



INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior
de Tecnologia e Gestão

Desenvolvimento de um protótipo de amortecedor magnético para controlo passivo de vibrações

Ricardo Jorge Meles Oliveira

Relatório Final de Dissertação apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão

Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial

Outubro 2016



INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA Escola Superior
de Tecnologia e Gestão

Desenvolvimento de um protótipo de amortecedor magnético para controlo passivo de vibrações

Ricardo Jorge Meles Oliveira

Relatório Final de Dissertação apresentado à
Escola Superior de Tecnologia e de Gestão
Instituto Politécnico de Bragança

para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Industrial

Orientador:

Dr. Manuel Teixeira Braz César

Outubro 2016

“O único lugar onde sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.” Albert Einstein

Resumo

Os sistemas clássicos de dissipação de energia baseiam-se na utilização de dispositivos passivos (e.g., isoladores, amortecedores viscosos, etc.) que armazenam /dissipam energia apenas com atuação mecânica e sem qualquer tipo de sistema de controlo. Estes sistemas são mais comuns por serem simples e baixo custo. O aparecimento de novos materiais potenciou a investigação de novos dispositivos de controlo que são mais eficientes. Neste contexto, este trabalho pretende-se projetar um novo tipo de amortecedor magnético para dissipação de vibrações mecânicas. O amortecedor é composto por um conjunto de ímanes permanentes de neodímio (NdFeB) que serão colocados no interior de um tubo de cobre. Esta configuração permite aproveitar as correntes elétricas que são induzidas no condutor pela variação do fluxo do campo magnético (correntes de Eddy) para reduzir o movimento dos ímanes através do chamado amortecimento magnético. Numa primeira fase será construído um modelo experimental projetado para satisfazer especificações pré-definidas, nomeadamente a capacidade de amortecimento, o nível máximo de carga e curso do amortecedor. Com base nos resultados experimentais será desenvolvido um modelo numérico que permita simular o comportamento dissipativo do dispositivo. Por fim o protótipo do amortecedor será testado experimentalmente para obter o seu comportamento para várias excitações mecânicas. Finalmente, serão apresentadas as principais conclusões deste trabalho e serão propostas linhas futuras de investigação para a continuidade deste estudo.

Palavras-chave: amortecedor-magnético, correntes-de-Eddy, ímanes-permanentes.

Abstract

The classical energy dissipation systems are based on the use of passive devices (e.g., isolators, viscous dampers, etc.) that store / dissipate energy only with mechanical operations and without any type of control system. These systems are the most common ones because they are simple and present a low cost. The appearance of new materials potentiate the research and development of new monitoring devices which are more efficient.

In this context, this work aims to design a new type of magnetic damper to dissipate mechanical vibration. The damper comprises a set of permanent neodymium magnets (NdFeB) to be placed inside a copper tube. This configuration allows seizing electrical currents that are induced in the conductor by varying the flow of the magnetic field (eddy currents) to reduce the movement of magnets via so-called magnetic damping. First we will be built an experimental model designed to meet pre-defined specifications, including the damping capacity, maximum load and shock stroke. Based on the experimental results we will developed a numerical model to simulate the behavior of dissipative device. Then the damper prototype will be tested for their behavior when exposed to various mechanical excitations. Finally, they will be presented the main conclusions and proposed future research lines for the continuation of this study.

Keywords: magnetic-damper, Eddy-currents, permanent-magnets.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer, por todo empenho e dedicação, ao meu orientador Professor Manuel Braz Cesar, tornando possível ultrapassar todas adversidades e chegar ao resultado pretendido.

Quero deixar também o meu grande agradecimento a todos os meus amigos pelo apoio nesta etapa da minha vida.

Também ao instituto politécnico de bragança, a todos os docentes e funcionários que tiveram interveniência no decorrer deste projeto, especialmente aos técnicos do laboratório de tecnologia mecânica, no apoio prestado na construção do protótipo.

Por fim, mas muito importante, à minha família, por todo apoio prestado, ajudando-me a ultrapassar todos os obstáculos e dificuldades. Obrigado!

Conteúdo

| | |
|---|-------------|
| Resumo | vii |
| Abstract | ix |
| Agradecimentos | xi |
| Lista de Símbolos | xxi |
| Lista de Abreviaturas | xxii |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Objetivos | 2 |
| 1.2 Estrutura da dissertação | 2 |
| 2 Estado de arte | 4 |
| 2.1 Campo Magnético | 6 |
| 2.2 Indução, Permeabilidade e Suscetibilidade Magnética | 6 |
| 2.3 Correntes de Eddy | 8 |
| 2.4 Força sobre o ímã de amortecimento | 10 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.5 | Amortecedor | 13 |
| 2.6 | Tipos de amortecedores | 15 |
| 2.7 | Amortecedores magnéticos | 15 |
| 2.8 | Exemplos e aplicações de amortecimento magnético | 16 |
| 2.9 | Ímanes Permanentes | 17 |
| 2.10 | Propriedades ímanes permanentes | 20 |
| 2.10.1 | Ciclo de Histerese | 20 |
| 2.10.2 | Curva de Desmagnetização | 22 |
| 3 | Elaboração do protótipo | 25 |
| 4 | Simulação numérica | 30 |
| 4.1 | Etapas de uma análise magnética estática | 30 |
| 4.2 | Geometria | 31 |
| 4.3 | Características dos materiais | 31 |
| 4.4 | Tipo de análise magnética e elementos finitos | 33 |
| 4.5 | Condições de fronteira | 34 |
| 4.6 | Resultados obtidos | 35 |
| 4.6.1 | Simulação 1 | 36 |
| 4.6.2 | Simulação 2 | 38 |
| 4.6.3 | Simulação 3 | 39 |
| 4.6.4 | Simulação 4 | 41 |
| 4.6.5 | Discussão dos resultados | 42 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | Análise experimental | 44 |
| 5.1 | Adaptações e medições | 45 |
| 5.2 | Condicionamento do LVDT | 46 |
| 5.3 | Simulações | 47 |
| 5.4 | Resultados obtidos | 50 |
| 5.4.1 | Simulação 1 | 50 |
| 5.4.2 | Simulação 2 | 52 |
| 5.4.3 | Simulação 3 | 53 |
| 5.4.4 | Simulação 4 | 54 |
| 5.5 | Discussão dos resultados | 56 |
| 6 | Conclusões e trabalhos futuros | 57 |
| | Bibliografia | 59 |
| 7 | Anexos | 62 |
| 7.1 | Desenhos cotados dos componentes do protótipo | 62 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|--|----|
| 3.1 | Dimensões do protótipo | 28 |
| 4.1 | Permeabilidade relativa dos materiais | 33 |
| 4.2 | Formulação MVP (ANSYS) | 34 |
| 4.3 | Características do elemento eletromagnético PLANE13 | 34 |
| 4.4 | Valores de AZ para cada tipo de condição fronteira | 35 |
| 4.5 | Valores mínimos máximos do campo magnético das quatro simulações | 42 |
| 5.1 | Tabela com variações paramétricas (cargas) utilizadas nas simulações | 49 |
| 5.2 | Valores de tempo e velocidade da primeira simulação (1 íman) | 51 |
| 5.3 | Valores de tempo e velocidade da segunda simulação (2 ímanes) | 52 |
| 5.4 | Valores de tempo e velocidade da terceira simulação (3 ímanes) | 53 |
| 5.5 | Valores de tempo e velocidade da quarta simulação (4 ímanes) | 55 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Amortecedor MR construído em modo de corte [4] | 5 |
| 2.2 | Parte inicial da curva de magnetização B-H de materiais ferromagnéticos. O declive μ_i é a permeabilidade magnética inicial e o declive $\mu_{\text{máx}}$ é a permeabilidade magnética máxima [5] | 8 |
| 2.3 | Correntes de Eddy induzidas com o movimento descendente (queda livre) de um íman permanente [2] | 9 |
| 2.4 | Indicação longitudinal da densidade do fluxo gerada a partir de um íman permanente caindo através de um tubo de cobre [2] | 10 |
| 2.5 | Diagrama esquemático de um íman permanente, atravessando um tubo de cobre em movimento descendente [2] | 10 |
| 2.6 | Ilustração de densidade de fluxo magnético num ponto aleatório P em co- ordenadas cilíndricas [2] | 11 |
| 2.7 | Diagrama de corpo livre para um íman em movimento descendente dentro de um tubo de cobre [2] | 13 |
| 2.8 | Quatro etapas da passagem de um íman permanente no interior de um solenóide [2] | 15 |
| 2.9 | Torre de queda livre em Estocolmo e desenho do seu princípio de funcio- namento [2] | 17 |

| | | |
|------|---|----|
| 2.10 | Ímã permanente de neodímio | 20 |
| 2.11 | Ciclo de histerese de um material ferromagnético [19] | 21 |
| 2.12 | Curva de desmagnetização B - H "normal" e curva de desmagnetização Bi - H "intrínseca" para diferentes temperaturas de um ímã permanente de NdFeB, [19] | 23 |
| 3.1 | Protótipo final de amortecedor magnético elaborado em SolidWorks | 26 |
| 3.2 | CNC (controlo numérico computadorizado) | 26 |
| 3.3 | Torno mecânico | 27 |
| 3.4 | Tubo de cobre/haste de alumínio/topo/ímã | 27 |
| 3.5 | Haste com um/dois ímã(es) permanente(s) de neodímio | 28 |
| 3.6 | Haste com três/quatro ímãs permanentes de neodímio | 28 |
| 3.7 | Protótipo final do amortecedor | 29 |
| 4.1 | Geometrias utilizadas no software ANSYS das quatro simulações | 31 |
| 4.2 | Gráfico B-H da curva de desmagnetização do neodímio N52a temperatura de 20°C | 32 |
| 4.3 | Malha elementos finitos utilizada nas simulações e as condições fronteiras aplicadas | 35 |
| 4.4 | Linhas de fluxo do campo magnético produzido por 1 ímã permanentes | 36 |
| 4.5 | Intensidade do campo magnético produzido por 1 ímã permanentes | 37 |
| 4.6 | Linhas de fluxo do campo magnético produzido por 2 ímãs permanentes | 38 |
| 4.7 | Intensidade do campo magnético produzido por 2 ímãs permanentes | 39 |
| 4.8 | Linhas de fluxo do campo magnético produzido por 3 ímãs permanentes | 40 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.9 | Intensidade do campo magnético produzido por 3 ímanes permanentes . . . | 40 |
| 4.10 | Linhas de fluxo do campo magnético produzido por 4 ímanes permanentes | 41 |
| 4.11 | Intensidade do campo magnético produzido por 4 ímanes permanentes . . . | 42 |
| 5.1 | Adaptações e suportes | 45 |
| 5.2 | Protótipo com as adaptações e suportes para ensaios experimentais | 46 |
| 5.3 | LVDT utilizado no processo de medição | 47 |
| 5.4 | Placa e Arduíno UNO utilizado nas medições | 47 |
| 5.5 | Recolha de dados experimentais | 48 |
| 5.6 | Ensaio experimental com carregamento de 1 Kg | 49 |
| 5.7 | Gráfico velocidade/massa da primeira simulação | 51 |
| 5.8 | Gráfico velocidade/massa da segunda simulação | 53 |
| 5.9 | Gráfico velocidade/massa da terceira simulação | 54 |
| 5.10 | Gráfico velocidade/massa da quarta simulação | 55 |
| 5.11 | Comparação dos resultados de todas as simulações | 56 |

Lista de Símbolos

H Intensidade do campo magnético

H_c Campo magnético coercivo

B Fluxo magnético

B_r Fluxo magnético residual

μ Permeabilidade magnética

μ₀ Permeabilidade magnética no vazio

μ_r Permeabilidade magnética relativa

μ_i Permeabilidade magnética inicial

M Intensidade de magnetização

J Densidade de corrente

F_z Força de amortecimento

F_g Força gravítica

m Massa do íman

Lista de Abreviaturas

MR Amortecedor magneto-reológicos

BS Indução de saturação

B-H Curva de desmagnetização

NdFeB Neodímio-ferro-boro

AlNiCo Alumínio-Níquel-Cobalto

EMD Amortecedor eletromagnético

NdFeB Neodímio-ferro-boro

FEM Método de elementos finitos

MVP Formulação de potencial vetor magnético

GDLs Graus de liberdade

MPS Método potencial magnético escalar

LVDT Transformador Diferencial Variável Linear

SI Sistema Internacional

SmCo5 Samário-cobalto

CNC Controlo numérico computadorizado

Capítulo 1

Introdução

Recentes pesquisas levaram a grandes progressos em relação a vários tipos de geometrias e/ou projetos de amortecedores. As melhorias na computação numérica, e os resultados experimentais permitiram a concepção de dispositivos de amortecimento mais eficientes e com um melhor comportamento.

Quando um condutor em movimento intercepta um campo magnético estacionário, ou vice-versa, uma corrente de Eddy é gerada [2]. O movimento entre o condutor e o campo magnético gera correntes de Eddy dentro do condutor, estas correntes induzem o seu próprio campo magnético com a polaridade oposta do campo aplicado, o que faz com que se gere uma força repulsiva entre o íman e o condutor. Estas correntes dissipam-se devido a resistência elétrica e essa força irá, eventualmente, desaparecendo. Este conceito pode-se utilizar como amortecimento, sob a forma de amortecimento viscoso.

Foram desenvolvidos há algumas décadas, várias aplicações utilizando correntes de Eddy, para amortecimento dinâmico de sistemas mecânicos, tal como o sistema de travagem magnético e o controlo lateral de vibração de máquinas rotativas.

O presente estudo investiga numericamente e experimentalmente as características de amortecimento resultantes de correntes de Eddy quando um íman permanente é colocado em um tubo condutor. As experiências incluem um ensaio experimental, segundo o qual

um ímã é largado (queda livre) num tubo de cobre para medir a força de amortecimento.

1.1 Objetivos

O presente projeto tem como principal objetivo o desenvolvimento e análise de um protótipo de amortecedor magnético para redução de vibrações em equipamentos, maquinaria e/ou estruturas.

Pode-se dividir esta dissertação em três objetivos:

- Construção do protótipo experimental do amortecedor;
- Desenvolvimento de um modelo numérico que permite simular o seu comportamento;
- Ensaios laboratoriais para obter o seu comportamento para várias excitações mecânicas;

1.2 Estrutura da dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. Em baixo serão descritos de uma forma sucinta cada um deles.

