidade, baixo custo e baixa viscosidade (Ashtiani et al., 2015).

Algumas pesquisas estudaram o uso de aditivos que podem melhorar tanto a estabilidade quanto o efeito de magneto-reológico. Contudo, parece que entre todos os aditivos e surfactantes, o ácido esteárico, as argilas organofílicas e a sílica fumada são os materiais mais adequados. No entanto, muitos desses métodos de estabilização reduzem a tensão de escoamento e, portanto, o efeito magneto-reológico. Desse modo, apesar dos numerosos estudos conduzidos nesta área, ainda é necessário encontrar uma nova composição destas suspensões que possam ser mais estáveis e mais rentáveis (Ashtiani et al., 2015).

Gordaninejad et al. (2004) estudaram novos géis de polímero magneto-reológico. Neste estudo, investigaram os géis de polímero com melhor desempenho de redispersão e propriedades de resistência a altas temperaturas. Estes fluidos são compostos de partículas magnéticas suspensas em um gel de poliimida. As poliimidadas são materiais termooxidativamente estáveis e possuem boa resistência química. É difícil impedir por completo o acúmulo de partículas de ferro devido à grande diferença entre a densidade das partículas de ferro e o meio de transporte. No entanto, esses fluidos podem ser usados de forma eficaz em diferentes dispositivos, se eles se dispersarem rápida e completamente.

Bombard et al. (2014) investigaram o uso de nanofibras para melhorar as propriedades magneto-reológicas de fluidos MR convencionais, baseados em microesferas. Dois tipos de nanofibras foram empregadas, com morfologias bastante similares, mas com propriedades magnéticas muito diferentes. Essas foram as nanofibras não-magnéticas de goethita e as nanofibras magnéticas de dióxido de cromo. Para concentrações apropriadas, a tensão de escoamento relativa aumenta até 80%, quando são incorporadas nanofibras na formulação dos fluidos. Um aumento de tensão de escoamento similar é encontrado para ambas as nanofibras, o que sugere que o principal fator desse aprimoramento é a anisotropia da forma das partículas. Com a substituição parcial das partículas de ferro carbonil por nanofibras, foram encontradas tensões relativas de escoamento significativamente maiores que as obtidas em trabalhos anteriores, formulados a partir da substituição parcial por partículas esféricas micronizadas. Além disso, foi demonstrado que esses fluidos dimórficos MR também exibem uma estabilidade de sedimentação a longo prazo consideravelmente maior, mantendo a mesma penetração e características de redispersibilidade.

## Capítulo 3

### 3. Fundamentos teóricos

#### 3.1. Materiais inteligentes

Por muitos séculos, os metais desempenham um papel de grande importância para a humanidade, aplicados a diversas áreas de atuação. Com o auxílio do constante avanço tecnológico, cada vez mais é possível entender os efeitos microestruturais dos materiais, a possibilidade de novas formas de processamento e as funcionalidades diversas dos mesmos. No caso dos materiais inteligentes, entende-se que estes surgiram da necessidade de utilizar materiais que funcionem como sensores e atuadores. Os sensores recebem sinais mecânicos e os convertem em saídas não-mecânicas. Já os atuadores, funcionam de forma oposta, transformando uma entrada não-mecânica em uma saída mecânica (Lagoudas, 2008).

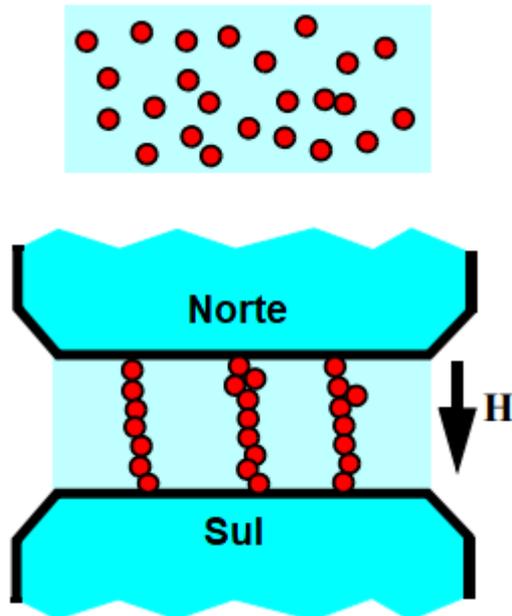
As ligas de memória de forma (SMA) são exemplos de materiais inteligentes que convertem energia térmica em deformação mecânica, bem como os fluidos magneto-reológicos, que, submetidos a um campo magnético, apresentam uma saída mecânica, como a mudança em sua viscosidade. Já os materiais piezelétricos recebem entradas mecânicas, como vibração e deformação, e respondem com uma saída em forma de sinal elétrico e vice-versa. As respostas obtidas com esse tipo de material, em geral, são de magnitude bastante superior aos materiais comuns (Lagoudas, 2008).

Os materiais inteligentes podem ser subdivididos em materiais de acoplamento direto e de acoplamento indireto. No acoplamento direto, tanto um sinal mecânico quanto um sinal não-mecânico pode ser utilizado como entrada e o outro será o sinal de saída. Materiais piezelétricos e ligas de memória de forma são exemplos desse tipo de acoplamento. Já no acoplamento indireto, como nos fluidos eletro e magneto-reológicos, uma entrada elétrica ou magnética gera uma alteração mecânica indireta, através da mudança de viscosidade do material (Lagoudas, 2008).

#### 3.2. Fluidos magneto-reológicos

Os fluidos magneto-reológicos e eletro-reológicos têm grande semelhança quando se trata de sua composição. Assim como os FERs, os FMRs são compostos por partículas sólidas - no caso, ferromagnéticas, com diâmetros entre 3 e 5  $\mu\text{m}$  - suspensas em um meio líquido, em geral, óleos minerais, sintéticos, água ou silicones. Essas partículas sólidas ferromagnéticas, quando submetidas a um campo magnético, adquirem um momento de dipolo alinhado com o

campo externo, que leva as partículas a se alinharem paralelamente ao campo, assim como mostra a Figura 8. Dessa maneira, o movimento do fluido é restringido pela solidificação da suspensão de partículas, alterando o seu limite de elasticidade. O grau dessa alteração varia de acordo com a intensidade do campo aplicado (Yang, 2001).



**Figura 8:** FMRs sob ação de um campo magnético. (Yang, 2001)

Em geral, um fluido magneto-reológico contém entre 20% e 40% de partículas ferromagnéticas, em volume. A resistência máxima de um FMR está diretamente ligada à saturação de magnetização dessas partículas. Quanto maior a saturação de magnetização da partícula escolhida, mais resistente será o FMR. As ligas de ferro e cobalto são as mais adequadas para gerar as partículas ferromagnéticas, com saturação de magnetização em torno de 2,4 Tesla. No entanto, devido a seu alto custo, as partículas de ferro puro são as mais indicadas, com saturação de magnetização em torno de 2,15 tesla. Todas as demais ligas e óxidos possuem índices de saturação de magnetização muito baixos, gerando FMRs significativamente menos resistentes (Yang, 2001).

Como pode ser observado na Tabela 1, quando comparados com os FERs, os FMRs possuem algumas vantagens, pois apresentam menor sensibilidade à ação de impurezas na suspensão, normalmente adquiridas durante sua preparação. Além disso, possuem uma faixa de temperatura de trabalho mais ampla (de  $-40^{\circ}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ ), podem ser controlados com uma fonte de energia de menor tensão e os seus limites de resistência à tração são maiores em, pelo menos, uma ordem de grandeza em relação aos FERs. Desse modo, dispositivos que utilizam FMRs

necessitam de uma quantidade significativamente menor de fluido e espaço (Butz & Von Stryk, 2002).

**Tabela 1:** Propriedades de alguns FERs e FMRs. (Butz & Von Stryk, 2002)

Propriedade	Fluido Eletro-reológico	Fluido Magneto-reológico
Tempo de resposta	Milissegundos	Milissegundos
Viscosidade plástica (a 25°C)	0,2 a 0,3 Pa.s	0,2 a 0,3 Pa.s
Faixa de temperatura de trabalho	10 a 90° C (iônico) -25 a 125° C (não-iônico)	-40 a 150° C
Tensão da fonte de energia	2 a 5 kV	2 a 25 V
Limite de resistência à tração	2 a 5 kPa	50 a 100 kPa

Uma das propriedades reológicas mais relevantes de um fluido MR é a tensão de escoamento. Esta deve ser superada para iniciar a deformação ou fluxo do material. O limite de escoamento é o valor exigido para o início do fluxo e é de interesse especial em aplicações de transferência de torque. Existem dois modelos de limites de escoamento principais, quando se trata de fluidos magneto-reológicos. O primeiro é o modelo macroscópico, que utiliza princípios de minimização de energia magnética e assume estruturas homogêneas, formadas por agregados de partículas esferoidais, cilíndricos ou em camadas. Esse modelo se baseia em uma descrição mesoscópica da estrutura, considerando apenas a forma anisotrópica, sob pequenas deformações dos agregados tensionados (Vicente *et al.*, 2011).

O modelo microscópico considera as interações entre partículas. Na maioria dos modelos de limite de escoamento, as interações magnetoestáticas entre partículas se sobrepõem à tensão de cisalhamento. Além disso, são ignoradas as interações entre estruturas induzidas por campo. Desse modo, a análise se limita a baixas concentrações de partículas (Vicente *et al.*, 2011).

Para o caso de fluidos MR convencionais, os modelos macroscópicos não conseguem reproduzir comportamentos observados experimentalmente. Já os modelos microscópicos são capazes de fornecer resultados bastante similares aos obtidos experimentalmente (Vicente *et al.*, 2011).

Devido às suas características de rápida e alta reversibilidade, além de possibilitarem um contato direto de dispositivos mecânicos com sistemas eletrônicos, os FMRs têm sido amplamente estudados e desenvolvidos em diversas aplicações. Entre elas, pode-se ressaltar o

uso na fabricação de amortecedores de impacto, na fabricação de válvulas de controle, na fabricação de freios e na execução de polimento de superfícies (Ashtiani *et al.*, 2015).

### 3.3. Modelos matemáticos de amortecedores magneto-reológicos

Com o objetivo de modelar o comportamento de amortecedores magneto-reológicos, foram estabelecidos modelos matemáticos paramétricos e não paramétricos. Diversos pesquisadores trabalharam modelos não paramétricos. No entanto, essa abordagem mostrou inúmeros problemas, pois os modelos gerados eram de alta complexidade (Lima, 2011).

Já os modelos paramétricos também foram amplamente estudados e desenvolvidos por muitos pesquisadores. Estes modelos são modelos fenomenológicos, em geral, produzidos pela combinação de elementos mecânicos simples, entre eles: molas, amortecedores e elementos de atrito. Quando se trata desses modelos, há um ajuste dos parâmetros, para que seja possível reproduzir, de forma fidedigna, os resultados obtidos de maneira experimental (Lima, 2011).

Para que se possa realizar a devida modelagem matemática, são utilizadas duas diferentes abordagens: a modelagem do fluido MR e a modelagem do amortecedor MR. Esta última, considera um modelo obtido a partir de uma observação experimental de como se comporta um sistema mecânico que possui um amortecedor do qual a vazão, que flui por seu orifício, é controlada com a ação de um campo magnético.

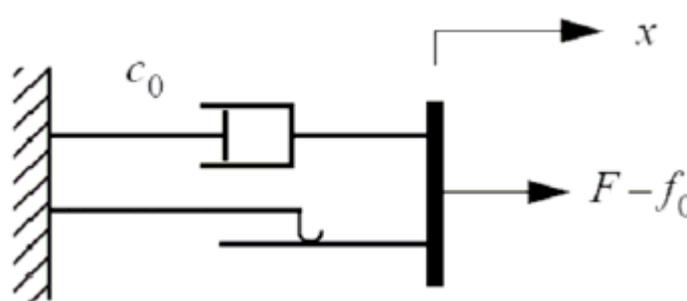
Os modelos paramétricos mais comuns são: o modelo de Bingham; o modelo de Gamota e Filisko, que é uma extensão do modelo de Bingham; o modelo de Bouc-Wen e o modelo de Bouc-Wen Modificado, que possui uma resposta mais próxima da resposta experimental. Isso pode ser observado na comparação entre os resultados experimentais obtidos e os previstos pelo modelo numericamente, principalmente no comportamento força x velocidade, exibidos para cada modelo nos itens a seguir.

#### 3.3.1. Modelo de Bingham

O modelo de Bingham, proposto por Stanway *et al.* (1985), é um modelo mecânico idealizado composto por um termo de amortecimento viscoso linear colocado em paralelo a um termo de amortecimento semelhante ao atrito de Coulomb. A resposta à tração e compressão do fluido dentro do amortecedor para esse modelo é frequentemente usada e dada pela Equação 1:

$$\tau = \tau_{y(campo)} + \eta\dot{\gamma} \quad (1)$$

onde  $\tau_{y(campo)}$  é o esforço produzido pelo fluído dentro do amortecedor, quando exposto ao campo magnético e atua na direção contrária ao deslocamento do sistema,  $\eta$  é a viscosidade do fluido e  $\dot{\gamma}$  é a velocidade total do sistema.



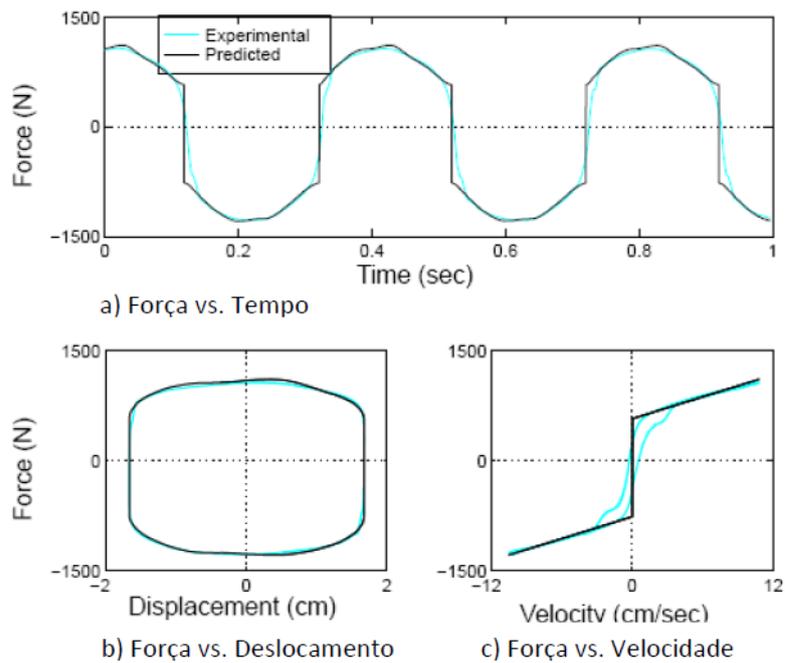
**Figura 9:** Representação mecânica do modelo de Bingham (Spencer Jr. *et al.*, 1997).

