



Oliveira Ernesto Sidónio Mafuca

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

SISTEMA DE ISOLAMENTO SÍSMICO EM ESTÁTUAS BASEADO EM LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Estruturas e Geotecnia

Orientador: Professor Doutor Filipe Amarante dos Santos
Professor Assistente, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Professora Doutora Ildi Cismasiu

Arguente: Professor Doutor Corneliu Cismasiu

Vogal: Professor Doutor Filipe Amarante dos Santos



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Janeiro, 2021

Sistema de isolamento sísmico baseado em levitação magnética

Copyright © Oliveira Ernesto Sidónio Mafuca, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Dedico aos meus pais
Ernesto Oliveira Mafuca
e
Ana Paula Paulino Rêgo.

Agradecimentos

Nesta fase final, quero expressar os meus sinceros agradecimentos a todos que contribuirão de alguma forma na realização desta dissertação: em particular, gostava de agradecer:

Ao professor Filipe Amarante dos Santos, pela incansável disponibilidade e partilha de conhecimentos ao longo dos meses de elaboração desta dissertação.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional em todas as decisões e desafios ao longo da minha vida.

Aos meus irmãos, pelos grandes momentos que partilhamos e partilharemos ao longo da minha vida.

A todos os meus colegas, amigos, que me acompanharam nesta jornada académica que direta ou indiretamente me ajudaram a ultrapassá-la, o meu muito obrigado.

Resumo

Nos últimos anos tem aumentado o número de aplicações de sistema de isolamento de base em estruturas localizadas em regiões com elevada perigosidade sísmica. Porém, a aplicação desta técnica para proteção sísmica de estruturas leves, nomeadamente estátuas, dos sistemas de isolamento tradicionais não tem apresentado bons resultados. Tendo em conta as limitações desses sistemas, iniciou-se uma corrida para adaptação e busca por soluções inovadoras de sistemas de isolamento de base para proteção sísmica dessas estruturas.

O objetivo deste estudo é avaliar a eficiência de um dispositivo de isolamento sísmico de base baseado em levitação magnética, na proteção sísmica de estátuas. Procura-se verificar a viabilidade do modelo estrutural com base em análises numéricas e experimentais.

Do estudo realizado, pode afirmar-se que o dispositivo proposto demonstrou ser eficiente reduzindo a aceleração de resposta da estrutura.

Palavras-chave: Isolamento sísmico de base, Proteção sísmica, Magnetismo, Levitação magnética, Estátua.

Abstract

In recent years, the number of applications of base insulation systems in structures located in regions with high seismic hazards has increased. However, the application of the traditional technique for seismic protection of light structures, namely statues with traditional insulation has not shown good results. Considering those limitations, efforts to develop and create a new innovative solution for base insulation systems for the seismic protection of these structures.

The goal of this study is to evaluate the efficiency of a seismic isolation device based on magnetic levitation, in the seismic protection of statues. Numerical and experimental analysis are used to verify the viability of the proposed isolation approach.

Based on the present study, which was carried out, it can be stated that in the proposed system presented a good performance in reducing the response acceleration of the structure

Keywords: Seismic Base Isolation, Seismic protection, Magnetism, magnetic levitation, statue

Índice Geral

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS E CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	2
2. ESTADO DA ARTE.....	3
2.1. ISOLAMENTO SÍSMICO	3
2.1.1. <i>Introdução.....</i>	3
2.1.2. <i>Conceito de isolamento sísmico de base.....</i>	4
2.1.3. <i>Evolução dos sistemas de isolamento de base.....</i>	5
2.1.4. <i>Tipos de sistemas de isolamento de base.....</i>	9
2.1.5. <i>Isolamento sísmico de estátuas.....</i>	19
2.2. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	24
3. MAGNETISMO	25
3.1. INTRODUÇÃO	25
3.2. PARÂMETROS MAGNÉTICOS	27
3.2.1. <i>Campo magnético.....</i>	27
3.2.2. <i>Permeabilidade magnética</i>	28
3.2.3. <i>Magnetização.....</i>	29
3.2.4. <i>Suscetibilidade magnética.....</i>	30
3.2.5. <i>Fluxo magnético.....</i>	31
3.3. LEVITAÇÃO MAGNÉTICA.....	32
3.3.1. <i>Conceito.....</i>	32
3.3.2. <i>Levitação com ímanes permanentes.....</i>	32
3.3.3. <i>Levitação magnética no campo da proteção sísmica de estruturas.....</i>	34
3.4. CARACTERIZAÇÃO DA FORÇA MAGNÉTICA	35
3.4.1. <i>Cálculo da força magnética entre dois ímãs cilíndricos com recurso ao programa FEMM.....</i>	35
3.4.2. <i>Cálculo experimental da força magnética entre dois ímãs cilíndricos...44</i>	44
3.4.3. <i>Comparação dos resultados obtidos pelas simulações no FEMM com os obtidos experimentalmente.....</i>	46
4. PROPOSTA DE UM DISPOSITIVO DE ISOLAMENTO DE VIBRAÇÕES BASEADO EM LEVITAÇÃO MAGNÉTICA.....	49
4.1. INTRODUÇÃO	49
4.2. APRESENTAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	49
4.2.1. <i>Ímanes.....</i>	51
4.2.2. <i>Elementos elásticos.....</i>	52
4.3. ENSAIO DO MODELO NA MESA SÍSMICA	52

4.3.1.	<i>Análise de resultados do ensaio</i>	53
5.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISES NUMÉRICAS DA PROPOSTA PARA APARELHO DE ISOLAMENTO SÍSMICO BASEADO EM LEVITAÇÃO MAGNÉTICA	55
5.1.	INTRODUÇÃO.....	55
5.2.	APRESENTAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	55
5.3.	EQUAÇÃO DO MOVIMENTO.....	59
5.3.1.	<i>Matriz de massa</i>	59
5.3.2.	<i>Matriz de amortecimento</i>	60
5.4.	ANÁLISE DO MODELO.....	61
5.4.1.	<i>Análise do comportamento das molas magnéticas</i>	61
5.4.2.	<i>Matriz de rigidez</i>	62
5.4.3.	<i>Equação do equilíbrio dinâmico</i>	64
5.5.	ALGORITMOS DE INTEGRAÇÃO NUMÉRICA NO TEMPO	65
5.5.1.	<i>Método de Newmark</i>	65
5.6.	DEFINIÇÃO DA AÇÃO DINÂMICA	70
5.7.	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS.....	72
5.8.	ESTUDO PARAMÉTRICO	75
6.	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	78
6.1.	SÍNTESE E ANÁLISE DAS CONCLUSÕES OBTIDAS	78
6.2.	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	78
	BIBLIOGRAFIA	80
	ANEXOS	84

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Representação da camada de isolamento de base (Guerreiro, 2004)	4
Figura 2.2 – Sistema de isolamento patenteado em 1906 (Guerreiro, 2003).....	6
Figura 2.3 – Sistema de isolamento patenteado pelo Dr. Calantariente em 1909 (Meireles, 2011).....	6
Figura 2.4 – a) Escola Heinrich Pestalozzi, em Skopje; b) Bloco de borracha não reforçado; c) Blocos fusíveis em porcelana (Guerreiro, 2003).....	8
Figura 2.5 – Sistema de isolamento utilizado na central nuclear de Kroeberg, África do Sul, 1978 (Guerreiro, 2003).....	9
Figura 2.6 – Vista e esquema de um apoio elastoméricos instalado numa estrutura (Forni, et al., 2007)	11
Figura 2.7 – Variação de forma de um bloco elastoméricos, com relação baixa (à esquerda) e alta (à direita) entre a altura e área transversal (Guerreiro, 2003).....	12
Figura 2.8 – Estrutura interna de um apoio de borracha de alto amortecimento e seu esquema (Freyssinet, 2020)	13
Figura 2.9 – Deformação horizontal de um apoio HDRB (Santos, 2008).....	13
Figura 2.10 – Aplicação de um sistema HDRB em obra (Freyssinet, 2020).....	14
Figura 2.11 – Relação força – deslocamento num apoio HDRB (Loureiro, 2008)	15
Figura 2.12 – Estrutura de um apoio de LRB (Figueiredo, 2007 e Santos, 2008).....	15
Figura 2.13 – Comportamento mecânico do chumbo, borracha natural e do apoio LRB para ações de corte (Figueiredo, 2007).....	16
Figura 2.14 – Relação força – deslocamento de um apoio LRB (Santos, 2008)	17
Figura 2.15 – a) aparelho de apoio FPS. b) identificação dos principais componentes e movimento do aparelho (Figueiredo, 2007).	18
Figura 2.16 – Comportamento de um dispositivo FPS (Guerreiro, 1997).....	19
Figura 2.17 – O modelo considerado (Calio`, et al., 2003)	21
Figura 2.18 – Sistema de isolamento Rolling-Ball (Guerreiro, et al., 2007).....	22
Figura 2.19 – a) Estatua de Michelangelo's David; b) Sistema de isolamento de base proposto (Facchini, et al., 2015).	23
Figura 2.20 – a) Aspeto geral, b) detalhe do sistema de isolamento sísmico com 3 níveis de HDRB (Civil, 2011).....	23
Figura 3.1 – Rocha típica de âmbar da região báltica, na Europa (Máximo, et al., 2016).	26
Figura 3.2 – Exemplos de ímanes, a) ímanes naturais (magnetite), b) ímanes artificiais (Soares, 2005).	27