Capítulo 1:

Enquadramento do tema em estudo, breve explicação do que irá ser aplicado ao longo deste trabalho assim como os principais objetivos.

Capítulo 2:

Neste capítulo é apresentado os fundamentos teóricos necessários para a elaboração da dissertação, como definição de amortecedor e tipos de amortecedores, mais propriamente amortecedores magnéticos, será também apresentada uma evolução histórica e propriedades de ímanes permanentes e definição de correntes de Eddy.

Por fim neste capítulo é mostrado exemplos onde pode ser aplicado amortecimento magnético.

Capítulo 3:

No capítulo 3 é apresentada a etapa de elaboração do protótipo final. Inicialmente foi modelado o protótipo no software 3D SolidWorks, e posteriormente foram maquinadas e construídas todas as peças necessárias para chegar ao protótipo final.

Capítulo 4:

Esta secção da dissertação apresenta a modelação numérica. Nesta modelação numérica primeiramente foi apresentada a geometria para o estudo, as características dos materiais utilizadas nas várias simulações, o tipo de análise e de elementos finitos usados para o cálculo do problema, bem como por fim os resultados obtidos.

Capítulo 5:

No capítulo 5 descreve a parte experimental desta dissertação. Inicialmente será apresentado algumas adaptações necessárias para a realização dos ensaios experimentais, bem como o condicionamento do mecanismo de medições. Será descrito todo o processo realizado nas simulações efetuadas e também os resultados obtidos.

Capítulo 6:

São apresentadas conclusões dos resultados obtidos e também serão apresentadas propostas e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado de arte

Em diversas aplicações da engenharia é frequente a necessidade de controlar e/ou atenuar as vibrações de diferentes sistemas mecânicos de forma a minimizar o seu efeito no desempenho dos sistemas bem como melhorar o conforto dos operários e utilizadores dos mesmos. As soluções existentes para efetuar esse controlo são diversas, contudo, nem todas conseguem abranger a diversidade de perturbações dos diferentes sistemas mecânicos.

Existem três grandes grupos de sistemas de controlo para atenuar os efeitos causados por vibrações indesejadas, são eles os sistemas de controlo passivo, ativo e semi-ativo [12]

Os sistemas de controlo passivo são os sistemas mais simples e económicos uma vez que não necessitam de uma fonte de energia externa, atuando diretamente com as propriedades físicas (massa, rigidez e amortecimento) dos sistemas.

Os sistemas de controlo ativo permitem o controlo de vibrações de diversas frequências através da utilização de atuadores, sensores e sistemas de controlo (controlos). A utilização destes componentes pode requerer uma elevada quantidade de energia, o que geralmente obriga a presença de uma fonte de energia externa, que pode nem sempre estar disponível (corte de energia, por exemplo), e que acarreta elevados custos de energia.

Os sistemas de controlo semi-ativo combinam características dos dois sistemas referidos

anteriormente. Tal como os sistemas de controlo passivo, a força de controlo é gerada através da dissipação da energia do sistema, contudo, a intensidade da força pode ser controlada através de corrente elétrica com baixa potência e baixos níveis de tensão. Assim, o sistema é capaz de atuar numa maior gama de frequências do que os sistemas de controlo passivo e com um custo de funcionamento muito inferior os sistemas de controlo ativo. É de referir também que possuem maior fiabilidade, uma vez que na falta de energia, o sistema comporta-se como um sistema passivo.

Em destaque encontram-se os sistemas de suspensão com controlo semi-ativo à base de fluidos magneto-reológicos. Isto é, o amortecedor tradicional é substituído por um amortecedor MR em que as propriedades reológicas são alteradas em função do campo magnético a que é submetido, figura 2.1 [12].

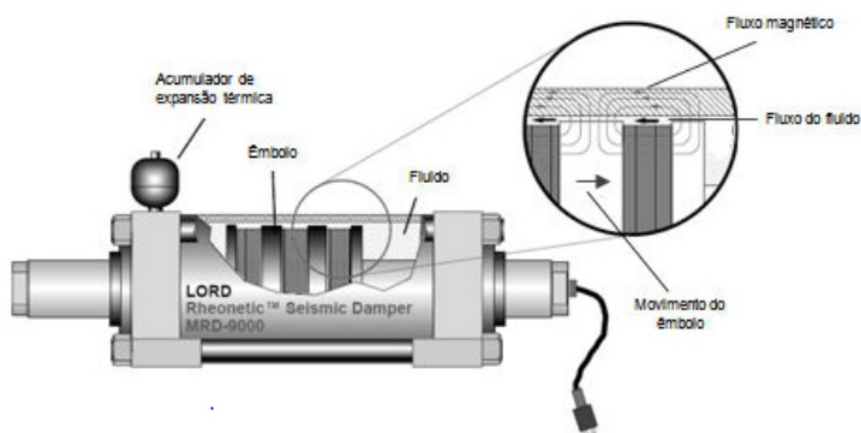


Figura 2.1: Amortecedor MR construído em modo de corte [4]

Uma força de travagem é gerada quando um ímã permanente em movimento passa através de um objeto estático e condutivo. Uma mudança do campo magnético dentro o condutor gera uma força de amortecimento [2].

2.1 Campo Magnético

Um exemplo de magnetismo é o fenômeno físico associado à atração de certos materiais. Alguns materiais são inerentemente magnéticos, isto é, podem gerar um campo magnético sem a presença de uma corrente elétrica. Sabe-se que a circulação de corrente elétrica num condutor, por exemplo uma bobina, cria um campo magnético no espaço interior, bem como no exterior envolvente, a essa bobina. O “emparelhamento” de dipolos é o símbolo da interação dos elétrons que ocorre à escala atômica nos materiais magnéticos.

O magnetismo tem uma natureza dipolar, coexistindo sempre dois polos ou centros magnéticos num campo magnético, separados por uma certa distância.

Os campos magnéticos estáticos são produzidos por correntes elétricas estacionárias ou por ímanes permanentes. Quando as cargas se movem com velocidade constante é gerado um campo magnético constante. Esse fluxo de corrente pode ser constituído por correntes de magnetização, como as correntes no interior de um íman permanente, correntes de feixes eletrônicos como nas válvulas eletrônicas, ou correntes de condução, como as correntes em fios condutores.

O vetor H é utilizado para definir a intensidade do campo magnético ou a força do campo magnético, sendo expresso em Ampère por metro [A/m] [5].

2.2 Indução, Permeabilidade e Suscetibilidade Magnética

Um campo magnético pode ser representado por linhas que, são denominadas linhas de indução e que, em cada ponto, têm a direção e o sentido do vetor indução magnética. O vetor B é conhecido como densidade de fluxo magnético ou indução magnética, expresso em Tesla (T) ou Weber por metro quadrado [Wb/m²].

Quando um campo magnético é aplicado no vácuo, o número de linhas do fluxo ou densidade de fluxo apresenta a seguinte relação

$$B = H\mu_0 \quad (1)$$

Onde μ_0 representa a permeabilidade magnética do vázio e toma o valor $4\pi \times 10^{-7}$ [T.m/A, ou H/m], em que H representa o vetor intensidade de campo magnético.

Quando um material ferromagnético é colocado num campo magnético, há um aumento da intensidade do campo magnético. Este aumento da magnetização é medido através da permeabilidade magnética, μ , definida como o quociente entre a indução magnética e o campo aplicado, isto é:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2)$$

A permeabilidade é o parâmetro mais importante para os materiais magnéticos macios uma vez que indica a quantidade de indução magnética que é gerada por um material quando colocado sob a ação de um determinado campo magnético [10].

A indução magnética obtém-se somando o campo aplicado com o campo exterior resultante da magnetização do material. O momento magnético induzido por unidade de volume, devido ao material, é designado intensidade de magnetização ou magnetização, e é representado pelo vetor M, medido em [A/m].

$$B = \mu_0(H + M) \quad (3)$$

A magnetização ocorre quando os dipolos magnéticos são orientados por uma interação entre o campo magnético e o material magnético. A magnetização facilita a influência do campo magnético e a presença do material faz com que mais energia magnética possa ser armazenada. Esta energia pode ser armazenada permanentemente ou temporariamente e ser usada para produzir trabalho.

Outra grandeza útil é a permeabilidade relativa, μ_r , expressa pelo quociente μ/μ_0 . Uma grande permeabilidade relativa significa que o material amplifica o efeito do campo

magnético.

A permeabilidade relativa serve para medir a intensidade do campo magnético induzido. A permeabilidade magnética de um material ferromagnético não é constante, variando quando o material é magnetizado. A permeabilidade magnética é medida pela permeabilidade inicial μ_i , e obtém-se a partir do declive da parte inicial da curva de magnetização, e pela permeabilidade máxima $\mu_{\text{máx}}$, definida pela origem e pelo ponto de inflexão da indução magnética em função do campo magnético, figura 2.2 [5].

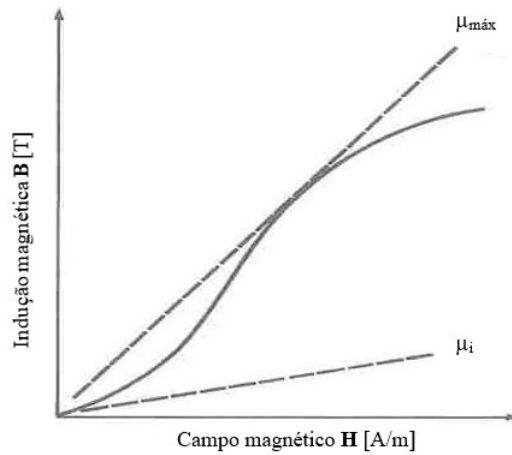


Figura 2.2: Parte inicial da curva de magnetização B-H de materiais ferromagnéticos. O declive μ_i é a permeabilidade magnética inicial e o declive $\mu_{\text{máx}}$ é a permeabilidade magnética máxima [5]

2.3 Correntes de Eddy

Existem diferentes tipos de amortecedores eletromagnéticos (EMDs), estes foram aplicados na realidade, como amortecimento passivo ou semi-passivo. Estes amortecedores produzem uma força de amortecimento através da variação de campos magnéticos nos objetos condutores.

Quando um íman permanente atravessa (em queda livre) um tubo de cobre, devido a

ação gravítica é um estado de aceleração. Mas devido a uma força de travagem que se gera, este atrasa o seu movimento. As correntes de Eddy são induzidas em cada segmento infinitesimal do tubo condutor. As alterações das correntes de Eddy no tubo inteiro podem ser divididas em duas áreas e suas direções que são mostradas na Figura 2.3.

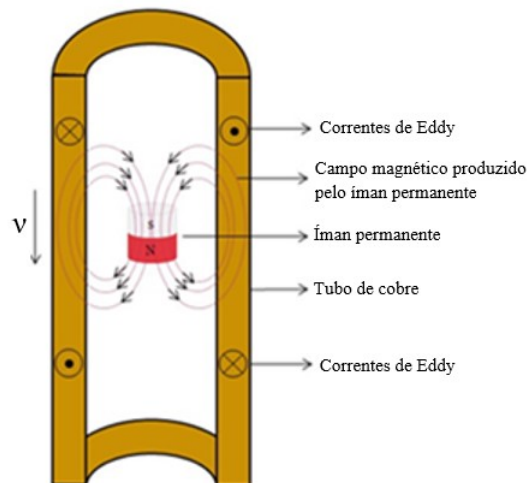


Figura 2.3: Correntes de Eddy induzidas com o movimento descendente (queda livre) de um ímã permanente [2]

A corrente induzida na área superior produz um campo magnético a fim de evitar a redução do fluxo, quando o ímã se afasta. A corrente induzida na área inferior, tem como objetivo de gerar um campo, opondo-se o campo magnético crescente [2].

A geração de correntes de Eddy podem ser descritas em mais detalhe, escolhendo qualquer pequena fatia das correntes induzidas de Eddy no tubo de cobre (ver Figura 2.4). Antes quando menos de metade do ímã passa por esse segmento infinitesimal do tubo de cobre, o campo magnético produzido pelas correntes induzidas Eddy é o oposto do campo gerado a partir do ímã. Quando mais de metade do ímã passa por esta faixa de tubo de cobre, as correntes de Eddy dentro do tubo de cobre alcançam a máxima intensidade. Quando o ímã percorre o tubo condutor, a direção das correntes de Eddy desta fatia de tubo de cobre é mudada imediatamente [2].

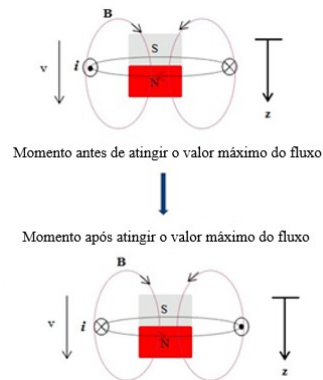


Figura 2.4: Indicação longitudinal da densidade do fluxo gerada a partir de um ímã permanente caindo através de um tubo de cobre [2]

2.4 Força sobre o ímã de amortecimento

Quando um ímã permanente cilíndrico cai axi-simetricamente em direção vertical (queda livre), são induzidas correntes de Eddy no tubo condutor, devido à mudança de densidade de fluxo atravessando a parede do tubo [7]. Portanto, a densidade de corrente J (pode ser obtida, através da velocidade de movimento do ímã, v).

$$\vec{j} = \sigma (\vec{v} \cdot \vec{B}) \quad (4)$$

Onde σ é a condutividade do material (neste caso cobre) e a densidade de decorrente. O esquema deste processo de movimento em duas dimensões é apresentada na figura 2.5.

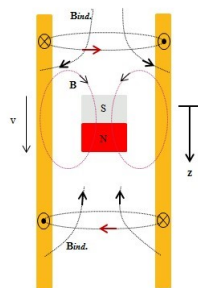


Figura 2.5: Diagrama esquemático de um ímã permanente, atravessando um tubo de cobre em movimento descendente [2]

A variação da força de amortecimento que é exercida sobre o ímã quando está em movimento descendente, que corresponde às correntes Eddy, pode ser calculada, através da densidade de fluxo e velocidade vertical. Portanto, o próximo passo é calcular a densidade do fluxo magnético em qualquer ponto P (R, θ, z) afastado do ímã, utilizando coordenadas cilíndricas (Figura 2.6).