Neste modelo, apresentado na Figura 9, utilizando as velocidades do pistão diferentes de zero, pode-se estabelecer a força gerada pelo mecanismo a partir da Equação 2.

$$F = f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) + c_0 \dot{x} + f_0 \quad (2)$$

onde  $\dot{x}$  é a velocidade relativa das extremidades do amortecedor,  $\operatorname{sgn}(\ )$  é a função sinal,  $c_0$  é a constante de amortecimento plástica, ou seja, é o coeficiente de amortecimento observado após o escoamento do fluido e  $f_c$  é a força relacionada à tensão de escoamento do fluido. Já  $f_0$  é uma parcela de força que se inclui quando os valores de força medidos ocorrem devido à presença do acumulador no interior do amortecedor. Desse modo, utilizando a Equação 2, conclui-se que, caso a velocidade do pistão se iguale a zero em algum ponto, a força gerada pelo mecanismo ( $F$ ) é igual a força interna do acumulador ( $f_0$ ).

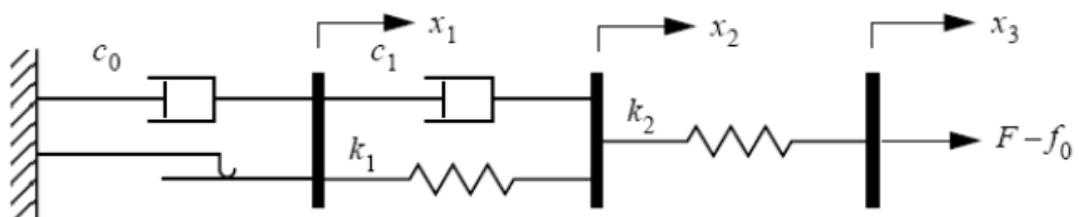
Este modelo não é capaz de captar certos fenômenos decorrentes deste tipo de amortecimento, quando se trabalha com velocidades muito próximas de zero. No entanto, para velocidades iguais a zero, o modelo é capaz de captar a mudança de sinal da força gerada, que é devida à mudança de sinal das acelerações e deslocamentos. Assim sendo, conforme pode ser observado na Figura 10, entende-se que o modelo possui um bom desempenho ao analisar as respostas globais do amortecedor e é capaz de caracterizar o dispositivo de maneira adequada, quando em aplicações de controle (Spencer Jr. *et al.*, 1997).



**Figura 10:** Comparação entre a resposta experimental e numérica, utilizando o modelo de Bingham (Spencer Jr., 1997).

### 3.3.2. Modelo de Gamota e Filisko

O modelo, proposto por Gamota e Filisko (1991), apresentado na Figura 11, é uma extensão do modelo de Bingham. O modelo em questão é o mesmo que o anterior colocado em série com um modelo de um sólido linear visco-plástico. Suas equações deste modelo captam também as respostas não lineares próximas de zero.



**Figura 11:** Modelo de Gamota e Filisko (Castão *et al.*, 2008).

Em consequência da grande dificuldade encontrada ao simular as equações deste modelo, foram utilizados passos de integração na ordem de  $10^{-6}$  seg, capazes de captar as respostas não lineares do amortecedor. As Equações 3 e 4 são as governantes deste modelo e são mostradas a seguir.

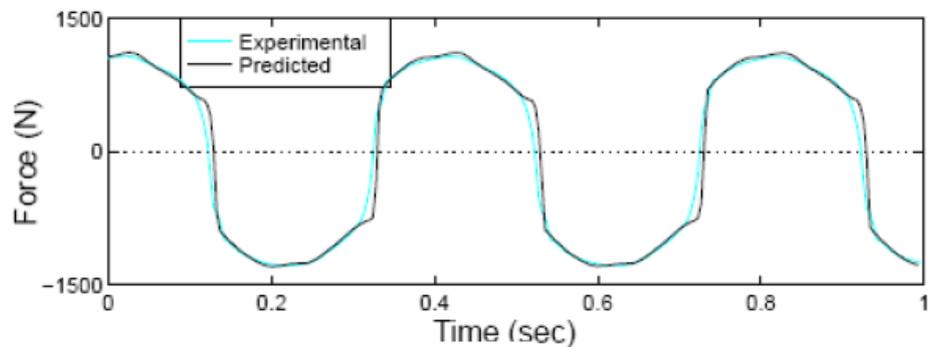
$$\left. \begin{aligned} F &= k_1(x_2 - x_1) + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + f_0 \\ &= c_0\dot{x}_1 + f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}_1) + f_0 \end{aligned} \right\} |F| > f_c \quad (3)$$

$$= k_2(x_3 - x_2) + f_0$$

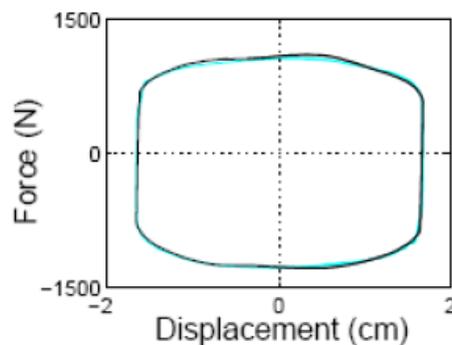
$$\left. \begin{aligned} F &= k_1(x_2 - x_1) + c_1\dot{x}_2 + f_0 \\ &= k_2(x_3 - x_2) + f_0 \end{aligned} \right\} |F| \leq f_c \quad (4)$$

onde  $c_0$  é o coeficiente de amortecimento associado ao modelo de Bingham e  $k_1$ ,  $k_2$  e  $c_1$  estão associados com o material sólido linear. As equações 3 e 4 são de extrema complexidade, o que torna a aproximação deste modelo com a parte numérica mais difícil.

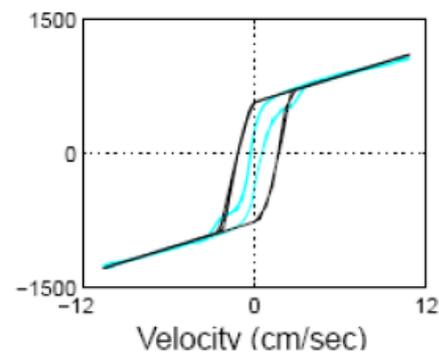
Na Figura 12, pode ser observado o desempenho da resposta numérica, obtida com o modelo em questão, em comparação com a resposta experimental.



a) Força vs. Tempo



b) Força vs. Deslocamento

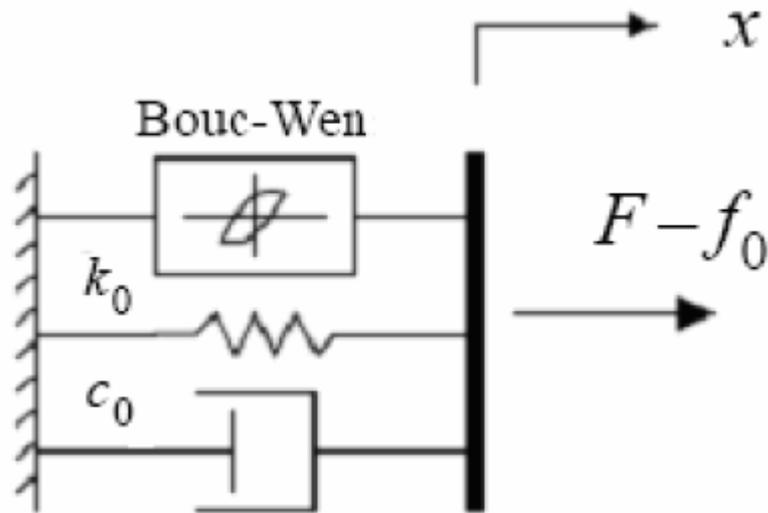


c) Força vs. Velocidade

**Figura 12:** Comparação entre a resposta experimental e numérica, utilizando o modelo de Gamota e Filisko (Spencer Jr. *et al.*, 1997).

### 3.3.3. Modelo de Bouc-Wen

O modelo de Bouc-Wen é bastante utilizado e se aproxima ainda mais da resposta experimental do comportamento de amortecedores magneto-reológicos, como é possível observar na Figura 14. Isso se dá pela sua grande facilidade de tratamento numérico, por apresentar uma grande variedade de respostas histeréticas e por ser bastante versátil na modelagem de sistemas que apresentam este fenômeno. Seu modelo mecânico pode ser observado na Figura 13.



**Figura 13:** Modelo de Bouc-Wen (Castão, 2008).

Esse modelo tem a capacidade de captar, com alto desempenho, a resposta força vs. deslocamento do amortecedor, se aproximando bastante da resposta experimental. Contudo, assim como o modelo de Bingham, não é capaz de captar respostas não lineares do amortecedor, quando as velocidades se aproximam de zero e quando a velocidade e aceleração apresentam sinais diferentes (Castão, 2008).

A Equação 5 representa a força governante desse sistema e pode ser observada a seguir:

$$F = c_0 \dot{x} + k_0 x + \alpha z + f_0 \quad (5)$$

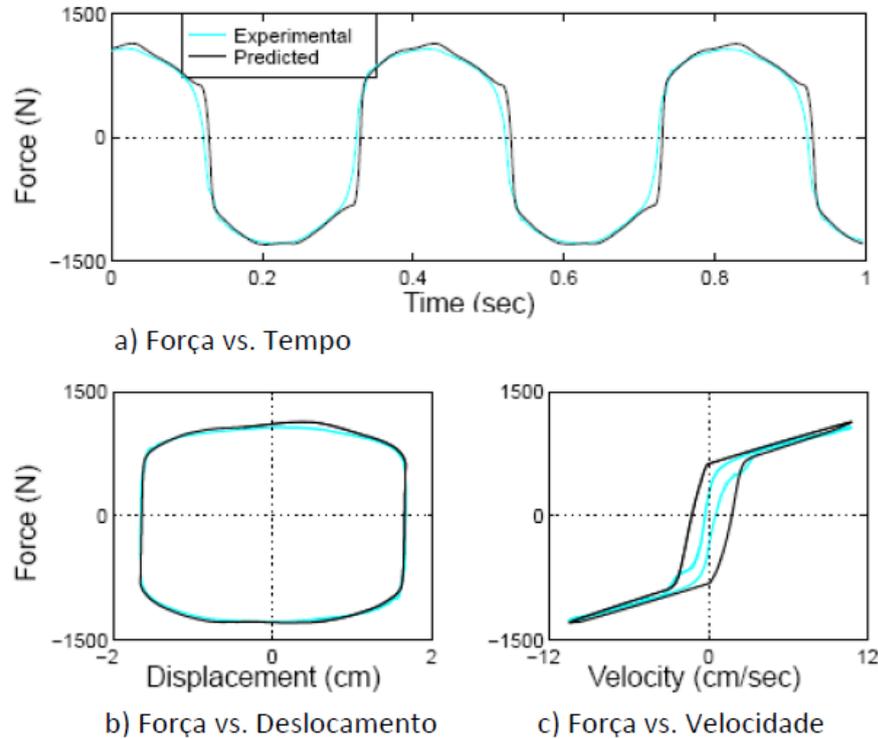
onde  $c_0$  é o coeficiente de amortecimento plástico associado ao modelo,  $\dot{x}$  é a velocidade relativa das extremidades do amortecedor,  $k_0$  e  $f_0$  contabilizam o efeito do acumulador e  $z$  é a variável de estado, uma variável interna do sistema, chamada de deslocamento de histerese. Esta é dada pela Equação 6.

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \beta \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \quad (6)$$

É possível controlar a linearidade na ausência de carga, a transição suave antes e depois do carregamento e a forma da curva de histerese, ajustando os devidos parâmetros do modelo,  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $A$  e  $n$ . A força  $f_0$  devido ao acumulador pode ser inserida neste modelo como uma deflexão inicial  $x_0$ , da mola de constante  $k_0$ . A Equação 7 é dada a seguir, com a aplicação destes valores na Equação 5:

$$F = c_0 \dot{x} + k_0 (x - x_0) + \alpha z \quad (7)$$

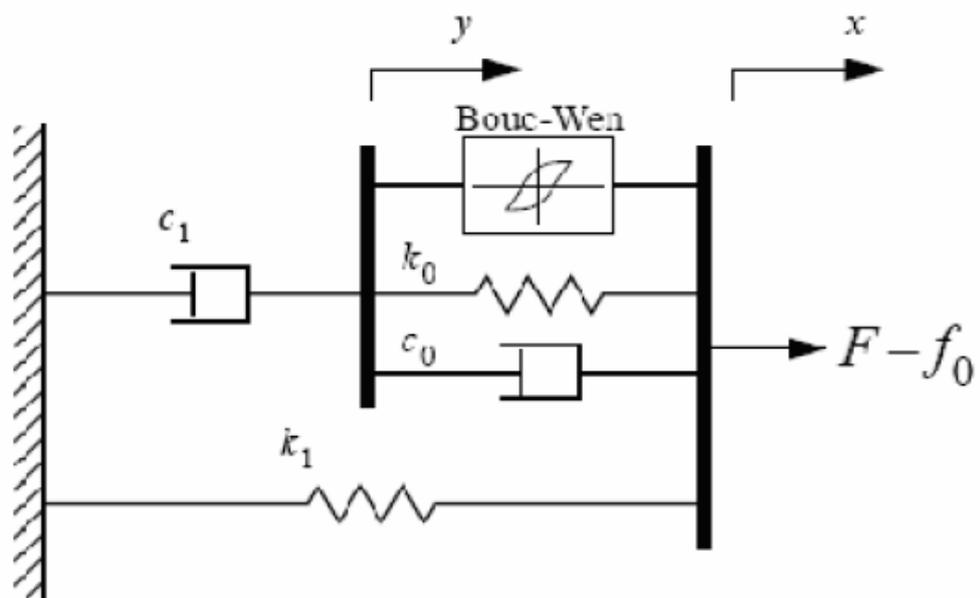
A Figura 14 mostra o desempenho esperado com o uso do modelo em comparação com os resultados obtidos experimentalmente.