Figura 3.3 – Parte inicial da curva de magnetização B-H de um material ferromagnético. O declive μ_i é a permeabilidade magnética inicial e o declive μ_{max} é a permeabilidade máxima (Pinho, 2009).	29
Figura 3.4 – Campo magnético e suas componentes dentro e fora de um ímã (Robertson, 2013).....	30
Figura 3.5 – Mostra o fluxo de um campo magnético ϕ através de uma superfície de área A (Soares, 2005).	31
Figura 3.6 – Repulsão entre ímãs permanentes do mesmo polo.	33
Figura 3.7 N – Diagrama de um levitador com ímanes permanentes (Adaptado de Costa , 2005).....	33
Figura 3.8 – a) Quatro pares de ímanes repelentes mantêm a mesa flutuando; b) Para garantir a estabilidade mecânica introduziu-se um sistema feito de quatro eixos verticais fixados na mesa que correm ao longo de eixos verticais (Puppin, et al., 2002).....	34
Figura 3.9 – Desenho esquemático do sistema PM-PM composto por dois ímãs permanentes de modo obter a levitação estacionaria (Tsuda, et al., 2010).	35
Figura 3.10 – Disposições para o cálculo da força magnética entre dois ímanes cilíndricos em função da distância. Os ímanes utilizados têm um diâmetro $\phi = 34\text{ mm}$ e uma altura de 4mm.	38
Figura 3.11 – Dimensões do ímã em planta e corte (Supermagnete, 2020).	39
Figura 3.12 – a) Definição geométrica do problema no programa. b) Malha triangular de 1mm gerada no programa.....	40
Figura 3.13 – Gráfico do valor da força magnética (de atração e repulsão) entre dois ímãs cilíndricos, obtidos pelas simulações no programa FEMM de acordo com as disposições apresentadas na Figura 3.11.....	41
Figura 3.14 – Gráfico da densidade de fluxo magnético obtido da simulação no FMM da interação magnética entre dois ímanes cilíndricos, com um espaçamento entre eles de 5mm.....	42
Figura 3.15 - Gráfico da intensidade do campo magnético obtido da simulação no FMM da interação magnética entre dois ímãs cilíndricos, com um espaçamento entre eles de 5mm.....	43
Figura 3.16 – Molde de suporte dos ímanes.....	44
Figura 3.17 - Gráfico da força magnética média (de repulsão) entre dois ímãs cilíndricos, obtidos experimentalmente em função da distância d.....	46
Figura 3.18 – Comparação da força magnética de repulsão entre a medição experimental e o cálculo por elementos finitos no FEMM.....	47
Figura 4.1 - Esquema do aparelho desenvolvido	49
Figura 4.2 - Foto do aparelho desenvolvido para análise experimental.....	50

Figura 4.4.3 - Molas elásticas fixadas nos cantos da base rígida.....	52
Figura 4.4.4 – Configuração do teste do protótipo na mesa sísmica	53
Figura 4.4.5 - Aceleração de pico da massa em função da aceleração de base para diferentes excitações.....	54
Figura 5.1 – Modelo estrutural proposto	55
Figura 5.2 – Representação dos graus de liberdade no modelo estrutural.....	56
Figura 5.3 – Modelo utilizado para estudar o comportamento da rigidez durante o carregamento e descarga, ou seja, para um incremento ou redução da distância d entre os imanes.....	57
Figura 5.4 - – a) gráfico que mostra o comportamento da força magnética durante os ciclos de incremento ou redução da distância d entre os imanes; b) gráfico mostra o comportamento da rigidez das molas magnéticas durante os ciclos de incremento ou redução da distância d entre os imanes.	58
Figura 5.5 - – a) gráfico que mostra o comportamento da força magnética os ciclos de incremento ou redução da distância d entre os imanes; b) gráfico mostra o comportamento da rigidez das molas magnéticas durante os ciclos de incremento ou redução da distância d entre os imanes.	58
Figura 5.6 – Estrutura deformada pela ação de um deslocamento unitário na direção u_2 e u_3	63
Figura 5.7 – Ação dinâmica para frequência de 0.5Hz utilizada no estudo	71
Figura 5.8 – Ação dinâmica para frequência de 1 Hz utilizada no estudo	71
Figura 5.9 – Comportamento das molas magnéticas	62
Figura 5.10 – Aceleração de pico da massa em função da aceleração de base para diferentes excitações.	72
Figura 5.11 – Deslocamento máximo no topo da estatua em função aceleração de base da máxima.....	73
Figura 5.12 – Comparação da aceleração de resposta do modelo numérico com a do modelo experimental para uma determinada excitação.	74
Figura 5.13 - Comparação da aceleração de resposta do modelo numérico com a do modelo experimental para uma determinada excitação.	74
Figura 5.14 – Comparação da aceleração de resposta do modelo analítico com o modelo experimental em função da frequência de excitação	75
Figura 5.15 - Aceleração de pico da massa em função da aceleração de base para diferentes excitações.	77

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 – Propriedades magnéticas dos ímãs NdFeB 35 MGOe	38
Tabela 3.2 – Informação técnica dos ímãs (Supermagnete, 2020)	39
Tabela 3.3 – Resultados da força magnética (de repulsão) entre dois ímanes cilíndricos obtidos nas simulações com o programa FEMM.....	41
Tabela 3.4 – Média dos valores da força magnética (de repulsão) que resultam da interação entre dois ímanes cilíndricos, obtidos experimentalmente em função da distância d.	45
Tabela 4.1 – Parâmetros físicos do Protótipo	50
Tabela 4.2 – Características geométrica do Protótipo	51
Tabela 5.1– Valores da aceleração de base máxima, frequência e duração das excitações impostas ao modelo	70
Tabela 5.2 - Informação técnica dos ímãs (Supermagnete, 2020).....	76
Tabela 5.3 – Lei constitutiva dos ímanes e altura de levitação inicial (d) para uma massa de 0.462kg.....	76

Simbologia

Latinas minúsculas

a base – aceleração de base

a massa – aceleração da massa

h – Altura da estatua

ht – Altura do aparato experimental

\underline{m} – Matriz massa

m1 – Massa da estatua

m2 – Massa da base

\underline{k} – Matriz de rigidez

kh – Rigidez horizontal

km – Rigidez das molas magnética

Letras latinas maiúsculas

A – área das molas elásticas

B – Indução magnética

Diâmetro da estatua – \emptyset

E – Modulo de elasticidade da estatua

EP – Modulo de elasticidade das molas elásticas

F_t – Força magnética total

$F(t)$ – Força aplicada em função do tempo

H – Campo magnético

I – Inercia da estatua

L2 – Comprimento da base

M – Magnetização

T- Tempo

Gregas minúsculas

γ – Constante do método de Newmark

β – Constante do método de Newmark

u – Deslocamento

\dot{u} – Velocidade

\ddot{u} – Aceleração

χ – Suscetibilidade magnética

μ_r – Permeabilidade relativa

μ_o – Permeabilidade no vácuo

ϕ – Fluxo magnético

Gregas maiúsculas

Δt – Passo de interação do método integração no tempo

Δu – Variação do vetor deslocamento

$\Delta \dot{u}$ – Variação do vetor velocidade

$\Delta \ddot{u}$ – Variação do vetor aceleração

Abreviaturas (siglas)

FEMM – Finite Element Method Magnetics

FPS – Friction Pendulum system

HDRB – High Dumping Rubber Bearings

LRB – Lead Rubber Bearings

LDRB – Low Dumping Rubber Bearings

1. INTRODUÇÃO

1.1. Objetivos e considerações preliminares

Nas últimas décadas, tem-se assistido uma constante evolução no campo das tecnologias de proteção sísmica, devido à necessidade de edificar estruturas em zonas de elevada perigosidade sísmica. Uma dessas tecnologias é o isolamento sísmico de base, que é classificado como um sistema de proteção passivo, uma vez que o seu funcionamento não necessita do fornecimento de energia externa. As vantagens que esta tecnologia apresenta no comportamento dinâmico das estruturas submetidas a ações sísmicas a tornam uma alternativa as técnicas tradicionais de dimensionamento que buscam projetar as estruturas para terem a capacidade para acomodarem deformações fora do regime linear, explorando a capacidade dúctil dos elementos estruturais.

Os métodos de isolamento sísmico de base utilizados para edifícios são baseados no princípio de desacoplamento da superestrutura do solo, através da introdução de dispositivos de isolamento sísmico de baixa rigidez horizontal. Embora existam hoje diferentes soluções de isolamento sísmico de base para diferentes tipos de estrutura, ainda se verifica a falta de soluções de isolamento sísmico para algumas estruturas, uma vez que as soluções tradicionais apresentam alguns problemas como:

- Ineficiência contra vibrações de baixa amplitudes;
- Pouco eficiência em estruturas leves.

No isolamento sísmico de estruturas leves, o uso de sistemas de isolamento sísmico de base tradicionais (como é o caso dos elastoméricos), não é económico e, na maioria dos casos não é tecnicamente adequado.

Tendo em conta as limitações dos isolamentos de base tradicionais, os investigadores desta área começaram a estudar as possibilidades alternativas de adaptando e criando soluções inovadoras para proteção sísmica de estátuas, esculturas, artefactos e objetos de arte. A necessidade de proteger estes objetos contra sismos foi considerada vital, uma vez que estamos a falar de objetos que têm um valor histórico e cultural inestimável para a humanidade e que devem ser preservados para as próximas gerações.

É nesse contexto de busca por soluções mais eficientes e económicas para esse tipo de estruturas que se insere o principal objetivo desta dissertação: a avaliação da possibilidade de uso e a caracterização da eficiência de dispositivos de isolamento sísmico

de base baseados em levitação magnética, usando imanes permanentes na proteção sísmica de estruturas leves, nomeadamente estátuas.

Para estudar a eficiência destes dispositivos quando submetidos a ações sísmicas, será proposto um modelo numérico para estudar a sua resposta dinâmica. Também serão efetuadas análises experimentais na mesa sísmica, com um protótipo que vai permitir comprovar a eficiência da solução proposta.

1.2. Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, sendo o primeiro o que constitui a introdução.

No segundo capítulo apresentam-se várias soluções de proteção sísmica, das quais fazem parte os sistemas de isolamento sísmico de base. Neste capítulo é apresentado o seu conceito, sua idealização, tipos e campos de aplicação. Em suma, é feito um resumo histórico da evolução dos sistemas de isolamento de base.

No terceiro capítulo fala-se do magnetismo e descrevem-se os principais parâmetros magnéticos. Também se fala dos vários tipos de levitação magnética, suas características e como tirar vantagem da mesma para o isolamento sísmico de estruturas. Por último, caracteriza-se a força magnética (de repulsão) através um programa de elementos finitos (FEMM) e a partir de uma análise experimental.

No quarto capítulo é apresentado um protótipo baseado na levitação magnética em tamanho reduzido, onde serão realizadas várias análises na mesa sísmica. Os resultados das análises experimentais vão possibilitar a validação do modelo numérico, que será apresentado no quinto capítulo.

No quinto capítulo é apresentada a proposta do aparelho de isolamento de base, e são efetuadas análises dinâmicas, de modo a verificar a eficiência do modelo numérico proposto quando submetido a ações dinâmica de baixa amplitude. Por último serão comparados os resultados obtidos das análises numéricas com os da análise experimental.

O sexto capítulo é dedicado a apresentação de conclusões obtidas das análises numéricas e experimentais do sistema de isolamento de base proposto para estruturas leves, nomeadamente estátuas.

2. ESTADO DA ARTE

Entre os vários desastres naturais que afetam as sociedades humanas, os sismos podem ser considerados os maiores causadores de perdas humanas e materiais, principalmente em zonas densamente povoadas e com pouca proteção contra este fenómeno.

