

Universidade Federal de São Carlos – UFSCar
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia – CCET
Departamento de Engenharia Mecânica – DEMec

Pedro Paulo Kuramoto

**ESTUDO DINÂMICO DE FLUIDOS MAGNETO-
REOLÓGICOS DE BAIXO CUSTO**



São Carlos

2019

Universidade Federal de São Carlos – UFSCar
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia – CCET
Departamento de Engenharia Mecânica – DEMec

Pedro Paulo Kuramoto

**ESTUDO DINÂMICO DE FLUIDOS MAGNETO-REOLÓGICOS
DE BAIXO CUSTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial para a obtenção do
título de bacharel em Engenharia Mecânica
pela Universidade Federal de São Carlos.

Orientador: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki

São Carlos – SP

2019

**FOLHA DE APROVAÇÃO DE TRABALHO DE
CONCLUSÃO DE CURSO**

Resultado da avaliação da defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso do discente **Pedro Paulo Kuramoto**, intitulado "**Estudo dinâmico de fluidos magneto-reológicos de baixo custo**", defendido junto ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São Carlos na presente data.

Resultado:

Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki (orientador)
DEMec / UFSCar

Aprovado

Prof. Dr. Luis Antonio Oliveira Araujo
DEMec / UFSCar

APROVADO

Prof. Dr. Vitor Ramos Franco
DEMec / UFSCar

Aprovado

São Carlos, 16 de dezembro de 2019

A minha família e amigos que por todo o auxílio e incentivo que sempre me deram.

AGRADECIMENTO

Agradeço ao professor Sidney Bruce Shiki, por toda o suporte, paciência e disposição durante o desenvolvimento deste trabalho e também aos demais docentes e técnicos administrativos que contribuíram com o meu aprendizado.

Agradeço a equipe Baja UFSCar, pelo tempo que passei na equipe, por todos os amigos, por todo o apoio e experiência que contribuíram para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

E agradeço aos meus amigos e todas as outras pessoas que contribuíram e fizeram parte dessa etapa.

RESUMO

Os fluidos magneto-reológicos (MR) são materiais compostos de partículas magnetizáveis suspensas em um fluido “carregador” não magnetizável. Esses materiais possuem a capacidade de alterar suas propriedades reológicas na presença de um campo magnético. Devido a essa característica esses fluidos vêm sendo estudados para aplicações em engenharia. Para a realização deste trabalho foi sintetizado um fluido MR de maneira simples com materiais de baixo custo, a ser utilizado nos ensaios, de modo a verificar a influência do campo magnético no efeito de amortecimento desse fluido sintetizado. Para isso realizaram-se ensaios sem e com o campo magnético, a aplicação do campo magnético foi gerada por ímãs permanentes de neodímio. Como resultado obteve-se que o fluido MR composto de óleo e toner tem a capacidade de alterar o coeficiente de amortecimento na presença do campo magnético. A partir disso concluiu-se que um fluido MR feito a partir de óleo e toner pode ter aplicações na engenharia no futuro, assim possibilitando a redução do custo de equipamentos que utilizam esse fluido.

Palavras-chaves: Fluido magneto-reológico, Amortecedores, Campo magnético, Vibrações, Sistemas dinâmicos.

ABSTRACT

The magnetorheological fluids (MRFs) are suspensions of magnetic particles in nonmagnetic carrier medium. These materials have the ability to change their rheological behavior under the influence of magnetic field. Because of that property these fluids are being studied for engineering applications. For this paper a low cost and simple-made MRF was developed, to be used on the experiments, to verify the influence of the magnetic field on the synthesized fluid damping characteristics. For this, some experimental tests were made with and without the magnetic field. The magnetic fields used were generated with permanent neodymium magnets. The MRF fluid prepared with toner and oil have the ability to change its viscous friction coefficient under the influence of magnetic field. In conclusion, the MRF prepared with toner and oil may have an application in engineering in the future. Therefore lowering the costs of MR devices.

Keywords: Magnetorheological fluids, Dampers, Magnetic field, Vibrations, System dynamics.

SUMARIO

Figura 1 - Componentes dos amortecedores tipo monotubo e bitubo.	16
Figura 2 - Modos básico de operação dos fluidos MR.	17
Figura 3 – Amortecedor veicular MR de alta performance.	18
Figura 4 – Modelo de automóvel com sistemas de amortecedores MR.	18
Figura 5 – Desenho esquemático do sistema real.	21
Figura 6 – Diagrama do sistema, modelo matemático.	22
Figura 7 – DCL do modelo. a) DCL da massa; b) DCL do amortecedor.	23
Figura 8 – Diagrama do sistema real.	25
Figura 9 – Diagrama de corpo livre do êmbolo.	26
Figura 10 – Resposta do deslocamento, modelo matemático, variando k	27
Figura 11 – Resposta do deslocamento, modelo matemático, variando τ	27
Figura 12 – Resposta da velocidade, modelo matemático, variando k	28
Figura 13 - Resposta da velocidade, modelo matemático, variando τ	29
Figura 14 – Resposta da aceleração, modelo matemático, variando k	30
Figura 15 – Resposta da aceleração, modelo matemático, variando τ	30
Figura 16 – Percentual de incremento na viscosidade com relação a fração óleo/toner.	33
Figura 17 – Disposição da seringa com 1 imã.	34
Figura 18 – Medição do experimento no Tracker.	35
Figura 19 – Resposta do deslocamento, sem campo magnético.	36
Figura 20 – Resposta da velocidade, sem campo magnético.	37
Figura 21 – Resposta do deslocamento, com campo magnético de 1 imã.	38
Figura 22 – Resposta da velocidade, com campo magnético de 1 imã.	39
Figura 23 – Resposta do deslocamento, com campo magnético de 2 imãs.	39
Figura 24 – Resposta da velocidade, com campo magnético de 2 imãs.	40
Figura 25 – Resposta do deslocamento, para diferentes intensidades de campos magnéticos.	42
Figura 26 – Respostas de velocidades, para diferentes intensidades de campo magnético.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes presentes no toner.	32
Tabela 2 – Valores de k e τ , ensaios sem campo magnético.	37
Tabela 3 - Valores de k e τ , ensaios com 1 imã.	38
Tabela 4 - Valores de k e τ , ensaios com 2 imãs.	40
Tabela 5 – Parâmetros do sistema ajustado representativos dos ensaios.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MR	Magneto-reológico.
MRF	Magnetorheological fluid
DCL	Diagrama de Corpo Livre

LISTA DE SIMBOLOS

B	Coefficiente de amortecimento do sistema.
A	Intensidade da força externa atuante no corpo.
dx	Taxa de variação da função $x(t)$.
dt	Taxa de variação infinitesimal do tempo.
ΣF	Somatório de forças.
$F(s)$	Transformada de Laplace da função $f(t)$.
$f(t)$	Força aplicada no corpo em função do tempo.
$F_{at,e}$	Força de atrito estático.
F_{b1}	Força na extremidade superior do amortecedor.
F_{b2}	Força na extremidade inferior do amortecedor.
g	Aceleração da gravidade.
K	Ganho da função de transferência.
M	Massa do corpo.
t	Tempo.
τ	Constante de tempo.
ω	Parte imaginária da variável de Laplace.
$X(s)$	Transformada de Laplace da função $f(t)$.
$x(t)$	Deslocamento do corpo em função do tempo.
$\dot{x}(t)$	Velocidade do corpo em função do tempo.
$\ddot{x}(t)$	Aceleração do corpo em função do tempo.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1.	Objetivos.....	13
1.2.	Organização do trabalho	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1.	Amortecedores	15
2.2.	Fluido magneto-reológico.....	16
2.3.	Amortecedores magneto-reológicos	18
2.4.	Estudos desenvolvidos.....	19
3.	MODELO MATEMÁTICO	21
3.1.	Descrição do modelo	21
3.2.	Modelagem matemática.....	22
3.3.	Comparação com o sistema real	25
4.	VALIDAÇÃO DO MODELO.....	32
4.1.	Sintetização do fluido	32
4.2.	Aplicação do campo magnético.....	33
4.3.	Procedimento experimental	33
4.4.	Coleta de dados.....	34
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
5.1.	Resultados.....	36
5.2.	Discussões.....	41
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	44
6.1.	Sugestões para trabalhos futuros	45
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
	ANEXOS.....	48
	ANEXO A.1 – Rotinas do Matlab para plotar curvas teóricas.....	48

ANEXO A.2 – Rotina para plotagem dos pontos experimentais e da curva ajustada. 51

1. INTRODUÇÃO

As suspensões automotivas são os sistemas responsáveis por absorver as irregularidades do terreno, fornecendo conforto aos passageiros e ao condutor do veículo, e manter o contato do pneu com a pista de modo a se manter a aderência do veículo com a superfície da pista, fornecendo assim uma melhor dirigibilidade do veículo.

Para atender as necessidades de conforto dos passageiros do veículo, se faz necessário um coeficiente de amortecimento baixo, enquanto para se melhorar a dirigibilidade do automóvel para realizar manobras, se faz necessário um coeficiente de amortecimento elevado (LAGOIN, 2017).

De modo a atender ambas as necessidades, o projetista necessita escolher os parâmetros de amortecimento e rigidez da suspensão equilibrado para diferentes condições de operação, garantindo assim o conforto e a estabilidade do veículo durante as manobras. Outro modo de atender essas necessidades, é a utilização de amortecedores com coeficiente de amortecimento variável, um exemplo desses dispositivos é o amortecedor magneto-reológico (MR), que varia a viscosidade do fluido na presença de um campo magnético e consequentemente, o coeficiente de amortecimento da suspensão..

1.1. Objetivos

Este trabalho visa verificar a influência do campo magnético no efeito de amortecimento de um fluido MR sintetizado de maneira simples e com materiais de baixo custo.

Para isso foi definido alguns objetivos específicos a serem concluídos como:

- Analisar do modelo dinâmico de um sistema com amortecimento adaptável;
- Definir materiais e concentrações que irão compor o fluido MR;
- Definir o modo como será aplicado o campo magnético;
- Realização dos ensaios do fluido na presença e na ausência do campo magnético;
- Analisar resultados dos testes do fluido com e sem o campo magnético aplicado

1.2. Organização do trabalho

O trabalho foi dividido em 6 capítulos, sendo o capítulo 1 a introdução do tema e a apresentação dos objetivos do trabalho. O capítulo **Erro! Fonte de referência não**

encontrada. apresenta a revisão bibliográfica. O capítulo 3 apresenta a metodologia para desenvolver um modelo para este trabalho. O capítulo 4 apresenta o procedimento realizado para a validação do modelo matemático desenvolvido na metodologia. O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos, bem como uma discussão sobre os ensaios. O capítulo 6 apresenta as considerações finais do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta algumas características dos amortecedores, dos fluidos magneto-reológicos (MR) e dos amortecedores MR nas seções 2.1, 2.2 e 2.3 respectivamente. Na seção 2.4 são apresentados alguns trabalhos desenvolvidos em cima de amortecedores e fluidos MR.