**Figura 14:** Comparação entre a resposta experimental e numérica, utilizando o modelo de Bouc-Wen (Spencer Jr. *et al.*, 1997).

### 3.3.4. Modelo de Bouc-Wen Modificado

Com o objetivo de obter uma resposta numérica ainda mais próxima dos resultados experimentais, foi feita, por Spencer Jr. *et al.* (1997), uma modificação no modelo Bouc-Wen, introduzindo um amortecedor viscoso e uma mola linear no modelo, como observado na Figura 15.



**Figura 15:** Modelo mecânico de Bouc-Wen modificado (Spencer Jr. *et al.*, 1997).

A força de amortecimento é dada pela Equação 8 e a velocidade é dada pela Equação 9.

$$F = c_0 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (8)$$

$$\dot{y} = \frac{1}{c_0 + c_1} \{ \alpha z + c_0 \dot{x} + k_0(x - y) \} \quad (9)$$

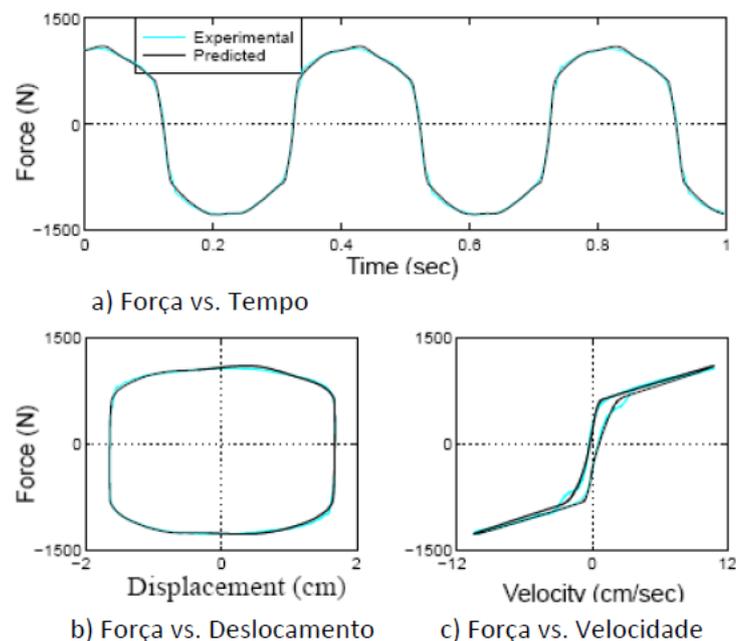
Já a variável de estado,  $z$ , é descrita pela Equação 10.

$$\dot{z} = -\gamma |\dot{x} - \dot{y}| z |z|^{n-1} - \beta (\dot{x} - \dot{y}) |z|^n + A(\dot{x} - \dot{y}) \quad (10)$$

onde os parâmetros  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $A$  e  $n$  determinam a forma da curva de histerese.

A rigidez do acumulador, para este modelo, é representada por  $k_1$  e o amortecimento viscoso para grandes velocidades é representado por  $c_0$ . Já o amortecedor representado por  $c_1$ , é inserido na equação com o objetivo de realizar uma compensação da distorção em baixas velocidades,  $k_0$  está presente para controlar a rigidez em altas velocidades e  $x_0$  é o deslocamento inicial da mola de rigidez  $k_1$ , que está associada à força de amortecimento nominal devido ao acumulador (Lima, 2011).

A resposta obtida com o modelo modificado é a mais próxima da resposta experimental, quando comparada aos demais modelos, como se observa na Figura 16. Isso ocorre principalmente no gráfico força x velocidade. Assim, entende-se que o modelo é o que tem a melhor capacidade de captar a resposta do amortecedor em todas as regiões, mesmo quando as acelerações e velocidades têm sinais opostos e quando as magnitudes das velocidades são próximas de zero. No entanto, a obtenção de seus parâmetros se dá de maneira bastante complexa.



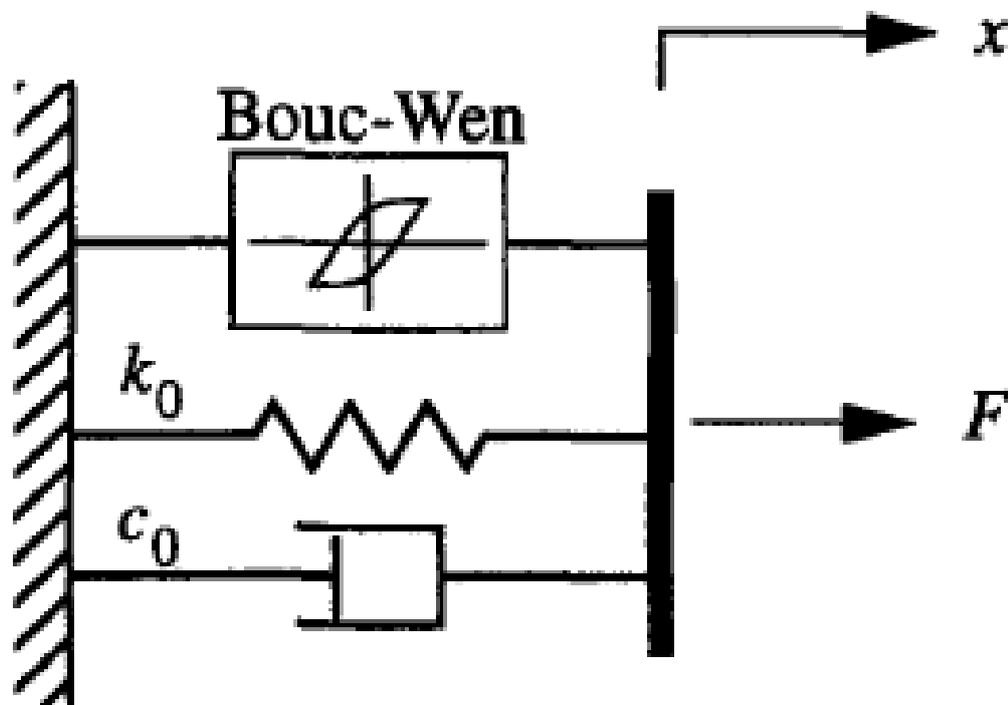
**Figura 16:** Comparação entre a resposta experimental e numérica, utilizando o modelo de Bouc-Wen modificado (Spencer Jr., 1997).

## Capítulo 4

### 4. Metodologia

#### 4.1. Estudo utilizando o modelo de Bouc-Wen simples

Neste trabalho, será considerado inicialmente o modelo de Bouc-Wen simples, para a análise dos parâmetros, pois ele apresenta um resultado satisfatório e próximo ao obtido experimentalmente, como visto na Figura 14. Além disso, ele oferece um tratamento numérico mais simples que o modelo de Bouc-Wen modificado. Ele foi utilizado conforme a Figura 17, na investigação numérica do comportamento do amortecedor magneto-reológico.



**Figura 17:** Esquema que representa o modelo de Bouc-Wen (Spencer Jr. *et al.*, 1997).

Segundo o modelo de Bouc-Wen, com o auxílio de ensaios experimentais, estabelece-se que a força total de amortecimento pode ser representada matematicamente pela soma de três parcelas, conforme já apresentado na Equação 7:

$$F = c_0 \dot{x} + k_0(x - x_0) + \alpha z \quad (7)$$

As duas primeiras parcelas do lado direito da equação descrevem o amortecimento e a rigidez inerentes ao amortecedor MR, sendo em geral pequenas, e a terceira descreve a parte histerética, onde,  $z$ , é a variável evolutiva já descrita na Equação 6.

Uma das dificuldades práticas para o uso do modelo de Bouc-Wen é o grande número de parâmetros envolvidos na modelagem e a dificuldade encontrada ao tentar obtê-los. Dessa forma, serão utilizados os parâmetros, conforme a Tabela 2, obtidos a partir de ensaios experimentais por Spencer Jr. *et al.* (1997).

**Tabela 2:** Tabela de parâmetros do modelo de Bouc-Wen (Spencer Jr. *et al.*, 1997).

Parâmetros	
$\alpha$ (N/cm)	880
$c_0$ (N.s/cm)	50
$k_0$ (N/cm)	25
$\gamma$ (cm <sup>-2</sup> )	100
$\beta$ (cm <sup>-2</sup> )	100
$n$	2
$A$	120
$x_0$ (cm)	3,8
$f$ (Hz)	2,5
$x_1$ (cm)	1,5

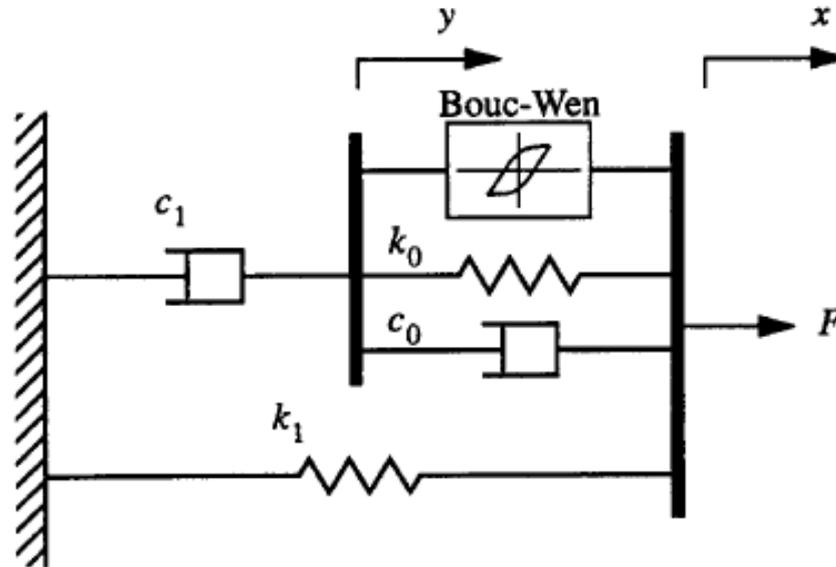
Inicialmente, será feita uma primeira análise, que tem o objetivo de comparar os resultados obtidos com a implementação do modelo de Bouc-Wen simples e sem ele. Esse estudo também considera as seções de Poincaré, que consiste em mapear a posição e velocidade do sistema a cada período da onda. Este mapeamento simplifica o reconhecimento de movimentos ordenados ou caóticos do sistema, em que os primeiros aparecem sobre curvas bem definidas no plano, enquanto os últimos preenchem de forma irregular regiões mais extensas do espaço de fase.

Além disso, também será realizado um estudo paramétrico para verificar a influência exercida por cada parâmetro no modelo em questão.

## 4.2. Estudo utilizando o modelo de Bouc-Wen modificado

Em seguida, será utilizado o modelo de Bouc-Wen Modificado, mostrado na Figura 18, com o objetivo de reproduzir mais fielmente o comportamento de um fluido magneto-reológico, que consiste na introdução de um amortecedor viscoso em série ao modelo de Bouc-Wen e na introdução de uma mola linear em paralelo a este amortecedor e ao Bouc-Wen. Conforme

observado anteriormente na Figura 16, esse modelo é o que oferece o melhor resultado para todos os gráficos, quando comparado com o resultado experimental. Principalmente, os resultados obtidos no comportamento força x velocidade para velocidades próximas de zero.



**Figura 18:** Esquema que representa o modelo de Bouc-Wen modificado( Spencer Jr., 1997)

Neste modelo é possível realizar a análise do comportamento do amortecedor com a aplicação de diferentes tensões elétricas prescritas. As tensões elétricas serão, primeiramente, comparadas sem a aplicação de tensão, com uma aplicação numérica e com uma aplicação senoidal. Após esse estudo, será realizada a análise comparando diferentes tensões elétricas numéricas, seguidas da análise de diferentes tensões elétricas senoidais com variação da fase  $\varphi$ . Essas análises consideram as respostas no tempo e os espaços de fase para diferentes casos de tensão elétrica aplicada.

De acordo com o modelo de Bouc-Wen modificado, a força total de amortecimento é dada pela, já mostrada, Equação 8:

$$F = c_0 \dot{y} + k_1(x - x_0) \quad (8)$$

Além disso, serão consideradas as Equações 11, 12, 13 e 14, que determinam as relações dos parâmetros deste modelo com a tensão elétrica. Elas foram obtidas a partir de Spencer Jr. *et al.* (1997).

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_b u \quad (11)$$

$$c_1 = c_{1a} + c_{1b} u \quad (12)$$

$$c_0 = c_{0a} + c_{0b}u \quad (13)$$

$$\dot{u} = \eta (u - v) \quad (14)$$

Os parâmetros para o modelo de Bouc-Wen modificado também apresentam grande complexidade e são de difícil obtenção. Dessa forma, assim como feito para o estudo do modelo de Bouc-Wen simples, também serão utilizados os parâmetros previamente obtidos de maneira experimental por Spencer Jr. *et al.* (1997), apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3:** Tabela de parâmetros do modelo de Bouc-Wen modificado (Spencer Jr.*et al.*, 1997).

Parâmetros	
$\alpha_a$ (N/cm)	140
$\alpha_b$ (N/cm . V)	695
$c_{0a}$ (N. s/cm)	21
$c_{0b}$ (N. s/cm . V)	3,50
$c_{1a}$ (N. s/cm)	283
$c_{1b}$ (N. s/cm . V)	2,95
$k_0$ (N/cm)	46,9
$k_1$ (N/cm)	5,00
$\gamma$ (cm <sup>-2</sup> )	363
$\beta$ (cm <sup>-2</sup> )	363
$\eta$ (s <sup>-1</sup> )	190
$n$	2
$A$	301
$x_0$ (cm)	14,3
$f$ (Hz)	2,5
$x_1$ (cm)	1,5

Para a devida análise numérica, as equações diferenciais e a função de amplitude do deslocamento do amortecedor foram solucionadas, para 8 períodos em cada caso estudado e com passo de integração de 0,4 s, pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem no programa Force 2.0 em linguagem Fortran. Esse programa se trata de um compilador, que é o responsável por gerar um programa executável a partir dos comandos que foram colocados no arquivo fonte do programa. A ideia consiste em gerar um arquivo texto contendo linhas de comando próprias da

linguagem Fortran, utilizando o compilador para gerar um outro arquivo que pode ser executado no computador. Pode-se dizer que o compilador é um programa de computador que faz a tradução entre o arquivo texto, com os comandos da linguagem Fortran, e o arquivo executável.