Os primeiros estudos de controlo de vibrações geradas por carregamentos dinâmicos deram-se na engenharia aeroespacial, mas nos últimos anos vem sendo estudos amplamente nas áreas de engenharia civil e mecânica, no controlo de vibrações em estruturas de grande porte e importância tais como pontes, usinas nucleares, barragens e abrangido mais tarde os edifícios.

2.1. Isolamento sísmico

2.1.1. Introdução

As técnicas de dimensionamento tradicionais buscam munir as estruturas para terem a capacidade de acomodarem deformações fora do regime linear, explorando a capacidade dúctil dos elementos estruturais. A integridade estrutural é assegurada através de mecanismos de dissipação associados aos sismos, através da formação de rotulas plásticas em zonas específicas da estrutura. Estas zonas são munidas de grande ductilidade pois devem acomodar ciclos sucessivos de deformações inelásticas, mantendo o nível de resistência, sendo que a dissipação da energia ocorre através de fenómenos histeréticos. O objetivo desta abordagem é permitir que as estruturas cumpram os seguintes requisitos: prevenção total de danos perante atuações sísmicas de magnitude reduzida, limitação de danos não estruturais face a sismos de magnitude moderada e prevenção do colapso estrutural perante sismos de elevada magnitude permitindo-se, no entanto, o desenvolvimento de danos estruturais e não estruturais. Mesmo evitado o colapso da estrutura, ou parte desta, num cenário de ocorrência dum sismo de elevada magnitude, estas deformações poderão causar danos consideráveis, particularmente ao nível de elementos não estruturais, ou seja, originar graves consequências económicas.

Atualmente, com os avanços tecnológicos registrados nas últimas décadas a ocorrência de danos estruturais quando um evento sísmico deixou de ser aceitável, especialmente em estruturas que necessitem de garantir um bom funcionamento durante e após as atuações sísmicas, tais como os hospitais, pontes, edifícios associados à gestão de emergências, edifícios de grande valor histórico e cultural, museus, escola entre outros. É neste contexto que surge o isolamento sísmico, como uma abordagem alternativa na proteção sísmica, que possibilita evitar os danos nos elementos estruturais e não estruturais, durante a ocorrência de um sismo de grande magnitude.

No presente capítulo será abordado o isolamento sísmico de base no quadro da proteção sísmica, apresentando os conceitos, a idealização, os tipos e os objetivos dos sistemas de isolamento de base em geral, e com mais incidência para sua utilização em estruturas leves (destacando-se estátuas) que constituem o tema central deste trabalho.

2.1.2. Conceito de isolamento sísmico de base

O isolamento sísmico de base é uma técnica de proteção sísmica que reduz a vulnerabilidade sísmica das estruturas. Este baseia-se na separação parcial do movimento da estrutura em relação ao movimento da base, com o intuito de diminuir a transmissão das acelerações horizontais do solo à estrutura. Este propósito é conseguido pela criação de uma superfície de descontinuidade, dotada de grande flexibilidade horizontal, de modo a limitar a transmissão de movimentos de translação entre a fundação e a estrutura a proteger. A designação de *isolamento de base* é devido ao fato da superfície de descontinuidade, estar localizada na base da estrutura (Skinner, et al., 1993). Pretende-se com isso que a superestrutura se comporte como um corpo rígido como o apresentado na Figura 2.1.

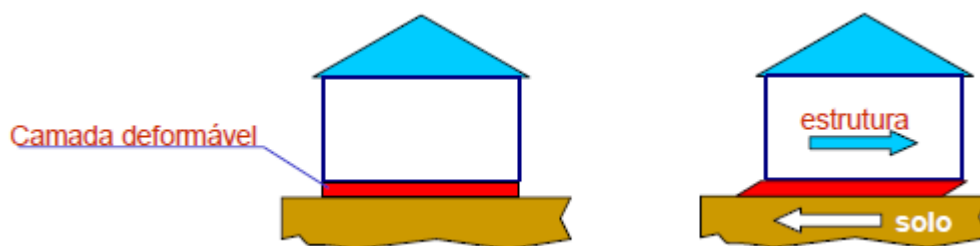


Figura 2.1 – Representação da camada de isolamento de base (Guerreiro, 2004)

Uma consequência imediata da criação de uma camada deformável entre a estrutura e a fundação é a diminuição da frequência própria de vibração. E isso pode levar a

uma diminuição significativa nas acelerações impostas à estrutura e, conseqüentemente, nos esforços. Mas por outro lado há um aumento da deformação total da estrutura, uma vez que a estrutura foi tornada mais flexível. Para compensar este aumento de deformações é conveniente que o sistema de isolamento apresente boa capacidade de amortecimento. Desse modo será possível reduzir as deformações máximas além de diminuir ainda mais o valor das acelerações (Guerreiro, 2003).

2.1.3. Evolução dos sistemas de isolamento de base

Uma das primeiras referências a um sistema de proteção sísmica que pode ser considerado como de isolamento de base ocorreu no início do século XX. Este sistema foi registado em Munique, no ano de 1906, e consistia numa placa rígida que servia de base ao edifício e que, por sua vez, estava assente sobre um conjunto de roletes de material rijo (Figura 2.2) (Guerreiro, 2003).

No ano de 1909 foi registada uma outra patente por um médico, Dr. Calantarients, que criou uma solução em que o edifício fica apoiado sobre uma camada de talco. Como se pode observar na Figura 2.3. O Dr. Calantarients criou um conjunto de aparelhos para ligação das tubagens ao exterior, essas ligações tinham capacidade para acomodar grandes deslocamentos (Guerreiro, 2003).

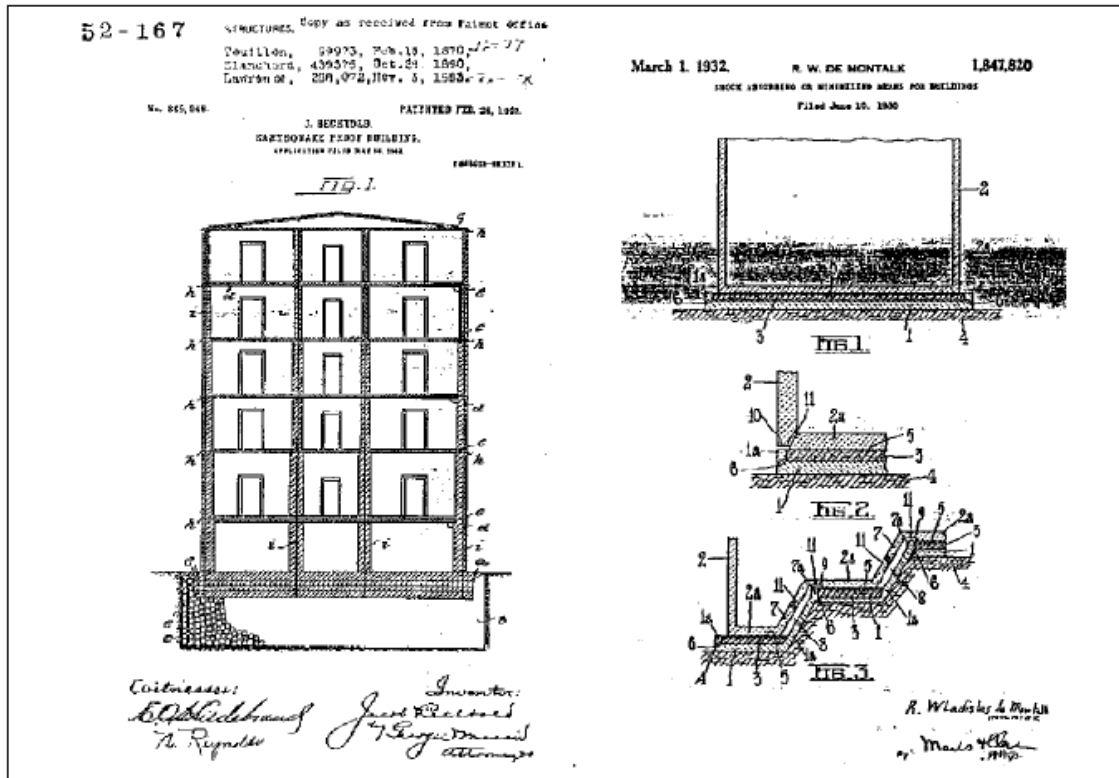


Figura 2.2 – Sistema de isolamento patentado em 1906 (Guerreiro, 2003)

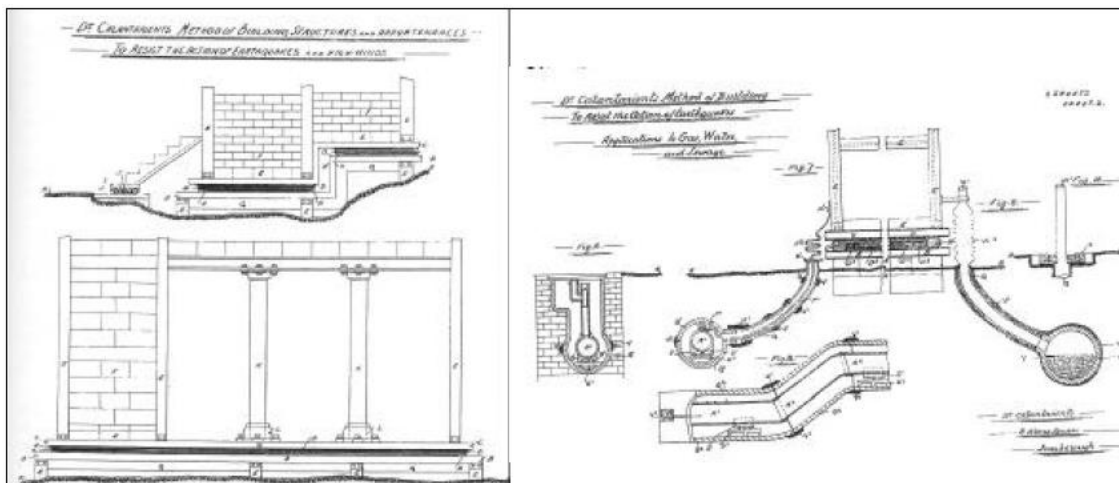


Figura 2.3 – Sistema de isolamento patentado pelo Dr. Calantariente em 1909 (Meireles, 2011).

Embora os conceitos fundamentais do isolamento sísmico tenham vindo a ser estudados desde o século passado, a sua implementação só começou a dar os primeiros passos nas últimas décadas do mesmo (Stanton, et al., 1991).

No entanto, já vai surgindo um grande número de estruturas isoladas sísmicamente, embora as técnicas de isolamento sísmico ainda não sejam usadas de uma forma muito generalizada, na maior parte dos países do mundo, resumindo-se a sua aplicação principalmente aos Estados Unidos, Japão, Nova Zelândia e a alguns países da Europa (Dames, et al., 1979 e Buckle, 1986) dos quais se salienta a Itália.