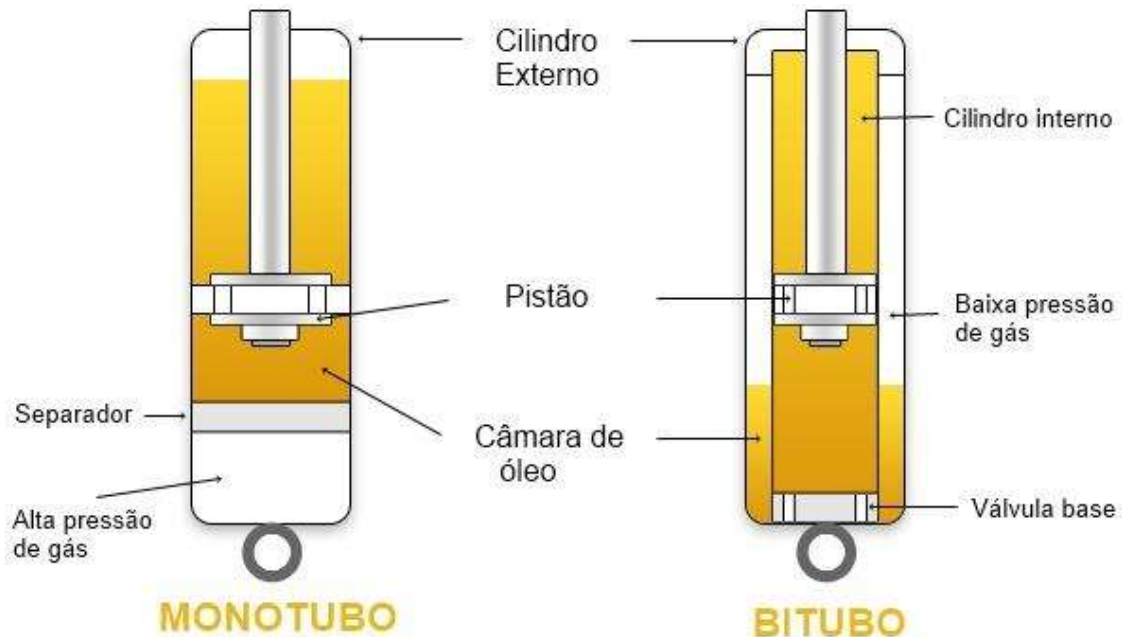
2.1. Amortecedores

Atualmente os amortecedores hidráulicos telescópicos são amplamente utilizados na indústria automobilística, aeronáutica, civil, entre outras. A dissipação de energia desses amortecedores ocorre através da passagem do fluido presente no interior da câmara de óleo, por orifícios presentes no pistão durante o movimento da haste do amortecedor. Os fluidos devido às suas propriedades reológicas, como viscosidade, densidade, entre outros; apresentam resistência ao movimento do pistão dissipando a energia cinética do sistema em forma de calor. (DIXON, 2007)

Os tipos de amortecedores hidráulicos telescópicos se diferenciavam pelo método no qual acomodam o volume de fluido deslocado pela entrada da haste na câmara de óleo. A haste do amortecedor ocupa 10% do volume interno da câmara de óleo e a compressibilidade dos fluidos não são suficientes para suportar essa redução. As principais soluções utilizadas atualmente são: tipo monotubo e bitubo, mostrados na fig (1). (DIXON, 2007)

Os amortecedores de bitubo possuem dois tubos concêntricos, sendo o tubo interno o local onde a haste e o pistão do amortecedor se deslocam e o espaço entre os cilindros externo e interno que serve para acomodar o volume de fluido deslocado pela haste do amortecedor. Já os amortecedores monotubo são formados por um cilindro no qual o pistão e a haste percorrem em uma região com o fluido hidráulico. Essa região é separada de um gás a alta pressão, por um pistão flutuante que possibilita a expansão da câmara de fluido do pistão para acomodar o excesso de fluido. Os componentes de cada um dos tipos de amortecedores são mostrados na fig.(1).

Figura 1 - Componentes dos amortecedores tipo monotubo e bitubo.



Fonte: 4x4 Brasil.

A utilização de amortecedores hidráulicos nos automóveis resultou em um menor desgaste dos componentes do sistema, maior estabilidade ao veículo, maior segurança e conforto aos passageiros, maior aderência do pneu ao solo, redução da distância de frenagem, além de redução de ruído gerado no sistema.

2.2. Fluido magneto-reológico

Com o objetivo de aumentar a eficiência dos amortecedores, foram desenvolvidas pesquisas em cima de novos materiais para otimizar o funcionamento do dispositivo. Alguns dos materiais estudados são os fluidos magneto-reológicos (MR) que possibilitaram o desenvolvimento de amortecedores com coeficiente de amortecimento ajustável por um campo magnético externo.

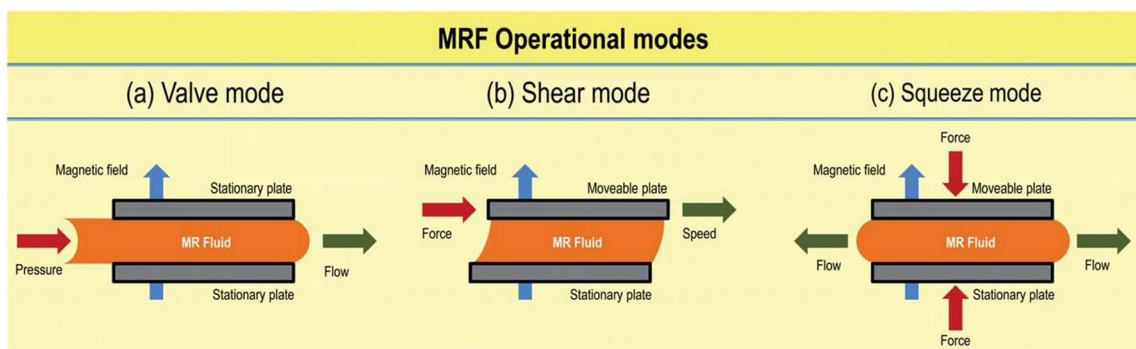
Fluidos MR são materiais compostos por partículas de tamanho microscópico magneticamente polarizadas, suspensas em um fluido “carregador” não magnético, como o óleo mineral, água ou óleo sintético (SUKHWANI; HIRANI, 2007). Esses materiais respondem à aplicação de um campo magnético com mudanças em seu comportamento reológico, como a viscosidade. Os materiais inteligentes são aqueles que apresentam acoplamento entre campos físicos diferentes, como alguns materiais inteligentes que tem a capacidade de mudar sua forma, rigidez e outras propriedades por meio da imposição de temperatura, campos de tensão, diferença de potencial elétrico ou de um campo magnético.

Alguns exemplos desses materiais são os materiais MR, os materiais eletro-reológicos, as ligas de memória de forma, os materiais piezelétricos, entre outros (SAVI; A. OLIVEIRA, 2013).

As partículas magnéticas presentes no fluido MR quando não estão sendo excitadas por um campo magnético não geram grande influência no comportamento da mistura, fazendo com que o fluido MR possua um comportamento semelhante ao de um óleo comum. Entretanto quando estão submetidas a ação de um campo magnético elas tendem a se alinhar com as linhas de fluxo do campo, fazendo com que o fluido apresente uma viscosidade diferente e, dependendo da intensidade do campo magnético, esse fluido pode se comportar praticamente como um sólido (GAO; LIU; LIAO, 2017).

Os fluidos MR apresentam 3 modos básicos de operação: o modo de pressão, em que o fluido é forçado a fluir por entre os polos magnéticos estacionários; o modo de cisalhamento, em que uma força induz a tensão de cisalhamento no fluido e o modo de compressão, em que o fluido é submetido a uma força de compressão, alterando assim as posições dos polos magnéticos, como ilustrado pela Figura 2.

Figura 2 - Modos básico de operação dos fluidos MR.



Fonte: DE VICENTE; KLINGENBERG; HIDALGO-ALVAREZ, 2011

O baixo tempo de resposta do fluido MR e a capacidade de retornar ao seu estado inicial na ausência de um campo magnético, tornam este material muito atrativo para aplicações como a redução da vibração em estruturas devido a efeitos sísmicos (FERNANDES, 2016), o fornecimento de uma maior estabilidade em veículos na indústria automobilística (TUSSET, 2008) e aeronáutica (CHENG et al., 2009), melhoria no desempenho de próteses médicas (ROCHA, 2015). Entretanto devido ao alto custo envolvido na utilização do fluido MR, faz com que sua aplicação comercial ainda não seja tão ampla. A

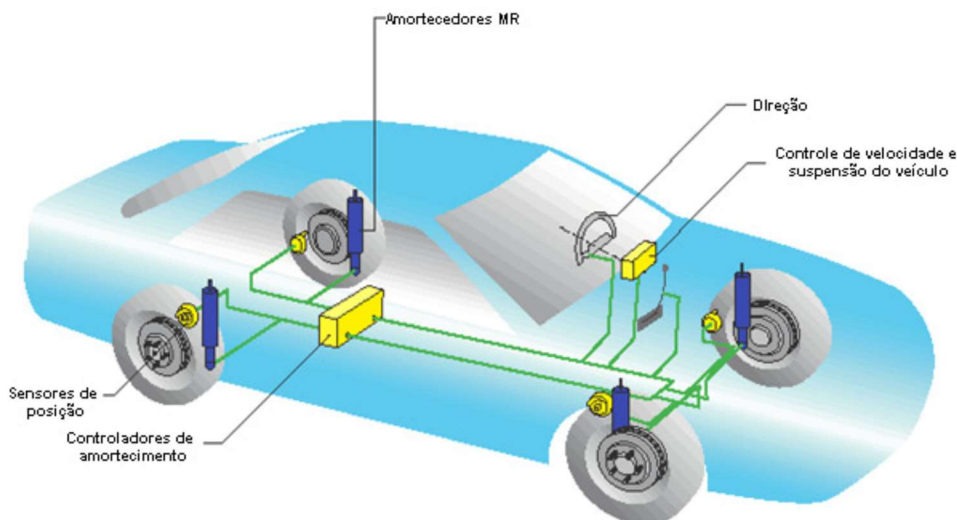
seguir, nas Figuras 3 e 4, são mostrados um dispositivo com fluido MR e a aplicação desse dispositivo em um automóvel.

Figura 3 – Amortecedor veicular MR de alta performance.



Fonte: BATOCCHIO; GUERREIRO, 2011

Figura 4 – Modelo de automóvel com sistemas de amortecedores MR.



Fonte: BATOCCHIO; GUERREIRO, 2011

2.3. Amortecedores magneto-reológicos

As suspensões automotivas que utilizam amortecedores hidráulicos apresentam o desafio de apresentar um amortecimento equilibrado em diferentes condições de operação, como a necessidade de um alto coeficiente de amortecimento para se ter uma boa dirigibilidade ou um baixo coeficiente para se obter mais conforto. Esse problema pode ser contornado com o uso de amortecedores MR. Esses dispositivos foram desenvolvidos em busca de conforto e estabilidade de veículos, estruturas de grande porte devido a eventos sísmicos e outros fenômenos da natureza, de maneira mais eficaz. Esses amortecedores

também são conhecidos como um tipo de amortecedores ativos ou semi-ativos, devido a sua capacidade de adaptar a diferentes condições de operação (LAGOIN, 2017).

Os amortecedores semi-ativos possuem a capacidade de alterar o amortecimento da estrutura em tempo real, sem a necessidade de parar o sistema, sendo que esse amortecimento é estabelecido pelo controlador. Os amortecedores ativos assim como os passivos, possuem a capacidade de alterar o amortecimento do sistema em tempo real, porém esses dispositivos necessitam do fornecimento de energia externa, geralmente dadas por um atuador (GALAVOTTI, 2010).

Os amortecedores MR possuem a mesma característica geométrica dos amortecedores hidráulicos do tipo telescópico. A principal diferença entre esses amortecedores é o fluido utilizado. Enquanto no amortecedor passivo utiliza-se um fluido com propriedades reológicas constantes, no amortecedor semi-ativo ou ativo o fluido MR confere ao mesmo a capacidade de variar o coeficiente de amortecimento conforme a presença de campo magnético.

2.4. Estudos desenvolvidos

O comportamento reológico dos fluidos MR tem se mostrado muito interessante para aplicações em engenharia. Devido a isso foram desenvolvidos vários estudos de modo a se compreender e até mesmo desenvolver novos fluidos MR.

Mesquida e Lässig (2014) estudaram a viabilidade de se desenvolver um fluido MR barato e simples de se construir com propriedades reológicas que sejam interessantes para o projeto de dispositivos de controle de velocidade. Para isso, foram sintetizados alguns fluidos MR compostos por partículas de óxido de ferro e um fluido “carregador” e outra mistura composta por tinta toner de impressora a laser misturado em óleo vegetal. Verificando assim o potencial do uso dessas soluções para aplicações em engenharia apesar do comportamento de sedimentação.

ROSA (2014) desenvolveu um estudo numérico e experimental de um fluido magnético. Na parte experimental, o estudo foi concedido para analisar a resposta viscosa dos fluidos em função da taxa de cisalhamento, do campo magnético aplicado e da fração volumétrica de partículas de magnetita em suspensão no óleo mineral. Além disso, conduziu uma análise da estrutura microscópica do material, expondo a influência da formação dessas estruturas na presença de um campo magnético no comportamento reológico do fluido MR. Na parte numérica, foi feita uma análise dinâmica do sistema, para se obter as propriedades

reológicas em função da fração volumétrica, do campo, da taxa de cisalhamento e da interação entre os dipolos.

Existem também várias pesquisas desenvolvidas em aplicações de equipamentos com fluidos MR em diversas áreas. Na área médica, por exemplo, foram realizados alguns trabalhos utilizando amortecedores MR em próteses de modo a permitir que as pessoas com membros amputados possam ter um maior grau de mobilidade. Alguns exemplos são o trabalho de Andrade (2018) que desenvolveu um joelho magneto-reológico ativo para próteses transfemurais composto por uma unidade motora e acoplamento MR e de Rajendran (2013) que desenvolveu uma pesquisa para determinar a viabilidade de utilizar amortecedor MR controlável para a aparelhos de reabilitação para pessoas que tiveram um acidente vascular cerebral.