Os comandos foram gerados baseados em programas utilizados em trabalhos anteriores e utilizaram as equações diferenciais de cada modelo matemático associadas a outras equações que descrevem o método de Runge Kutta de 4ª ordem, para solucionar essas equações diferenciais. Foi escolhido o Runge Kutta de 4ª ordem, pois, além de ele ser numericamente mais fácil de ser tratado, ele fornece aproximações dos resultados reais suficientemente precisas para o desenvolvimento do trabalho.

## Capítulo 5

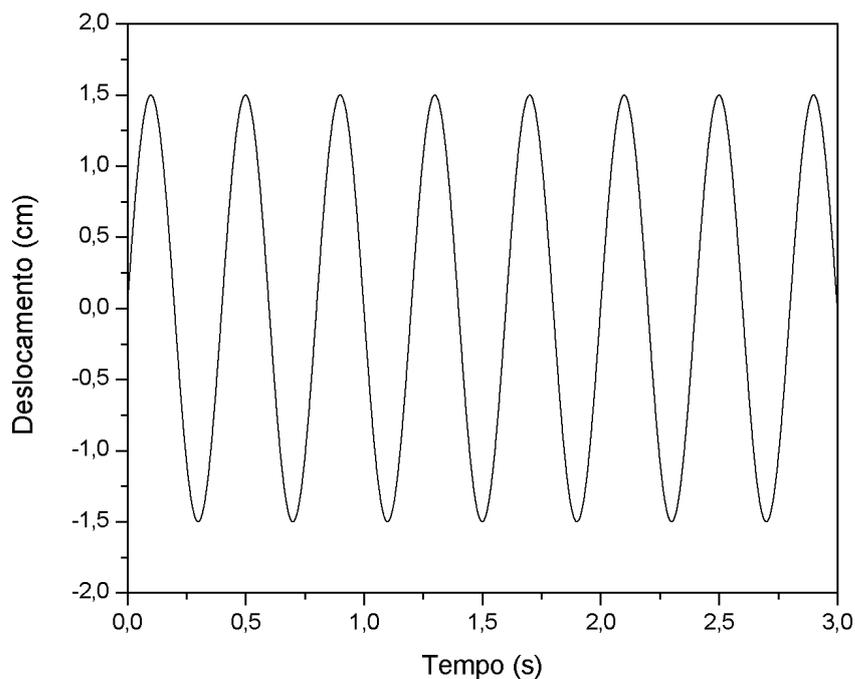
### 5. Resultados

Neste capítulo, serão mostrados os resultados obtidos com o modelo numérico, através de uma programação desenvolvida em linguagem Fortran e executada com o auxílio do software Force 2.0. Além disso, serão realizadas as devidas análises do estudo com e sem a implementação do modelo de Bouc-Wen, do estudo da influência de cada parâmetro do modelo, do estudo da influência da variação da tensão elétrica aplicada, utilizando o modelo de Bouc-Wen modificado.

#### 5.1. Estudo utilizando o modelo de Bouc-Wen simples

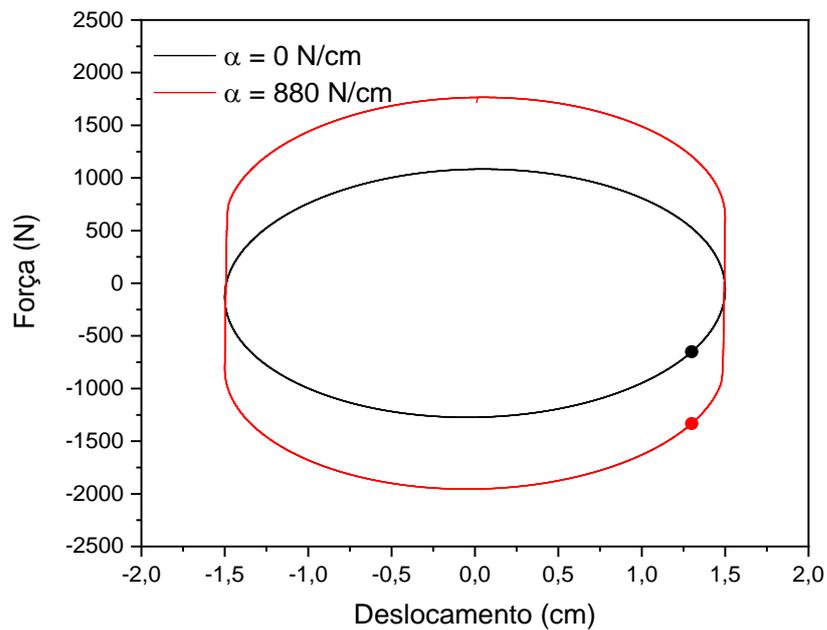
##### 5.1.1. Análise inicial com e sem o modelo de Bouc-Wen

A primeira análise realizada compara os efeitos gerados no amortecedor magneto-reológico com e sem o uso do modelo de Bouc-Wen. Para isto, foram utilizados os devidos parâmetros, estabelecidos por Spencer Jr. *et al.*, conforme a Tabela 2, variando apenas o parâmetro  $\alpha$ , que assumiu o valor de  $\alpha = 0 \text{ N/cm}$  e de  $\alpha = 880 \text{ N/cm}$ . Esses valores representam, respectivamente, o estudo sem a implementação de Bouc-Wen e o estudo com a implementação desse modelo. O comportamento deslocamento x tempo utilizado nessa análise pode ser observado na Figura 19.



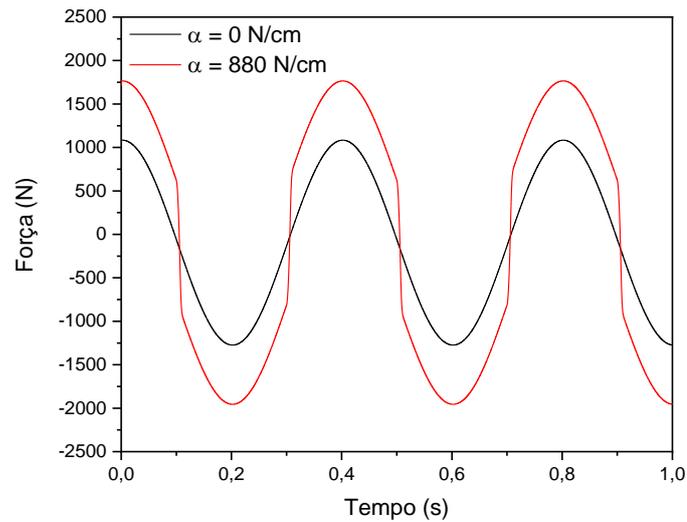
**Figura 19:** Comportamento deslocamento x tempo utilizado na análise.

Na Figura 20, pode ser observado o comportamento do amortecedor (sem o transiente), previsto numericamente, para os dois valores de  $\alpha$  utilizados. É possível notar que para o amortecedor com o modelo de Bouc-Wen implementado são estabelecidos maiores valores de força de amortecimento para cada deslocamento, quando em comparação com o amortecedor sem o uso do modelo. A força estabelecida tem valores significativamente maiores, o que mostra a real influência da utilização do modelo de Bouc-Wen nos amortecedores magneto-reológicos. É possível ver somente uma seção de Poincaré indicando que o sistema é harmônico de período 1.



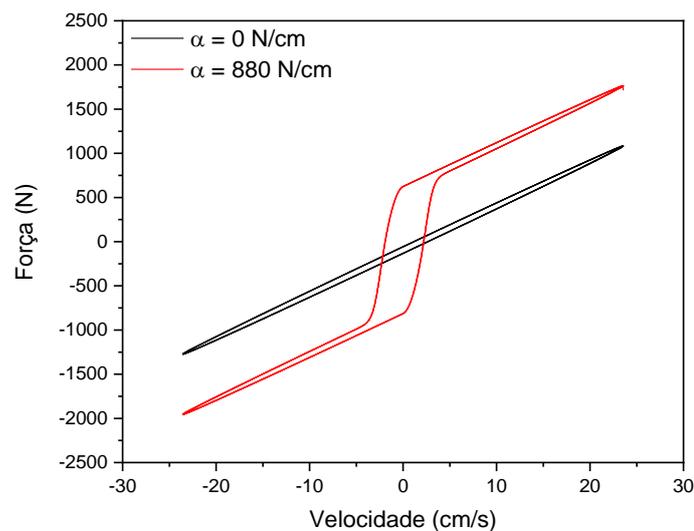
**Figura 20:** Comparativo do comportamento força x deslocamento do amortecedor com e sem implementação de Bouc-Wen, em que a linha representa o espaço de fase e o ponto representa a seção de Poincaré.

Já o estudo do comportamento força x tempo é mostrado na Figura 21. Neste caso, se observa a variação da força de amortecimento maior que no caso sem a presença do fluido MR, além disso observa-se que a forma da resposta se modifica, indicando a presença de um comportamento histerético que será evidenciado na Figura 22. Ao considerarmos que o forçamento exercido sobre amortecedores se dá de forma bastante intensa e brusca, entende-se, com esse estudo, como o uso do modelo pode auxiliar na construção do amortecedor.



**Figura 21:** Comparativo do comportamento força x tempo do amortecedor com e sem implementação de Bouc-Wen.

Outro estudo realizado foi o comportamento força x velocidade do amortecedor, apresentado na Figura 22. Novamente, podem ser observadas diferenças significantes para os testes com e sem o modelo de Bouc-Wen. Vê-se a taxa de energia dissipada para os casos de um amortecedor convencional e um com fluido magneto reológico. Observa-se a presença de histerese bastante pronunciada no dissipador com o fluido magneto reológico. O amortecimento histerético é um comportamento associado ao um fenômeno não linear, onde a força de amortecimento está em fase com a velocidade relativa do sistema e é proporcional ao deslocamento relativo.

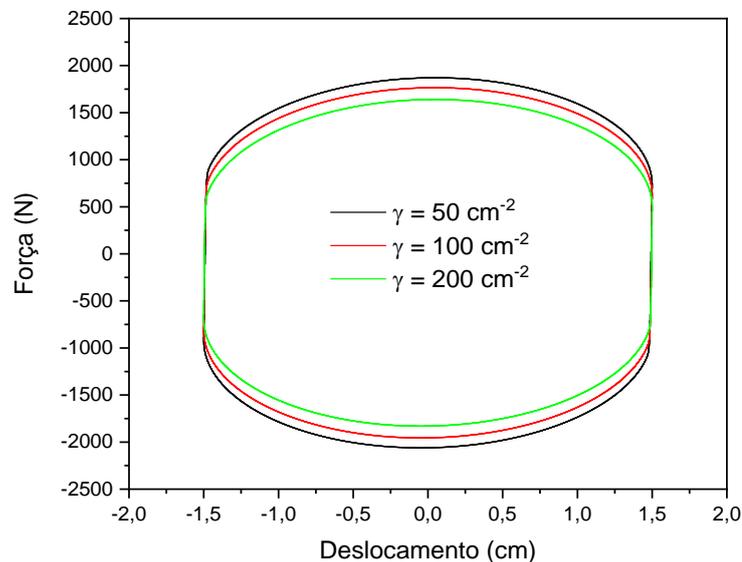


**Figura 22:** Comparativo do comportamento força x velocidade do amortecedor com e sem implementação de Bouc-Wen.

### 5.1.2. Análise da influência de cada parâmetro no modelo

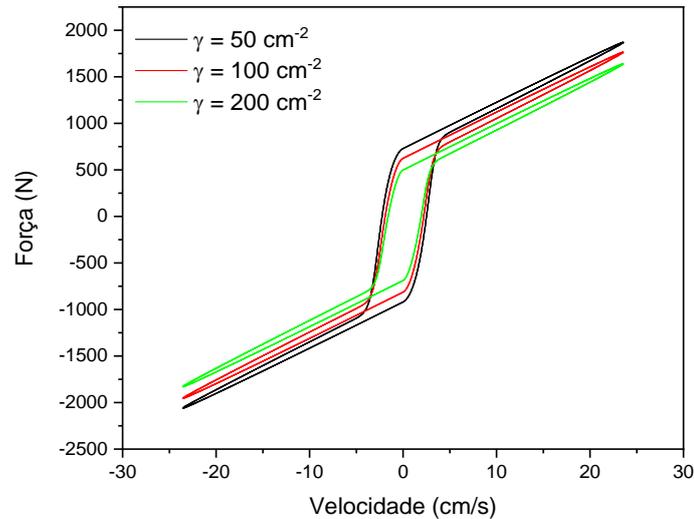
Foram analisadas as influências de cada um dos parâmetros do modelo de Bouc-Wen nos comportamentos força x deslocamento e força x velocidade. Para isso, foram considerados todos os parâmetros conforme a Tabela 2, com exceção daquele a ser analisado, que sofreu variações.

O primeiro parâmetro analisado foi o  $\gamma$ . Ele foi testado para três diferentes valores, sendo eles:  $\gamma = 50 \text{ cm}^{-2}$ ,  $\gamma = 100 \text{ cm}^{-2}$  e  $\gamma = 200 \text{ cm}^{-2}$ . De acordo com o observado na Figura 23, os valores de  $\gamma$  e da força de amortecimento se relacionam de maneira inversamente proporcional, aumentando os valores de força com a redução dos valores de  $\gamma$ .