Assim surge em 1969 em Skopje, na então Jugoslávia atualmente república da Macedónia, surge aquela que é indicada como sendo a primeira utilização documentada de um sistema de isolamento de base, na escola Heinrich Pestalozzi (Figura 2.4a). Este sistema consistia em apoiar a estrutura em blocos de borracha não reforçada (Figura 2.4b), com ligações do edifício ao meio exterior, concretizadas por elementos fusíveis em porcelana (Figura 2.4c), que estão dimensionados para resistir a forças horizontais até um certo valor, a partir do qual se quebram, permitindo assim a vibração livre da estrutura sobre os apoios (Guerreiro, 2003).



Figura 2.4 – a) Escola Heinrich Pestalozzi, em Skopje; b) Bloco de borracha não reforçado; c) Blocos fusíveis em porcelana (Guerreiro, 2003).

O aparecimento e conseqüente desenvolvimento de tecnologias ao nível de apoios de borracha, neoprene e outros elastómeros, permitiu que se desse um grande salto no que concerne a aplicação dos sistemas de isolamento de base em estruturas.

Em 1978 foi construída uma central nuclear na África do Sul (Kroeberg), com aplicação de isolamento de base (Figura 2.5). Esta estrutura constitui um marco histórico na evolução do conceito de isolamento, pois é o exemplo duma edificação onde o nível de segurança é elevado (Guerreiro, 2003).

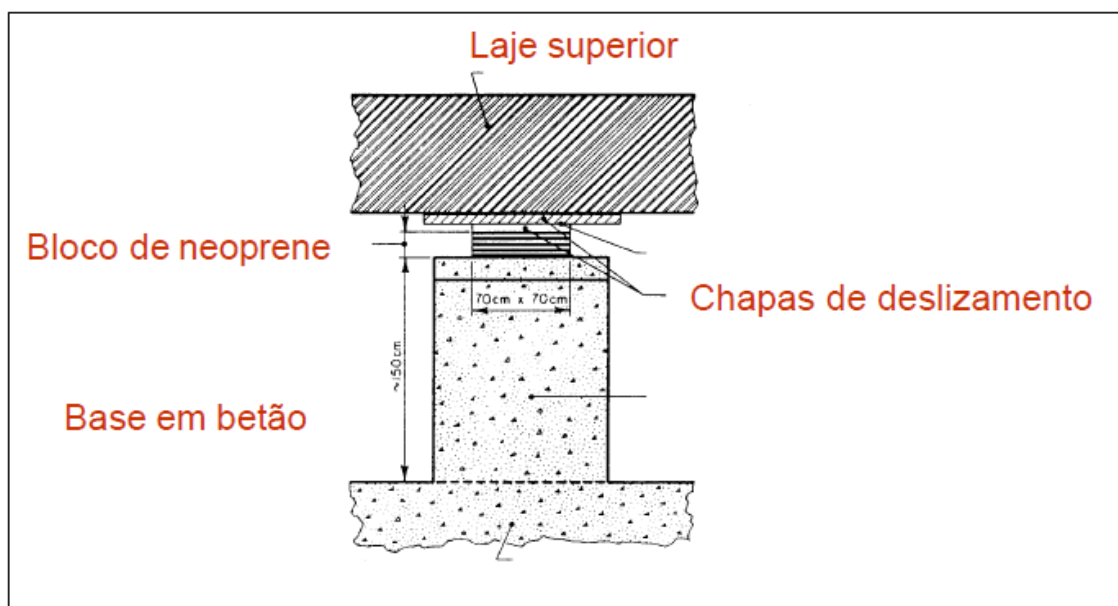


Figura 2.5 – Sistema de isolamento utilizado na central nuclear de Kroeberg, África do Sul, 1978 (Guerreiro, 2003).

2.1.4. Tipos de sistemas de isolamento de base

Em geral, os sistemas de isolamento de base são constituídos por elementos de um só tipo ou por elementos de diversos tipos e com características que se complementam. Atualmente existem várias alternativas para a conceção de uma solução de isolamento sísmico de base, havendo entre elas algumas diferenças consideráveis ao nível do comportamento e das características apresentadas pelos seus elementos constituintes. Entretanto, os sistemas de isolamento sísmico de base eficazes devem apresentar as seguintes características essenciais:

- Baixa rigidez horizontal que lhes permita uma elevada flexibilidade no plano de distorção;
- Capacidade elevada de dissipação de energia ($\xi \geq 5\%$) (Guerreiro, 2003), evitando que esta ocorra por meio de danos estruturais;
- Capacidade de suporte de cargas verticais;
- Capacidade de restituição à posição inicial (força de restituição);
- Rigidez horizontal adequada para cargas não sísmica, como ação do vento (Santos, 2008).

A função primária de um sistema de isolamento prende-se com o suporte da superestrutura do edifício promovendo, ao mesmo tempo, uma elevada flexibilidade hori-

zontal. Os aparelhos de apoio devem apresentar uma rigidez vertical elevada, para suportarem de um modo estável as cargas verticais provenientes da superestrutura do edifício, e não permitirem que ocorram inclinações substanciais da superestrutura ao nível da face superior dos apoios. Os dispositivos são dotados de uma elevada flexibilidade horizontal, diminuindo consideravelmente a frequência própria de vibração da estrutura e, conseqüentemente, as acelerações provenientes das ações sísmicas (Figueiredo, 2007).

O fato de existir uma grande variedade de sistemas de isolamento de base facilita na definição do isolamento de base para proteção sísmica de estruturas, uma vez que se pode comparar as varias opções, no que concerne a exequibilidade, economia, tempo de vida útil e necessidade de manutenção, assim como analisar qual dos sistemas se adequa melhor em função das características e do comportamento da estrutura que se pretende isolar.

Os sistemas descritos em seguida estão divididos em apoios elastoméricos (blocos de Borracha de Baixo e Alto Amortecimento – LDRB e HDRB e Blocos de Borracha com Núcleo de Chumbo - LRB), apoios deslizantes (sistema Pendular com Atrito – FPS).

2.1.4.1. Apoios elastoméricos

Como referido na seção anterior estes tipos de apoios estão divididos em apoios de borracha de baixo amortecimento (LDRB – Low Dumping Rubber Bearings), apoios de borracha de alto amortecimento (HDRB – High Dumping Rubber Bearings) e apoios de borracha com núcleo de chumbo (LRB – Lead Rubber Bearings).

Estes aparelhos são compostos por camadas finas de borracha (elastómero) interpostas por placas de aço, dispostas na horizontal, com objetivos de produzir um isolador com uma elevada rigidez vertical, mas flexível na direção horizontal. As camadas de borracha são vulcanizadas e ligadas às chapas de aço durante o processo de vulcanização. Os estratos de borracha apresentam, regularmente, espessuras entre os 8 e os 20 mm sendo separadas por de chapas de aço com 2 ou 3 mm. No topo e na base dos apoios são colocadas placas de aço espessas (com pelo menos 20 mm) que possibilitam a realização de ligações firmes entre o apoio, a superestrutura e das fundações. A fixação dos aparelhos elastoméricos à estrutura pode ser realizada através de ligações aparafu-

sadas ou por encaixe, de modo a se evitar o derrubamento dos apoios, sendo a última pouco utilizada (Figura 2.6) (Figueiredo, 2007).

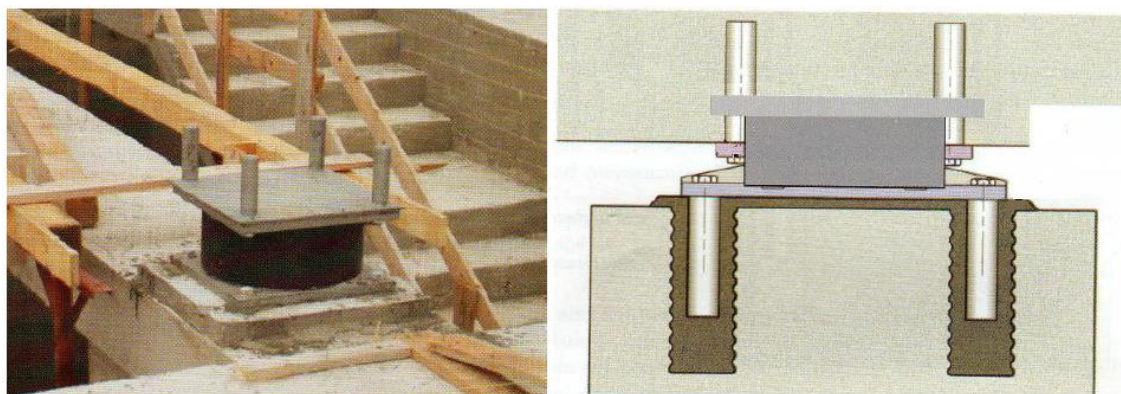


Figura 2.6 – Vista e esquema de um apoio elastomérico instalado numa estrutura (Forni, et al., 2007)

O elastómero é um material que resulta do processo de vulcanização de um composto formado por látex de borracha natural, matérias-primas para borrachas sintéticas e aditivos. Este material apresenta características muito similares às da borracha natural e como tal é vulgarmente denominado por “borracha”. Entre as suas principais características destaca-se a grande deformabilidade e capacidade de recuperar rapidamente a forma original, permitindo deste modo uma grande acumulação de energia (Guerreiro, 2003).

Outra propriedade que este material apresenta é o facto de ser praticamente incompressível, ou seja, deforma-se exclusivamente devido à alteração da sua forma, registando uma variação de volume desprezável. A rigidez de um bloco de elastómero torna-se assim bastante dependente da sua capacidade de deformação lateral e toma valores elevados se apresentar uma relação baixa entre a altura do bloco e a correspondente área transversal (Figura 2.7) (Guerreiro, 2003).

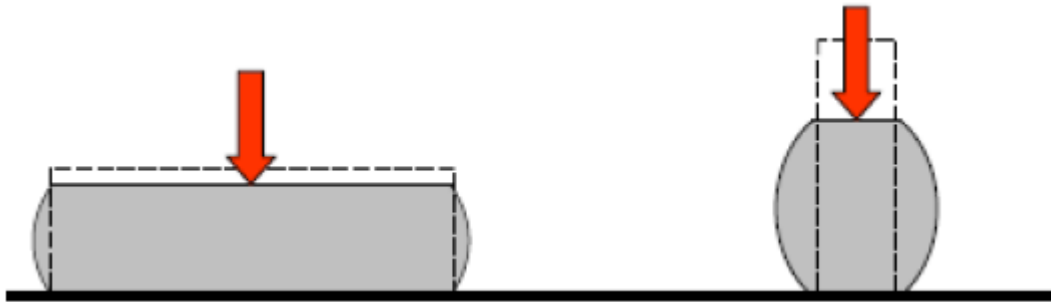


Figura 2.7 – Variação de forma de um bloco elastoméricos, com relação baixa (à esquerda) e alta (à direita) entre a altura e área transversal (Guerreiro, 2003).