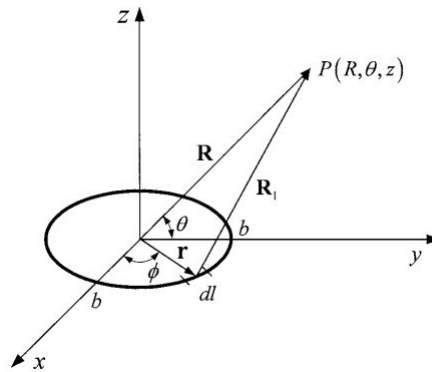


Figura 2.6: Ilustração de densidade de fluxo magnético num ponto aleatório P em coordenadas cilíndricas [2]

Assumindo que a velocidade do ímã e o seu fluxo magnético são expressos em vetores:

$$\vec{v} = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k} \quad (5)$$

$$\vec{B} = B_x \vec{i} + B_y \vec{j} + B_z \vec{k} \quad (6)$$

A densidade do fluxo magnético é definida de acordo com a lei de Biot-Savart, onde μ_0 e M_0 são a permeabilidade e a magnetização por unidade de comprimento respectivamente e $d\vec{l}$ é uma fatia infinitesimal, enquanto R_1 é uma grandeza vetorial para definir a distância entre o ponto P e a fatia de corrente.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 M_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{d\vec{l} \times R_1}{R_1^3} d\Phi \quad (7)$$

$$\vec{R}_1 = \vec{R} - \vec{r} \quad (8)$$

As relações entre todas as quantidades de vetor na Figura 2.6 são escritas como:

Onde:

$$\vec{R} = y\vec{j} + z\vec{k} \quad (9)$$

$$\vec{r} = b \cos \Phi \vec{i} + b \sin \Phi \vec{j} \quad (10)$$

Assim, o vetor de comprimento $d\vec{l}$ é obtido por:

$$d\vec{l} = \frac{d(\vec{r})}{d\Phi} = -b \sin \Phi d\Phi \vec{i} + b \cos \Phi d\Phi \vec{j} \quad (11)$$

Onde b é o raio do íman circular. Com as equações (9) e (11), na equação (7) e obtida a velocidade do fluxo magnético, que pode ser derivada através de:

$$\begin{aligned} dB_y &= \frac{\mu_0 M_0 b_z}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\sin \Phi}{(b^2 \cos^2 \Phi + y^2 z^2 - 2yb \sin \Phi + b^2 \sin^2 \Phi)^{\frac{3}{2}}} d\Phi \\ &\leftrightarrow \frac{\mu_0 M_0 b_z}{4\pi} I_y(b, y, z) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} dB_z &= \frac{\mu_0 M_0 b}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{b - y \sin \Phi}{(b^2 \cos^2 \Phi + y^2 z^2 - 2yb \sin \Phi + b^2 \sin^2 \Phi)^{\frac{3}{2}}} d\Phi \\ &\leftrightarrow \frac{\mu_0 M_0 b}{4\pi} I_z(b, y, z) \end{aligned} \quad (13)$$

Onde I_y e I_z são compostas das integrais elípticas, e aqui não fazemos uma integração completa sobre os seus limites. Então, a força de amortecimento é expressa como se pode verificar na equação 14.

$$\vec{F}_z = \int_V \vec{j} \times \vec{B} dV = 2\pi\sigma\delta v_z \int B_y^2 dz \quad (14)$$

Onde δ é a espessura do tubo de cobre e B_y é a densidade de fluxo radial.

O movimento do íman obedece a lei de Lenz, que diz que uma força de amortecimento resiste sempre a direção de movimento do íman. O diagrama de corpo livre é mostrado na figura 2.7.



Figura 2.7: Diagrama de corpo livre para um íman em movimento descendente dentro de um tubo de cobre [2]

Portanto, a força resultante sobre o íman com velocidade variável é expressa por:

$$F_g - F_z = m \frac{dv_z}{dt} \quad (15)$$

Onde f_g é a força gravítica sobre os ímanes em queda e m é a massa do íman.

2.5 Amortecedor

Um amortecedor é um dispositivo que reduz a vibração mecânica através da dissipação de energia cinética, de forma a cumprir determinados requisitos de segurança e confiabilidade.

Chama-se amortecimento o processo pelo qual a energia é retirada e/ou absorvida do sistema elástico. A energia é consumida por atrito entre as peças móveis do sistema e/ou pelo atrito interno entre as moléculas das peças do sistema, havendo uma dissipação de energia mecânica sob forma de calor e/ou som. Um amortecedor é o componente do sistema mecânico que dissipa energia mecânica, com uma função similar ao resistor que é o componente do sistema elétrico que dissipa energia elétrica do mesmo. Na modelação do amortecedor consideramos que não tem massa e rigidez.

O amortecimento de um sistema ou material pode ser classificado de três formas principais: interno, estrutural e viscoso. O interno está associado aos defeitos na microestrutura, granularidade e impurezas do material e a efeitos termoelásticos causados por gradientes locais de temperatura. Já o estrutural está associado a perdas de energia por atrito em juntas, parafusos e articulações semi-rígidas. Por último, o amortecimento viscoso ocorre por resistência ao arraste em meio viscoso, por exemplo, a conversão de energia cinética de um pêndulo em energia térmica para o ar.

Existem diversos métodos para determinação do amortecimento, os quais podem ser obtidos basicamente por dois caminhos: mediante a duração da resposta do sistema a uma excitação transitória (exemplo: método do decremento logarítmico) e em função da resposta do sistema em frequência (exemplo: método da largura de meia banda de potência). O método do decremento logarítmico calcula o amortecimento a partir da atenuação da resposta dinâmica do material ou estrutura após uma excitação por impulso. O método da largura de meia banda de potência calcula o amortecimento através da análise da frequência do sinal oriundo da vibração, a partir da relação entre a largura de banda e a frequência central de uma ressonância. Ambos os métodos consideram um modelo de amortecimento viscoelástico. A escolha do método depende principalmente da faixa do amortecimento e da frequência de vibração [3].

2.6 Tipos de amortecedores

Existem dois tipos de amortecedores, amortecedores lineares e rotativos. Um amortecedor linear é definido por seu traçado, enquanto um amortecedor rotativo é especificado por ter um coeficiente de amortecimento no binário por velocidade angular, que pode ser obtida diretamente dos fabricantes. Estes dois tipos de amortecedores têm sido utilizados, por exemplo em veículos, relés e motores. Amortecedores magnéticos foram criados usando princípios dos dois tipos de amortecedores [2].

2.7 Amortecedores magnéticos

Uma experiência simples demonstrativa do princípio por trás do mecanismo de amortecimento magnético quando um ímã passa por um solenoide em queda livre, é ilustrado na Figura 2.8.

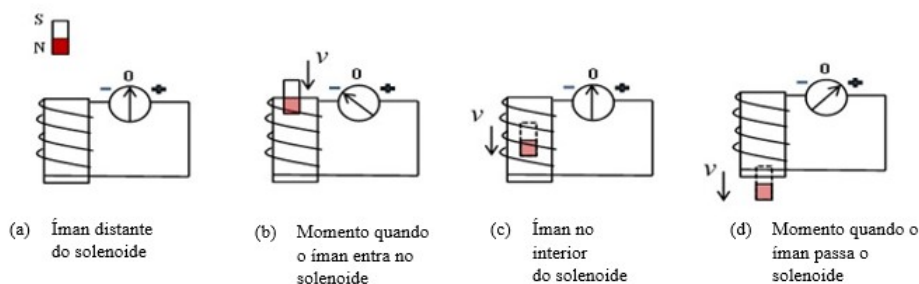


Figura 2.8: Quatro etapas da passagem de um ímã permanente no interior de um solenoide [2]

Como é mostrado na Figura 2.8, um solenoide é conectado a um amperímetro para acompanhar a mudança da corrente induzida pelo campo magnético. Antes de ser largado o ímã (a), a corrente é nula. Quando o ímã é largado e começa a entrar no solenoide (b), o ponteiro move-se para a esquerda até que o ímã chega ao meio do solenoide, onde ocorrem os picos de corrente e então depois volta novamente para zero (c) e depois, assim

que sai do solenoide, a corrente muda de direção (d), atingindo um máximo, passando para zero quando o íman está muito afastado do solenoide.

Pela lei de Faraday e Lenz, quando o íman está na parte superior do solenoide, a corrente induzida gera um campo magnético que tenta reduzir o campo magnético produzido pelo íman. Então, quando o íman passa o solenoide, uma corrente é induzida que tenta aumentar o campo para evitar o movimento do íman.

No exemplo dado, há pouca ou nenhuma oposição do sistema ao íman em movimento. No entanto se aumentarmos a quantidade de material condutor, a velocidade do íman ou a força magnética, forças de amortecimento perceptíveis começam a aparecer. Estas forças produzidas são chamadas de amortecimento magnético [2].

2.8 Exemplos e aplicações de amortecimento magnético

Diferentes tipos de amortecedores eletromagnéticos (EMDs) foram aplicados na realidade, como amortecimento e passivo e semi-passivo. O princípio de funcionamento destes amortecedores magnéticos baseia-se na da variação dos campos magnéticos em objetos condutores.

Li, Ma e Fang [11], estudaram um padrão atual de correntes de Eddy, aplicado numa carruagem de alta velocidade, o que poderia melhorar a controlabilidade, economizar energia e proporcionar mais modos de operações.

Nos parques de diversões, as torres de queda livre são uma atração muito popular (ver Figura 2.9). Nestas torres o funcionamento de travagem está relacionada com o conceito de amortecimento magnético. Ímanes permanentes são instalados sobre as cadeiras e barras verticais são montadas na torre. O fluxo magnético é protegido por placas de ferro, de tal forma que o campo magnético é conduzido para o interior do cilindro e não para o exterior, protegendo as pessoas e seus pertences ferromagnéticos de não serem afetados pelo forte campo magnético criado quando estão sentados sobre as cadeiras. Durante a queda livre,

a velocidade de pico das cadeiras podem chegar a 100km/h. A parte inferior da torre é composta por dois troços, com um cilindro de cobre em cada um deles. As correntes de Eddy são induzidos pelo movimento relativo entre os ímanes e o cobre, gerando uma força de amortecimento para reduzir a velocidade das cadeiras em apenas alguns metros (até parar o movimento).

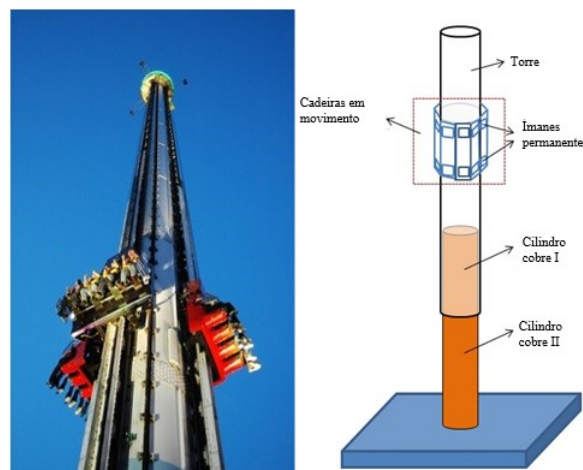


Figura 2.9: Torre de queda livre em Estocolmo e desenho do seu princípio de funcionamento [2]

2.9 Ímanes Permanentes

As observações de fenómenos magnéticos naturais remontam ao tempo da Grécia Antiga. Os gregos daquela época observaram que certos minerais de ferro, como a magnetite, apresentavam a propriedade de atrair pequenos pedaços de ferro. Essas substâncias não eram mais do que óxidos de ferro (Fe_3O_4). No estado natural, apresentam esta propriedade o ferro, o cobalto, o magnésio e muitos compostos destes metais. A esta propriedade de atração deu-se o nome de magnetismo. O nome deriva da antiga cidade da Ásia Menor, Magnésia, onde, segundo a tradição, foi observada pela primeira vez este fenómeno.

No início do século XVII, William Gilbert publicou estudos científicos que tentavam

explicar algumas das propriedades básicas do magnetismo, tendo mesmo referido técnicas de fabrico de materiais com melhores propriedades magnéticas do que aquelas observadas nos ímanes naturais.

Mais tarde, após várias experiências laboratoriais que culminaram na conceção do primeiro eletroímã em 1825, surgem enormes avanços científicos na área do eletromagnetismo como a descoberta da indução eletromagnética, por parte de Joseph Henry e Michael Faraday. Grande parte destas descobertas serviu de base para os trabalhos de engenharia desenvolvidos no fim do século XIX, tornando possível a eletrificação das sociedades industrializadas.

Consequentemente, com o crescente interesse pela utilidade dos materiais magnéticos, começaram a ser desenvolvidas várias ligas que apresentavam propriedades magnéticas muito interessantes. Em 1857, várias experiências realizadas por Madame Curie culminaram na descoberta de um material magnético com coercividade de 7 kA/m. Mais tarde, em 1917, os japoneses Honda e Takagi, demonstraram que ligas de aço contendo 30% a 40% de cobalto apresentavam uma coercividade de 20 kA/m assim como um produto energético máximo de 8 kJ/m³. Contudo, devido ao elevado preço do cobalto, assim como do processo de fabrico destas ligas, o seu preço final era bastante elevado. Atendendo, ainda, que estas ligas se desmagnetizavam facilmente e que a necessidade de dar resposta a uma crescente utilização dos materiais magnéticos era cada vez maior, surgiu uma autêntica corrida pelo desenvolvimento de novos materiais magnéticos.

Entretanto, em 1931, dá-se uma revolução na indústria dos materiais magnéticos permanentes com o surgimento dos Alnicos. Estes eram constituídos por alumínio, níquel, cobalto e ferro. A primeira liga deste material não continha cobalto, era constituída por alumínio (10%), níquel (25%) e ferro (65%). Era mais barata e apresentava uma coercividade superior quando comparada com as ligas de aço-cobalto. Com o objetivo de aumentar o produto energético máximo destes materiais, vários fabricantes testaram novos métodos de fabrico, chegando à conclusão de que a adição de cobalto a estas ligas de Al-Ni-Fe melhorava substancialmente as suas propriedades magnéticas. Para além

de um aumento do magnetismo remanescente, um aumento do valor do campo coercivo também era conseguido, fazendo com que estas ligas não se desmagnetizassem tão facilmente quando submetidas a campos magnéticos externos. De facto, os fabricantes tinham conseguido criar ímanes permanentes com ótimas propriedades magnéticas mas que apresentavam duas grandes desvantagens, tornando o seu preço final bastante elevado. A primeira prendia-se com o seu processo de fabrico, que era bastante complexo e dispendioso, e a segunda estava relacionada com o elevado preço do cobalto. Isto fez com que o seu domínio no mercado global fosse alterado com o aparecimento dos materiais magnéticos cerâmicos, vulgarmente conhecidos por ferrites. As ferrites foram desenvolvidas pela empresa Philips na década de 1940, ficando disponíveis comercialmente na década seguinte. Estes materiais apresentavam uma coercividade superior à dos Alnicos mas a mesmo não se sucedia com a sua remanescência. Outra desvantagem estava relacionada com sua baixa temperatura de Curie, o que significava que as suas propriedades magnéticas eram severamente afetadas quando estes ímanes ficavam sujeitos a elevadas temperaturas de trabalho. Contudo, o seu preço face aos Alnicos apresentava-se como uma enorme vantagem. Eram os materiais presentes no mercado com o preço por unidade de produto energético mais baixo. Atualmente, as ferrites representam cerca de 50% do mercado dos ímanes permanentes em termos financeiros. São ainda muito utilizadas nas mais diversas aplicações, pois combinam um preço relativamente baixo com um produto energético máximo razoável.