Na área de controle de vibrações, também foram realizados diversos trabalhos para amenizar as vibrações estruturais utilizando um sistema de controle em conjunto com um amortecedor MR (FERNANDES, 2016). Alguns trabalhos foram desenvolvidos para o controlar o amortecimento de suspensões dotadas de amortecedores MR, utilizando técnicas de controle não linear e na logica fuzzy, para modelo de um quarto de veículo (TANAKA, 2017; TUSSET, 2008). Apesar de existirem vários estudos sobre o controle de vibrações de um sistema com amortecedores MR, esses equipamentos são empregados atualmente em carros de luxo, devido ao melhor custo benefício.

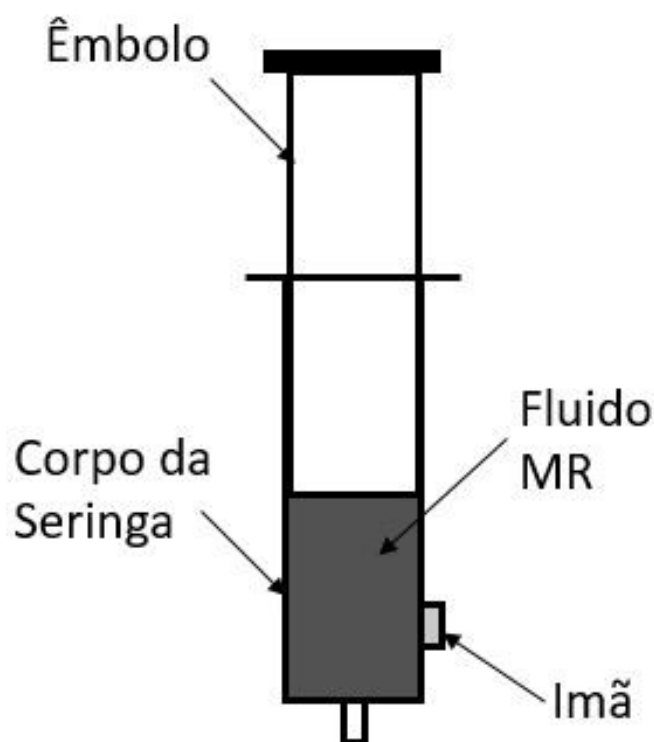
3. MODELO MATEMÁTICO

Neste capítulo é descrito como foi obtido o modelo matemático que representa a resposta do sistema em relação ao tempo.

3.1. Descrição do modelo

O sistema desenvolvido nesse trabalho visa verificar a influência do campo magnético no amortecimento de um amortecedor dotado de fluido MR. Para essa verificação utilizou-se uma seringa de 10mL e o fluido MR sintetizado, como apresentado na Figura 5.

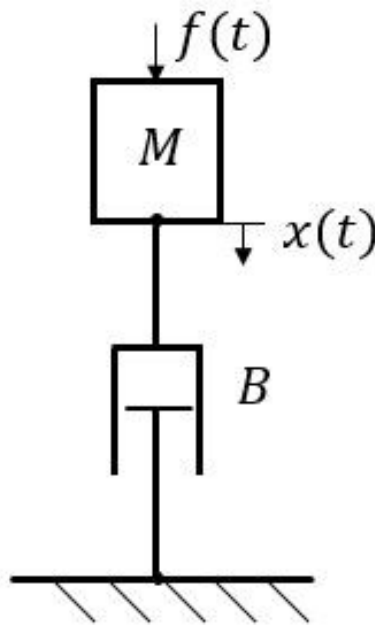
Figura 5 – Desenho esquemático do sistema real.



Fonte: Próprio autor.

Para a modelagem do sistema real, considerou-se o êmbolo móvel como um corpo de massa M , e a resistência que o fluido fornece ao movimento do êmbolo e o atrito do corpo da seringa com o êmbolo móvel como a resistência que um amortecedor fornece a um sistema F_b . A partir dessas considerações realizou-se a modelagem de um sistema composto por massa e amortecedor, como representado na Figura 6.

Figura 6 – Diagrama do sistema, modelo matemático.



Fonte: Próprio autor.

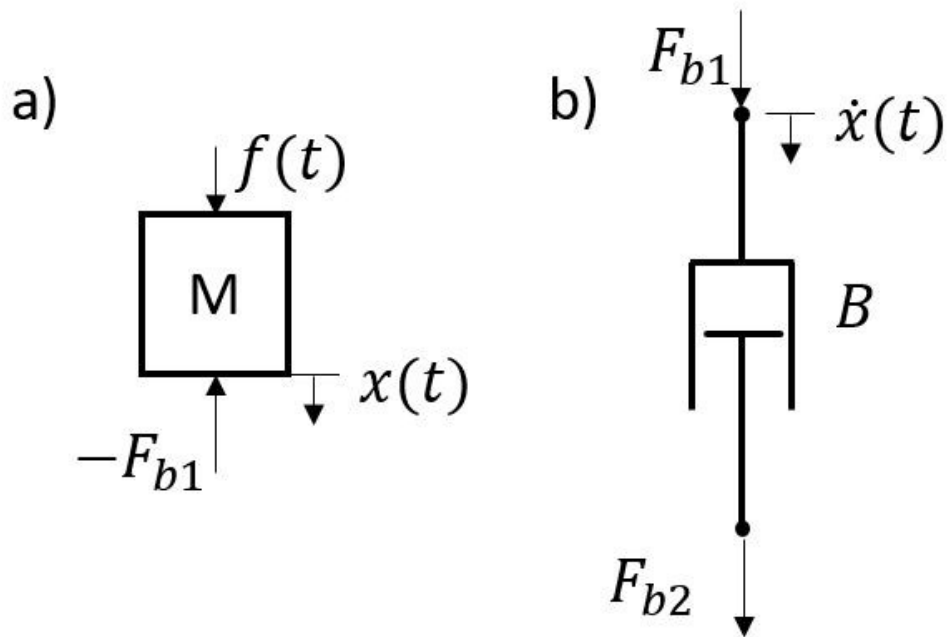
Em que:

- $f(t)$: Força aplicada no corpo em função do tempo, [N];
- M : Massa do corpo, [kg];
- $x(t)$: Deslocamento do corpo em função do tempo, [m];
- B : Coeficiente de amortecimento, [N.s/m];
- t : Tempo, [s];

3.2. Modelagem matemática

Para obter as equações que descrevem o comportamento do sistema, realizou-se o diagrama de corpo livre (DCL) do sistema da Figura 6, o DCL é apresentado na fig. (7):

Figura 7 – DCL do modelo. a) DCL da massa; b) DCL do amortecedor.



Fonte: Próprio autor

- em que:
- $\dot{x}(t)$: Velocidade do corpo em função do tempo, [m/s];
 - F_{b1} : Força na extremidade superior do amortecedor, [N];
 - F_{b2} : Força na extremidade inferior do amortecedor, [N];

A partir da 2ª Lei de Newton, obtém-se:

$$\sum F = M\ddot{x}(t) \quad (1)$$

- em que: - $\sum F$: Somatório de forças atuantes no corpo, [N].

Considerando inicialmente o caso estático, $t < 0s$, obtém-se:

$$Mg = F_{at.e}$$

- em que:
- $F_{at.e}$: Força de atrito estático, [N];
 - g : Aceleração da gravidade; [m/s²].

Considerando o caso dinâmico, $t \geq 0s$, no amortecedor em que:

$$F_{b1} = -B\dot{x}(t) \quad (2)$$

$$F_{b2} = B\dot{x}(t)$$

A partir do DCL do corpo de massa M :

$$f(t) - (-F_{b1}) = M\ddot{x}(t) \quad (3)$$

Substituindo eq. (2) na eq. (3):

$$f(t) - B\dot{x}(t) = M\ddot{x}(t) \quad (4)$$

Somando $B\dot{x}(t)$ nos dois lados da equação:

$$f(t) = M\ddot{x}(t) + B\dot{x}(t) \quad (5)$$

Aplicando a transformada de Laplace em ambos os lados da equação (5), obtendo-se assim:

$$F(s) = Ms^2X(s) + BsX(s)$$

em que: - $X(s)$: Transformada de Laplace da função $x(t)$;
 - $F(s)$: Transformada de Laplace da força de entrada $f(t)$.
 - s : Variável complexa de Laplace.

Isolando $\frac{X(s)}{F(s)}$, obtém-se a função de transferência do sistema dada por:

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{Ms^2 + Bs} \quad (4)$$

Rearranjando os termos da equação:

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{\frac{1}{B}}{\frac{M}{B}s^2 + s}$$

Multiplicando ambos os lados da equação por s :

$$\frac{sX(s)}{F(s)} = \frac{\frac{1}{B}}{\frac{M}{B}s + 1}$$

$$\frac{sX(s)}{F(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (5)$$

em que: - $\tau = \frac{M}{B}$: Constante de tempo, [s];
 - $K = \frac{1}{B}$: Ganho da função de transferência; [m/(N.s)]

Considerando $f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ A, & t \geq 0 \end{cases}$

$$F(s) = \frac{A}{s} \quad (6)$$

Em que: - c : Intensidade da força externa atuante no corpo, [N];

Isolando $X(s)$ e substituindo (7) em (6):

$$X(s) = \frac{AK}{\tau s^2 \left(s + \frac{1}{\tau}\right)} \quad (7)$$

Aplicando a transformada inversa de Laplace em (8):

$$x(t) = \frac{AK}{\tau} * \frac{\left(e^{-\frac{1}{\tau}t} + \frac{1}{\tau}t - 1\right)}{\left(\frac{1}{\tau}\right)^2}$$

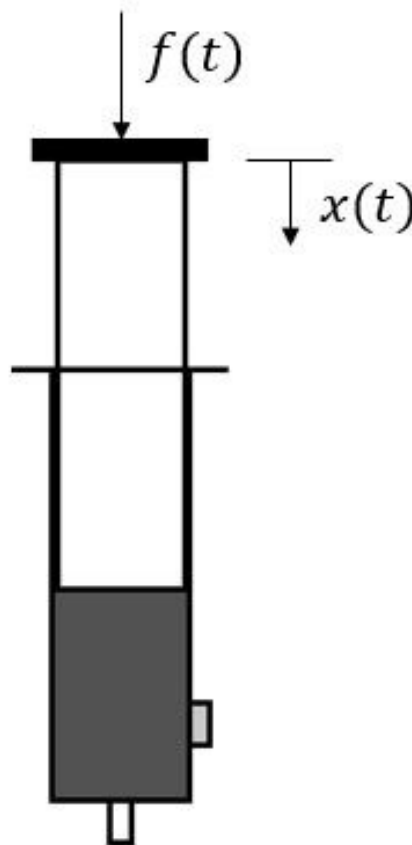
Rearranjando os termos:

$$x(t) = AK\tau \left(e^{-\frac{1}{\tau}t} + \frac{1}{\tau}t - 1\right) \quad (8)$$

3.3. Comparação com o sistema real

O sistema real utilizado para a realização dos ensaios neste trabalho está apresentado pelo diagrama da Figura 8

Figura 8 – Diagrama do sistema real.



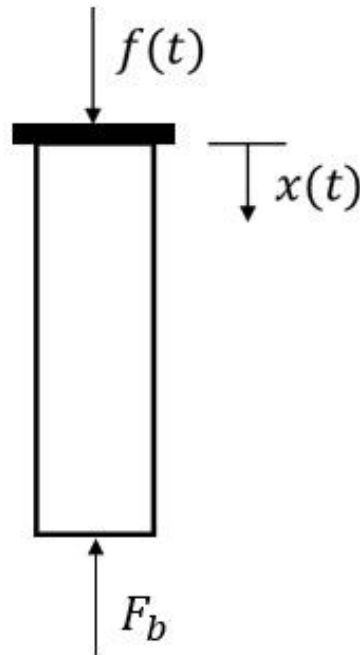
Fonte: Próprio autor.

Em que:

- $f(t)$: Força aplicada no corpo em função do tempo, [N];
- $x(t)$: Deslocamento do êmbolo em função do tempo, [m];
- t : Tempo, [s];

Como pode-se observar na Figura 8 o sistema real utilizado é bem próximo ao modelo matemático desenvolvido e realizando o DCL do êmbolo tem-se:

Figura 9 – Diagrama de corpo livre do êmbolo.