Apoios de borracha de alto amortecimento (HDRB)

Os apoios de borracha de alto amortecimento (High Damping Rubber Bearings - HDRB) foram desenvolvidos em 1985 pelo professor Jim Kelly na universidade da Califórnia em Berkeley (Meireles, 2011). Estes aparelhos de apoio têm o aspecto de um aparelho de apoio de pontes em neoprene reforçado com chapas de aço. A diferença entre eles está na composição do elastômero que os constitui.

A composição especial dos elastômeros dos apoios HDRB confere-lhes um amortecimento adicional permitindo atingir valores da ordem dos 10 a 15% do amortecimento crítico. O aumento do amortecimento é conseguido através da utilização de aditivos especiais, tais como carbono, óleos e resinas, na concepção da borracha HDR (High Damping Rubber) (Loureiro, 2008).

Na Figura 2.8 é possível observar a geometria interna típica de um apoio HDRB e a o seu esquema.



Figura 2.8 – Estrutura interna de um apoio de borracha de alto amortecimento e seu esquema (Freyssinet, 2020)

A deformabilidade destes apoios no plano horizontal é bastante elevada (Figura 2.9), e confirmada por meio de ensaios experimentais que demonstram que os apoios HDRB podem acomodar distorções até 500%, quando submetidos a ensaios cíclicos de corte (Figueiredo, 2007).



Figura 2.9 – Deformação horizontal de um apoio HDRB (Santos, 2008)

Os apoios de borracha de alto amortecimento têm uma grande aplicabilidade na área do isolamento sísmico, pois, apresenta isoladamente, uma boa capacidade de suporte (derivada de uma rigidez vertical elevada), capacidade de dissipação de energia, flexibilidade horizontal e capacidade de acomodar deformações laterais até duas vezes a altura do apoio, ou seja, distorções de 200% (Freyssinet, 2020 e Hussain, et al., 2001). A Figura 2.10 apresenta um exemplo de aplicação de um sistema HDRB num edifício.



Figura 2.10 – Aplicação de um sistema HDRB em obra (Freyssinet, 2020)

As principais propriedades que estes tipos de aparelho apresentam são:

- Coeficientes de amortecimento entre 10% e 15%;
- Módulo de distorção (G) entre 0.4MPa e 1.4MPa;
- Módulo de compressibilidade (B) de 2500MPa;
- A rigidez diminui com o aumento da distorção;
- Para grandes distorções a rigidez volta a aumentar.

O mecanismo de dissipação de energia de um aparelho HDRB, submetido a carregamentos cíclicos de corte, baseia-se na geração de calor originada pela fricção entre as cadeias de moléculas do elastómero no momento da desintegração das ligações cruzadas entre as mesmas (Burtscher et al., 1998). Este mecanismo é descrito por ciclos suaves de histerese, como se pode ver na Figura 2.11, que são derivados do facto da borracha de alto amortecimento apresentar um comportamento diferente na fase de carregamento e de descarregamento. Este comportamento deve-se à composição especial da borracha de alto amortecimento. A quantidade de energia dissipada histereticamente é determinada através da área interior dos ciclos característicos da relação força-deslocamento (Figueiredo, 2007).

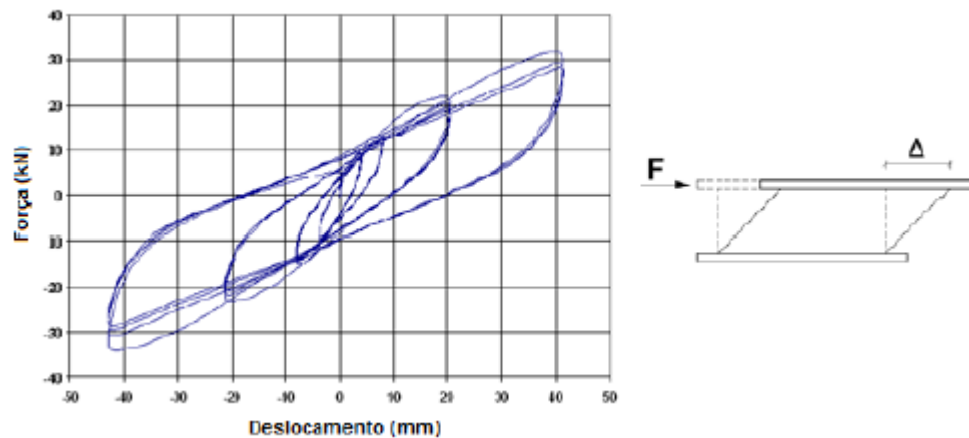


Figura 2.11 – Relação força – deslocamento num apoio HDRB (Loureiro, 2008)

Apoios de borracha com núcleo de chumbo (LRB)

Os apoios de borracha com núcleo de chumbo (Lead Rubber Bearings – LRB) foram desenvolvidos na Nova Zelândia, por W.H. Robinson em abril de 1975 (Skinner, et al., 1993). Estes blocos também possuem uma constituição semelhante à dos blocos em elastómero cintado, diferindo dos outros devido à inserção de um núcleo cilíndrico de chumbo no centro do bloco de elastómero de borracha, como mostra a Figura 2.12.

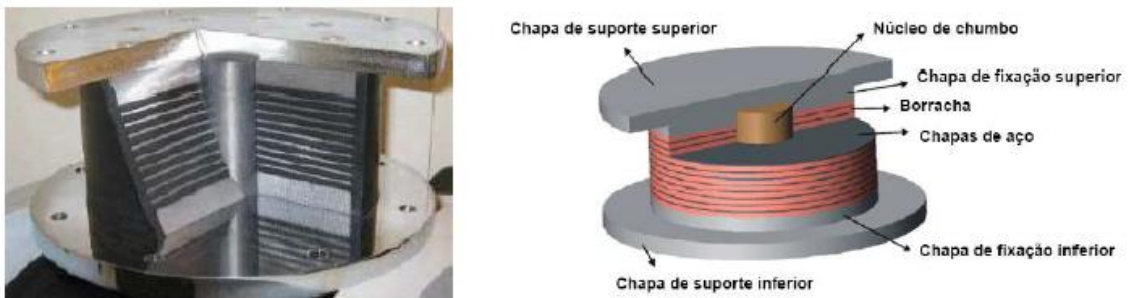


Figura 2.12 – Estrutura de um apoio de LRB (Figueiredo, 2007 e Santos, 2008)

Um apoio LRB funciona como um aparelho híbrido pois combina as propriedades do elastómero de borracha natural com as propriedades do chumbo, permitindo a obtenção de um dispositivo que fornece todas as características essenciais a um sistema de isolamento sísmico: suporte estrutural, flexibilidade horizontal, amortecimento e capacidade de restituição à posição inicial.

A adição do núcleo de chumbo tem como objetivos principais aumentar a capacidade de dissipação de energia e conferir uma rigidez horizontal inicial elevada ao bloco. Este material comporta-se aproximadamente como um sólido elasto-plástico, com uma tensão de plastificação ao corte relativamente reduzida, o que o torna adequado como dissipador de energia por histerese. Por este motivo e pelo facto de apresentar um bom comportamento face a ações cíclicas, mesmo a baixas temperaturas, para além de uma boa recuperação das suas propriedades originais após a aplicação destas ações, o chumbo foi escolhido como material a adicionar ao bloco em elastómero cintado (Guerreiro, 1997). O chumbo recristaliza a temperaturas normais, levando a que as repetidas plastificações não causem problemas de fadiga.

Até ao ponto da sua cedência, o núcleo de chumbo confere ao conjunto uma maior rigidez horizontal inicial; a partir daí, a rigidez lateral do sistema iguala a rigidez ao corte do bloco de elastómero (Figura 2.13). Dependendo do nível das ações de serviço a que a estrutura isolada está sujeita, o nível de cedência deste sistema de isolamento pode ser otimizado através da solução de núcleo de chumbo escolhida, limitando-se os deslocamentos para o nível de força pretendido, por via da elevada rigidez inicial (Meireles, 2011).

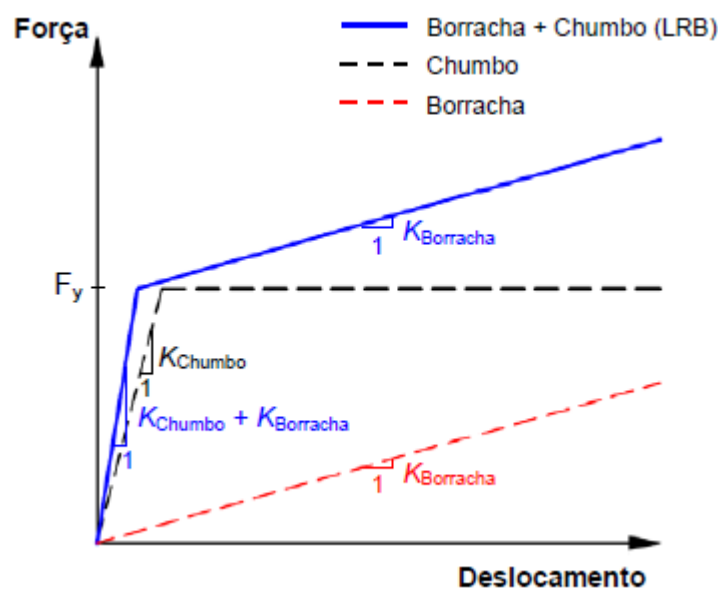


Figura 2.13 – Comportamento mecânico do chumbo, borracha natural e do apoio LRB para ações de corte (Figueiredo, 2007).

A seguir serão mencionadas as principais propriedades deste tipo de apoio, juntamente com uma figura ilustrativa do seu comportamento (Figura 2.14).

- Coeficientes de amortecimento até 30%;
- A rigidez após a cedência do bloco é a rigidez da borracha;
- A tensão de cedência ao corte do chumbo é cerca de 10MPa;
- A rigidez antes da cedência é cerca de 10x a rigidez após cedência;
- Boas propriedades de fadiga, após plastificação, perante ações cíclicas de corte;
- Capacidade de recuperação das propriedades originais após a atuação de ações cíclicas.