Na década de 60, surge uma terceira família de materiais magnéticos permanentes baseados em “terras raras”, como o samário e o neodímio. Inicialmente, produziram-se ímanes permanentes de samário-cobalto (SmCo_5) que rapidamente foram utilizados em aplicações aeroespaciais e militares devido ao seu elevado produto energético máximo por unidade de volume, comparativamente com os Alnicos e as ferrites.

Em 1983, a General Motors e a Sumitomo Special Metals desenvolveram os primeiros ímanes permanentes de neodímio-ferro-boro ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). Estes dois fabricantes utilizaram técnicas de fabrico diferentes tendo sido aquela desenvolvida pelo primeiro a que teve

maior aceitação comercial. Comparativamente, os ímanes de NdFeB são os que apresentam maior produto energético máximo, pois para além de uma elevada coercividade são caracterizados por uma elevada indução remanescente. Têm como principal desvantagem a sua baixa temperatura de Curie, o que limita a utilização destes ímanes em aplicações que exijam elevadas temperaturas de funcionamento [19].

2.10 Propriedades ímanes permanentes

Os ímanes permanentes são materiais magnéticos duros caracterizados por conservarem grande parte da energia magnética após a influência de um campo magnetizante externo. As suas propriedades influenciam significativamente quando dimensionados para um projeto, pelo que o seu conhecimento se torna crucial [19].

Na figura 2.10 pode-se observar um íman permanente de neodímio.



Figura 2.10: Íman permanente de neodímio

2.10.1 Ciclo de Histerese

A indução magnética B de um material depende da sua permeabilidade magnética μ e do campo de excitação magnética H que lhe é aplicado. A indução B é dada pela seguinte expressão:

Equação semelhante a equação 2, sendo esta utilizada para o cálculo da indução

$$\vec{B} = \mu \times \vec{H} \quad (16)$$

magnética.

A relação entre a indução e o campo pode ser visualizada na figura 2.11, a seguir demonstrada.

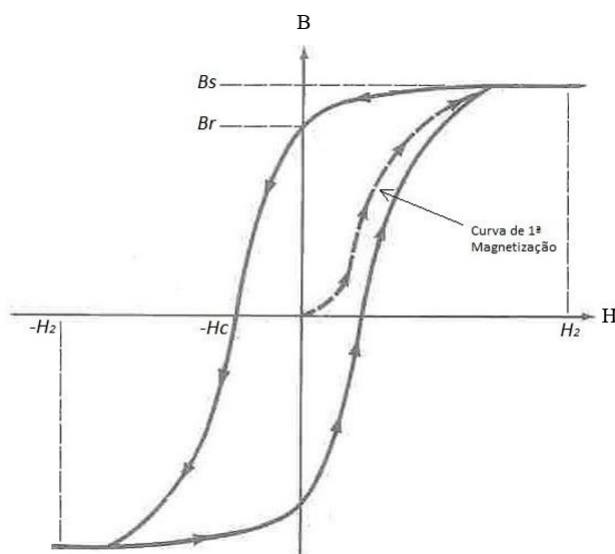


Figura 2.11: Ciclo de histerese de um material ferromagnético [19]

Ao analisar o gráfico da figura anterior, verifica-se que, na curva de magnetização (1º quadrante), à medida que a excitação magnética aumenta, a indução também aumenta até atingir a indução de saturação. Em termos físicos, significa que todos os momentos magnéticos estão orientados no mesmo sentido, sendo este o valor máximo de magnetização que o material permite obter. Se, em seguida, se diminuir o campo aplicado até zero, pode-se concluir que o material mantém um campo magnético residual ou remanente, r , e que, para o anular, é necessário aplicar um campo inverso de valor c , designado de campo coercivo.

É de notar que, quando a excitação diminui, os valores tomados pela indução são superiores aos adquiridos com excitação crescente. Há assim um atraso na desmagnetização

do material. Este fenómeno denomina-se histerese.

A histerese é comum a todos os materiais ferromagnéticos e tem origem na conversão irreversível entre a energia magnética e a energia térmica que se observa pelo aquecimento do material quando é magnetizado. Ao variar continuamente a excitação entre -2 e 2, as trocas de energia estabilizam e obtém-se um gráfico, a que se dá o nome de ciclo de histerese (figura 2.11).

Os ímanes permanentes também são conhecidos por materiais magneticamente duros, o que significa materiais ferromagnéticos com um largo ciclo de histerese [5].

2.10.2 Curva de Desmagnetização

Existem três parâmetros magnéticos de fundamental importância na escolha de ímanes permanentes. São eles, a indução remanescente B_r , a coercividade H_c e o produto energético máximo $(BH)_{\text{máx}}$.

A energia associada a um íman permanente está diretamente relacionada com a dimensão do seu ciclo de histerese. A energia potencial máxima $(BH)_{\text{máx}}$ é medida pelo maior retângulo inscrito no segundo quadrante do ciclo histerético, isto é, na curva de desmagnetização. Pode-se concluir, portanto, que a zona de maior eficiência dá-se nas condições em que o produto energético é máximo.

As curvas $B(H)$ representam a curva de desmagnetização normal do respetivo material para diferentes temperaturas. É de destacar a sua linearidade principalmente para baixas temperaturas (figura 2.12). Esta linearidade é um dos aspetos mais importantes aquando da seleção de um determinado tipo de íman permanente a utilizar, pois quanto menor for essa linearidade da curva, maior vai ser a facilidade com que o íman se vai desmagnetizar sob o efeito de um campo desmagnetizante. Pode também concluir-se que, quanto maior for a temperatura, menor será o valor do campo coercivo necessário para que ocorra a perda total do magnetismo remanescente presente no íman. No caso de a temperatura

continuar a subir, esta atingirá um valor tal que o íman desmagnetizará mesmo sem a influência de um campo desmagnetizante. Isto deve-se ao facto de a agitação atómica, devida à elevação da temperatura, provocar a desorientação dos dípolos magnéticos. A esta temperatura, a partir da qual as propriedades magnéticas dos ímanes permanentes desaparecem, dá-se o nome de temperatura de Curie.

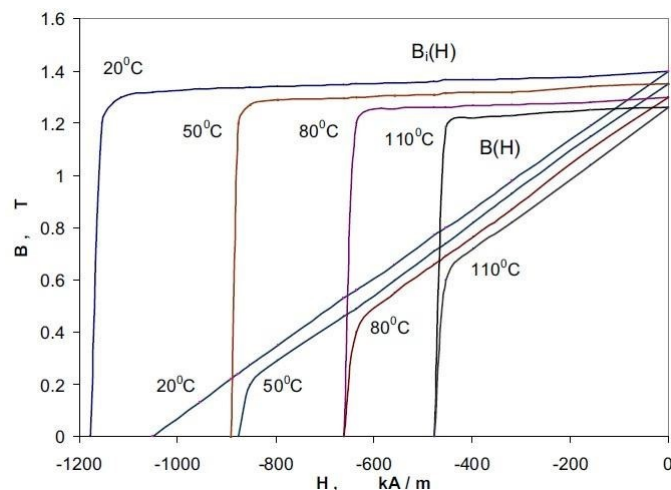


Figura 2.12: Curva de desmagnetização $B - H$ "normal" e curva de desmagnetização $B_i - H$ "intrínseca" para diferentes temperaturas de um íman permanente de NdFeB, [19]

As curvas $B(H)$ representam a curva de desmagnetização normal do respetivo material para diferentes temperaturas. É de destacar a sua linearidade principalmente para baixas temperaturas (figura 2.12). Esta linearidade é um dos aspetos mais importantes aquando da seleção de um determinado tipo de íman permanente a utilizar, pois quanto menor for essa linearidade da curva, maior vai ser a facilidade com que o íman se vai desmagnetizar sob o efeito de um campo desmagnetizante. Pode também concluir-se que, quanto maior for a temperatura, menor será o valor do campo coercivo necessário para que ocorra a perda total do magnetismo remanescente presente no íman. No caso de a temperatura continuar a subir, esta atingirá um valor tal que o íman desmagnetizará mesmo sem a influência de um campo desmagnetizante. Isto deve-se ao facto de a agitação atómica, devida à elevação da temperatura, provocar a desorientação dos dípolos magnéticos. A esta temperatura, a partir da qual as propriedades magnéticas dos ímanes permanentes

desaparecem, dá-se o nome de temperatura de Curie.

Por sua vez, as curvas $B(H)$ representam as curvas de desmagnetização devidas à presença de material ferromagnético macio em torno dos ímanes, como acontece nas máquinas de ímanes permanentes. Pode-se verificar que, neste caso, a indução magnética B_i se mantém praticamente constante à medida que a excitação magnética H aumenta até se atingir o valor do campo coercivo H_c [19].

Capítulo 3

Elaboração do protótipo

Um dos objetivos desta dissertação é a construção de um protótipo de um novo tipo de amortecedor magnético para dissipação de vibrações mecânicas. O amortecedor é composto por um tubo condutor em cobre e um conjunto de ímanes permanentes de neodímio (NdFeB) que serão colocados no seu interior.

Quando os ímanes permanentes atravessam o tubo condutor, geram-se correntes de Eddy, as quais se opõem ao campo magnético produzido, atrasando o movimento dos ímanes permanentes provocando então amortecimento magnético. O amortecedor será testado experimentalmente para obter o seu comportamento, nomeadamente a capacidade de amortecimento, o nível máximo de carga e o curso para várias excitações mecânicas.

O projeto iniciou-se com o desenvolvimento de um o modelo no software Solidworks que seguira de base á construção do protótipo. A representação esquemática do protótipo em Solidworks está ilustrada na figura 3.1.

Como se pode ver na figura 3.1, o protótipo é composto por um tubo de cobre com diâmetro de 50 mm e espessura de 12.25 mm, por 4 ímanes permanentes de neodímio com diâmetro de 23 mm e 20 mm de altura com um furo centrado de 6 mm. Foi construída uma haste em alumínio com 6 mm na parte inferior onde serão acoplados os ímanes e de 10 mm na parte superior.

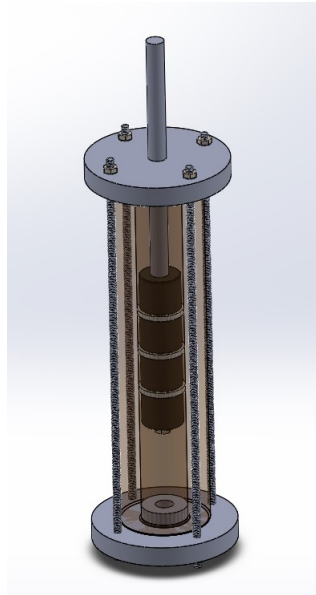


Figura 3.1: Protótipo final de amortecedor magnético elaborado em SolidWorks

Foi necessário maquinar os diversos elementos que compõem o protótipo. Foi feito um furo no tubo de cobre em toda sua extensão com diâmetro de 25.5 mm onde os ímanes de neodímio juntamente com a haste serão colocados. Foram também maquinadas duas peças em alumínio para colocar em cada topo do tubo de cobre com um furo centrado, com o diâmetro da haste (10 mm), permitindo o movimento longitudinal centrado com o tubo de cobre. Foram feitos também furos para a colocação de pernos de fixação.



Figura 3.2: CNC (controlo numérico computadorizado)

Todo o processo de construção do protótipo foi feito no laboratório de tecnologia mecânica, do instituto politécnico de bragança, foi utilizado o torno mecânico, e CNC (figura 3.2, 3.3).



Figura 3.3: Torno mecânico

Na seguinte figura pode-se observar os vários componentes do amortecedor.



Figura 3.4: Tubo de cobre/haste de alumínio/topo/íman

Nas seguintes imagens pode-se ver a configuração dos ímanes acoplados na haste de alumínio que serão utilizadas nas diferentes simulações experimentais. Esta geometria seguirá para desenvolver o modelo numérico do amortecedor magnético.



Figura 3.5: Haste com um/dois íman(es) permanente(s) de neodímio

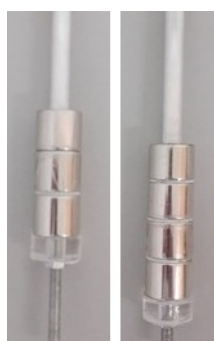


Figura 3.6: Haste com três/quatro ímanes permanentes de neodímio

Em anexo encontram-se os desenhos de definição de todos os componentes do protótipo.

As dimensões finais do protótipo estão na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Dimensões do protótipo

| Componentes do protótipo | Diâmetro interno [mm] | Diâmetro externo [mm] | Diâmetro furo [mm] | Altura [mm] | Espessura parede [mm] |
|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|-------------|-----------------------|
| Tubo de cobre | 25,50 | 50,00 | - | 205,00 | 12,25 |
| Íman neodímio | - | 23,00 | 6,00 | 20,00 | - |
| Haste alumínio | - | 10,00 | - | 235,00 | - |
| Base e topo | 25,50 | 80,00 | 10,00 | 19,00 | - |

Por fim na figura 3.7 é possível ver a montagem final do protótipo do amortecedor.



Figura 3.7: Protótipo final do amortecedor

Capítulo 4

Simulação numérica

Neste capítulo irá ser apresentada a modelação numérica do amortecedor magnético. Este modelo será utilizado para uma melhor compreensão do comportamento do protótipo quando os ímanes estão no interior do tubo de cobre. As simulações serão realizadas no software de elementos finitos ANSYS, utilizando o módulo eletromagnético.