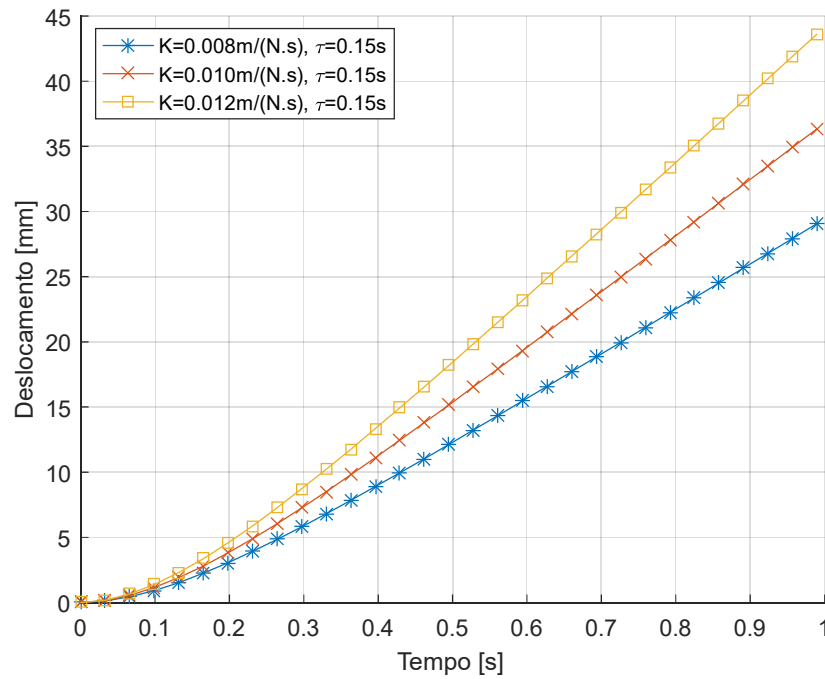
Fonte: Próprio autor.

Em que: - F_b : Força de resistência do fluido MR, [N];

Realizando o somatório de forças que atuam sobre o êmbolo, considerando a força devido ao fluido MR e a força de atrito Coulomb do êmbolo com o corpo da seringa igual a força de amortecimento, tem-se que o modelo que representa o comportamento do sistema real é dado pela equação (5).

Considerando $A = 4,3N$, $K = [0,008; 0,0010; 0,0012]m/(N * s)$ e $\tau = 0,15s$, substituindo esses valores na equação (9), obtém-se o efeito de k sobre o comportamento da curva de deslocamento x tempo, mostrado na Figura 10.

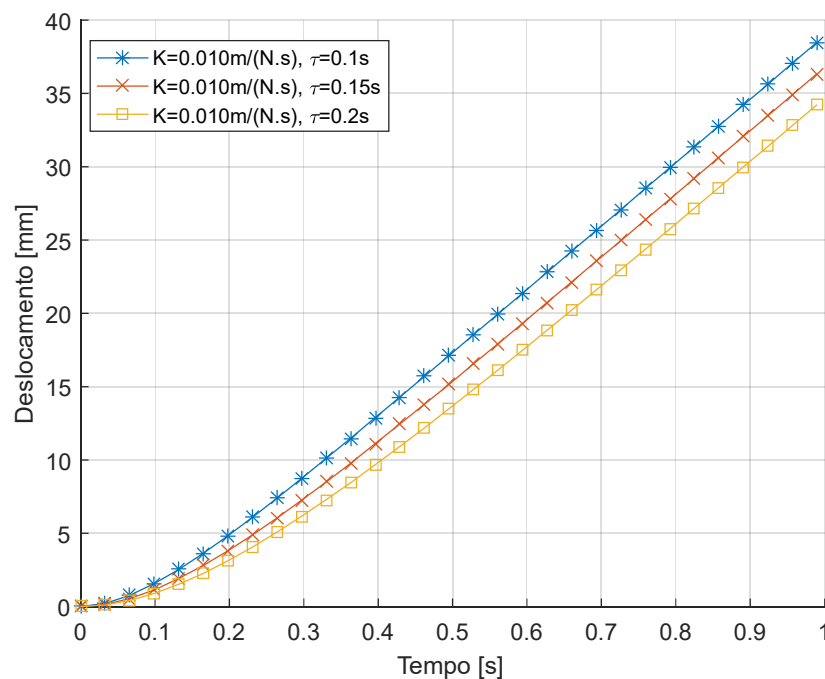
Figura 10 – Resposta do deslocamento, modelo matemático, variando k .



Fonte: Próprio autor.

Considerando $A = 4,3N$, $K = 0,010m/(N * s)$ e $\tau = [0,1; 0,2; 0,3]s$, substituindo esses valores na equação (9), obtém-se o efeito de τ sobre o comportamento da curva de deslocamento x tempo, mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Resposta do deslocamento, modelo matemático, variando τ .



Fonte: Próprio autor.

Como pode-se observar, o deslocamento do êmbolo dado pela equação (9), depois de um certo tempo, começa a ter um crescimento linear e tende ao infinito. Diferente do sistema real, o modelo matemático não considera o fim de curso do êmbolo da seringa, assim temos que no modelo real o deslocamento teria um limite dado pelo fim de curso do êmbolo.

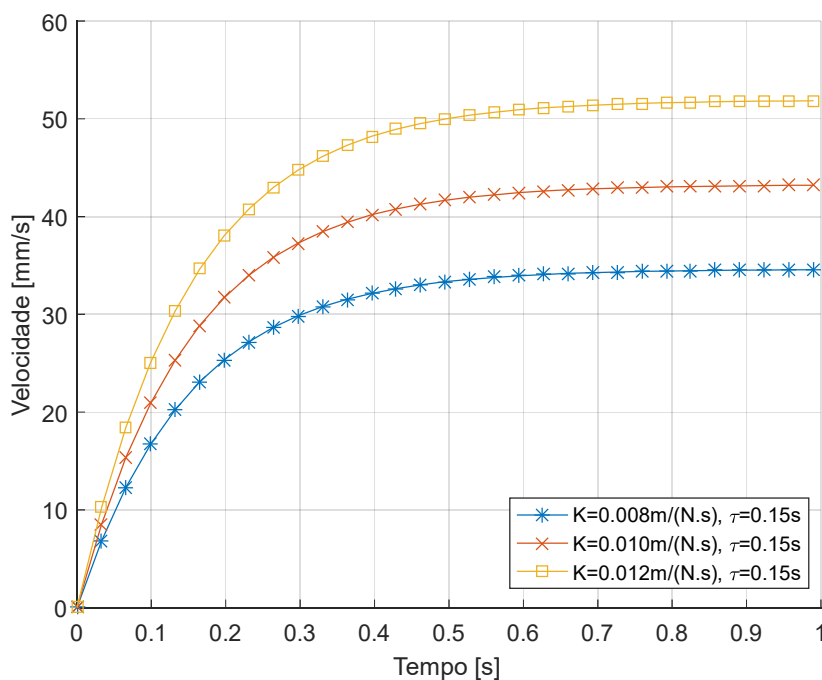
Derivando a equação (9) em função do tempo, tem-se que:

$$\frac{dx}{dt}(t) = AK * \left(1 - e^{-\frac{1}{\tau}t}\right) \quad (9)$$

Em que: $-\frac{dx}{dt}(t) = \dot{x}(t)$: Velocidade do corpo em função do tempo, [m/s];

Considerando $A = 4,3N$, $K = [0,008; 0,0010; 0,0012]m/(N * s)$ e $\tau = 0,15s$, substituindo esses valores na equação (10), obtém-se o efeito de k sobre o comportamento da curva velocidade x tempo, mostrado na Figura 12.

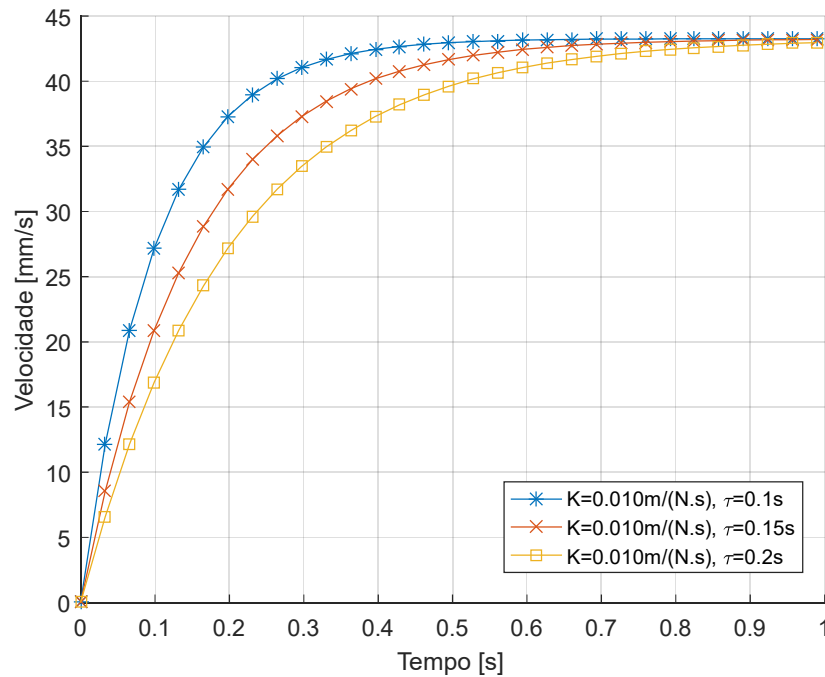
Figura 12 – Resposta da velocidade, modelo matemático, variando k .



Fonte: próprio autor

Considerando $A = 4,3N$, $K = 0,010m/(N * s)$ e $\tau = [0,1; 0,2; 0,3]s$, substituindo esses valores na equação (10), obtém-se o efeito de τ sobre o comportamento da curva de velocidade x tempo, mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Resposta da velocidade, modelo matemático, variando τ .



Fonte: Próprio autor.

Como pode-se observar, a velocidade do êmbolo dada pela equação (10), tende a se estabilizar, isso ocorre, pois, ao alcançar uma certa velocidade a força de amortecimento dada pela equação (2), se iguala à força aplicada no êmbolo. No modelo real essa velocidade não permanece constante, mas sofre uma desaceleração até a parada total, devido ao fim de curso da seringa.

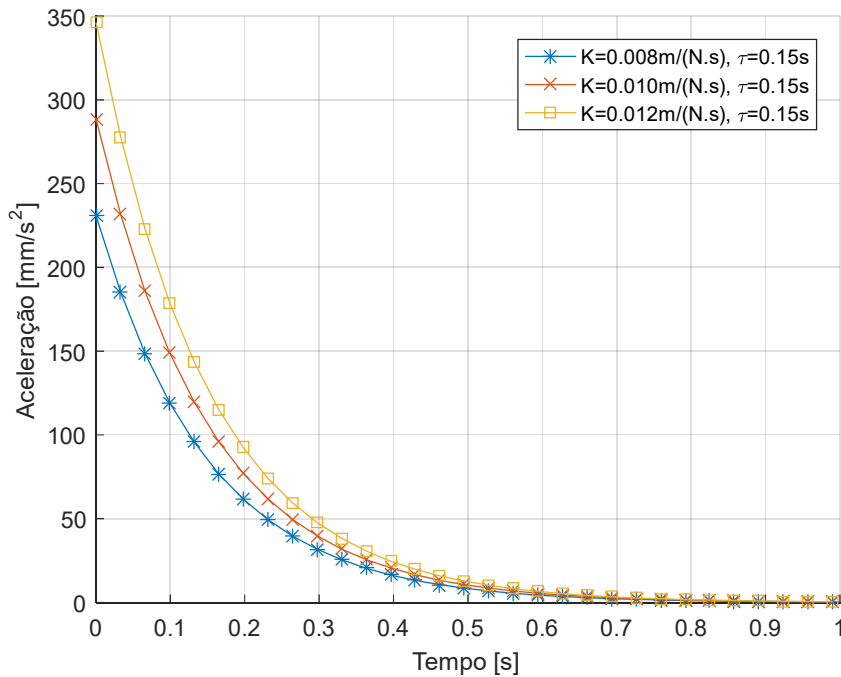
Derivando novamente a equação (10) em função do tempo, tem-se:

$$\frac{d^2x}{dt^2}(t) = \frac{AK}{\tau} e^{-\frac{1}{\tau}t} \quad (10)$$

Em que: $-\frac{d^2x}{dt^2}(t) = \ddot{x}(t)$: Aceleração do corpo em função do tempo, [m/s²];

Considerando $A = 4,3N$, $K = [0,008; 0,0010; 0,0012]m/(N * s)$ e $\tau = 0,15s$, substituindo esses valores na equação (11), obtém-se o efeito de k sobre o comportamento da curva aceleração x tempo, mostrado na Figura 14.