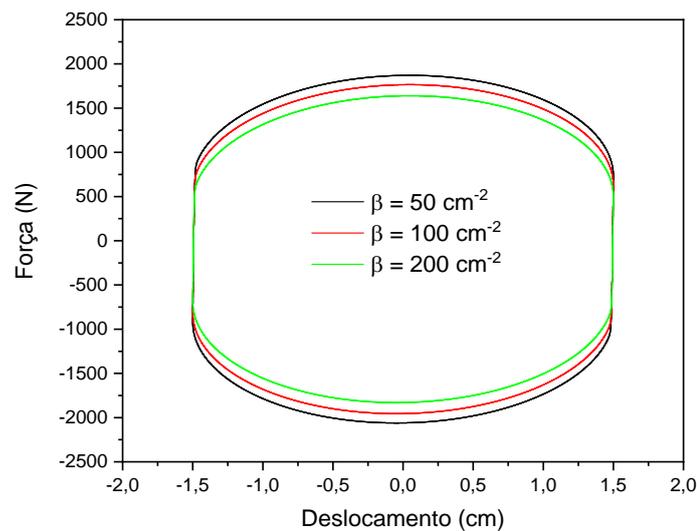
**Figura 23:** Comparativo do comportamento força x deslocamento para diferentes valores de  $\gamma$ .

Na Figura 24, é apresentado o comportamento força x velocidade para cada um dos três valores de  $\gamma$  testados. Assim como na análise do comportamento força x deslocamento, é possível notar que a forma como as curvas se comportam, para os três valores de  $\gamma$ , é semelhante. No entanto, existe uma relação de aumento das amplitudes das forças de amortecimento com a redução de  $\gamma$ .



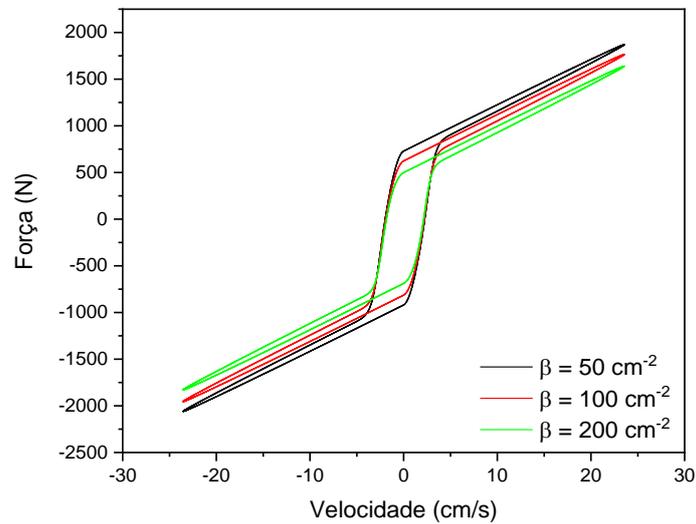
**Figura 24:** Comparativo do comportamento força x velocidade para diferentes valores de  $\gamma$ .

O segundo parâmetro analisado foi o  $\beta$ . Ele também foi testado para três diferentes valores, sendo eles:  $\beta = 50 \text{ cm}^{-2}$ ,  $\beta = 100 \text{ cm}^{-2}$  e  $\beta = 200 \text{ cm}^{-2}$ . Nas Figuras 25 e 26, observa-se que a influência de  $\beta$  é bastante similar à influência de  $\gamma$  no comportamento do amortecedor MR. O comportamento força x deslocamento, assim como o comportamento força x velocidade, ocorre de forma semelhante entre as variações de  $\beta$  e  $\gamma$ , mas com amplitudes ainda maiores de forças de amortecimento para menores valores de  $\beta$ .



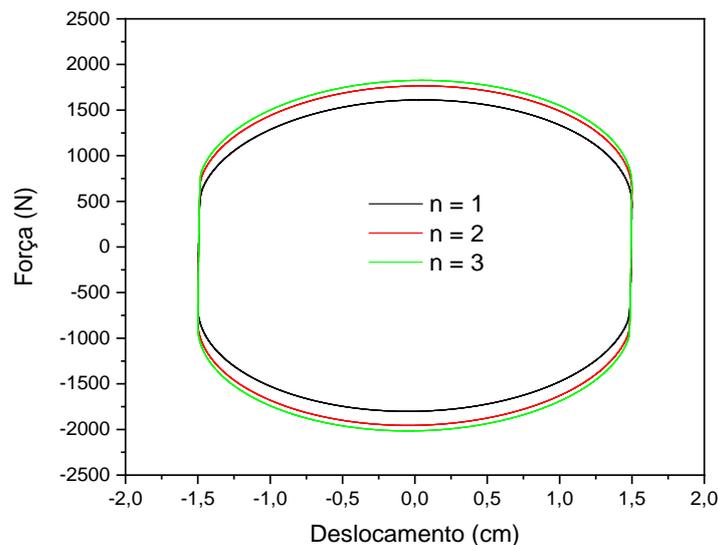
**Figura 25:** Comparativo do comportamento força x deslocamento para diferentes valores de  $\beta$ .

A maior diferença entre as análises de  $\gamma$  e  $\beta$  é no gráfico força x velocidade, mostrado na Figura 26, em que a influência de  $\beta$  demonstra que o comportamento de cada curva, nas velocidades próximas a zero, assume forma ainda mais parecida.



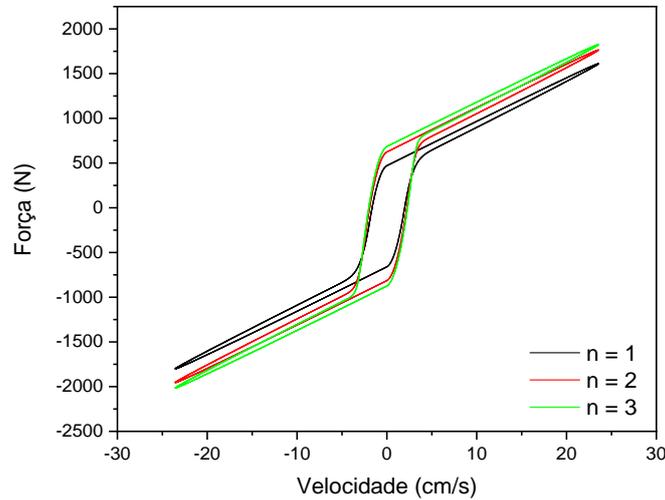
**Figura 26:** Comparativo do comportamento força x velocidade para diferentes valores de  $\beta$ .

A influência do parâmetro  $n$  foi analisada para os valores de  $n = 1$ ,  $n = 2$  e  $n = 3$ . Diferente dos casos anteriores, a relação das forças de amortecimento com  $n$  se dá de maneira diretamente proporcional, havendo um aumento das forças com o aumento do valor de  $n$ . Esse comportamento pode ser observado nas Figuras 27 e 28, tanto nos gráficos força x deslocamento, quanto nos gráficos força x velocidade.



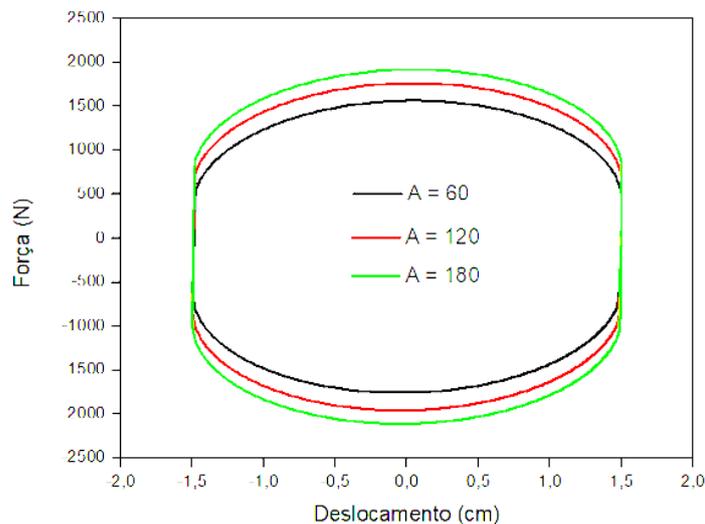
**Figura 27:** Comparativo do comportamento força x deslocamento para diferentes valores de  $n$ .

No entanto, também nos dois casos, nas Figuras 26 e 27, conforme o valor de  $n$  aumenta, menor é o aumento da força, tornando as amplitudes das forças cada vez mais próximas. Isso é indicativo de uma estabilização do comportamento para valores de  $n \geq 2$ .



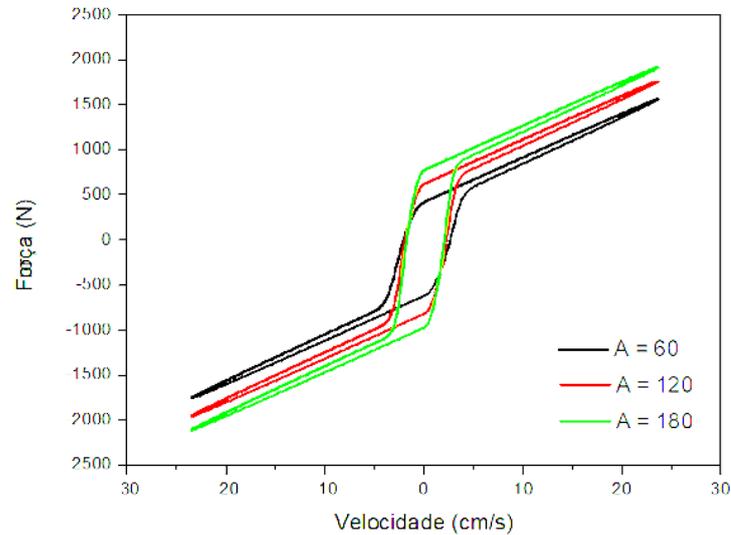
**Figura 28:** Comparativo do comportamento força x velocidade para diferentes valores de  $n$ .

O parâmetro  $A$  também teve sua influência analisada com valores de  $A = 60$ ,  $A = 120$  e  $A = 180$ . Assim como ocorre com o parâmetro  $n$ , e pode ser observado na Figura 29, a relação das amplitudes das forças com os valores de  $A$  é diretamente proporcional. Nota-se uma redução na diferença das amplitudes entre os valores de  $A = 120$  e  $A = 180$ , quando comparada com a diferença entre  $A = 60$  e  $A = 120$ . Isso demonstra uma tendência à estabilização do comportamento para maiores valores de  $A$ . Esse mesmo comportamento pode ser visto na Figura 30, para o gráfico força x velocidade, indicando a mesma tendência à estabilização.



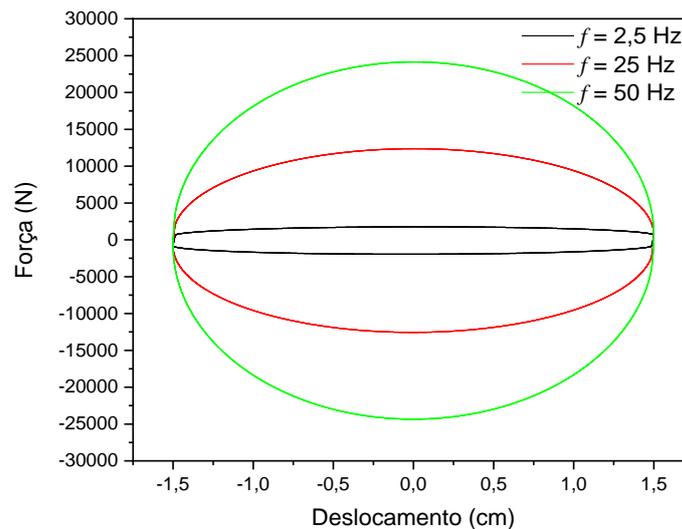
**Figura 29:** Comparativo do comportamento força x deslocamento para diferentes valores de  $A$ .

Esse mesmo comportamento pode ser visto na Figura 30, para o gráfico força x velocidade, indicando a mesma tendência à estabilização.



**Figura 30:** Comparativo do comportamento força x velocidade para diferentes valores de A.

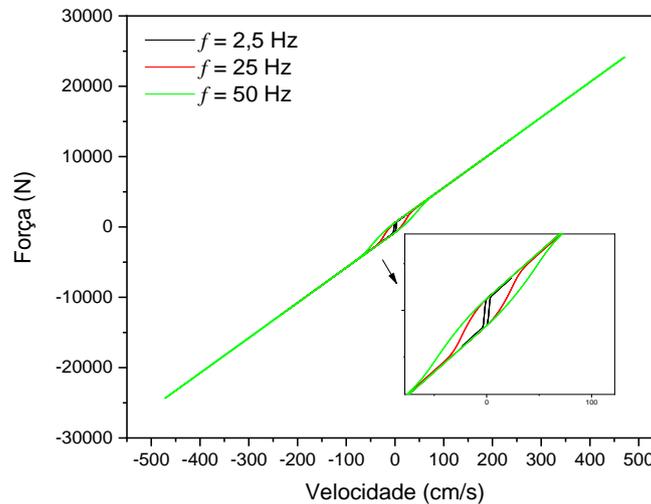
O parâmetro  $f$ , que trata da frequência de excitação do sistema, também foi testado, para os valores de  $f = 2,5$  Hz,  $f = 25$  Hz e  $f = 50$  Hz. É notável as significantes diferenças encontradas, ao serem variadas as frequências, no comportamento força x deslocamento, exibido na Figura 31. O aumento das frequências gera um aumento expressivo nas amplitudes da força de amortecimento.



**Figura 31:** Comparativo do comportamento força x deslocamento para diferentes valores de  $f$ .

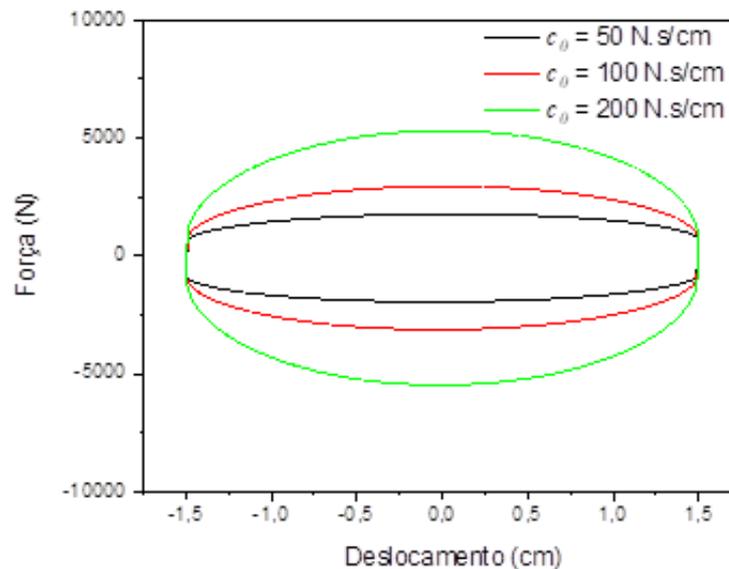
Já o comportamento força x velocidade se dá de maneira bastante linear para todas as frequências testadas, o que é visto na Figura 32. No entanto, a maior diferença entre os casos

testados se encontra nas velocidades mais próximas de zero. Nota-se, nessa região, que o comportamento das curvas se altera para cada frequência, se mostrando mais linearizado para valores de frequência mais elevados. Nos valores de  $f$  mais reduzidos, visualiza-se saltos mais bruscos na amplitude da força.