Serão feitas quatro simulações, variando em cada uma delas o número de ímanes permanentes que esta no interior do tubo de cobre.

4.1 Etapas de uma análise magnética estática

Será elaborado um modelo FEM baseado em elementos com propriedades eletromagnéticas.

O procedimento para fazer uma análise estática magnética consiste em cinco etapas principais:

1. Criar a geometria física do modelo;
2. Construir e o modelo de malha e atribuir atributos físicos para cada região dentro do modelo;

3. Aplicar as condições de fronteira e cargas (excitação);
4. Obter a solução;
5. Análise dos resultados;

4.2 Geometria

Inicialmente, foi necessário criar a geometria no software de elementos finitos ANSYS.

Foram criadas quatro geometrias em que difere em cada uma, o número de ímanes permanentes. Na figura 4.1 é possível observar as dimensões e o posicionamento dos ímanes permanentes em cada simulação.

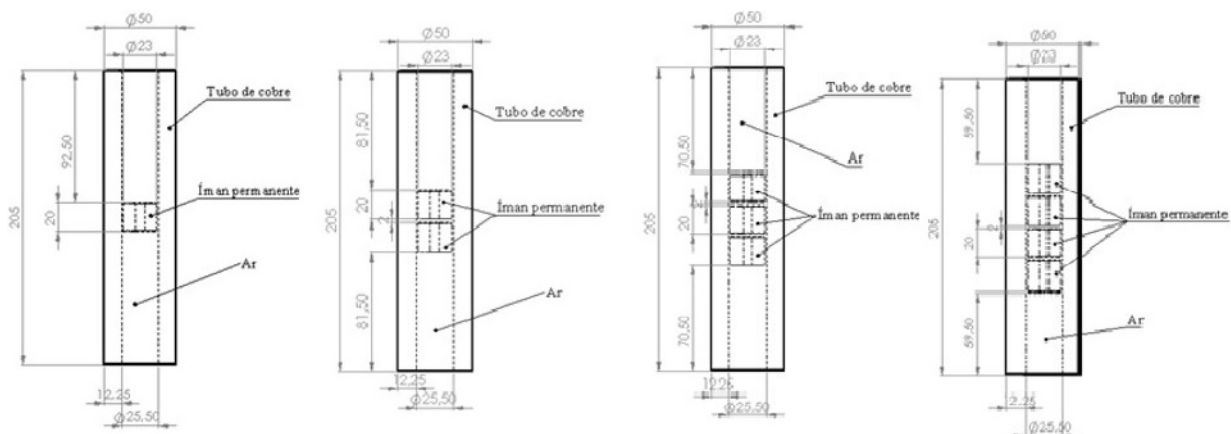


Figura 4.1: Geometrias utilizadas no software ANSYS das quatro simulações

4.3 Características dos materiais

Com a geometria criada com as dimensões do protótipo, foi necessário definir as propriedades dos materiais de cada seção da geometria. Neste caso foram definidas as seguintes propriedades eletromagnéticas: curva de desmagnetização do ímã permanente utilizado; a força coerciva e a permeabilidade relativa do cobre e do ar.

Normalmente a curva de desmagnetização do ímã permanente situa-se no 2^o quadrante do gráfico B-H, mas no software é necessário que esta esteja definida no 1^o quadrante. Para isso foi adicionada uma constante (offset), a todos os valores de H de forma a que os valores de H sejam todos positivos, como se pode ver na figura 4.2.

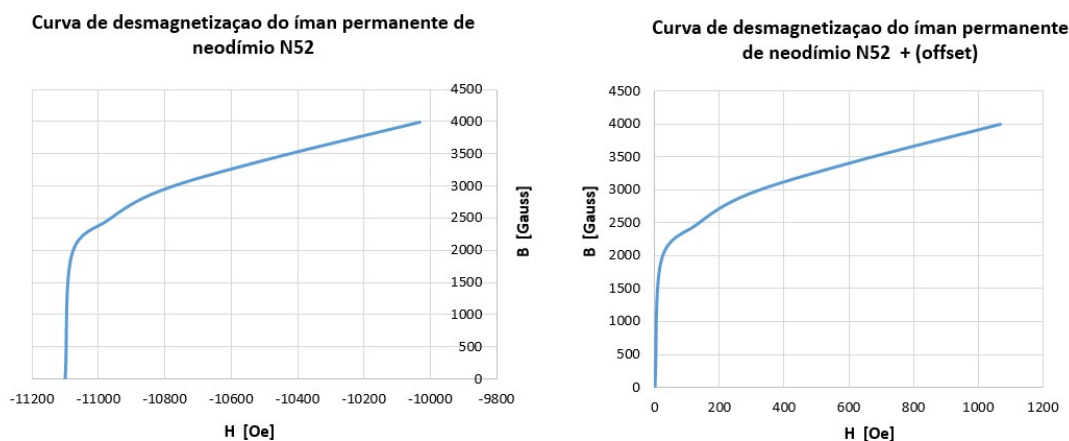


Figura 4.2: Gráfico B-H da curva de desmagnetização do neodímio N52a temperatura de 20°C

Em que H é a intensidade do campo magnético, sendo expresso em Ampère por metro [A/m] em unidades SI, ou então em Oersted [Oe] unidades do sistema CGS.

O vetor B é densidade de fluxo magnético ou indução magnética, expresso em Tesla (T) ou Weber por metro quadrado [Wb/m²] em unidades SI, ou então [Gauss] sistema de unidades CGS.

Esta constante adicionada (offset) representa a magnitude da força coerciva. Os componentes desta força são usados para orientar o eixo de magnetização do ímã permanente como eixo de coordenadas principal.

A permeabilidade magnética determina o grau de magnetização de um material que pode atingir em resposta a um campo magnético aplicado. Na tabela 4.1 pode-se observar os valores de permeabilidade dos materiais utilizados neste estudo.

| Material | Permeabilidade relativa [μ/μ_0] |
|----------|---|
| Ar | 1,00 |
| Cobre | 1,00 |
| Neodímio | 1,05 |

Tabela 4.1: Permeabilidade relativa dos materiais

4.4 Tipo de análise magnética e elementos finitos

De acordo com o manual do ANSYS, é possível fazer os seguintes tipos de análises magnéticas: estática, harmônica ou transiente.

Neste estudo foi escolhida uma análise 2-D estática, que permite observar os campos magnéticos causados por corrente contínua (DC) ou ímanes permanentes. Uma análise estática de 2-D usa uma formulação de potencial vetor magnético (MVP).

O que é a formulação de potencial vetor magnético?

A formulação do vetor magnético potencial é um dos dois métodos baseados no método nodal para análises estáticas, harmônicas e transientes.

Esta formulação tem mais (três) graus de liberdade por nó que o método potencial magnético escalar (MSP): AX, AY e AZ, o vetor magnético, graus de liberdade (GDLs) nas direções X, Y e Z.

Deve-se usar a formulação de MVP para uma análise 2-D estática magnética, resultando assim um único vetor magnético potencial com 1 grau de liberdade, AZ. A formulação MVP utiliza o elemento PLANE 53 e PLANE 13.

Na tabela 4.2 especifica os valores das propriedades dos materiais magnéticos e também os graus de liberdade.

O software ANSYS inclui uma variedade de elementos que se podem usar para efetuar análises eletromagnéticas. Na tabela 4.3 esta descrito o elemento utilizado nas simulações numéricas que foi o elemento PLANE 13.

| Região física | Corrente | Propriedades dos materiais magnéticos | GDLS |
|---|----------|---|------|
| Não-magnético (ar, cobre, alumínio) | Não | MURX (Y,Z) =1 | AZ |
| Pouco magnético (aço, ferro fundido) | Não | MURX (Y,Z) > 1 (linear) Ou Curva B-H (não-linear) | AZ |
| Muito magnético (alnico, cobalto) | Não | MURX (Y,Z), MURX (YY,ZZ) > 1 (linear) Ou Curva B-H (não-linear) | AZ |

Tabela 4.2: Formulação MVP (ANSYS)

| Elemento | Dimensão | Tipo de elemento | Nº de nós | Forma | GDLS |
|----------|----------|------------------|-----------|------------|------------------------------|
| PLANE 13 | 2-D | Sólido acoplado | 4 | Quadrático | UX, UY, TEMP, AZ UX-UY-UZ |

Tabela 4.3: Características do elemento eletromagnético PLANE13

4.5 Condições de fronteira

Para a realização das simulações foi necessário aplicar condições de fronteira. Estas cargas aplicadas especificam fluxo paralelo, campo distante, condições de fronteiras periódicas, bem como um campo magnético externo. Para o estudo em causa foi aplicado um fluxo paralelo em todas as fronteiras da geometria.

A tabela 4.4 mostra os valores de AZ necessários para cada tipo de condição de fronteira.

Na figura 4.3 pode-se visualizar a malha de elementos finitos e as condições fronteiras aplicadas na geometria do protótipo.

| Condição fronteira | Valor de AZ |
|-------------------------|--|
| Fluxo-normal | Não necessário (ocorrência natural) |
| Fluxo-paralelo | AZ=0 |
| Campo distante | Usa o elemento INFIN9 ou o INFIN110 |
| Fluxo periódico | Para análises estáticas, use recurso de simetria cíclica dos ANSYS |
| Campo magnético externo | Aplicar valores diferente de zero de AZ |

Tabela 4.4: Valores de AZ para cada tipo de condição fronteira

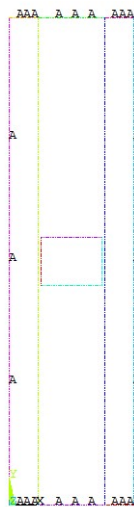


Figura 4.3: Malha elementos finitos utilizada nas simulações e as condições fronteiras aplicadas

4.6 Resultados obtidos

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados obtidos na realização de simulações efetuadas no software Ansys.

Foram efetuadas quatro simulações, em que em cada simulação variava o número de ímãs permanentes no interior do tubo de cobre. Através de uma análise magnética estática, será possível observar as linhas do campo magnético gerado quando estão ímãs permanentes no interior de um tubo condutor, bem como a grandeza de valores desse campo magnético.

Com a análise dos resultados verifica-se que o campo magnético gerado em todas as simulações tem um comportamento semelhante, tendo um formato oval. Este propaga-se no íman permanente e também se estende nas paredes do tubo de cobre. Foram retiradas duas imagens para cada simulação, que consistem na observação das linhas do campo magnético formado e também a grandeza de valores que varia esse mesmo campo magnético. Nos seguintes subcapítulos será descrito pormenorizadamente cada simulação.

4.6.1 Simulação 1

Na primeira simulação, é utilizado apenas um íman centrado no tubo de cobre. Depois de serem feitos todos procedimentos da análise estática magnética, desde a criação da geometria do protótipo no software, atribuir as características físicas dos materiais, construir o modelo de malha, e por fim a aplicação das cargas e condições de fronteira, é possível observar os resultados obtidos na simulação.

Na figura 4.4 pode-se observar a propagação das linhas do fluxo do campo magnético formado pelo íman permanente quando este se encontra no centro do tubo de cobre. As linhas do campo magnético gerado tem formato oval e propaga-se à volta do íman permanente e estende-se pelo tubo condutor de cobre.

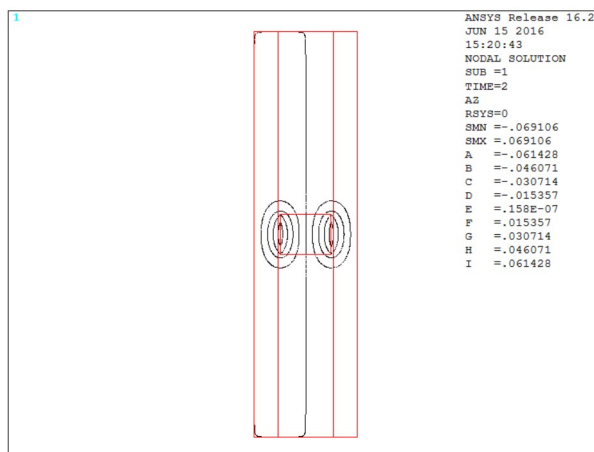


Figura 4.4: Linhas de fluxo do campo magnético produzido por 1 íman permanentes

Os valores máximos e mínimos são - 0.069106 e 0.069106 [gauss] respetivamente.

Através da análise da figura observa-se que as linhas do campo magnético são mais intensas na zona envolvente do íman permanente. Este efeito era esperado uma vez que o campo magnético é mais intenso junto à fonte magnética, ou seja, o íman permanente.

Na figura 4.5 ilustra-se a gama de valores da intensidade do campo magnético produzido pelo íman permanente. Esta representa uma solução nodal do vetor somatório de intensidade campo magnético.

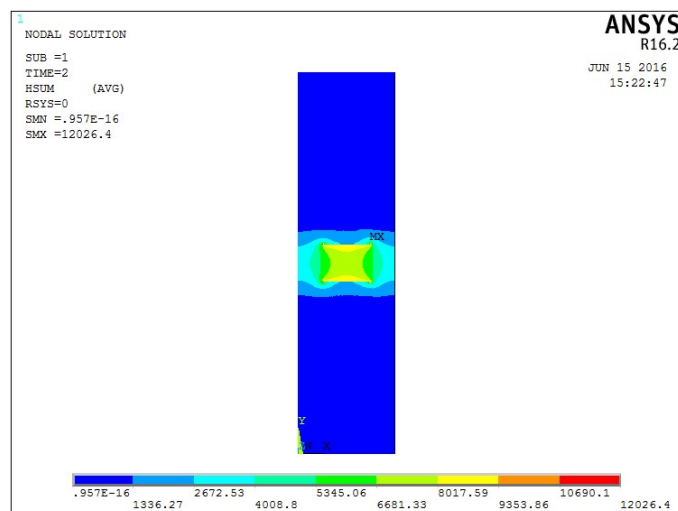


Figura 4.5: Intensidade do campo magnético produzido por 1 íman permanentes

Com a análise da figura 4.5 podemos observar que o campo magnético tem gamas de valores mais elevados na zona onde o íman se encontra (aumentando no seu interior). No topo como na base do tubo de cobre, onde o íman permanente esta mais afastado é aproximadamente zero. O valor mais elevado da intensidade do campo magnetico è no interior do íman permanente sendo aproximadamente de 12000 [Oe]. Este efeito era o esperado uma vez que o campo magnetico é mais intenso junto à fonte magnetica, ou seja, o íman permanente.