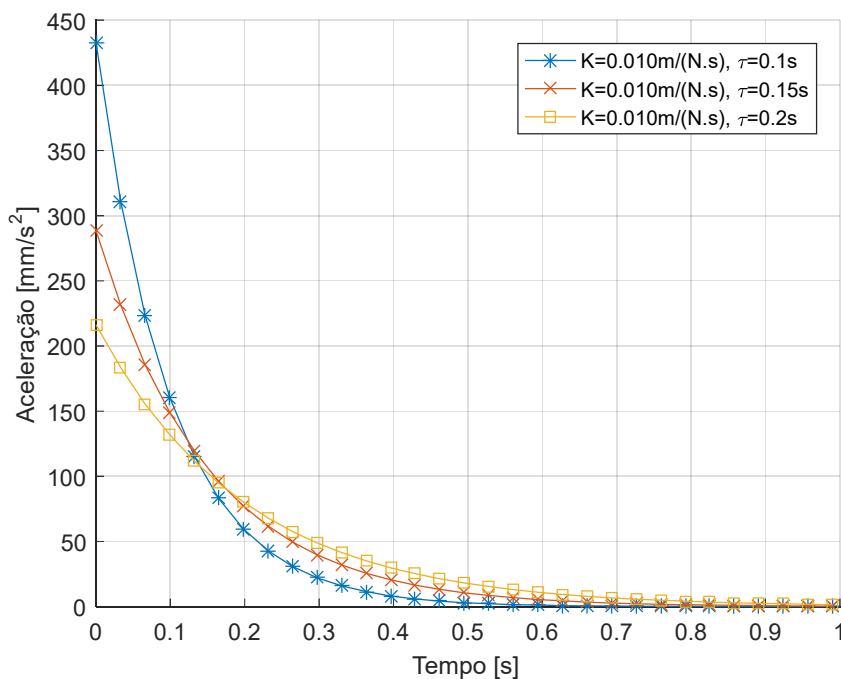
Figura 14 – Resposta da aceleração, modelo matemático, variando k .



Fonte: Próprio autor.

Considerando $A = 4,3N$, $K = 0,010 \text{ m}/(\text{N} \cdot \text{s})$ e $\tau = [0,1; 0,2; 0,3] \text{ s}$, substituindo esses valores na equação (11), obtém-se o efeito de τ sobre o comportamento da curva de aceleração x tempo, mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Resposta da aceleração, modelo matemático, variando τ .



Fonte: Próprio autor.

Como pode-se notar a aceleração do êmbolo dada pela equação (11), tende ao valor nulo, isso ocorre, pois, ao alcançar uma certa velocidade a força de amortecimento dada pela equação (2), se iguala à força aplicada no êmbolo, fazendo assim com que as forças que atuam sobre o êmbolo se equilibrem, de modo que não haja mais aceleração no corpo. No modelo real o êmbolo irá sofrer uma desaceleração, devido ao fim de curso da seringa.

Ao observar os gráficos de deslocamento, apresentados pelas figuras 10 e 11, nota-se que o sistema se comporta como um sistema de 1° ordem ao ter uma entrada do tipo rampa. Nos gráficos de velocidades, apresentados pelas figuras 12 e 13, nota-se que o sistema se comporta como um sistema de 1° ordem a uma entrada do tipo degrau. Por fim, nos gráficos da aceleração, apresentados pelas figuras 14 e 15, observa-se que o sistema se comporta como um sistema de 1° ordem a uma entrada do tipo impulso no instante $t = 0s$.

4. VALIDAÇÃO DO MODELO

Este capítulo descreve os procedimentos realizados para cumprir os validar o modelo obtido no capítulo 3.

4.1. Sintetização do fluido

Inicialmente, realizou-se um estudo sobre materiais que poderiam ser utilizados na sintetização de um fluido que respondesse a influência de um campo magnético. Algumas das partículas magnéticas encontradas foram: partículas de óxido de ferro e pó de toner de impressora a laser, a composição do toner é apresentada na Tabela 01.

Tabela 1 – Componentes presentes no toner.

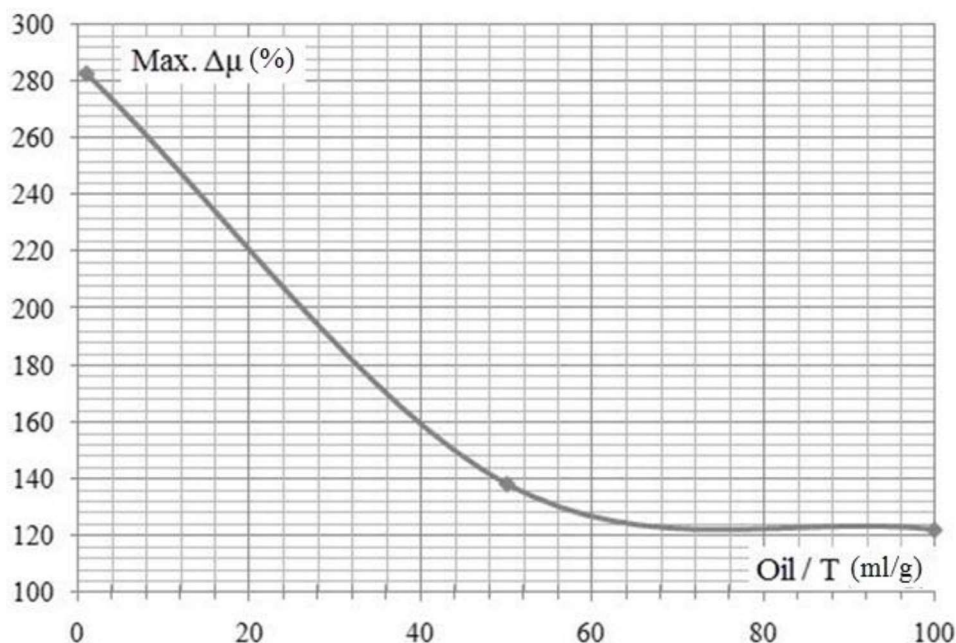
Fe_3O_4	Óxido de Ferro (Magnetita)
$(\text{La}_{0,8}\text{Sr}_{0,2})\text{FeO}_3$	Óxido de Ferro, Lantânio e Estrôncio
CeO_2	Óxido de Cério
$\text{Sr}_2\text{FeTiO}_5,5$	Óxido de Ferro, Titânio e Estrôncio

Fonte: Mesquida, Lässig (2014) – Tradução própria.

Para este trabalho, optou-se pela receita formada por pó de toner com óleo vegetal ao invés das partículas de óxido de ferro. Por ser um material mais acessível ao autor, o fluido carregador escolhido foi o óleo de soja Liza por ser um líquido de baixo custo e de fácil aquisição.

Após definir os materiais que compõem o fluido, foi definida a concentração óleo-toner da mistura, sendo ela escolhida a partir do gráfico da Figura 16, resultado obtido por Mesquida e Lässig (2014), que mostra o incremento da viscosidade do fluido na presença de um campo magnético em relação à fração óleo-toner. De modo a se obter uma variação no amortecimento do fluido que pudesse ser verificado nos ensaios, optou-se pela fração de 10mL/g. A partir dessa concentração sintetizou-se o fluido MR com 2g de pó de toner e 20mL de óleo vegetal.

Figura 16 – Percentual de incremento na viscosidade com relação a fração óleo/toner.



Fonte: MESQUIDA; LÄSSIG, (2014).

4.2. Aplicação do campo magnético

Para a aplicação do campo magnético no ensaio, optou-se pela utilização de um ímã permanente de neodímio ($\varnothing 12\text{mm} \times 3\text{mm}$), de modo a se obter o mesmo campo magnético em todos os ensaios realizados e pela facilidade construtiva já que a utilização de um ímã permanente elimina a necessidade de um circuito elétrico para gerar o campo magnético e de uma fonte de alimentação. Para a realização dos ensaios com o campo magnético fixou-se o ímã no corpo da seringa a uma altura de 20mm.

4.3. Procedimento experimental

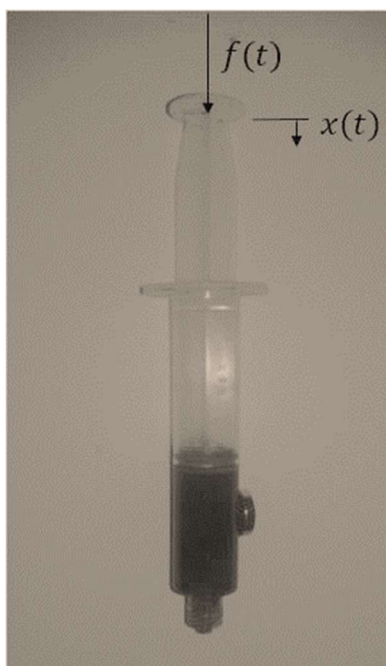
Para a realização dos ensaios seguiu-se os seguintes passos:

1. Misturar o fluido, de modo a deixá-lo mais homogêneo e que todos os experimentos tenham a mesma quantidade de partículas magnéticas no fluido;
2. Aspirar 5mL de fluido ao interior da seringa, evitando a entrada de bolhas de ar;
3. Posicionar a seringa sobre o recipiente;
4. Fixar o(s) ímã(s) no corpo da seringa a uma altura equivalente a 20mm da ponta da seringa. (Apenas para ensaios com aplicação do campo magnético).
5. Posicionar câmara a 25cm do experimento e iniciar a gravação;
6. Posicionar o corpo de massa de 441g sobre o recipiente, o mais próximo do êmbolo de modo a manter a entrada em todos os ensaios semelhantes.

Para a realização dos ensaios sem o campo magnético, apenas seguiu-se os passos gerais descritos, pulando o passo 4. Optou-se pela massa de 441g pois era a massa necessária para conseguir vencer a força de atrito estático entre o êmbolo e o corpo da seringa.

Para a realização dos ensaios com o campo magnético, fixou-se 1 imã para o ensaio com 1 imã. A disposição da seringa para o ensaio com 1 imã é mostrada na figura 17.

Figura 17 – Disposição da seringa com 1 imã.



Fonte: Próprio autor.

Realizou-se também alguns ensaios com o campo magnético gerado por 2 imãs sobrepostos, de modo, a verificar a comportamento do fluido ao se aumentar o campo magnético aplicado no sistema.

De modo a se consolidar os resultados obtidos pelos ensaios e reduzir a variação acidental dos experimentos, repetiu-se cada ensaio 8 vezes.

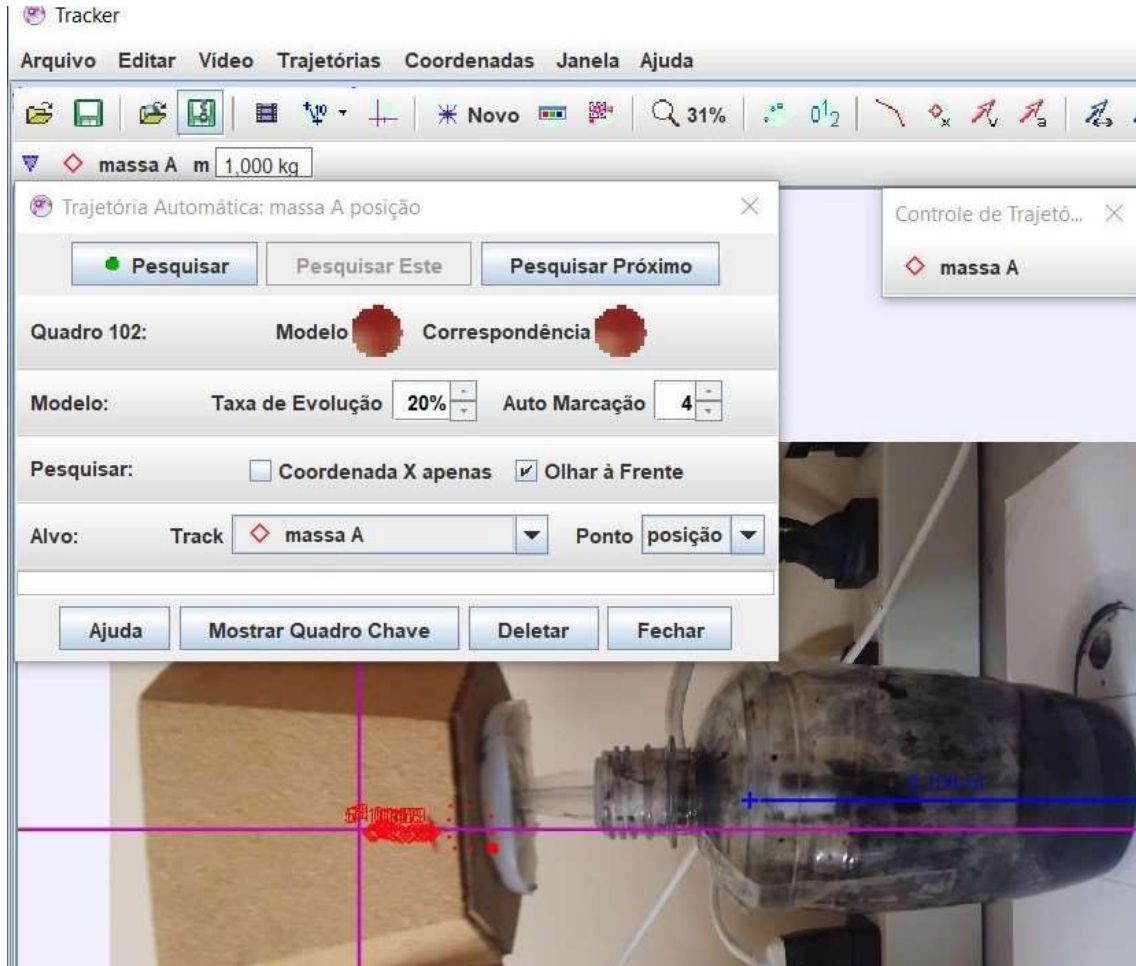
4.4. Coleta de dados

A coleta de dados de cada um dos ensaios realizados, com e sem campo magnético, foi realizada ao posicionar uma câmera a 25cm do sistema, de modo a se filmar o deslocamento do êmbolo em função do tempo. Para transformar as imagens obtidas pela filmagem em valores numéricos, utilizou-se o software Tracker 5.1.3.