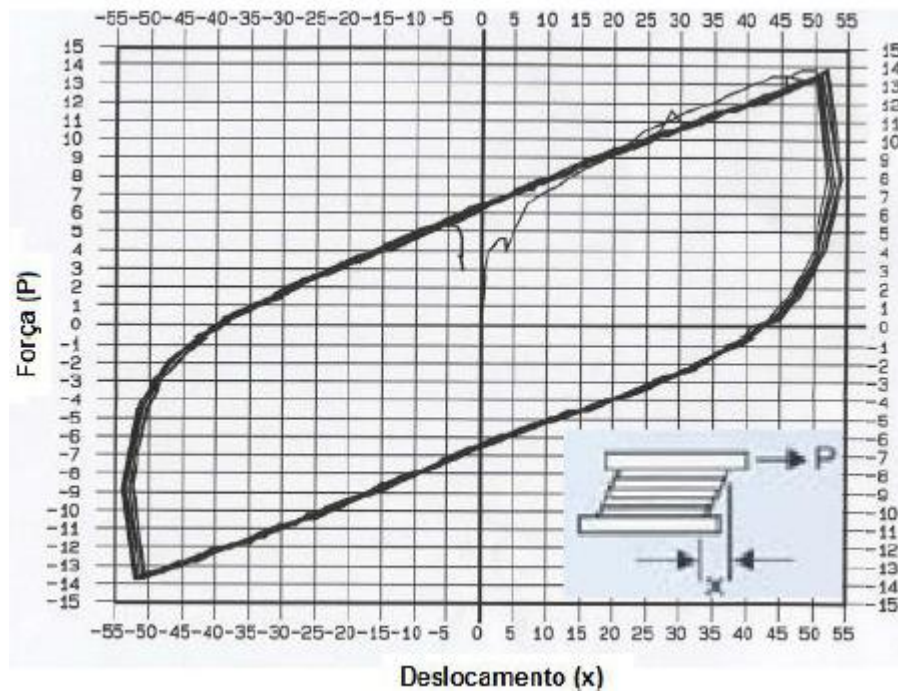


Figura 2.14 – Relação força – deslocamento de um apoio LRB (Santos, 2008)

2.1.4.2. Apoios deslizantes

Apoios pendulares com atrito (Friction Pendulum system – FPS)

Os apoios pendulares com atrito são dispositivos deslizantes, com capacidade de restituição da posição inicial, que se baseiam nos princípios do movimento de um pêndulo e são constituídos por duas peças deslizantes de aço conforme se pode observar na Figura 2.15(a). Uma delas é constituída por uma extremidade de aço inoxidável articulada, revestida por Teflon ou por outro material compósito com baixo coeficiente de atrito e elevada capacidade de suporte, que desliza sobre a superfície polida côncava (esférica) que constitui a segunda peça. A geometria do apoio FPS é apresentada na Figura 2.15(b) onde é também representado o esquema de funcionamento deste aparelho (Figueiredo, 2007).

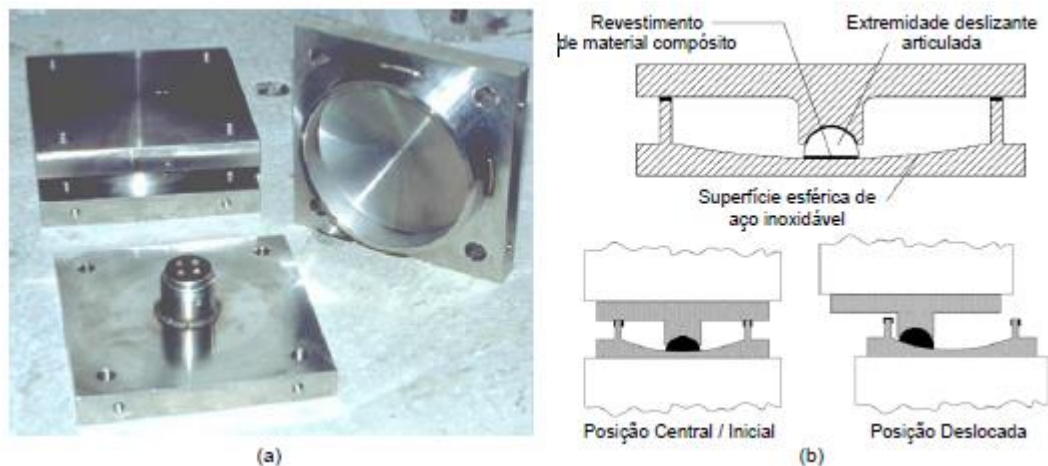


Figura 2.15 – a) aparelho de apoio FPS. b) identificação dos principais componentes e movimento do aparelho (Figueiredo, 2007).

Quando um sistema de isolamento constituído por apoios FPS é submetido a ação dinâmica as componentes articuladas dos aparelhos movimentam-se sobre as superfícies côncavas, forçando a estrutura suportada a descrever movimentos pendulares de pequena amplitude (Figueiredo, 2007).

A dissipação de energia destes aparelhos ocorre por atrito. Estes apoios permitem obter níveis de amortecimento da ordem dos 15 a 30% do amortecimento crítico.

A capacidade de recuperação à posição inicial de uma estrutura isolada por um sistema de aparelhos FPS é alcançada através do peso da estrutura devido à geometria

esférica da superfície de deslizamento dos dispositivos isoladores. Quando se movimenta da posição central a curvatura provoca a geração da força de restituição, induzida pela ação vertical do peso da estrutura, que promove um movimento de recuperação similar ao movimento de um pêndulo (Figueiredo, 2007).

O modelo de comportamento característico dos apoios FPS, é apresentado na Figura 2.16.

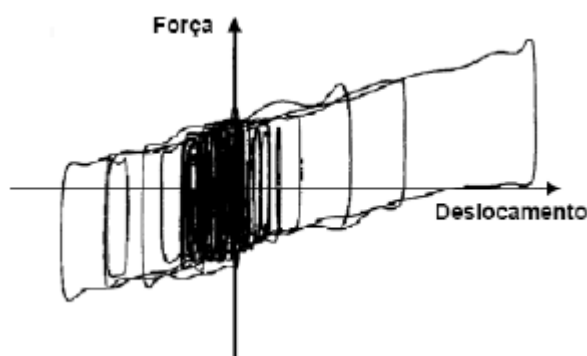


Figura 2.16 – Comportamento de um dispositivo FPS (Guerreiro, 1997)

2.1.5. Isolamento sísmico de estátuas

Os métodos de isolamento sísmico de base utilizados para edifícios são baseados no princípio de desacoplamento da superestrutura do solo, através da introdução de dispositivos de isolamento sísmico de baixa rigidez horizontal. Embora este tipo de isolamento sísmico seja adequado para muitos tipos de estruturas, eles geralmente não são adequados para estruturas monumentais, como estátuas e esculturas antigas que possuem um material particular e características geométricas diferentes dos sistemas estruturais convencionais.

Tendo em conta as limitações dos isolamentos de base tradicionais, os investigadores desta área começaram a estudar as possibilidades de adaptar e criar soluções inovadoras para proteção sísmica de estátuas, esculturas, artefactos e objetos de arte. A necessidade de proteger estes objetos contra sismos foi considerada vital, uma vez que estamos a falar de objetos que tem um valor histórico e cultural inestimável para a humanidade e que devem ser preservados para as próximas gerações.

Agbabian (Agbabian, et al., 1998), foram provavelmente os primeiros a desenvolver estudos analíticos e experimentais de avaliação e mitigação da vulnerabilidade sísmica para várias peças de arte. Augusti (Augusti, et al., 1992), estudaram a resposta sísmica de objetos de arte e propuseram algumas regras a ter em conta nos projetos de modo a reduzir a vulnerabilidade sísmica dos objetos de arte nos museus.

No que concerne a proteção sísmica de estátuas, esculturas e artefactos através de introdução de isolamento sísmico de base, Vestroni e Di Cinto (Vestroni, et al., 2000), realizaram um estudo paramétrico da resposta sísmica de uma estátua, considerando apenas um grau de liberdade, e isolada por um sistema de isolamento de base com comportamento histerético.

Atualmente existem várias formas de proteger os patrimónios culturais nos museus por meio de métodos de isolamento sísmico. A primeira abordagem é a global, que consiste em introduzir o isolamento sísmico na base do edifício do museu. Desta forma, as acelerações transmitidas aos objetos dentro do museu são indiretamente reduzidas graças ao isolamento sísmico do edifício. A outra é uma abordagem local, onde o isolamento é introduzido na base das estátuas. Neste caso o isolamento sísmico local tem a função de reduzir as acelerações que chegam do chão do edifício. Apesar disso, para adotar a segunda abordagem, a resistência do edifício a fortes excitações sísmica deve ser garantida, uma vez que se ele colapsar as estátuas isoladas localmente também serão destruídas, assim como o edifício.

No caso da solução de isolamento local deve-se ter o cuidado de caracterizar a solução de isolamento em função das propriedades geométricas e físicas das estátuas e do método construtivo utilizado na construção do museu (se está sísmicamente isolado ou não), e tipos de ações sísmicas. Todas essas características devem ser, portanto, examinadas cuidadosamente e a proposta do sistema de isolamento sísmico deve ser feita para cada caso em particular, considerando todas essas diferentes características (Castiglioni, et al., 2010).

2.1.5.1. Sistemas de isolamento de base propostos para isolamento de estatuas

Em seguida serão apresentados alguns sistemas de isolamento de base já desenvolvidos ou em desenvolvimento com o propósito de proteger estatuas, esculturas entre outros.

Caliò e Marletta (Caliò, et al., 2003) investigaram a possibilidade do controle de vibrações de objetos de arte através de um sistema de isolamento de base onde consideravam um modelo plano não linear. O modelo considerado consistia num bloco rígido simétrico, simplesmente apoiado em um suporte de massa móvel, conectado a um dispositivo viscoelástico, materializando um sistema de controle passivo (Figura 2.17).

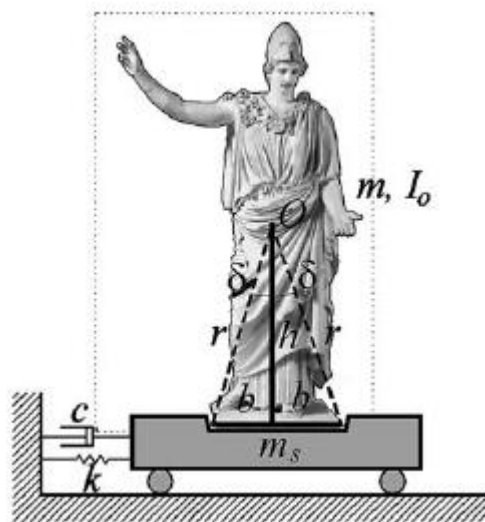


Figura 2.17 – O modelo considerado (Caliò, et al., 2003)

Guerreiro (Guerreiro, et al., 2007), apresentaram resultados experimentais e propuseram um modelo numérico para análise dos sistemas de isolamento do tipo Rolling-ball desenvolvido pelo Tun Abdul Razak Research Centre (TARRC), onde demonstraram a eficiência deste sistema de isolamento, na mitigação dos danos causados pelo sismo em estruturas leves. Este sistema de isolamento consiste num conjunto de bolas de aço que rolam em trilhas de borracha. Na Figura 2.18 a) apresenta um modelo esquemático do dispositivo, nas Figuras 2.18 b) e c) duas imagens do dispositivo em tamanho real.