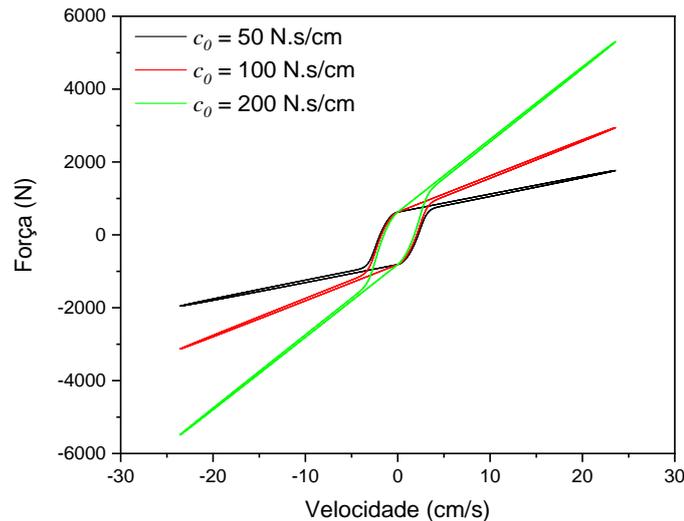
**Figura 32:** Comparativo do comportamento força x velocidade para diferentes valores de  $f$ .

Outro parâmetro analisado foi  $c_0$ , o coeficiente de amortecimento, considerando os valores  $c_0 = 50 \text{ N.s/cm}$ ,  $c_0 = 100 \text{ N.s/cm}$  e  $c_0 = 200 \text{ N.s/cm}$ . Assim como acontece na variação de  $f$ , o aumento de  $c_0$  também gera um aumento nas amplitudes da força, no gráfico força x deslocamento, exibido na Figura 33. No entanto, as amplitudes alcançadas têm valores menores quando comparadas com as geradas pela variação de  $f$ .



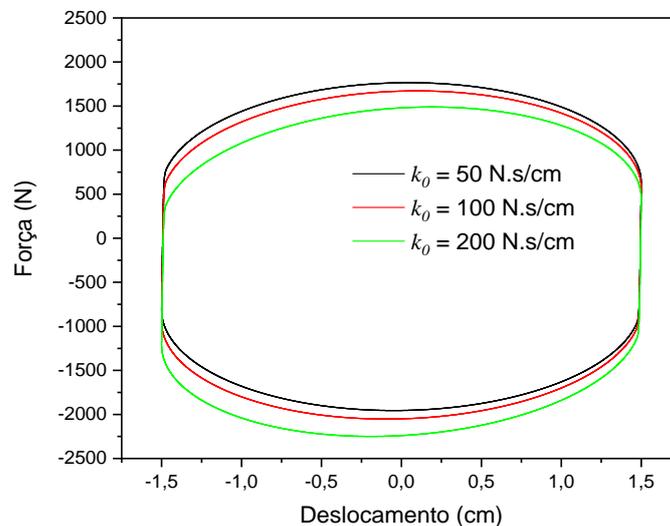
**Figura 33:** Comparativo do comportamento força x deslocamento para diferentes valores de  $c_0$ .

Quando se trata do comportamento força x velocidade, observa-se que as curvas geradas para os diferentes valores de  $c_0$  se comportam de maneira bastante semelhante em velocidades próximas de zero, inclusive em relação aos valores das amplitudes da força de amortecimento, o que pode ser visualizado na Figura 34. Contudo, para valores mais elevados de velocidade, as curvas se comportam de maneira muito distinta e apresentam valores das amplitudes da força que crescem substancialmente com o aumento de  $c_0$ .



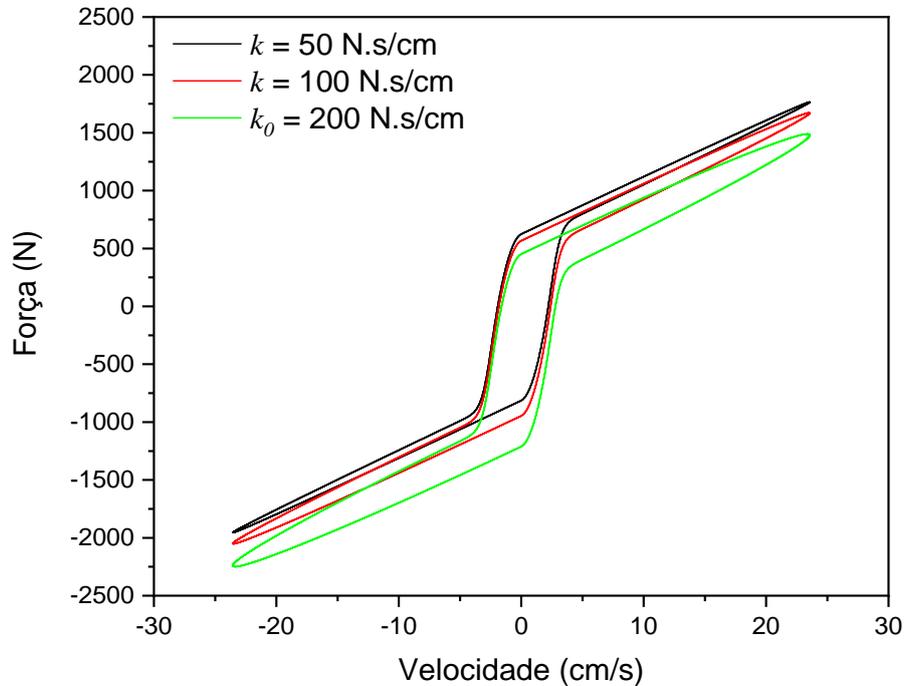
**Figura 34:** Comparativo do comportamento força x velocidade para diferentes valores de  $c_0$ .

O último parâmetro a ser analisado foi  $k_0$ , para  $k_0 = 50 \text{ N.s/cm}$ ,  $k_0 = 100 \text{ N.s/cm}$  e  $k_0 = 200 \text{ N.s/cm}$ . De acordo com a Figura 35, nota-se que as amplitudes das forças, para os diferentes valores de  $k_0$ , não variam. No entanto, há uma mudança no posicionamento das curvas, em que menores valores de  $k_0$  fazem com que as curvas se desloquem ligeiramente para cima. E esse deslocamento é cada vez menor conforme o valor de  $k_0$  é reduzido, demonstrando uma estabilização no comportamento para valores de  $k_0 \leq 100 \text{ N.s/cm}$ .



**Figura 35:** Comparativo do comportamento força x deslocamento para diferentes valores de  $k_0$ .

Ao se observar a Figura 36, nota-se que a redução do valor de  $k_0$  gera um leve estreitamento das curvas. Além disso, esse estreitamento é cada vez menor, conforme se diminui o valor de  $k_0$ , demonstrando, dessa forma, uma estabilização do comportamento para valores de  $k_0 \leq 100$  N.s/cm.

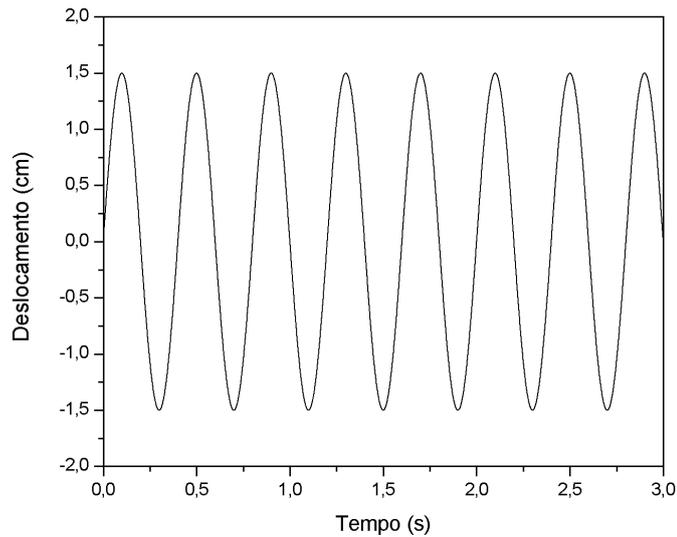


**Figura 36:** Comparativo do comportamento força x velocidade para diferentes valores de  $k_0$ .

## 5.2. Estudo utilizando o modelo de Bouc-Wen modificado

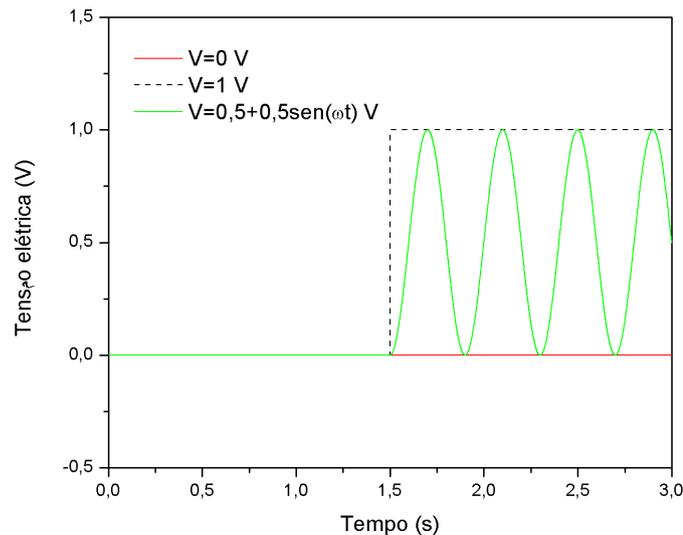
### 5.2.1. Comparativo entre a aplicação de tensões elétricas numéricas e senoidais

Com o uso do modelo de Bouc-Wen modificado, foram utilizados os parâmetros conforme a Tabela 3. Inicialmente, o amortecedor teve seu comportamento comparado para três valores diferentes de tensão elétrica,  $V$ :  $V = 0$  V,  $V = 1$  V e  $V = 0,5 + 0,5 \sin(\omega t)$  V. Esta última tensão possui uma fase  $\varphi = 0$ . O deslocamento foi aplicado conforme pode ser visualizado na Figura 37.



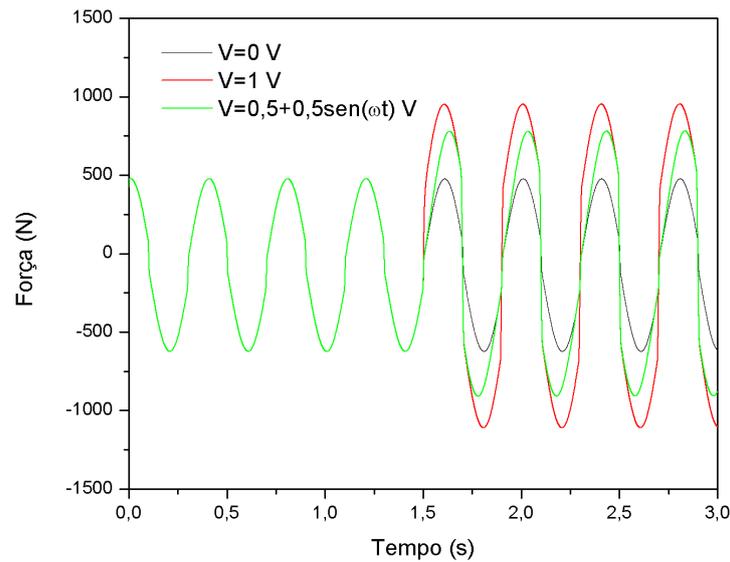
**Figura 37:** Comportamento do deslocamento aplicado x tempo.

Já as tensões elétricas, que foram aplicadas de acordo com o tempo, podem ser observadas na Figura 38.



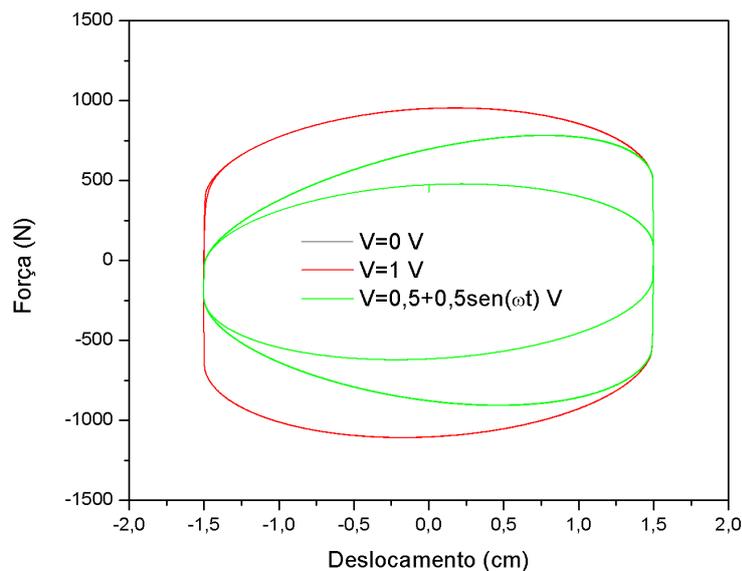
**Figura 38:** Comportamento tensão elétrica aplicada x tempo.