O Tracker é um software gratuito de análise de vídeo e ferramenta de modelagem desenvolvido para ser utilizado no ensino de física. Esse programa foi utilizado nesse trabalho para medir o deslocamento de um ponto do êmbolo durante o tempo do ensaio de modo a se

obter o deslocamento em função do tempo. Desse modo é possível delinear gráficos do experimento, como pode-se ver na Figura 18.

Figura 18 – Medição do experimento no Tracker.



Fonte: Próprio autor.

Para a análise dos dados, utilizou-se o Matlab 2016, por ser um software amplamente utilizado na engenharia para a realização de simulações, realização de testes estatísticos ou visualização de resultados. Além disso, o Matlab permite ao usuário criar uma rotina de modo que seja possível realizar ações repetitivas de maneira mais otimizada.

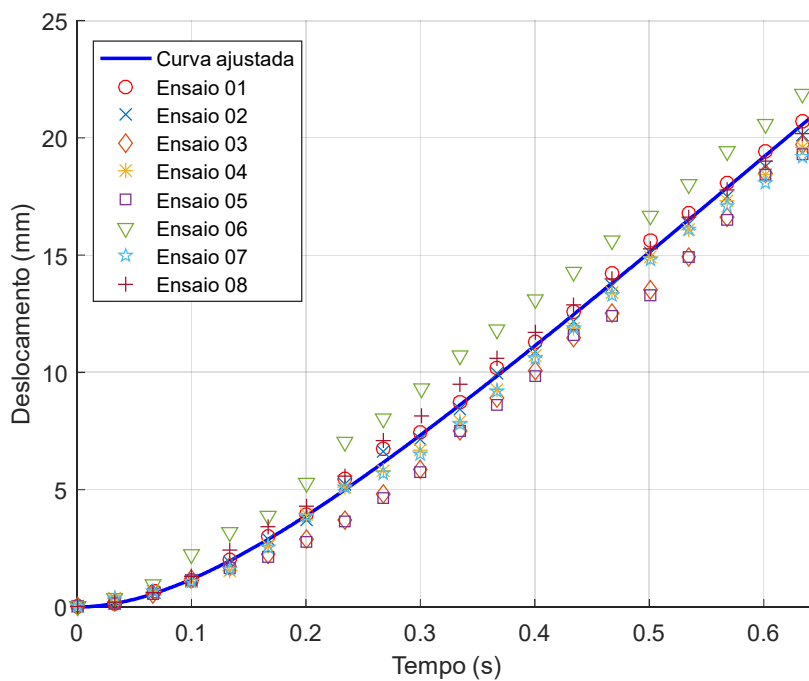
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nos experimentos bem como a discussão do motivo pela qual chegou-se nesses resultados.

5.1. Resultados

O deslocamento do êmbolo no tempo para o ensaio sem o campo magnético é apresentado no gráfico da Figura 19.

Figura 19 – Resposta do deslocamento, sem campo magnético.



Fonte: próprio autor

Para cada ensaio realizado ajustou-se uma curva no formato da equação (9), de modo a se obter os valores de τ e k . A curva ajustada foi definida como sendo a função dada pela equação (9) com os parâmetros de k e τ , como sendo a média entre os valores de k e τ obtidos pelos ensaios sem imã. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 2:

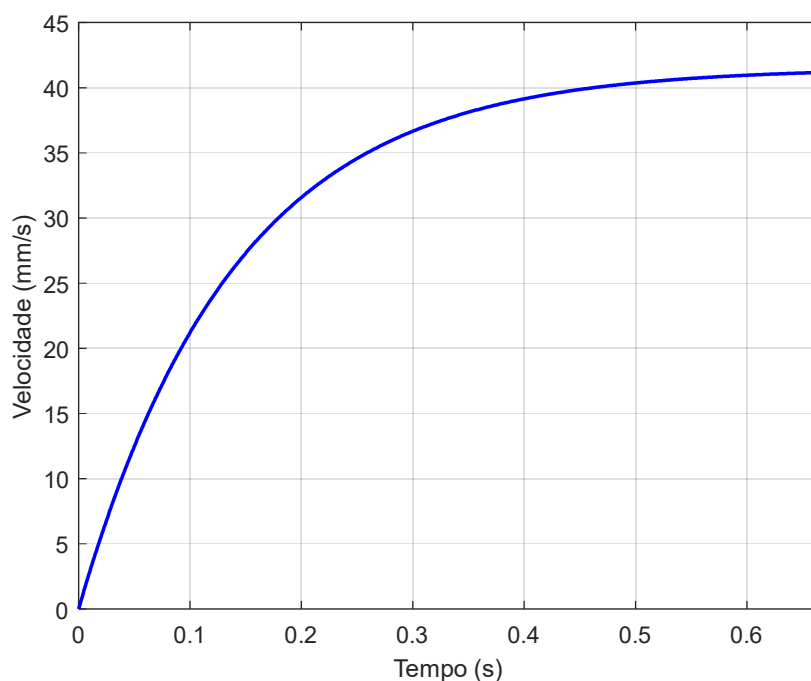
Tabela 2 – Valores de k e τ , ensaios sem campo magnético.

Sem imã	k [m/(N.s)]	τ [s]
Ensaio 01	0,0092	0,14
Ensaio 02	0,0091	0,12
Ensaio 03	0,011	0,24
Ensaio 04	0,0094	0,13
Ensaio 05	0,011	0,25
Ensaio 06	0,0088	0,057
Ensaio 07	0,0093	0,12
Ensaio 08	0,0086	0,087
Média	0,0096	0,14

Fonte: Próprio autor.

Utilizando o a curva ajustada e derivando o resultado dela em relação ao tempo obtém-se a o gráfico da velocidade em relação ao tempo, apresentado no gráfico da Figura 20.

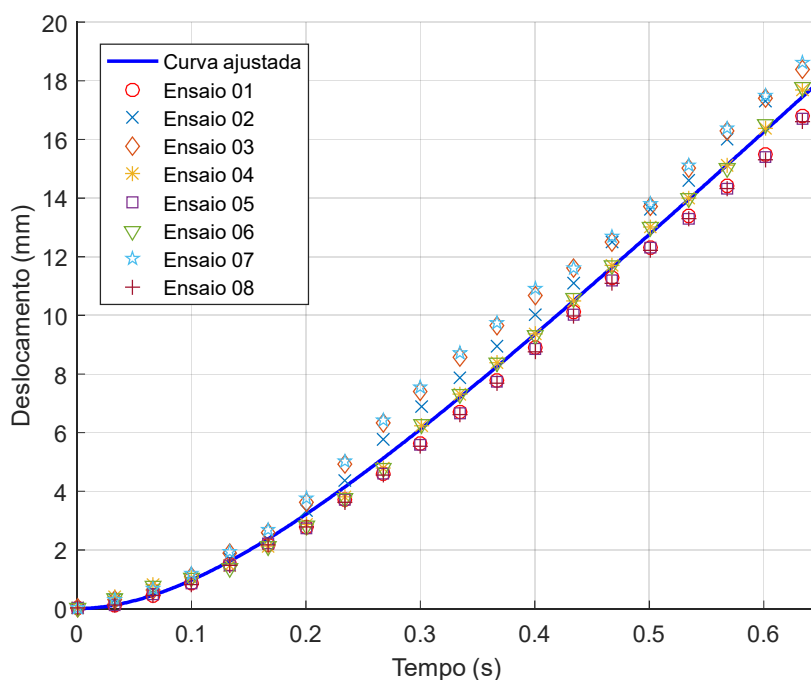
Figura 20 – Resposta da velocidade, sem campo magnético.



Fonte: Próprio autor

O deslocamento do êmbolo no tempo para o ensaio com o campo magnético de 1 imã está apresentado no gráfico da Figura 21.

Figura 21 – Resposta do deslocamento, com campo magnético de 1 imã.



Fonte: Próprio autor

Para cada ensaio realizado ajustou-se uma curva no formato da equação (9), de modo a se obter os valores de τ e k . A curva ajustada foi definida como sendo a função dada pela equação (9) com os parâmetros de k e τ , como sendo a média entre os valores de k e τ obtidos pelos ensaios com 1 imã. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 3:

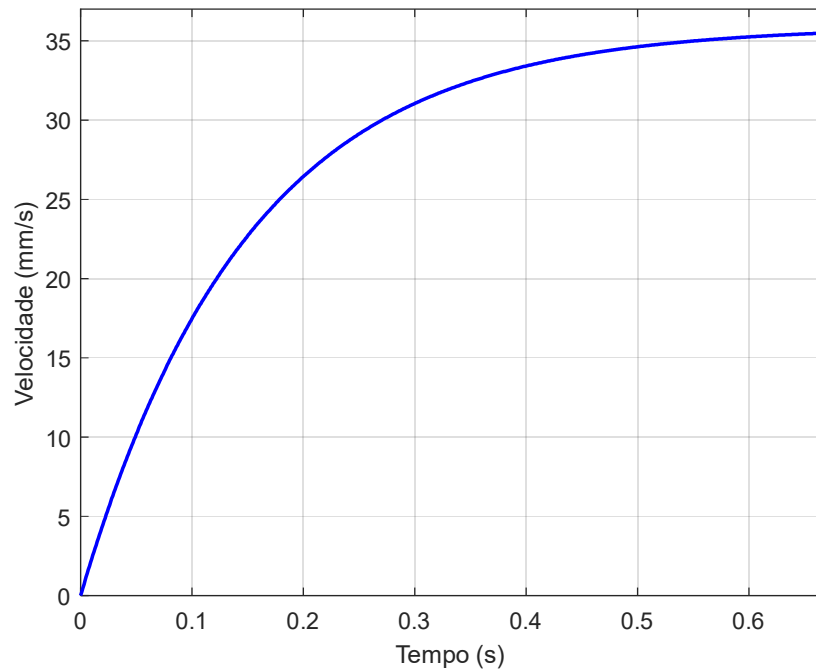
Tabela 3 - Valores de k e τ , ensaios com 1 imã.

1 Imã	k [m/(N.s)]	tau [s]
Ensaio 01	0,0088	0,17
Ensaio 02	0,0085	0,13
Ensaio 03	0,0080	0,097
Ensaio 04	0,0079	0,093
Ensaio 05	0,0083	0,17
Ensaio 06	0,0082	0,17
Ensaio 07	0,0083	0,17
Ensaio 08	0,0086	0,17
Média	0,0083	0,15

Fonte: Próprio autor.

Utilizando o a curva ajustada e derivando o resultado dela em relação ao tempo obtém-se a o gráfico da velocidade em relação ao tempo, apresentado no gráfico da Figura 22.