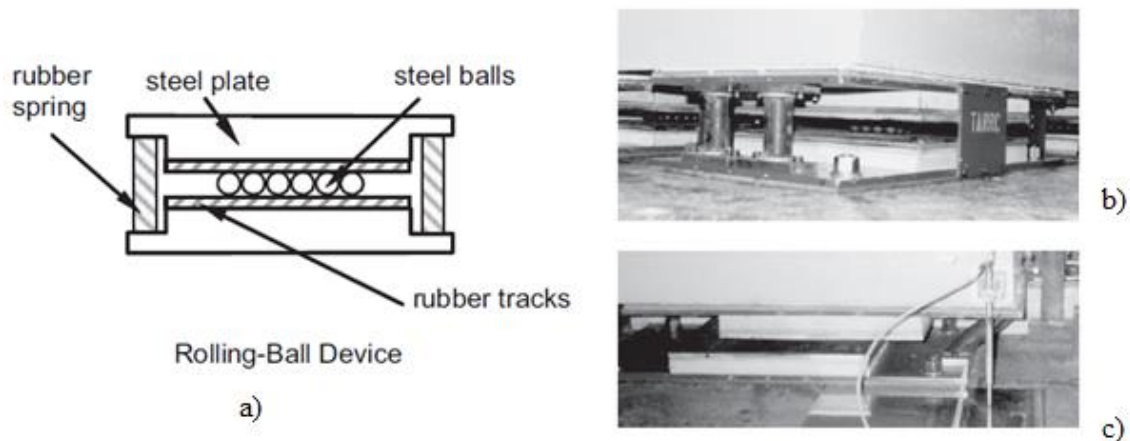


Figura 2.18 – Sistema de isolamento Rolling-Ball (Guerreiro, et al., 2007).

Facchini (Facchini, et al., 2015), propuseram um sistema de isolamento de base para a estátua de Miguel Ângelo (Figura 2.19 a)), que emprega apoios deslizantes entre o apoio da base da estátua e o chão. O sistema consiste em duas placas deslizantes dispostas de modo a desacoplar movimentos sísmicos, através de uma matriz de placas superiores móveis e placas inferiores fixas (Figura 2.19 b)). Para reproduzir o comportamento do sistema de isolamento eles empregaram o modelo histerético de Bouc e Wen, cujos parâmetros foram calibrados através de testes na mesa sísmica.

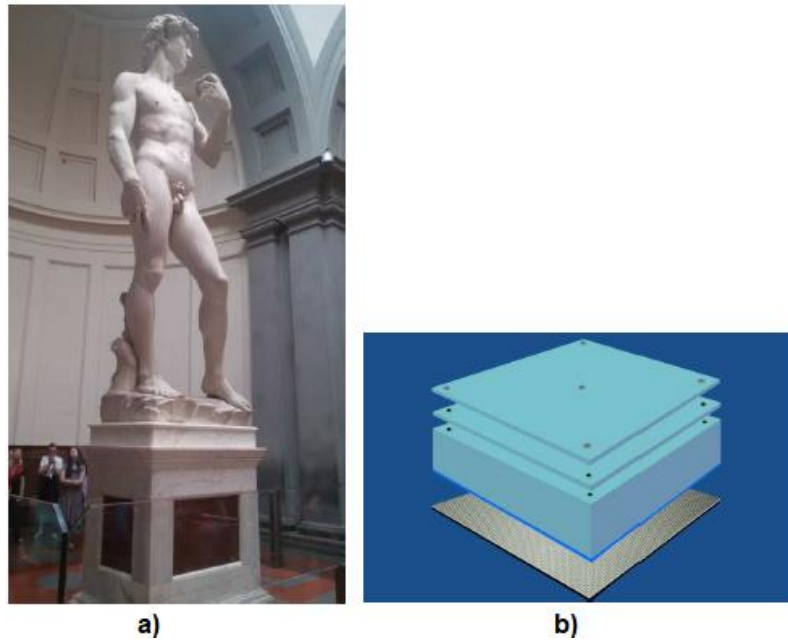


Figura 2.19 – a) Estatua de Michelangelo’s David; b) Sistema de isolamento de base proposto (Facchini, et al., 2015).

É importante referir que o sistema de isolamento de base (HDRB), apesar de em muitos casos não serem muito eficientes e económicos para estruturas leves e de baixa frequência foram utilizados para proteger algumas estátuas, como por exemplo a estátua do imperador germânico apresentada na Figura 2.20.

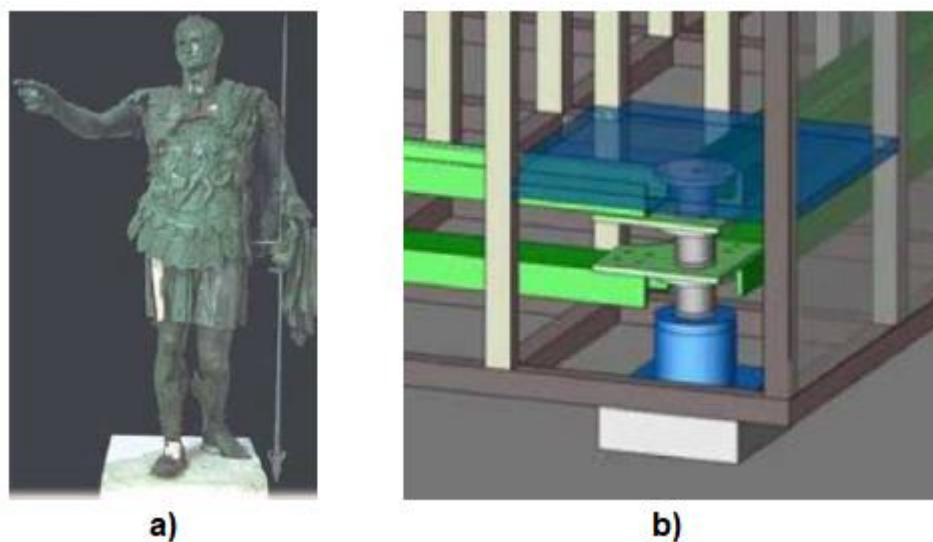


Figura 2.20 – a) Aspeto geral, b) detalhe do sistema de isolamento sísmico com 3 níveis de HDRB (Civil, 2011)

2.2. Considerações finais

Atualmente existem um grande leque de opções para sistemas de isolamento sísmico de base e cabe ao projetista escolher a solução de isolamento que se enquadra melhor para a estrutura a isolar de acordo com as características da estrutura e da excitação sísmica que a mesma estará sujeita.

No caso das estatuas é necessário ter uma especial atenção em relação às opções de isolamento sísmico de base, uma vez que, como foi mostrado neste capítulo os sistemas de isolamentos tradicionais não são totalmente eficientes para esse tipo de estruturas. Nesse tipo de estrutura deve-se fazer uma análise cuidadosa das suas características e a proposta de isolamento deve ser feita para cada caso em específico.

A aplicação de um sistema de isolamento de base tem como consequência a redução da frequência própria da estrutura, reduzindo a aceleração horizontais do solo transmitidas à estrutura.

3. MAGNETISMO

3.1. Introdução

No presente capítulo são abordadas temáticas relacionadas com o magnetismo, nomeadamente a sua origem e evolução do seu estudo, principais materiais ferromagnéticos, levitação magnética, caracterização da força de repulsão magnética e como tirar proveito da levitação magnética para o isolamento sísmico de estátuas.

Magnetismo é a designação associada ao fenómeno ou conjunto de fenómenos relacionados à atração ou repulsão observada entre certos materiais, tais como ferro, níquel e cobalto, para gerar campos magnéticos no seu estado magnetizado. O magnetismo pode ser explicado com base nas forças dipolo. Os materiais que dispõem de propriedades magnéticas possuem dois diferentes polos (polo Norte e o polo Sul). Quando esses objetos entram em contato com outros, os polos iguais se repelem e os polos opostos se atraem.

As primeiras observações de fenómenos magnéticos são bastante antigas, acreditando-se que estas observações foram realizadas pelos gregos, numa região da Ásia Menor denominada Magnésia em 2000 a.c. Eles verificaram que nesta região existia um tipo de rocha (magnetita) capaz de atrair pedaços de ferro. Atualmente sabe-se que essas rochas, chamadas imanes naturais, são constituídas por óxido de ferro (Máximo, et al., 2016).

O termo magnetismo foi usado para designar o estudo das propriedades desses imanes, devido ao local onde foram descobertos.

As propriedades magnéticas de atrair pedaços de ferro foi mencionada pelos gregos Tales de Mileto, Platão, Sócrates, entre outros. Os fenómenos magnéticos sempre foram confundidos com fenómenos elétricos, por possuírem efeitos semelhantes. O primeiro a diferenciá-los foi Girolano Cardano (1501-1576), que estudou as propriedades magnéticas de atração e repulsão do âmbar (Figura 3.1) (Máximo, et al., 2016).

As primeiras investigações sistemáticas em magnetismo foram executadas por William Gilbert, em aproximadamente 1600 d.c. no livro “De Magnete”, onde ele caracteriza as propriedades de atração e repulsão e perda das propriedades magnéticas ao aquecer os materiais magnéticos e, reconhecendo também que a própria terra é um enorme imane (Soares, 2005).

O estudo científico de magnetismo, que começou com Gilbert, reiniciou no século XIX, com a observação de Oersted, em 1820, onde verificou que o campo magnético está relacionado com uma corrente elétrica (Soares, 2005).