4.6.2 Simulação 2

Nesta simulação, são acoplados dois ímãs permanentes centrados no tubo de cobre separados por um pequeno intervalo como se pode ver na figura 4.6.

Todo o processo ocorrido na simulação 1 foi replicado nesta simulação variando apenas a geometria, acrescentando mais um ímã permanente.

Como já foi referido, o campo magnético tem também um formato oval, como na simulação 1 e é mais intenso onde os ímãs permanentes se encontram.

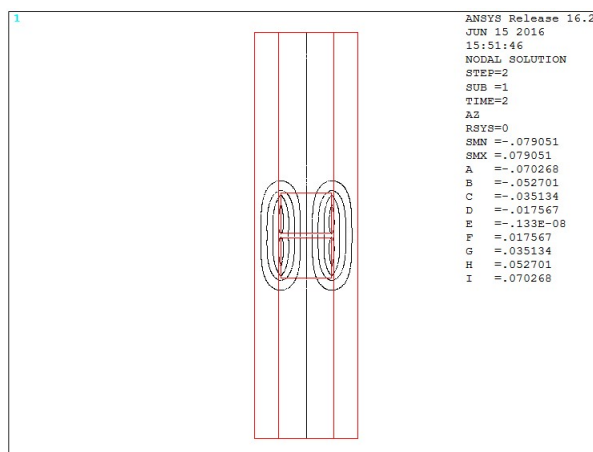


Figura 4.6: Linhas de fluxo do campo magnético produzido por 2 ímãs permanentes

Com a análise da figura 4.6, simulação com dois ímãs permanentes acoplados e centrados no tubo de cobre, o valor máximo é de 0.079051 [gauss] e mínimo de -0.079051 [gauss].

Na figura 4.7 ilustra-se a intensidade do campo magnético da segunda simulação.

Verifica-se que a zona onde os valores de intensidade do campo magnético são maiores é no interior dos ímãs permanentes e na sua envolvente. Como se observa na figura, no topo e da base da geometria e aproximadamente zero.

O valor máximo nesta simulação é de 12175 [Oe]. E de realçar que os valores máximos da intensidade do campo magnético são muito próximos com os valores de intensidade do

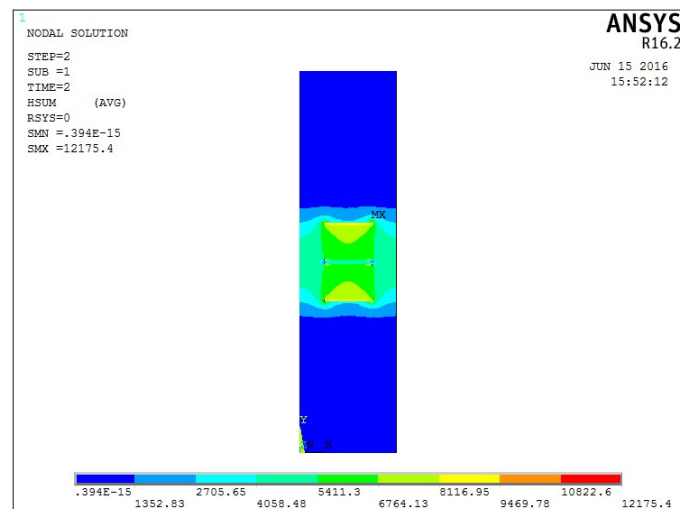


Figura 4.7: Intensidade do campo magnético produzido por 2 ímanes permanentes

campo magnético da simulação 1, ou seja, ao incrementar um íman permanente no caso em estudo não alterou o valor da intensidade do campo magnético.

4.6.3 Simulação 3

Na simulação 3, foram projetados 3 ímanes permanentes no interior do tubo de cobre. Foi feito também uma análise magnética estática e recolhidas imagens tando das linhas de fluxo do campo magnético com da intensidade.

Os resultados obtidos nesta simulação foram bastante semelhantes aos das simulações anteriores, em que as linhas do fluxo do campo magnético produzido pelos ímanes permanentes tem formato oval e são mais intensos na zona onde os ímanes permanentes estão colocados. Na figura 4.8 ilustra as linhas do fluxo do campo magnético.

Neste caso em que temos 3 ímanes em estudo os valores máximos e mínimos são 0.084731 e -0.08473 [gauss] respetivamente. Na figura 4.9 igualmente como nas simulações anteriores, ilustra a intensidade do campo magnético agora com três ímanes permanentes no interior.

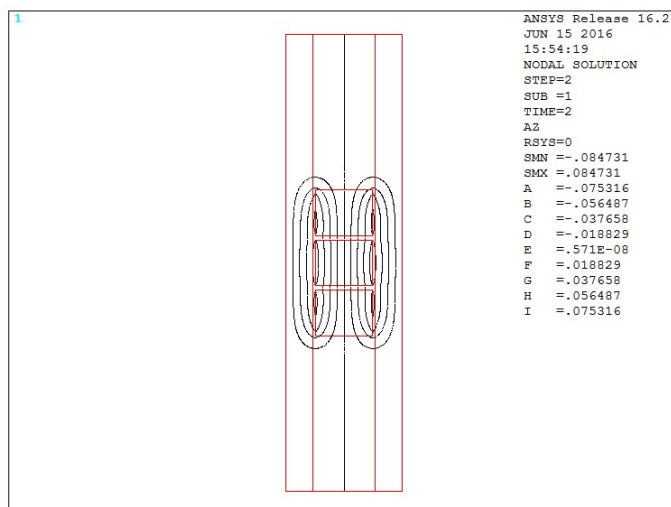


Figura 4.8: Linhas de fluxo do campo magnético produzido por 3 ímanes permanentes

Com a análise dos resultados obtidos (figura 4.9), o valor máximo da intensidade do campo magnético é de 12185 [Oe]. Também nesta simulação os campos magnéticos assumem maiores valores no interior dos ímanes permanentes e na zona envolvente, e no topo e na base do protótipo do amortecedor onde os ímanes estão mais afastados é aproximadamente zero.

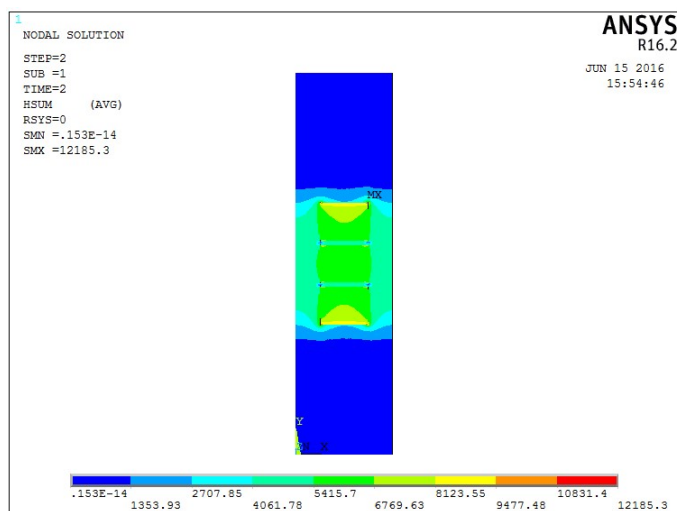


Figura 4.9: Intensidade do campo magnético produzido por 3 ímanes permanentes

4.6.4 Simulação 4

Por fim, na última simulação realizada, foram utilizados 4 ímanes permanentes.

Depois de fazer todas as etapas e processos necessários para realização de uma análise magnética estática no software ANSYS, processos estes já explicados nas simulações anteriores, extraíram-se as soluções obtidas. Na figura 4.10 ilustra as linhas do fluxo do campo magnético produzido pelos quatro ímanes permanentes quando estão no interior de um tubo de cobre. Na figura 4.11 pode-se visualizar como o campo magnético se distribui no protótipo do amortecedor, bem como a intensidade.

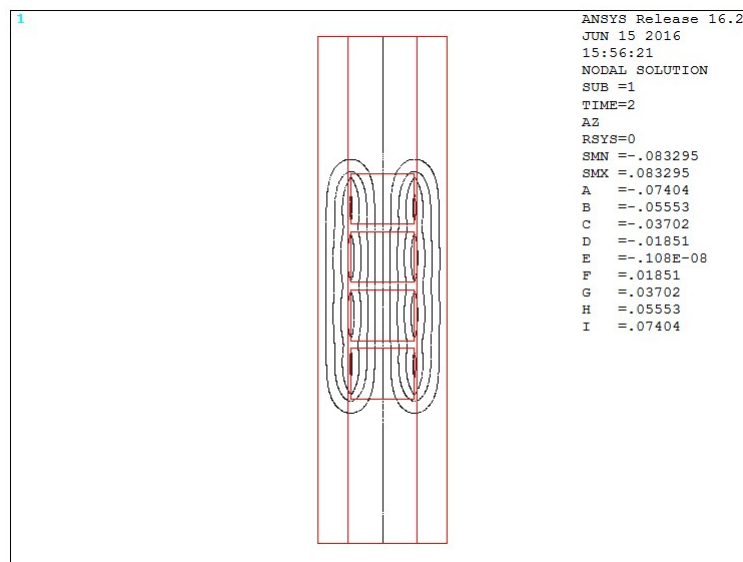


Figura 4.10: Linhas de fluxo do campo magnético produzido por 4 ímanes permanentes

As linhas de fluxo do campo magnético, em igualdade com as simulações anteriores, tem um comportamento oval e distribuem-se nos ímanes permanentes e pelas paredes do tubo de cobre.

As linhas de fluxo do campo magnético tem valores máximos de 0.083295 [gauss] e mínimos de -0.083295 [gauss].

Na figura 4.11 representa a intensidade do campo magnético.

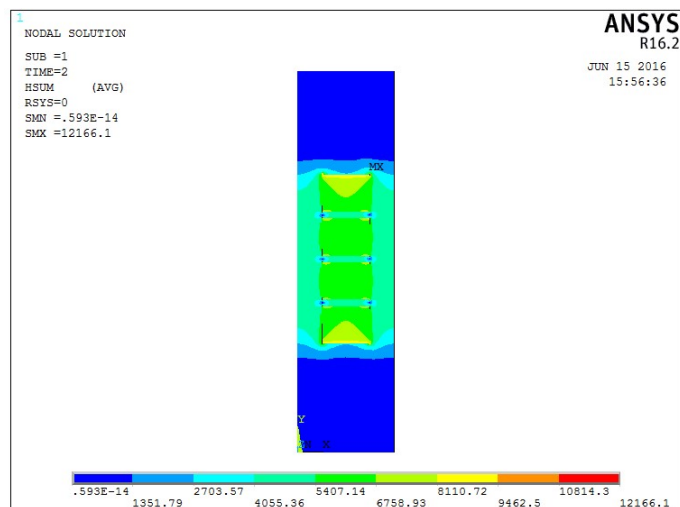


Figura 4.11: Intensidade do campo magnético produzido por 4 ímanes permanentes

Analisando a figura 4.11, o valor máximo do campo magnético produzido pelos quatro ímanes permanentes quando estão no tubo condutor de cobre, é de 12166 [Oe].

E de realçar que os valores da intensidade do campo magnético produzido é mais elevado no caso em estudo com quatro ímanes, no íman superior e inferior.

4.6.5 Discussão dos resultados

Na tabela 4.5 são apresentados os valores mínimos e máximos do fluxo e do campo magnético das quatro simulações

| Simulações | Valores de fluxo mínimo | Valores de fluxo máximo | Valor máximo do campo magnético |
|-------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Simulação 1 | -0,069106 | 0,069106 | 12026,40 |
| Simulação 2 | -0,079051 | 0,079051 | 12175,40 |
| Simulação 3 | -0,084731 | 0,084731 | 12185,30 |
| Simulação 4 | -0,083295 | 0,083295 | 12166,10 |

Tabela 4.5: Valores mínimos máximos do campo magnético das quatro simulações

Tendo como referência a simulação 1 onde foi utilizado apenas um íman permanente,

verificou-se que o aumento do número de ímanes permanentes na haste do amortecedor, as alterações dos valores de intensidade do campo magnético são insignificantes. O aumento dos valores da intensidade do campo magnético é de cerca de 1% em relação à simulação 1. No caso dos valores do fluxo das simulações com maior número de ímanes permanentes, tem um aumento de cerca de 15%.

Assim podemos concluir que o aumento de ímanes permanentes no amortecedor não provoca grandes alterações na intensidade do campo magnético produzido.

Capítulo 5

Análise experimental

O estudo do efeito das correntes de Eddy induzidas por um campo magnético variável permitiram demonstrar ao longo do tempo diferentes aplicações tendo sido utilizado para a fabricação de amortecedores ao longo de décadas. Jae-Sumg e Derby [1], [6], observaram o efeito do amortecimento magnético por efeito de Eddy através da realização de um teste em que um íman permanente passa por um tubo de cobre medindo a capacidade de amortecimento por varias simulações. Concluindo que as dimensões experimentais do íman permanente de neodímio e do tubo de cobre podem alterar os resultados de amortecimento [2].

Nesta dissertação foi feito um teste similar através de várias simulações. Foram feitas variações do número de ímanes acoplados na haste do protótipo do amortecedor, e também da carga aplicada. Foi medido o tempo que os ímanes demoram a percorrer a percorrer um determinado curso do amortecedor.

Foram feitas quatro simulações variando em cada uma delas o número de ímanes permanentes acoplados. Em cada simulação foi feito um carregamento mecânico no topo do amortecedor com massas desde 0.5 kg até 2.5 kg. Para a medição do deslocamento/tempo que os ímanes demoravam a percorrer o curso do amortecedor. Utilizou-se um LVDT, (Linear Variable Differential Transformer) mecanismo de medição de deslocamentos (e

tempo), adaptado no amortecedor.

Todo este processo irá ser descrito pormenorizadamente no decorrer deste capítulo, bem como os resultados obtidos.

5.1 Adaptações e medições

Com o protótipo construído passamos para a etapa seguinte desta dissertação que é a verificação do amortecimento que os ímanes produzem ao passar no tubo condutor de cobre.

Foi necessário fazer algumas adaptações no protótipo, nomeadamente um suporte para serem aplicadas as cargas (pesos) e também para colocar o LVDT de forma a recolher os dados experimentais (medições dos deslocamentos dos tempos das varias simulações).

Os suportes foram desenhados com as dimensões exatas para que o LVDT fique fixo no protótipo do amortecedor, para minimizar os erros nas medições. O material utilizado na elaboração dos suportes foi acrílico e foi cortado numa máquina de corte a laser existente no instituto politécnico de bragança. Nas figuras 5.1 e 5.2 podem ver-se os suportes criados e a sua aplicação no protótipo, respetivamente.