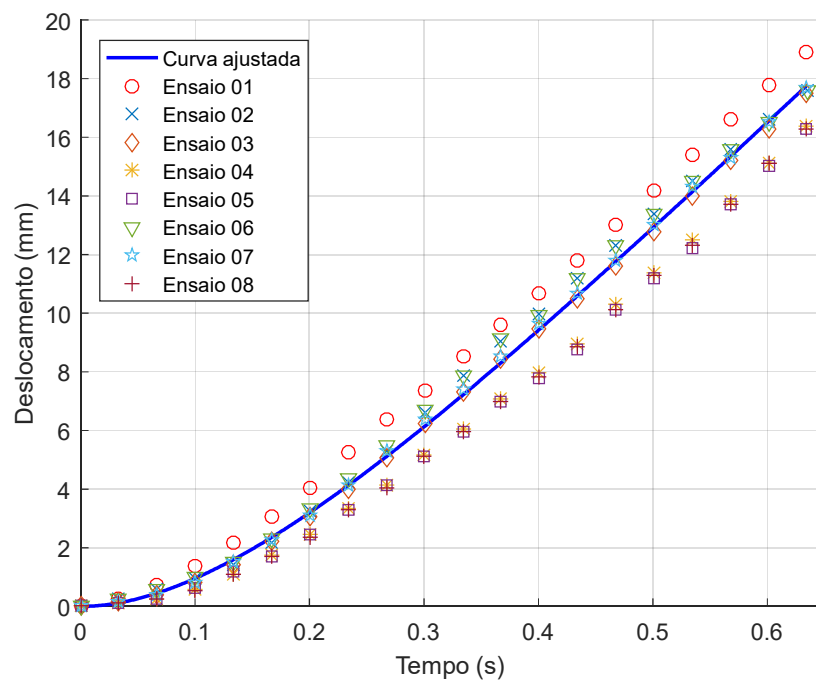
Figura 22 – Resposta da velocidade, com campo magnético de 1 imã.



Fonte: Próprio autor

O deslocamento do êmbolo no tempo para o ensaio com o campo magnético de 2 imãs está apresentado no gráfico da Figura 23.

Figura 23 – Resposta do deslocamento, com campo magnético de 2 imãs.



Fonte: Próprio autor.

Para cada ensaio realizado ajustou-se uma curva no formato da equação (9), de modo a se obter os valores de τ e k . A curva ajustada foi definida como sendo a função dada pela equação (9) com os parâmetros de k e τ , como sendo a média entre os valores de k e τ obtidos pelos ensaios com 2 imãs. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 4:

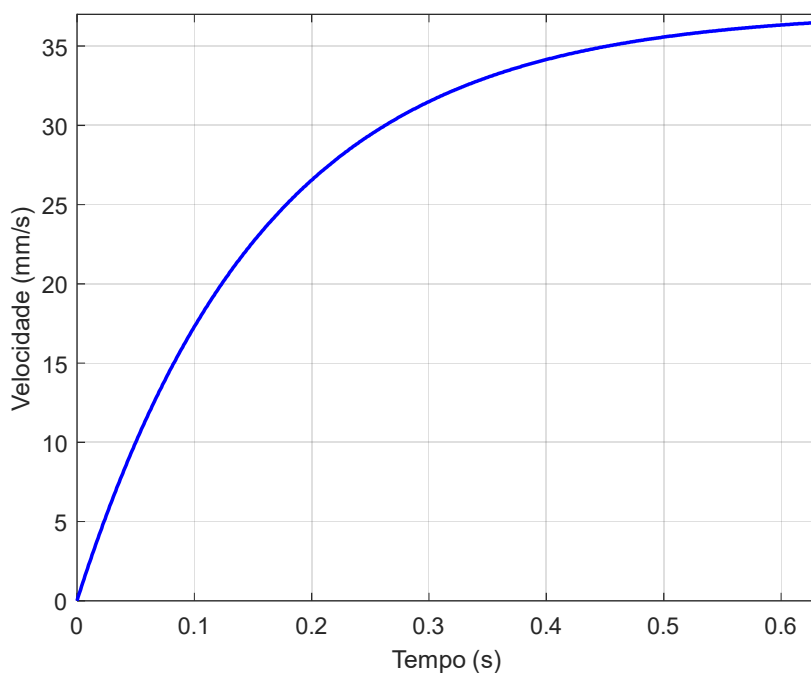
Tabela 4 - Valores de k e τ , ensaios com 2 imãs.

2 Imãs	k [m/(N.s)]	τ [s]
Ensaio 01	0,0082	0,13
Ensaio 02	0,0080	0,12
Ensaio 03	0,0084	0,15
Ensaio 04	0,0083	0,15
Ensaio 05	0,0080	0,19
Ensaio 06	0,0099	0,29
Ensaio 07	0,0081	0,094
Ensaio 08	0,0095	0,18
Média	0,0086	0,16

Fonte: Próprio autor.

Utilizando o a curva ajustada e derivando o resultado dela em relação ao tempo obtém-se a o gráfico da velocidade em relação ao tempo, apresentado no gráfico da Figura 24.

Figura 24 – Resposta da velocidade, com campo magnético de 2 imãs.



Fonte: Próprio autor.

Os valores de τ e k , obtidos para cada um dos ensaios realizados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros do sistema ajustado representativos dos ensaios.

Ensaio	Sem imã		1 Imã		2 Imãs	
	k [m/(N.s)]	tau [s]	k [m/(N.s)]	tau [s]	k [m/(N.s)]	tau [s]
01	0,0092	0,14	0,0088	0,17	0,0082	0,13
02	0,0091	0,12	0,0085	0,13	0,0080	0,12
03	0,011	0,24	0,0080	0,097	0,0084	0,15
04	0,0094	0,13	0,0079	0,093	0,0083	0,15
05	0,011	0,25	0,0083	0,17	0,0080	0,19
06	0,0088	0,057	0,0082	0,17	0,0099	0,29
07	0,0093	0,12	0,0083	0,17	0,0081	0,094
08	0,0086	0,087	0,0086	0,17	0,0095	0,18
Média	0,0096	0,14	0,0083	0,15	0,0086	0,16
Desvio Padrão	0,00098	0,068	0,00030	0,035	0,00073	0,059
Coeficiente de variação [%]	10	47	4	24	9	36

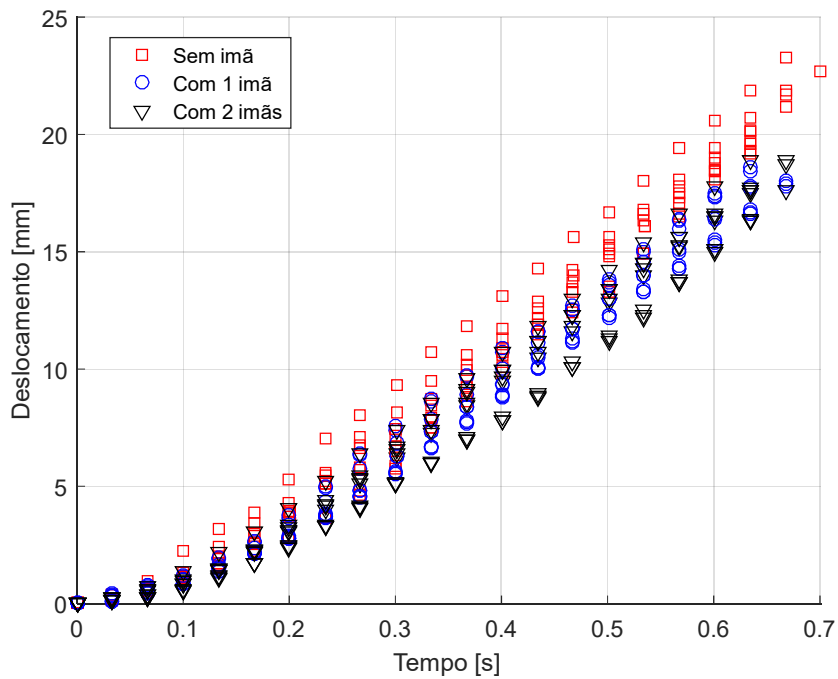
Fonte: Próprio autor.

5.2. Discussões

Nos gráficos dos deslocamentos, Figura 19; Figura 21 e Figura 23, os pontos experimentais possuem um valor máximo de deslocamento dado pelo fim de curso da seringa utilizada, porém, esses pontos não são de interesse ao estudo realizado por isso para o ajuste da curva aos pontos do gráfico optou-se por desconsiderar os últimos pontos do ensaio.

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que os deslocamentos nos ensaios na presença do campo magnético são menores. Entretanto os resultados de deslocamento entre o ensaio com 1 imã e com 2 imãs são muito próximos. Como pode ser visto na Figura 25.

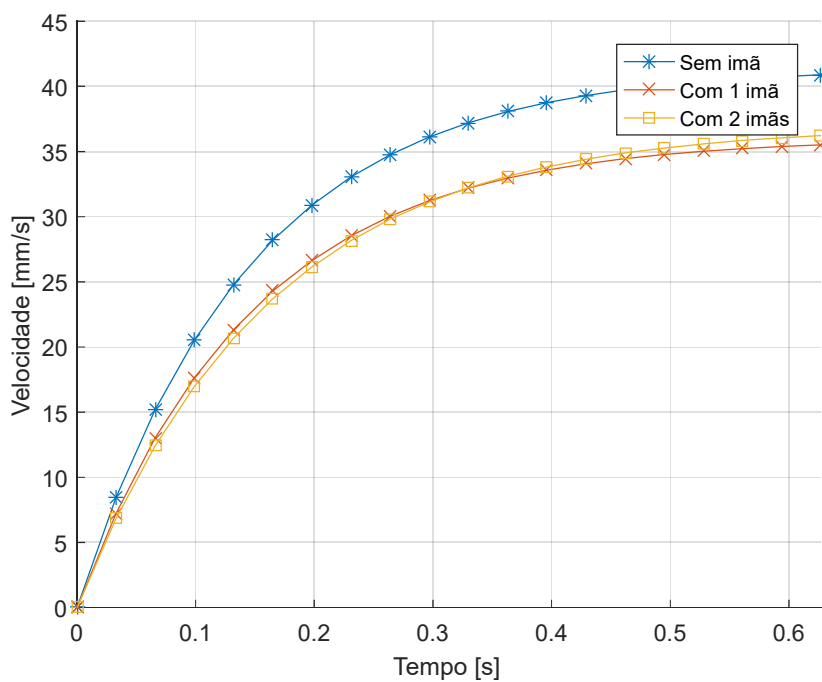
Figura 25 – Resposta do deslocamento, para diferentes intensidades de campos magnéticos.



Fonte: Próprio autor

Com os resultados obtidos é possível verificar a diferença entre a velocidade do êmbolo quando não é aplicado o campo magnético e o caso em que aplica-se um campo magnético no sistema, como pode-se ver na Figura 26.

Figura 26 – Respostas de velocidades, para diferentes intensidades de campo magnético.



Fonte: Próprio autor.

Como era esperado, nota-se que com a presença do campo magnético a velocidade máxima atingida pelo êmbolo é menor do que na ausência do campo, isso ocorre pois na presença do campo magnético há um incremento na viscosidade do fluido, gerando um maior atrito do fluido com o êmbolo móvel.

Comparando o resultado dos gráficos velocidade obtida através da derivada da curva ajustada com o gráfico da velocidade obtida através do modelo matemático, comprova-se que os parâmetros medidos, τ e k , sofreram influência do campo magnético gerado pelo imã.

Para o delineamento dos gráficos de velocidade do sistema, optou-se por derivar a curva ajustada do gráfico do deslocamento, pois, por ser um deslocamento na escala de milímetros qualquer ruído que houvesse na aquisição dos dados geraria um erro grande no resultado da velocidade.

Analisando os dados da Tabela 5 e da Figura 25, nota-se que com a presença de 2 imãs o comportamento do fluido não se alterou muito quando comparado com o ensaio com apenas 1 imã. Isso pode ter ocorrido devido ao fato da quantidade de partículas magnetizáveis no fluido não serem suficientes para gerar uma alteração no comportamento do fluido perceptível ao adicionar mais 1 imã. Porém é possível verificar a influência do campo magnético no comportamento do fluido quando se compara os resultados com a presença e a ausência do campo magnético.

Além disso, verifica-se nos dados da Tabela 5 uma dispersão nos valores de τ e k , sendo que a dispersão dos valores obtidos para k , mostrou-se menor que τ , obtidos podem ter sido causados por:

- Ruídos presentes na aquisição dos dados;
- A possível diferença na concentração de cada ensaio que apesar dos cuidados tomados em deixar o fluido homogêneo, não garante mesma concentração em todos os ensaios;
- Diferença no tamanho das partículas de toner;
- O desgaste da seringa devido o atrito do êmbolo e o corpo da seringa e a presença de partículas de toner;
- A diferença de temperatura do fluido em cada ensaio;

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

No presente trabalho de conclusão de curso, foi sintetizado um fluido MR de maneira simples e com materiais de baixo custo (óleo vegetal e pó de toner de impressora a laser). Com base nesse material, foram verificadas variações significativas nas velocidades equivalentes do dispositivo experimental montado conforme a aplicação de um campo magnético.

Inicialmente definiu-se quais seriam os materiais necessários para a realização dos ensaios, como sendo uma seringa de 10mL, um corpo de massa de 441g, 2 ímãs permanentes de neodímio e o fluido MR sintetizado com óleo vegetal e toner. Em seguida, definiu-se as concentrações dos materiais que sintetizaram o fluido MR utilizado nesse trabalho e verificou-se a alteração do comportamento da mistura na presença de um campo magnético gerado pelos ímãs permanentes.