De acordo com a Figura 39, é possível notar a diferença no comportamento da força de amortecimento para as diferentes tensões elétricas aplicadas. Sem a aplicação de tensão elétrica ( $V = 0 \text{ V}$ ), as forças obtidas têm valores significativamente menores que nos demais casos. O maior valor de força obtido, nessa condição, foi de aproximadamente  $478,19 \text{ N}$ . Já, quando é aplicada uma tensão de  $1 \text{ V}$ , a força máxima obtida, nessa condição, passa a ser de aproximadamente  $953,90 \text{ N}$ . Para a tensão elétrica senoidal de  $(0,5 + 0,5 \text{ sen}(\omega t)) \text{ V}$ , a maior força obtida foi de  $782,77 \text{ N}$ . Logo, percebe-se que a tensão elétrica aplicada no sistema tem grande influência nas forças de amortecimento obtidas.



**Figura 39:** Comportamento força x tempo para diferentes tensões elétricas.

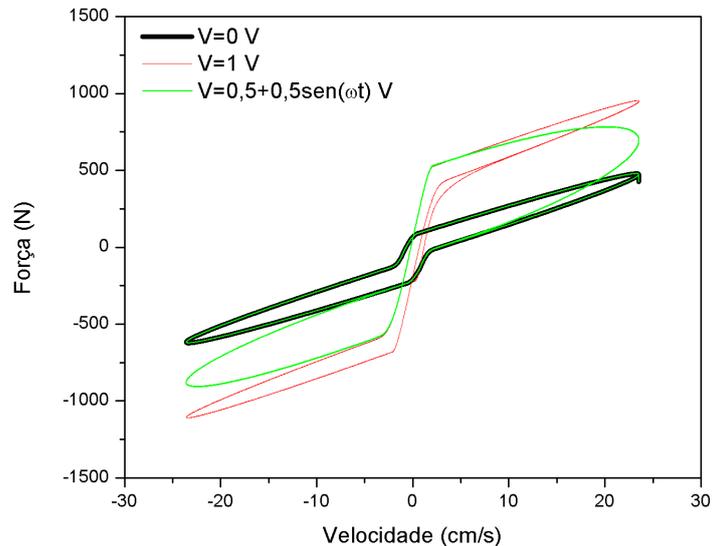
Quando se observa o gráfico força x deslocamento, na Figura 40, são percebidos comportamentos cíclicos para cada uma das tensões elétricas. Para tensões diferentes de zero, as curvas repetem o comportamento para  $V = 0\text{ V}$ , mas exibem outras regiões além dessa. Em  $V = 1\text{ V}$ , a curva exibe uma variação menor de forças para esta região adicional, que não ocorre em  $V = 0$ . Já para a tensão elétrica senoidal de  $V = 0,5 + 0,5 \text{sen}(\omega t)\text{ V}$ , essa região apresenta uma variação significativa de forças, que aumenta sua amplitude de acordo com o aumento do deslocamento. Isso demonstra que as tensões não senoidais apresentam maiores valores de força ao longo do deslocamento, se comparadas à função senoidal  $0,5 + 0,5 \text{sen}(\omega t)\text{ V}$ , com  $\varphi = 0$ .



**Figura 40:** Comportamento força x deslocamento para diferentes tensões elétricas.

Assim como ocorre no gráfico força x deslocamento, o gráfico força x velocidade, exposto na Figura 41, mostra que as tensões elétricas variadas apresentam uma região com

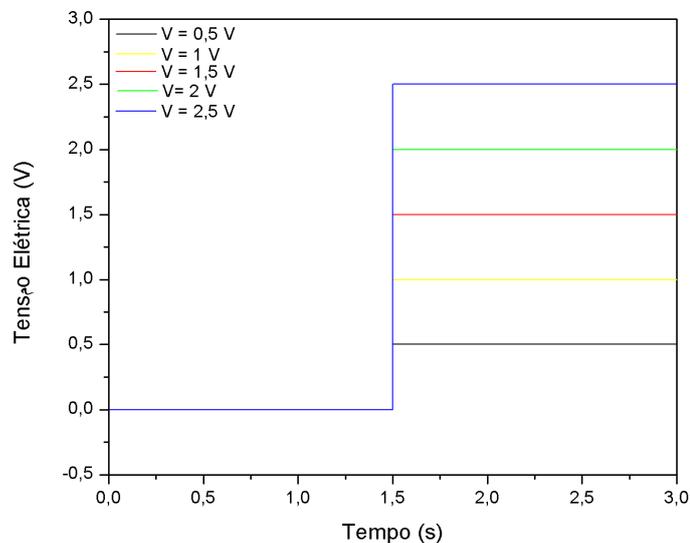
comportamento igual ao obtido com a tensão  $V = 0$ , porém, exibem outras regiões além desta. Nota-se que para cada instante de velocidade, as tensões diferentes de zero exibem comportamentos bastante distintos nessas regiões adicionais. Quando a tensão elétrica é 1 V, cada valor de velocidade possui uma pequena variação de força. Já quando a tensão elétrica é senoidal, essa variação de força para cada velocidade é muito superior.



**Figura 41:** Comportamento força x velocidade para diferentes tensões elétricas.

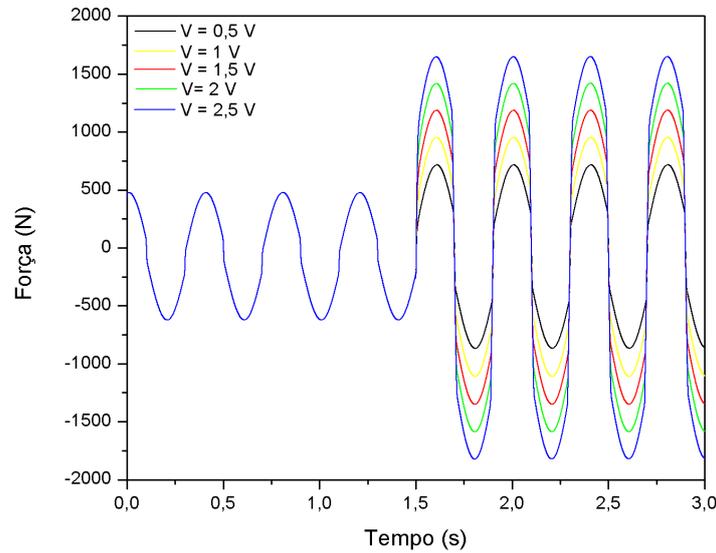
### 5.2.2. Comparativo entre diferentes tensões elétricas numéricas

Com o uso do modelo de Bouc-Wen modificado, foram comparados diferentes valores numéricos de tensões elétricas aplicadas no sistema. Como mostra a Figura 42, foram testados diferentes valores para  $V = 0,5$  V,  $V = 1$  V,  $V = 1,5$  V,  $V = 2$  V e  $V = 2,5$  V, aplicados após 1,5 segundos, e foi considerado o comportamento deslocamento x tempo igual ao experimento anterior, mostrado na Figura 37.



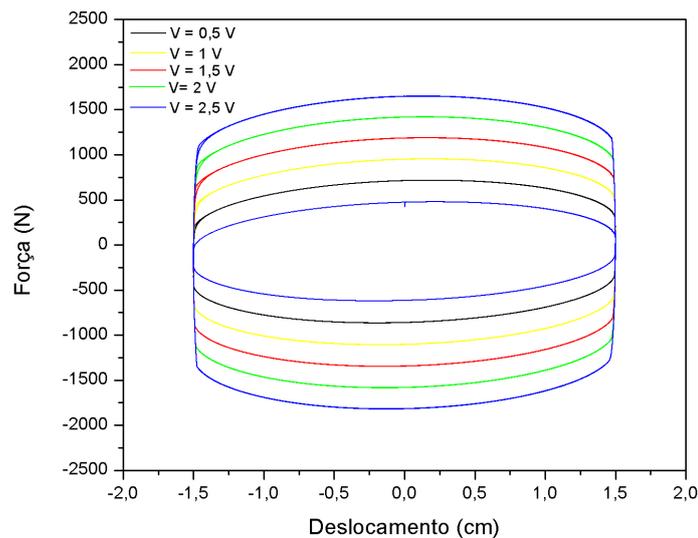
**Figura 42:** Comportamento tensão elétrica x tempo, para tensões numéricas.

A Figura 43, mostra o comportamento força x tempo para as diferentes tensões elétricas testadas. É notável o aumento da força de amortecimento quando se aumenta a tensão aplicada ao sistema. Isso determina como a escolha da tensão elétrica adequada pode ajudar no funcionamento do amortecedor, em relação à força de amortecimento que se deseja obter com o mesmo.



**Figura 43:** Comportamento força x tempo para diferentes tensões elétricas numéricas.

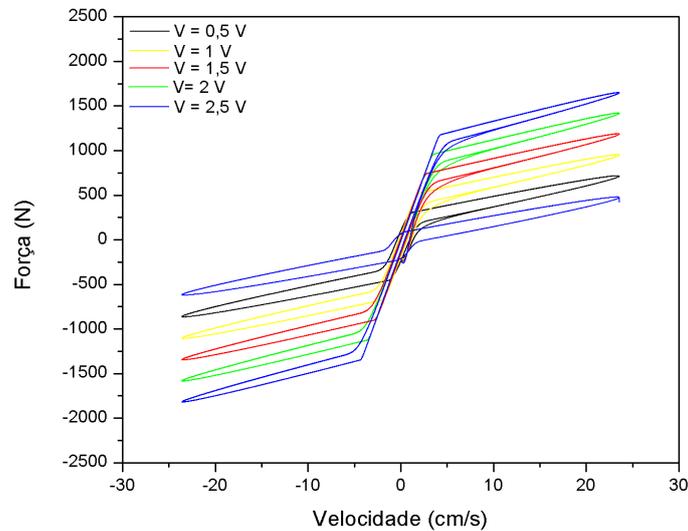
Na Figura 44, são observados comportamentos semelhantes para cada uma das tensões elétricas aplicadas, variando apenas a amplitude da força de amortecimento obtida, que, como visto anteriormente, aumenta juntamente ao aumento da tensão elétrica.



**Figura 44:** Comportamento força x deslocamento para diferentes tensões elétricas numéricas.

O comportamento força x velocidade para as diferentes tensões elétricas pode ser observado na Figura 45. Nota-se que o comportamento novamente é semelhante para todos os valores testados, variando-se apenas as forças de amortecimento obtidas. Até mesmo o

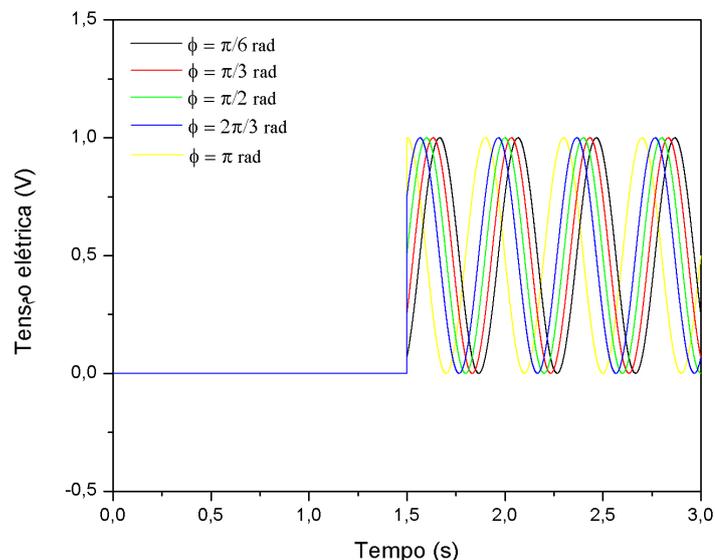
estreitamento de cada uma das curvas é o mesmo, o que mostra que a variação da tensão elétrica tem influência diretamente apenas nas amplitudes das forças de amortecimento.



**Figura 45:** Comportamento força x velocidade para diferentes tensões elétricas numéricas.

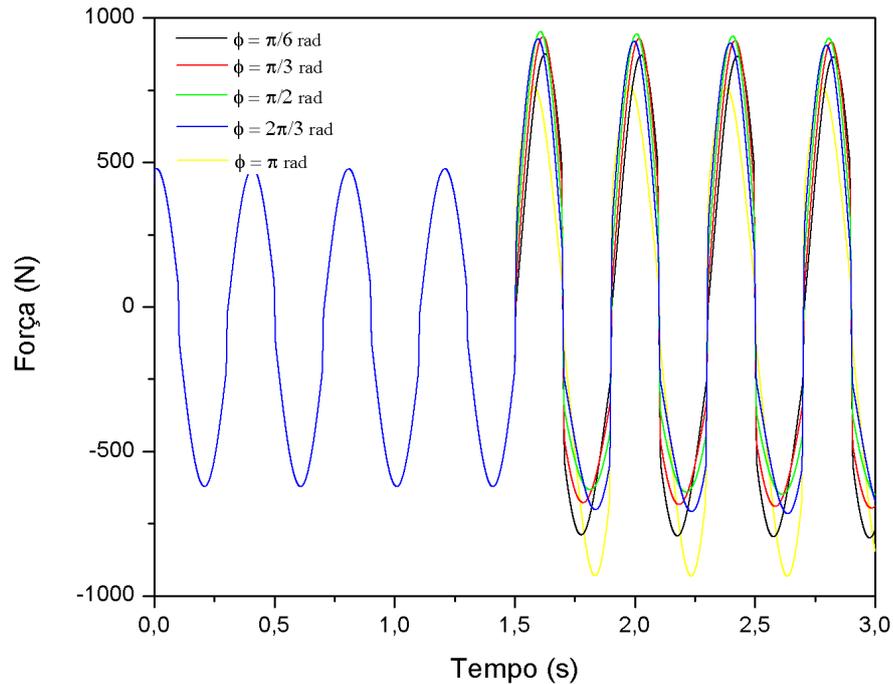
### 5.2.3. Comparativo entre diferentes tensões elétricas senoidais variando $\varphi$

Ao se comparar os comportamentos para diferentes tensões elétricas, entre valores numéricos e senoidais, notou-se que os senoidais se apresentam de maneira bastante distinta em alguns aspectos. Dessa maneira, decidiu-se analisar o comportamento para diferentes tensões elétricas senoidais, variando-se apenas a fase  $\varphi$ , que é dada em relação ao deslocamento utilizado. Para isso, utilizou-se a tensão elétrica  $V = 0,5 + 0,5 \sin(\omega t + \varphi)$  V, para valores de  $\varphi = \pi/6$  rad,  $\varphi = \pi/3$  rad,  $\varphi = \pi/2$  rad,  $\varphi = 2\pi/3$  rad e  $\varphi = \pi$  rad. As tensões elétricas foram aplicadas após 1,5 segundos e como no caso anterior, o gráfico deslocamento x tempo utilizado é mostrado na Figura 37. O comportamento tensão elétrica x tempo pode ser visto na Figura 46.