Figura 5.1: Adaptações e suportes



Figura 5.2: Protótipo com as adaptações e suportes para ensaios experimentais

5.2 Condicionamento do LVDT

O sistema de aquisição de dados tem como core um Arduíno UNO que é responsável pela aquisição de dados, tratamento e envio para um computador portátil através de USB. Além de todo o processamento de dados, tem também como função receber a leitura enviada pelo LVDT (figura 5.3) e interpretar essa tensão como um deslocamento. Os LVDT's são os sensores usados, responsáveis pela aquisição do deslocamento efetuado, isto é, por transformar os valores físicos em sinais elétricos, o LVDT utilizado foi:

- ACT1000-A

A placa de controlo e alimentação desenvolvida e calibrada no laboratório de eletrotécnia tem como core o circuito integrado AD598 da Analog devices, este é responsável por gerar o sinal e responder com um valor que varia entre 0 e 5V.

Este sinal em tensão é interpretado pelo Arduíno e convertido para uma medida resultante em milímetros. Este sensor está ligado ao Arduíno com cabos de sinal, com malha de forma a diminuir eventuais interferências. Sendo que todos eles passam dentro de uma ferrite que vai servir como filtro para as altas frequências [14].

Foi utilizado uma fonte de alimentar para alimentar todo o processo.

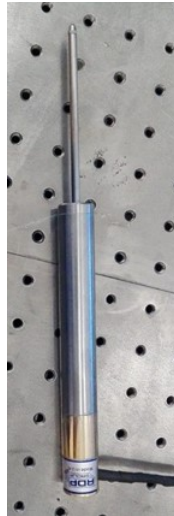


Figura 5.3: LVDT utilizado no processo de medição

A figura 5.4 ilustra a placa e Arduino UNO utilizados para a realização das medições experimentais.

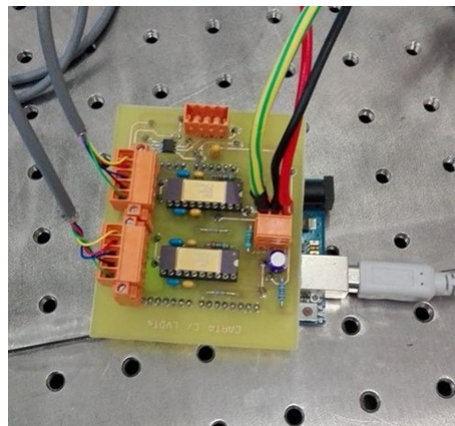


Figura 5.4: Placa e Arduino UNO utilizado nas medições

5.3 Simulações

Com todos os mecanismos devidamente colocados passamos para a recolha de dados experimentais. A primeira simulação foi realizada com um íman no interior do tubo de

cobre. As massas que foram utilizadas para carregar mecanicamente o amortecedor, foram previamente pesados numa balança de precisão.

O ensaio consiste em colocar a haste do amortecedor no topo e soltar para que esta percorra o curso do amortecedor. O processo foi repetido para as várias cargas e foram recolhidos os dados para um computador, através de um sistema de aquisição de dados para posteriormente serem tratados. Inicialmente sem carga aplicada, e posteriormente incrementando massas no topo do amortecedor desde 0.5 kg até 2.5 kg, (com incrementos de 0.25 kg).

Na figura 5.5, é possível observar como o processo de medição ocorreu.

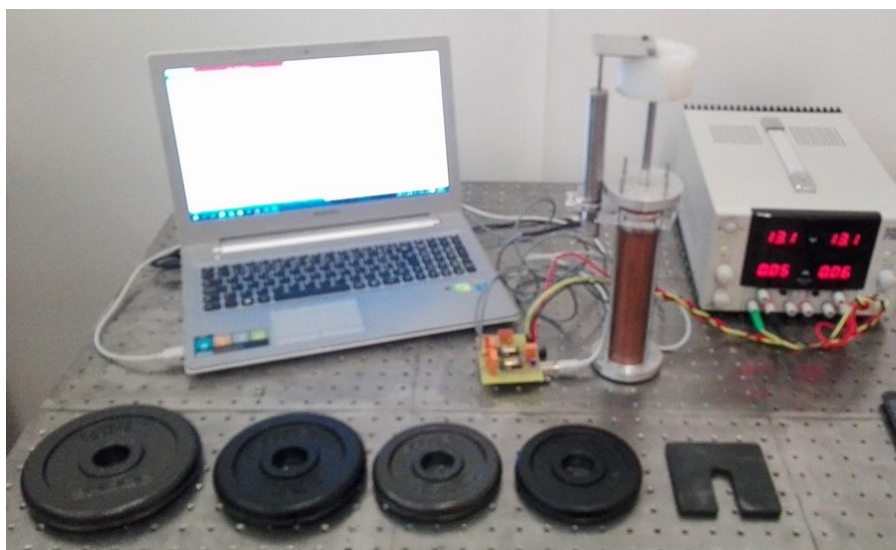


Figura 5.5: Recolha de dados experimentais

Foram feitas quatro simulações com um, dois, três, e quatro ímanes permanentes no interior do tubo de cobre, tendo-se repetido o processo para as várias cargas (pesos).

Na tabela 5.1 mostra as variações paramétricas das cargas utilizadas nas simulações, começando os ensaios experimentais sem colocar cargas no suporte e incrementando pesos desde 0.5 kg até um máximo de 2.5 kg. na tabela apresenta também a massa dos pesos utilizados.

| Pesos [kg] | Massa [g] |
|-------------------|-----------|
| Suporte/sem carga | 185,00 |
| 0,5kg | 682,00 |
| 1kg | 1248,00 |
| 1,25kg | 1412,00 |
| 1,5kg | 1745,00 |
| 1,75kg | 1909,00 |
| 2kg | 2192,00 |
| 2,5kg | 2704,00 |

Tabela 5.1: Tabela com variações paramétricas (cargas) utilizadas nas simulações

Na figura 5.6, mostra-se a aplicação de uma carga de 1 kg. Através do mecanismo de medições é recolhido o tempo que os ímanes demoravam a percorrer um determinado deslocamento do curso do amortecedor (que para o caso em estudo foi de 30 mm).

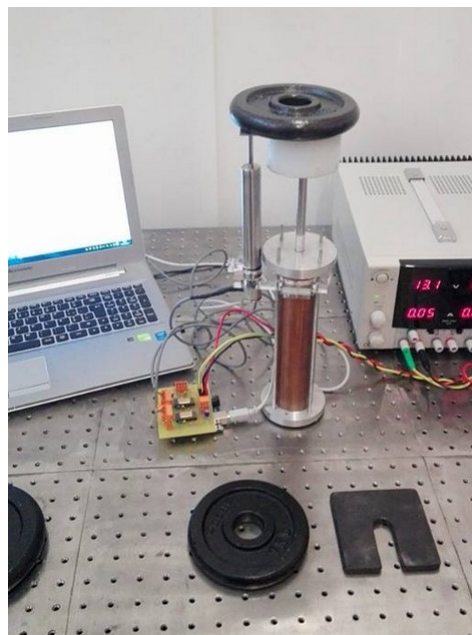


Figura 5.6: Ensaio experimental com carregamento de 1 Kg

Depois de conhecermos o tempo que os ímanes demoram a percorrer o curso do amortecedor determinado, que neste caso foi de 30 mm, pode-se calcular a velocidade média dos ímanes permanentes em cada simulação. Para isso basta dividir esse deslocamento pelo tempo e obtemos assim a velocidade média.

5.4 Resultados obtidos

Neste subcapítulo apresenta os resultados obtidos de todas as simulações experimentais.

Como já foi referido, em cada simulação varia o número de ímanes permanentes no interior do tubo de cobre. Em cada simulação foram registados os tempos que a haste demorava a percorrer o curso do protótipo do amortecedor para todos os carregamentos mecânicos.

Para cada simulação foi elaborada uma tabela com todos os dados registados, bem como os valores previamente calculados da velocidade média da haste.

Finalmente foram elaborados gráficos para uma melhor compreensão dos resultados obtidos e foi feito uma comparação de todas as simulações.

De seguida será descrito com mais detalhe cada simulação experimental.

5.4.1 Simulação 1

Na primeira simulação foi apenas utilizado um íman permanente de neodímio no interior do tubo de cobre.

Depois de colocado o sensor de medição LVDT, foi recolhido o tempo que a haste, onde os ímanes estavam acoplados, demora a percorrer um determinado percurso do protótipo de amortecedor (30 mm).

Conhecendo os valores do tempo que a haste do amortecedor demora a percorrer o curso, foi possível calcular a velocidade média de cada simulação para todos os carregamentos mecânicos.

Na tabela 5.2 é possível observar os tempos e a velocidade média que a haste demora a percorrer o curso do amortecedor para as várias cargas. O processo começa sem colocar carga mecânica, ou seja, neste caso tinha só a massa do suporte utilizado nas medições, e depois foi repetido o processo incrementando as massas de 0.5 kg até ao máximo 2.5kg.

| | Massa [g] | Tempo [s] | Velocidade [cm/s] | Velocidade [m/s] |
|---------|-----------|-----------|-------------------|------------------|
| Suporte | 185,00 | 1,19 | 3,025 | 0,030 |
| 0,50kg | 682,00 | 0,20 | 18,000 | 0,180 |
| 1,00kg | 1248,00 | 0,11 | 32,727 | 0,327 |
| 1,25kg | 1412,00 | 0,10 | 36,000 | 0,360 |
| 1,50kg | 1745,00 | 0,09 | 40,000 | 0,400 |
| 1,75kg | 1909,00 | 0,09 | 40,000 | 0,400 |
| 2,00kg | 2192,00 | 0,08 | 45,000 | 0,450 |
| 2,50kg | 2704,00 | 0,07 | 51,429 | 0,514 |

Tabela 5.2: Valores de tempo e velocidade da primeira simulação (1 íman)

Com os valores da tabela foi construído um gráfico de velocidade/massa para uma melhor visualização dos resultados (figura 5.7).

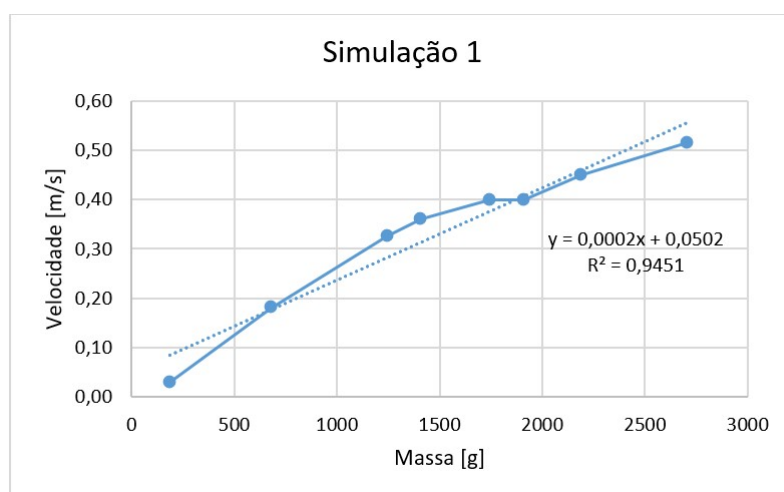


Figura 5.7: Gráfico velocidade/massa da primeira simulação

Analisando o gráfico (figura 5.7), verifica-se que a relação entre a velocidade e a massa tem um comportamento linear. Verifica-se que a velocidade aumenta linearmente com o incremento da massa colocada no topo da haste do amortecedor.

Observando que a relação entre a velocidade e o incremento das massas tem um comportamento linear fez-se uma análise de regressão, aproximando os valores obtidos a uma linha de tendência linear.

No gráfico também é possível visualizar a equação da linha de tendência e o coeficiente de correlação, que neste caso é muito próximo de 1, logo a aproximação da linha de tendência tem um erro muito reduzido.

5.4.2 Simulação 2

O processo de medição na simulação foi semelhante a simulação 1, variando apenas o número de ímãs permanentes de neodímio acoplados na haste. Nesta simulação foram utilizados 2 ímãs permanentes na haste do amortecedor e foi repetido todo o processo de medição, descrito no início deste capítulo, para todos os carregamentos mecânicos (aplicação dos pesos no topo da haste).

Na tabela 5.3 mostra os tempos e as velocidades médias da segunda simulação.

| | Massa [g] | Tempo [s] | Velocidade [cm/s] | Velocidade [m/s] |
|---------|-----------|-----------|-------------------|------------------|
| Suporte | 185,00 | 0,99 | 3,6364 | 0,0364 |
| 0,50kg | 682,00 | 0,28 | 12,8571 | 0,1286 |
| 1,00kg | 1248,00 | 0,14 | 25,7143 | 0,2571 |
| 1,25kg | 1412,00 | 0,14 | 25,7143 | 0,2571 |
| 1,50kg | 1745,00 | 0,11 | 32,7273 | 0,3273 |
| 1,75kg | 1909,00 | 0,10 | 36,0000 | 0,3600 |
| 2,00kg | 2192,00 | 0,10 | 36,0000 | 0,3600 |
| 2,50kg | 2704,00 | 0,08 | 45,0000 | 0,4500 |

Tabela 5.3: Valores de tempo e velocidade da segunda simulação (2 ímãs)

Com a análise do gráfico (figura 5.8), verifica-se que a relação entre a velocidade e a massa tem também um comportamento linear. A velocidade da haste do protótipo do amortecedor aumenta linearmente com o incremento da massa colocada no topo da haste do amortecedor.

Também nesta simulação recorreu-se a uma análise de regressão, aproximando a uma linha de tendência linear que tem como equação, $y = 0,0002x + 0,025$ e um coeficiente de correlação de 0,9774, valor este muito próximo de 1, ou seja, com um erro muito baixo.