Após a verificação, decidiu-se que o campo magnético a ser aplicado nos ensaios seria gerado pelos ímãs de neodímio. Em seguida, desenvolveu-se a modelagem matemática de modo a prever o comportamento esperado do sistema em gráficos de deslocamento x tempo e velocidade x tempo.

Posteriormente, verificou-se a influência do campo magnético no efeito de amortecimento do fluido MR no sistema real através de ensaios realizados com e sem aplicação de um campo magnético e com a aplicação de um campo magnético. Para a coleta dos dados, utilizou-se o programa Tracker e então analisou-se os dados no Matlab.

A partir da análise dos dados, conclui-se que a presença de um campo magnético gera incrementos no coeficiente de amortecimento do sistema com fluido MR. Assim, há possibilidade de utilização de uma mistura com toner e óleo vegetal para aplicações em que seja desejado uma variação do amortecimento no sistema em tempo real.

Porém, verificou-se também que a repetibilidade dos resultados pode ter sido influenciada por fatores que não foram medidos como: o ruído na aquisição de dados, desgaste da seringa, tamanho das partículas de toner, a temperatura do fluido, o atrito dinâmico entre a seringa e o êmbolo, entre outros.

Concluiu-se, também, que as simplificações adotadas na modelagem matemático desenvolvido, para descrever o comportamento do sistema com fluido MR, como, considerar o fluido homogêneo, comportamento linear do sistema, entre outros, fizeram com que os

resultados obtidos não fossem como o esperado, por exemplo a redução no valor de τ com a presença do campo magnético.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Este trabalho apresentou uma verificação da influência de um campo magnético sobre um fluido MR à base de toner e óleo vegetal. De modo a dar continuidade a esse trabalho alguns temas para trabalhos futuros são propostos:

- A construção de um protótipo em maior escala de modo a se reduzir os erros na aquisição de dados devido a ruídos;
- Desenvolver um protótipo mais próximo de um amortecedor hidráulico real, monotubo ou bitubo;
- Variação das concentrações entre óleo e toner de modo a se verificar a influência do campo no efeito de amortecimento para diferentes concentrações, variação dos posicionamentos dos imãs;
- Gerar o campo magnético sobre o dispositivo utilizando um circuito elétrico;
- Desenvolver uma relação matemática entre o campo magnético e o amortecimento gerado pelo fluido MR no dispositivo;
- Desenvolver um sistema para controlar o amortecimento do sistema ao variar a intensidade do campo magnético aplicado;
- Desenvolver a análise de um sistema massa-mola-amortecedor com amortecedor MR;
- Verificar a influência da temperatura no efeito de amortecimento de um fluido MR;
- Desenvolver método para evitar a sedimentação do toner no fluido MR.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

4x4 BRASIL, **Off limits – Entendendo o básico dos amortecedores.** (2014). Disponível em: <<https://www.4x4brasil.com.br/forum/canal-de-comunicacao-anunciantes/133711-off-limits-entendendo-o-basico-dos-amortecedores.html>> Acesso em 05 dez. 2019.

BATOCCHIO, A.; GUERREIRO, D. J. Estudo, caracterização e potencial de aplicação do fluido magneto-reológico. In: CONGRESSO INTERNO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. 11., 2011, Campinas, 2011. Disponível em: <<https://www.prp.unicamp.br/pibic/congressos/xixcongresso/paineis/094730.pdf>>

CHENG, H. B. et al. Effect of storage and ball milling on the sedimentation and rheology of a novel magnetorheological fluid. **Journal of Physics: Conference Series**, Wuhan, v. 149, p. 1-5, 2009.

DE VICENTE, J.; KLINGENBERG, D. J.; HIDALGO-ALVAREZ, R. Magnetorheological fluids: A review. **Soft Matter**, v. 7, n. 8, p. 3701–3710, 2011.

DIXON, J. C. **The Shock Absorber Handbook:** Second Edition. 2ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2007.

FERNANDES, D. B. **Controle híbrido para minimização de vibrações.** 2016. p. 66. Dissertação (Mestrado em Mecânica dos sólidos). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016.

GALAVOTTI, T. V. **Sistemas dinâmicos com amortecedores ativos controlados por atuadores piezelétricos.** 2010. p. 165. Dissertação (Mestrado em Mecânica dos sólidos). Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

GAO, F.; LIU, Y. N.; LIAO, W. H. Optimal design of a magnetorheological damper used in smart prosthetic knees. **Smart Materials and Structures**, v. 26, n. 3, p.9, 2017.

LAGOIN, T. G. **Análise de Desempenho de Suspensões Semi-Ativas Dotadas de Amortecedores Magnetoreológicos.** 2017. p. 130. Tese (Doutorado em Mecânica dos sólidos). Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2017.

MESQUIDA, C. D.; LÄSSIG, J. L. Characterization of simple magnetorheological fluids with potential application in engineering. **International Journal of Engineering and Inovative Technology**. v. 4, n. 3, p. 40–47, 2014.

ROCHA, T. S. **Desenvolvimento de prótese robótica transfemural: Projetos mecânico e de atuação.** 2015. p. 80. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Eletrônicos e Automação, Universidade de Brasília. Brasília, 2015.

ROSA, A. P. **ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DA REOLOGIA E MICROESTRUTURA DE SUSPENSÕES MAGNÉTICAS.** 2014. p. 175. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas). Universidade de Brasília. Brasília, 2014.

SAVI, M.; A. OLIVEIRA, S. Os Materiais Inteligentes e suas Aplicações. **Revista Marítima Brasileira**, v.133, p. 39–56, 01 2013.

SUKHWANI, V. K.; HIRANI, H. Synthesis and characterization of low cost magnetorheological (MR) fluids. **Behavior and Mechanics of Multifunctional and Composite Materials** 2007, v. 6526, p. 1-12, 2007.

TANAKA, M. C. **CONTROLE INTELIGENTE DE VIBRAÇÕES UTILIZANDO AMORTECEDOR MAGNETO REOLÓGICO.** 2017. p. 133. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2017.

TUSSET, Â. M. **Controle ótimo aplicado em modelo de suspensão veicular não linear controlada através de amortecedor magneto-reológico.** 2008. p. 174. Tese (Doutorado em Mecânica dos Sólidos). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

ANEXOS

ANEXO A.1 – Rotinas do Matlab para plotar curvas teóricas.

```

clear all, clc;
close all;

c=.441*9.81;    %Força de entrada [N]
t=0:0.033:1;    %Tempo [s]

s=tf('s');
i=1;
tau=[0.1,0.15, 0.2];    %Valores da constante de tempo tau [s]
k=[0.008, 0.01, 0.012];    %Valores do ganho da função de transferência
[m/(N.s)]
figure(1)
grid on
hold on
for i=1:3
    FT=k(i)/(tau(i)*s^2+s); %FT deslocamento x Força
    FTd=step(c*FT,t);
    if i==1
        plot(t,FTd*1000,'*-')
    elseif i==2
        plot(t,FTd*1000,'x-')
    else
        plot(t,FTd*1000,'s-')
    end
end
xlabel ('Tempo [s]');
ylabel ('Deslocamento [mm]')
legend('k=0.008m/(N.s), tau=0.2s','k=0.010m/(N.s), tau=0.2s',
'k=0.012m/(N.s), tau=0.2s')
hold off

figure (2)
grid on
hold on
for i=1:3
    FT=k(2)/(tau(i)*s^2+s); %FT deslocamento x Força
    FTd=step(c*FT,t);
    if i==1
        plot(t,FTd*1000,'*-')
    elseif i==2
        plot(t,FTd*1000,'x-')
    else
        plot(t,FTd*1000,'s-')
    end
end
xlabel ('Tempo [s]');
ylabel ('Deslocamento [mm]')
legend('k=0.010m/(N.s), tau=0.1s','k=0.010m/(N.s), tau=0.2s',
'k=0.010m/(N.s), tau=0.3s')
hold off
%axis([0,0.2,0,5]);

figure(3)
grid on
hold on
for i=1:3

```

```

FT=k(i)/(tau(2)*s+1); %FT deslocamento x Força
FTv=step(c*FT,t);
if i==1
    plot(t,FTv*1000,'*-')
elseif i==2
    plot(t,FTv*1000,'x-')
else
    plot(t,FTv*1000,'s-')
end
end
xlabel ('Tempo [s]');
ylabel ('Velocidade [mm/s]')
legend('k=0.008m/(N.s), tau=0.2s','k=0.010m/(N.s),
tau=0.2s','k=0.012m/(N.s), tau=0.2s')
hold off

figure(4)
grid on
hold on
for i=1:3
    FT=k(2)/(tau(i)*s+1); %FT deslocamento x Força
    FTv=step(c*FT,t);
    if i==1
        plot(t,FTv*1000,'*-')
    elseif i==2
        plot(t,FTv*1000,'x-')
    else
        plot(t,FTv*1000,'s-')
    end
end
xlabel ('Tempo [s]');
ylabel ('Velocidade [mm/s]')
legend('k=0.010m/(N.s), tau=0.1s','k=0.010m/(N.s),
tau=0.2s','k=0.010m/(N.s), tau=0.3s')
hold off

figure(5)
grid on
hold on
for i=1:3
    FT=k(i)/(tau(2)+1/s); %FT deslocamento x Força
    FTa=step(c*FT,t);
    if i==1
        plot(t,FTa*1000,'*-')
    elseif i==2
        plot(t,FTa*1000,'x-')
    else
        plot(t,FTa*1000,'s-')
    end
end
xlabel ('Tempo [s]');
ylabel ('Aceleração [mm/s^2]')
legend('k=0.008m/(N.s), tau=0.2s','k=0.010m/(N.s),
tau=0.2s','k=0.012m/(N.s), tau=0.2s')
hold off

figure(6)
grid on
hold on
for i=1:3
    FT=k(2)/(tau(i)+1/s); %FT deslocamento x Força
    FTa=step(c*FT,t);

```

```
if i==1
    plot(t,FTa*1000,'*-')
elseif i==2
    plot(t,FTa*1000,'x-')
else
    plot(t,FTa*1000,'s-')
end
end
xlabel ('Tempo [s]');
ylabel ('Aceleração [mm/s^2]')
legend('k=0.010m/(N.s), tau=0.0s','k=0.010m/(N.s),
tau=0.2s','k=0.010m/(N.s), tau=0.3s')
hold off
```

ANEXO A.2 – Rotina para plotagem dos pontos experimentais e da curva ajustada.

```

clear;
close all;
clc;
tau=0.147013;           %Valor médio de tau p
k= 0.008325;           %Valor médio de k
aux1=5;                %Valor inicial do ajuste 10^aux1 [variar de 1 a 7]
c=.441*9.81;          %Força de entrada
%ENSAIO 01
load 2ima04;
t=A(:,1);
y=A(:,2);

hold on
grid on
tn=0:0.001:max(t);
s=tf('s');
FT= k/(tau*s^2+s);
FTd=step(c*FT,tn);
plot(tn,FTd*1000,'b','LineWidth',1.5)
axis([0,inf,0,20]);

% %PONTOS ENSAIO 01
plot (t,y*1000,'ro')

% %PONTOS ENSAIO 02
load 2ima03
t=A(:,1);
y=A(:,2);
plot (t,y*1000,'x');

% %PONTOS ENSAIO 03
load 2ima01
t=A(:,1);
y=A(:,2);
plot (t,y*1000,'d');

% %PONTOS ENSAIO 04
load 2ima08
t=A(:,1);
y=A(:,2);
plot (t,y*1000,'*');

% %PONTOS ENSAIO 05
load 2ima05
t=A(:,1);
y=A(:,2);
plot (t,y*1000,'s');

% %PONTOS ENSAIO 06
load 2ima06
t=A(:,1);
y=A(:,2);
plot (t,y*1000,'v');

% %PONTOS ENSAIO 07
load 2ima07
t=A(:,1);
y=A(:,2);

```

```
plot (t,y*1000,'p');

% %PONTOS ENSAIO 08
load 2ima02
t=A(:,1);
y=A(:,2);
plot (t,y*1000,'+');

% title('Deslocamento')
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Deslocamento (mm)');
legend('Curva ajustada','Ensaio 01','Ensaio 02','Ensaio 03','Ensaio
04','Ensaio 05','Ensaio 06','Ensaio 07','Ensaio 08')
hold off

%Gráfico da velocidade
figure (2)
FT=k/(tau*s+1);
FTv=step(c*FT,tn);
% G=c*k*(1-exp(-(tau)*t));
%hold on
plot(tn,FTv*1000,'b','LineWidth',1.5)
axis([0,inf,0,37]);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Velocidade (mm/s)');
grid on
hold off
```