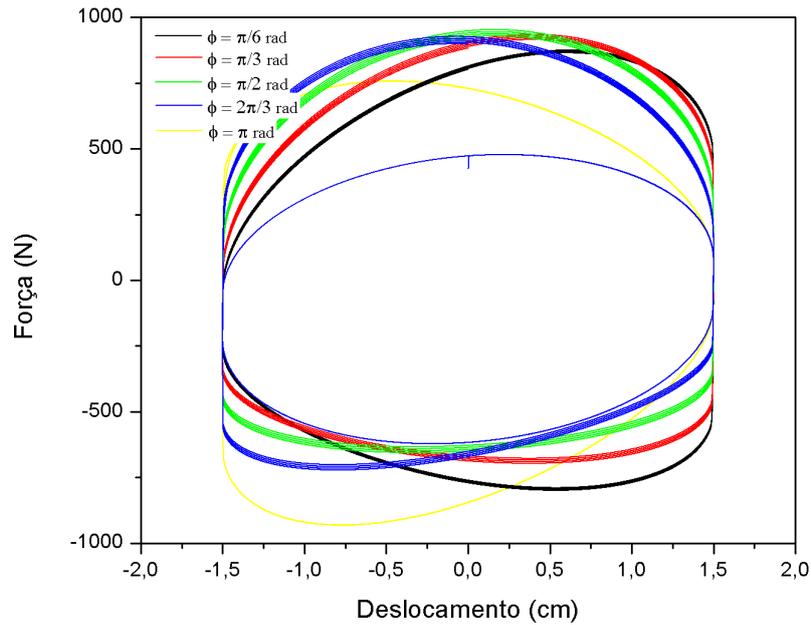
**Figura 46:** Comportamento tensão elétrica x tempo para diferentes valores de  $\varphi$ .

Na Figura 47, pode ser visto o comportamento força x tempo para cada tensão elétrica aplicada, notando-se que as diferenças das forças obtidas com a variação da fase  $\varphi$  não se mostram tão significativas quanto as obtidas na variação das tensões elétricas numéricas. A maior força de amortecimento ocorre para  $\varphi = \pi/2$ , alcançando o valor de 953,06 N. Já o menor valor de força obtido ocorre para  $\varphi = \pi$ , sendo 758,19 N. Isso demonstra que as variações em  $\varphi$  tem impacto muito menor que as variações numéricas de tensão, nas forças obtidas.



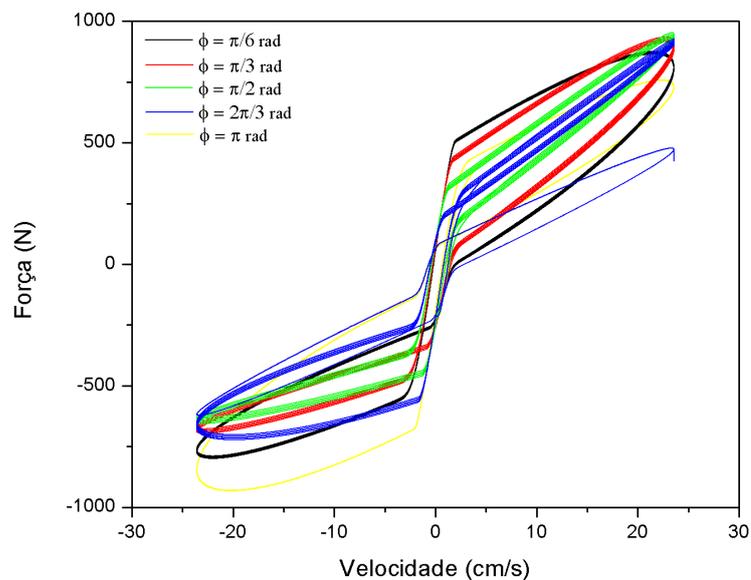
**Figura 47:** Comportamento força x tempo para diferentes valores de  $\varphi$ .

O comportamento força x deslocamento pode ser observado na Figura 48, que mostra diferenças significativas para cada uma das curvas. Quando  $\varphi = \pi/2$ , o comportamento é mais semelhante ao das curvas com valores de tensão elétrica numérica. Para os valores de  $\varphi = \pi/6$  e  $\varphi = \pi/3$ , as amplitudes da força aumentam com o aumento do deslocamento. Já para os valores de  $\varphi = 2\pi/3$  e  $\varphi = \pi$ , esse comportamento é exatamente oposto, com as amplitudes da força diminuindo com o aumento do deslocamento.



**Figura 48:** Comportamento força x deslocamento para diferentes valores de  $\varphi$ .

Na figura 49, observa-se o comportamento força x velocidade do, que também mostra diferenças significativas para cada tensão aplicada. Quando  $\varphi = \pi/2$ , a curva apresenta um comportamento mais semelhante ao obtido com a variação de valores numéricos da tensão elétrica. Além disso, ela se mostra a mais estável, pois possui um estreitamento similar nas duas porções, de velocidade positiva e negativa. Com isso, nota-se que esse valor de  $\varphi$  apresenta, a maior força de amortecimento e a condição mais estável para o funcionamento do amortecedor.



**Figura 49:** Comportamento força x velocidade para diferentes valores de  $\varphi$ .

## Capítulo 6

### 6. Conclusões

#### 6.1. Comentários finais

Os fluidos magneto-reológicos ainda possuem muito conteúdo a ser explorado, principalmente quando relacionados à área de amortecimento e controle de vibrações. Assim sendo, se mostra uma área de conhecimento bastante rica e atrativa para pesquisadores de diversos níveis acadêmicos. O uso desses fluidos para controle de vibrações mecânicas pode auxiliar a sociedade em diversos aspectos, principalmente na segurança de dispositivos vibratórios e na sua construção.

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia capaz de analisar a influência de alguns parâmetros, inerentes ao modelo, em um sistema de amortecimento magneto-reológico. Além disso, ela permite avaliar a influência de diferentes tensões elétricas aplicadas nesse tipo de sistema.

Os resultados demonstram que os amortecedores MR podem ter sua resposta de amortecimento melhorada de acordo com os valores de tensão elétrica aplicada. Dessa forma, a construção de amortecedores MR pode ser mais bem trabalhada, de acordo com o ambiente onde ele será inserido, ao ser observada a devida tensão elétrica que atenda à necessidade de cada caso estudado.

De acordo com os resultados obtidos, quanto maior a força de amortecimento necessária para um amortecedor, maior a tensão elétrica que deve ser aplicada ao sistema. Além disso, também pode ser controlada a forma como essa força de amortecimento é exercida a cada instante ao se utilizar tensões elétricas senoidais. As tensões elétricas senoidais, com variação da fase  $\varphi$ , demonstram que  $\varphi$  não tem grande influência nos valores da amplitude da força, mas ele influencia na forma como essa força se comporta ao longo do deslocamento.

Entende-se que a tensão elétrica numérica a ser escolhida para um sistema está ligada à força de amortecimento que se deseja obter, pois elas apresentam comportamentos idênticos, onde se varia apenas a amplitude dessas forças.

Já as tensões elétricas senoidais estudadas devem ser escolhidas de acordo com o comportamento da força de amortecimento que é desejado. Ao se observar o comportamento experimental obtido em estudos anteriores, entende-se que, para função senoidal utilizada, o melhor valor de  $\varphi$  a ser utilizado é  $\varphi = \pi/2$ , pois este apresenta curvas mais semelhantes às

observadas experimentalmente. Isso ocorre tanto no comportamento força x deslocamento, quanto no comportamento força x velocidade.

## **6.2. Sugestão para trabalhos futuros**

Com o auxílio deste trabalho é possível concluir que a variação da tensão elétrica influencia significativamente os parâmetros estudados. Assim sendo, para casos específicos, torna-se necessário o aprimoramento do modelo utilizado e sua adaptação para diferentes situações às quais o amortecedor possa ser submetido.

Ao serem considerados os campos científico e acadêmico, este trabalho possui grande relevância no que diz respeito à produção de conhecimento, tornando possível que ocorram novas discussões, pesquisas e desdobramentos na formação de estudantes e pesquisadores. Ainda se pode considerar que este contribui para o fortalecimento da área da engenharia responsável por este campo de conhecimento. Esses estudos permitem a elaboração de dispositivos de controle de vibrações com respostas melhoradas e mais seguros.

Para trabalhos futuros, são sugeridos ensaios experimentais para correlação numérico experimental do sistema. Outra sugestão é o estudo dos parâmetros do sistema, com o uso de seções de Poincaré, para se prever diferentes regimes caóticos/periódicos e o controle destes.

## Referências bibliográficas

- Ashtiani, M., Hashemabadi, S. H., & Ghaffari, A. (2015). A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 716-730.
- Bombard, A. J., Gonçalves, F. R., Morillas, J. R., & Vicente, J. (2014). Magnetorheology of dimorphic magnetorheological fluids based on nanofibers. *Smart Materials and Structures*.
- Braz-César, M. T., & Barros, R. (2010). Semi-active control of a metallic scaled frame with a MR damper: numerical and experimental research. *Smart Structural Systems Technologies*.
- Butz, T., & Von Stryk, O. (2002). Modelling and Simulation of Electro- and Magnetorheological. *ZAMM*, 3-20.
- Castão, K. A. (2008). *Análise dinâmica não-linear de um sistema não-ideal, utilizando um amortecedor magneto-reológico*. Tese de Mestrado, UNESP - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia Mecânica, Bauru.
- Cherif, K., Moalla, S., Sassi, S., & Zarrouk, H. (2007). Electrorheological response of modified silica suspensions. *Journal of The European Ceramic Society*, 1199-1202.
- Crivellaro, C. (2008). *Controle robusto de suspensão semi-ativa para caminhonetes utilizando amortecedores magneto-reológicos*. Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamnavento de Engenharia Mecânica, São Paulo.
- Ferrari N.V. (2019). *599 GTB Fiorano*. Acesso em Maio de 2019, disponível em Site da Ferrari: [https://auto.ferrari.com/en\\_EN/sports-cars-models/past-models/599-gtb-fiorano/](https://auto.ferrari.com/en_EN/sports-cars-models/past-models/599-gtb-fiorano/)
- Gordaninejad, F., Fuchs, A., Dogrou, U., Karakas, S., Liu, Y., Hu, B., & Evrensel, C. (2004). *A New Generation of Magneto-rheological Fluid Dampers*. Univeridade de Nevada, Departamento de Engenharia Mecânica, Reno.
- Lagoudas, D. C. (2008). *Shape memory alloys - Modeling and engineering applications*. Springer.
- Leal Jr, A. G., & Alves, L. D. (2015). *Prototipagem digital de um joelho magneto reológico para próteses*. Trabalho de conclusão do curso de engenharia mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Mecânica, Vitória.

- Lima, A. S. (2011). *Identificação experimental de um sistema magneto-reológico*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, Rio de Janeiro.
- Mendes, E. S. (1996). *Propriedades eletroreológicas de suspensões de sulfato de hidrazina-lítio em óleo de silicone*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas.
- Navarro, R. F. (2006). A evolução dos materiais - Parte 1: da pré-história ao início da Era Moderna. *Revista eletrônica de materiais e processos, I*.
- Pascoal, A. S. (2016). *Prototipagem e análise do conforto na condução de uma bicicleta equipada com um amortecedor Magneto-Reológico*. Tese de Mestrado, Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão.
- Pialet, J. W., Schober, B. J., & Piedrahita, C. A. (1996). *Estados Unidos da América Patente N° 293.536*.
- Shirazi, F. A., Mohammadpour, J., & Grigoriadis, K. M. (2010). An Integrated Approach for Parameter Identification and Semi-active Control of MR Dampers. *American Control Conference*, (pp. 720-725). Baltimore.
- Soares, C. A. (2016). *Desenvolvimento de um Dispositivo de Feedback de Força Usando Flúidos Magneto-Reológicos*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia.
- Spencer Jr., B. F., Dyke, S. J., Sain, M. K., & Carlson, J. D. (1997). Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper. *Journal of Engineering Mechanics*.
- Stanway, R., Sproston, J. L., & Stevens, N. G. (1985). Non-linear Identification of an Electro-rheological Vibration Damper. *IFAC - Identification and System Parameter Estimation*, 195-200.
- Teuber, N., & Novak, M. B. (2013). Estruturas Inteligentes. Em *Projeto Eco - Ensino Fundamental I - 5º ano*. Editora Positivo.
- Tusset, Â. M. (2008). *Controle ótimo aplicado em modelo de suspensão veicular não-linear controlada através de amortecedor magneto-reológico*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande de Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre.
- Unsal, M. (2002). *Force control o a new semi-active piezoelectric-based friction damper*. Tese de doutorado, University of Florida.
- Vicente, J., Klingenberg, D. J., & Hidalgo-Alvarez, R. (2011). Magnetorheological fluids: a review. *Soft Matter - Royal Society of Chemistry*, 3701-3710.

- Yang, G. (2001). *Large-scale magnetorheological fluid damper for vibration mitigation: modeling, testing and control*. Tese de Doutorado, University of Notre Dame, Department of Civil Engineering and Geological Sciences, Indiana.
- Yang, G., Spencer, B. F., Carlson, J. D., & Sain, M. K. (2002). Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering Structures*, 309-323.
- Yu, L. C. (2000). *Vibration Control of a Suspension System via a Magnetorheological Fluid Damper*. Tese de Mestrado, The Chinese University of Hong Kong.
- Yuan, X., Tian, T., Ling, H., Qiu, T., & He, H. (2019). A Review on Structural Development of Magnetorheological Fluid Damper. *Shock and Vibration*.
- Zayed, A. A., Khourshid, A. M., Assal, S. F., & Saber, E. (2014). Experimental Investigation of the Effect of Magneto-Rheological MR Damper on a Rotating Unbalance SDOF System. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 1087-1092.
- Zhang, H., Zhang, N., Min, F., Yan, W., & Wang, E. (2016). Bifurcations and chaos of a vibration isolation system with magneto-rheological damper. *API Advances*, 6, 035310.