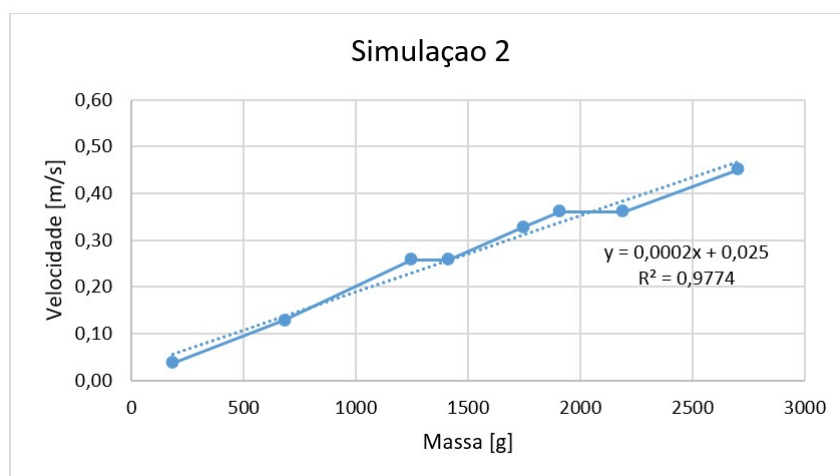


Figura 5.8: Gráfico velocidade/massa da segunda simulação

5.4.3 Simulação 3

Na simulação 3 foi acrescentado mais um ímã permanente na haste do protótipo amortecedor somando três ímãs de neodímio no total.

Foram replicados todos os passos de medição das simulações anteriores, desde recolher dados do deslocamento/tempo até ao tratamento dos dados no computador.

Os ensaios experimentais iniciavam sem colocar carga no topo da haste do protótipo do amortecedor até colocar o máximo de carga definido que foi 2.5 kg.

Depois de os dados serem tratados foi elaborada uma tabela com os resultados obtidos.

| | Massa [g] | Tempo [s] | Velocidade [cm/s] | Velocidade [m/s] |
|---------|-----------|-----------|-------------------|------------------|
| Suporte | 185,00 | 0,83 | 4,3373 | 0,0364 |
| 0,50kg | 682,00 | 0,27 | 13,3333 | 0,1286 |
| 1,00kg | 1248,00 | 0,17 | 21,1765 | 0,2571 |
| 1,25kg | 1412,00 | 0,15 | 24,0000 | 0,2571 |
| 1,50kg | 1745,00 | 0,13 | 27,6923 | 0,3273 |
| 1,75kg | 1909,00 | 0,12 | 30,0000 | 0,3600 |
| 2,00kg | 2192,00 | 0,10 | 36,0000 | 0,3600 |
| 2,50kg | 2704,00 | 0,08 | 45,0000 | 0,4500 |

Tabela 5.4: Valores de tempo e velocidade da terceira simulação (3 ímãs)

Com os dados da tabela 5.4 construiu-se um gráfico velocidade/tempo (figura 5.9) para uma melhor visualização dos resultados.

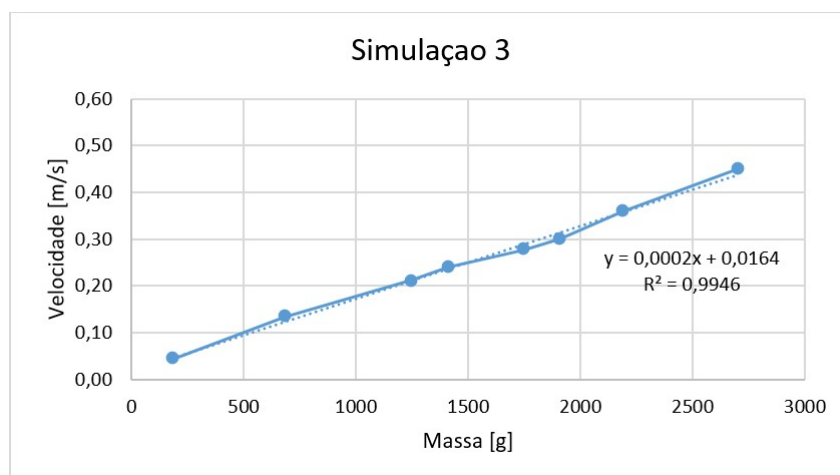


Figura 5.9: Gráfico velocidade/massa da terceira simulação

Na figura 5.9 é possível observar o comportamento que o amortecedor tem de capacidade de amortecimento quando se aplicam cargas no topo há haste.

Analisando o gráfico verifica-se que este tem um comportamento linear, atingindo para o máximo da carga aplicada que foi de 2.5kg cerca de 0.45 m/s.

Como nas simulações anteriores foi feito também uma análise de regressão aproximando os pontos obtidos a uma linha de tendência linear com equação $y=0.0002x+0.0164$, com um coeficiente de correlação de 0.9946.

5.4.4 Simulação 4

Por fim este subcapítulo mostra a ultima simulação realizada, em que foram acoplados na haste do amortecedor quatro ímanes permanentes de neodímio. Depois de todos os ensaios experimentais elaborou-se uma tabela com os resultados obtidos (tabela 5.5)

Observando os valores obtidos (tabela 5.5) verifica-se que que no caso em que foi colocado no topo da haste do amortecedor um peso de 2.5kg (carga máxima) a velocidade

| | Massa [g] | Tempo [s] | Velocidade [cm/s] | Velocidade [m/s] |
|---------|-----------|-----------|-------------------|------------------|
| Suporte | 185,00 | 0,70 | 5,1429 | 0,0514 |
| 0,50kg | 682,00 | 0,27 | 13,3333 | 0,1333 |
| 1,00kg | 1248,00 | 0,16 | 22,5000 | 0,2250 |
| 1,25kg | 1412,00 | 0,14 | 25,7143 | 0,2571 |
| 1,50kg | 1745,00 | 0,12 | 30,0000 | 0,3000 |
| 1,75kg | 1909,00 | 0,11 | 32,7273 | 0,3273 |
| 2,00kg | 2192,00 | 0,10 | 36,0000 | 0,3600 |
| 2,50kg | 2704,00 | 0,09 | 40,0000 | 0,4000 |

Tabela 5.5: Valores de tempo e velocidade da quarta simulação (4 ímanes)

atingida pela haste do protótipo foi de 0.40 m/s.

Foi também construído um gráfico velocidade/massa para visualizar o seu comportamento.

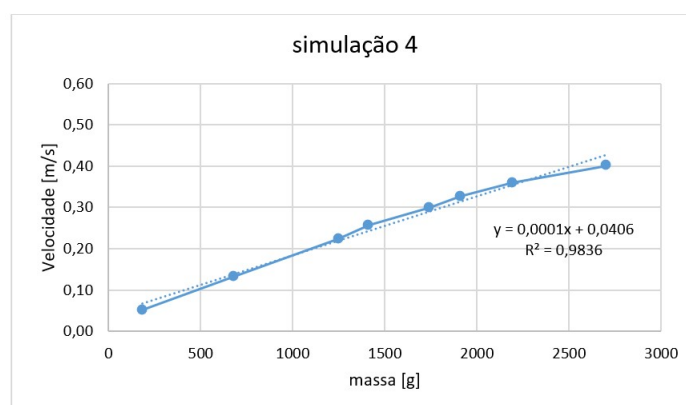


Figura 5.10: Gráfico velocidade/massa da quarta simulação

Na figura 5.10 ilustra o comportamento do protótipo da capacidade de amortecimento.

Com a análise do gráfico conclui-se que tem um comportamento linear, a velocidade aumenta linearmente com o incremento da massa colocada no topo da haste do amortecedor. Também neste caso aproximaram-se os pontos obtidos, através de uma análise de regressão, a uma linha de tendência linear que para esta simulação tem como equação $y=0.001x+0.9836$.

5.5 Discussão dos resultados

Para uma melhor visualização dos resultados fez-se uma comparação das retas obtidas nas quatro simulações.

Foi elaborado um gráfico com as quatro simulações para poder visualizar melhor se o número de ímãs acoplados na haste do protótipo provocaria alterações no comportamento de capacidade de amortecimento.

A figura 5.11 ilustra os resultados obtidos nas quatro simulações em simultâneo.

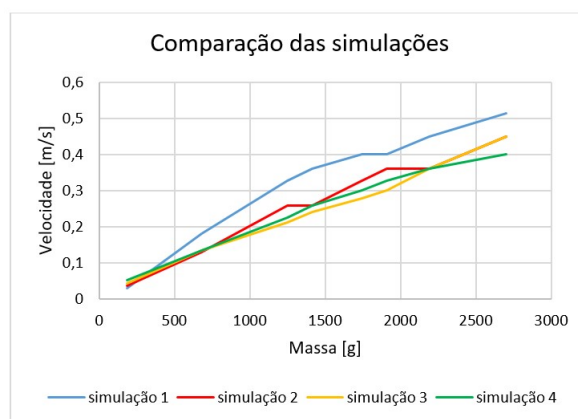


Figura 5.11: Comparação dos resultados de todas as simulações

Com a análise do gráfico (figura 5.11) verifica-se que a simulação que atinge maiores velocidades, logo, menor capacidade de amortecimento é a simulação 1 com apenas um ímã permanente no interior do tubo de cobre, que atinge aproximadamente 0,5 m/s quando a haste do amortecedor e carregada (aplicação das cargas) com 2,5 kg.

E de notar que as outras simulações são bastante semelhantes atingindo valores máximos de velocidade aproximadamente 0,4 m/s.

Pode-se então concluir que o incremento de ímãs permanentes na haste não provocam maior capacidade de amortecimento no protótipo.

Capítulo 6

Conclusões e trabalhos futuros

O desenvolvimento deste projeto correu de forma esperada, sendo possível alcançar todos os objetivos propostos definidos inicialmente. Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões retiradas como o desenvolvimento desta dissertação e serão também propostas algumas ideias e sugestões para a continuação e desenvolvimento deste estudo.

Um dos grandes objetivos desta dissertação era a construção física de um protótipo de amortecedor magnético, objetivo alcançado com sucesso.

Outro objetivo importante era a modelação numérica e verificar como os campos magnéticos se distribuem no protótipo quando a passagem de um íman permanente no interior de um tubo de cobre. Depois de todas as etapas para a realização da modelação numérica, pode-se concluir que o número de ímanes permanentes utilizados não alteram o valor de intensidade do campo magnético.

Com o protótipo construído foi possível fazer uma análise experimental. Com esta análise pode-se concluir que o protótipo tem um comportamento linear independentemente do número de ímanes utilizados no interior do tubo de cobre. Pode-se também concluir que a melhor simulação obtida foi a simulação 2, ou seja, com menos ímanes (menores custos financeiros) no interior do tubo de cobre foram atingidos resultados semelhantes no comportamento do protótipo na capacidade de amortecimento.

De um modo geral conclui-se que é possível utilizar este amortecedor magnético para controlo de vibrações baseados em correntes de Eddy em equipamentos mecânicos.

Com a realização deste projeto foi possível verificar que ainda existe muito espaço para explorar as potencialidades deste conceito de amortecimento magnético baseado em ímanes permanentes e correntes de Eddy, assim sugere-se a continuidade deste estudo, e para trabalhos futuros pretende-se aplicar este conceito no controlo de vibrações em equipamentos mecânicos. Será possível desenvolver um sistema de travagem e/ou amortecimento magnético utilizando ímanes permanentes e sistemas eletromagnéticos baseados em correntes de Eddy.

Bibliografia

- [1] Jae-Sung Bae, Jai-Hyuk Hwang, Jung-Sam Park, and Dong-Gi Kwag. Modeling and experiments on eddy current damping caused by a permanent magnet in a conductive tube. *Journal of mechanical science and technology*, 23(11):3024–3035, 2009.
- [2] Chen Chen. Simulation, design and experimental validation of a passive magnetic damper for ultra-fast actuators. 2014.
- [3] LC Cossolino and AHA Pereira. Amortecimento: classificação e métodos de determinação. *Universidade de São Carlos*, 2010.
- [4] Eduarda Lectícia Martins da Costa. Construção de um dispositivo amortecedor magnetoreológico para uma suspensão activa. 2008.
- [5] Luís Carlos Almeida Bastos de Pinho. *Materiais Magnéticos e suas aplicações*. PhD thesis, Universidade do Porto, 2009.
- [6] Norman Derby and Stanislaw Olbert. Cylindrical magnets and ideal solenoids. *American Journal of Physics*, 78(3):229–235, 2010.
- [7] G Donoso, CL Ladera, and P Martin. Magnet fall inside a conductive pipe: motion and the role of the pipe wall thickness. *European Journal of Physics*, 30(4):855, 2009.
- [8] Babak Ebrahimi, Mir Behrad Khamesee, and Farid Golnaraghi. A novel eddy current damper: theory and experiment. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42(7):075001, 2009.

- [9] Caglar Elbuken, MB Khamesee, and M Yavuz. Eddy current damping for magnetic levitation: downscaling from macro-to micro-levitation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(18):3932, 2006.
- [10] David Jiles. *Introduction to magnetism and magnetic materials*. CRC press, 2015.
- [11] Po Li, Jien Ma, and Youtong Fang. Design and analysis of hybrid excitation rail eddy current brake system of high-speed train. In *Service Operations, Logistics, and Informatics (SOLI), 2011 IEEE International Conference on*, pages 565–569. IEEE, 2011.
- [12] Kellie Fonseca Oliveira. *Controlo semi-ativo da suspensão de um veículo automóvel*. PhD thesis, 2015.
- [13] KJ Overshott. Magnetism: it is permanent. *IEE Proceedings A-Science, Measurement and Technology*, 138(1):22–30, 1991.
- [14] Arlindo Pascoal. *Prototipagem e análise do conforto na condução de uma bicicleta equipada com um amortecedor magneto-reológico*. PhD thesis, 2016.
- [15] M Rahman and G Slemon. Promising applications of neodymium boron iron magnets in electrical machines. *IEEE transactions on Magnetics*, 21(5):1712–1716, 1985.
- [16] CONTROLE ROBUSTO DE SUSPENSÃO SEMI-ATIVA. *CLÁUDIO CRIVEL-LARO*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, 2008.
- [17] Henry A Sodano, Jae-Sung Bae, Daniel J Inman, and W Keith Belvin. Concept and model of eddy current damper for vibration suppression of a beam. *Journal of Sound and Vibration*, 288(4):1177–1196, 2005.
- [18] Karl J Strnat. Modern permanent magnets for applications in electro-technology. *Proceedings of the IEEE*, 78(6):923–946, 1990.

- [19] Ruben Daniel Silva Tavares. Comparação experimental das características de funcionamento de um motor de ímanes permanentes com condições de alimentação diversas. 2014.
- [20] Lei Zuo, Xiaoming Chen, and Samir Nayfeh. Design and analysis of a new type of electromagnetic damper with increased energy density. *Journal of vibration and acoustics*, 133(4):041006, 2011.

Capítulo 7

Anexos

7.1 Desenhos cotados dos componentes do protótipo