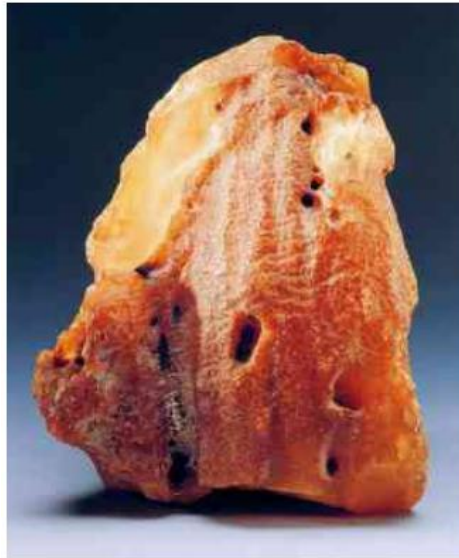


Figura 3.1 – Rocha típica de âmbar da região báltica, na Europa (Máximo, et al., 2016).

Supõe-se que o desenvolvimento de materiais magnéticos permanentes tenha iniciado no começo do século XX, quando aços magnéticos substituíram a magnetite.

No ano de 1983, foi descoberto no Japão um novo material magnético à base de neodímio-ferro-boro (NdFeB) (Soares, 2005).

Com a descoberta dos ímãs permanentes de NdFeB, houve uma grande variedade de trabalhos de pesquisa com a finalidade de estudar e melhorar as propriedades magnéticas destes ímãs.

Existem dois tipos de ímãs que são:

- Naturais – são aqueles que apresentam propriedades ferromagnéticas naturalmente, como exemplo pode se citar a magnetite (figura 3.2a).
- Artificiais – são aqueles que adquirem suas propriedades magnéticas ao serem atritados com ímãs naturais. A esse processo de magnetização chama-se imantação (figura 3.2b).

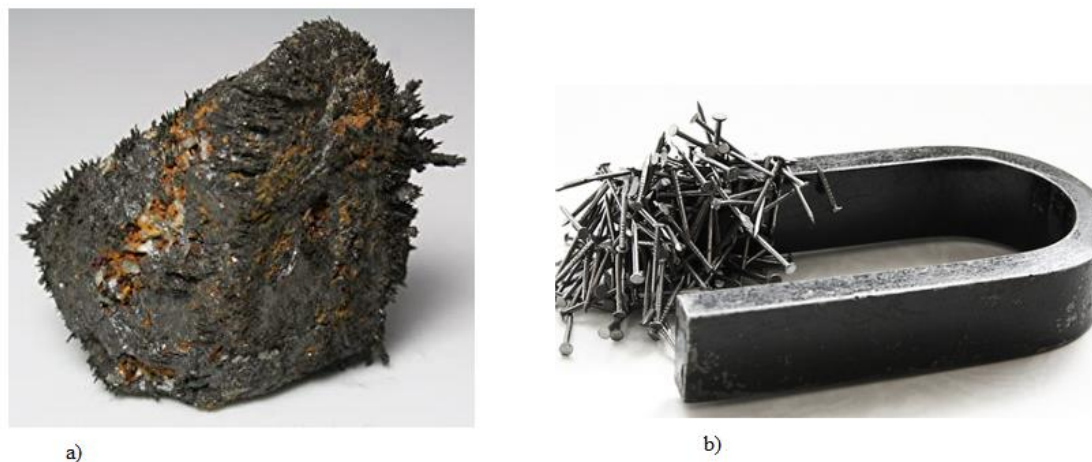


Figura 3.2 – Exemplos de ímanes, a) ímanes naturais (magnetite), b) ímanes artificiais (Soares, 2005).

3.2. Parâmetros magnéticos

3.2.1. Campo magnético

Um campo magnético é gerado por uma carga elétrica em movimento ou é produzido por um ímã permanente. Neste caso o campo é gerado pelo movimento orbital e pelo spin dos elétrons nos átomos (Faria, et al., 2005).

Mesmo que o campo magnético seja semelhante ao campo elétrico, apresenta algumas diferenças: as linhas do campo magnético não morrem nos ímanes, mas os atravessam. Fora dos ímanes as linhas do campo vão do polo norte ao polo sul e dentro deles do polo sul para o polo norte (Soares, 2005).

A intensidade do campo magnético (H), tem como unidade de medida o Ampère por metro (A/m). O campo magnético pode ser ilustrado por linhas 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/m^2). Quando um campo magnético é aplicado no vácuo, densidade de fluxo, apresenta a seguinte relação:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (3.1)$$

Sendo μ_0 a permeabilidade no vácuo, que toma o valor $4\pi \times 10^{-7}$ (T.m/A, ou H/m), e \mathbf{H} representa o vetor intensidade de campo magnético.

3.2.2. Permeabilidade magnética

A permeabilidade magnética, μ , é um parâmetro que depende do material e da sua preparação, e que associa a indução magnética do material em um certo ponto, em função do campo magnético existente nesse ponto, ou seja, ele quantifica o valor do campo magnético no interior de um material. Este campo existe devido à associação de uma condição magnética pré-existente na região, que envolve o material e a magnetização induzida no material por esse campo. É definida como o quociente entre a indução magnética \mathbf{B} e o campo aplicado \mathbf{H} , isto é:

$$\mu = \frac{\mathbf{B}}{\mathbf{H}} \quad (3.2)$$

Uma outra grandeza bastante importante 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 (Pinho, 2009).

A permeabilidade relativa mede a intensidade do campo magnético induzido. A permeabilidade magnética é medida a partir da permeabilidade inicial μ_i , e calcula-se através do declive da parte inicial da curva de magnetização, e pela permeabilidade máxima μ_{\max} , definida pela origem e pelo ponto de inflexão da indução magnética em função do campo magnético (Pinho, 2009).

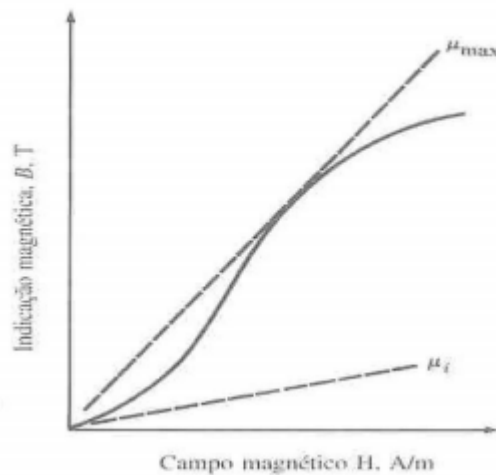


Figura 3.3 – Parte inicial da curva de magnetização B-H de um material ferromagnético. O declive μ_i é a permeabilidade magnética inicial e o declive μ_{max} é a permeabilidade máxima (Pinho, 2009).

3.2.3. Magnetização

O dipolo magnético é designado como a quantidade microscópica $m = IA$, para uma corrente I e uma área vetorial A (direção normal ao plano) (Robertson, 2013). Para uma coleção de dipolos magnéticos (como em um ímã permanente) num volume cada vez menor V , seu efeito pode ser quantificado com a magnetização macroscópica de o material M . A magnetização macroscópica do material é dada por:

$$\mathbf{M} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum \mathbf{m}}{V} \quad (3.3)$$

Cuja unidade é A/m,

Onde v , é o volume do ímã que é dado em m^3 .

Geralmente considera-se que a magnetização M dos ímãs permanentes é homogénea em todo o seu volume. No centro de um ímã cilíndrico (sem a presença de outros campos externos presentes), o campo magnético B é dado é dado pela seguinte relação:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{M} \quad (3.4)$$

Cuja unidade é A/m.

Nas extremidades divide-se por dois:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 \mathbf{H}}{2} \quad (3.5)$$

A relação entre a indução magnética \mathbf{B} , magnetização \mathbf{M} e campo magnético \mathbf{H} , é definida pela seguinte expressão:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{M} + \mathbf{H}) \quad (3.6)$$

A equação 3.6 pode ser utilizada para descrever a situação em todos os pontos do espaço (Figura 3.3). Mesmo na presença de um campo magnético externo, a densidade do fluxo magnético dentro do ímã permanente é a soma vetorial de \mathbf{H} e \mathbf{M} , quando no exterior do ímã, a magnetização $\mathbf{M} = 0$ e a densidade do fluxo magnético \mathbf{B} está relacionado com a intensidade do campo magnético \mathbf{H} através de uma constante. Disto resulta que \mathbf{B} , sendo contínuo em todos os lugares e tanto \mathbf{M} quanto \mathbf{H} sendo descontínuos (Robertson, 2013).

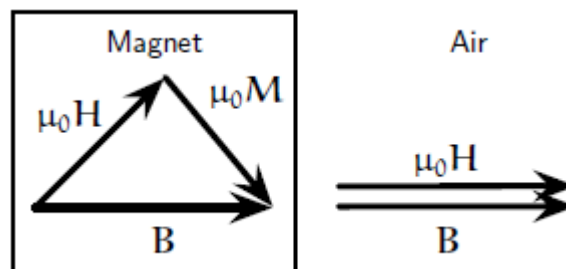


Figura 3.4 – Campo magnético e suas componentes dentro e fora de um ímã (Robertson, 2013).

3.2.4. Suscetibilidade magnética

A suscetibilidade magnética é definida como sendo o fator de proporcionalidade entre a magnetização de um material magnético e o campo aplicado. O seu símbolo matemático é χ , e é calculada a partir de:

$$\chi = \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{H}} \quad (3.7)$$

Esta grandeza serve frequentemente para expressar respostas magnéticas pouco intensa dos materiais e representa também a amplificação do campo magnético produzi-

do pelo material (tendo assim o mesmo significado que permeabilidade relativa) (Pinho, 2009). Essa relação é expressa a partir de:

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (3.8)$$

3.2.5. Fluxo magnético

Na representação do campo magnético, usam-se linhas que são chamadas de linhas de indução. Quanto mais intenso o campo, mais próximas estarão essas linhas entre si.

O fluxo magnético (ϕ) é definido como o número de linhas que atravessam uma superfície. Quanto maior for o número de linhas, mais intenso é o fluxo magnético. Sua unidade é Weber ($\text{Wb} = \text{Tm}^2$).

A expressão que permite determinar o fluxo magnético é:

$$\phi = B A \cos \theta \quad (3.9)$$

Em que B é densidade do campo magnético (T), A é área de incidência das linhas (m^2) e θ é o ângulo entre o vetor B e o vetor normal (n) a superfície, como mostra a Figura 3.5.

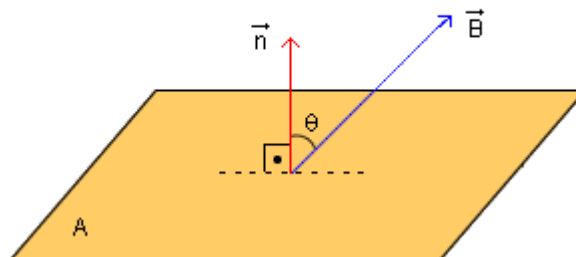


Figura 3.5 – Mostra o fluxo de um campo magnético ϕ através de uma superfície de área A (Soares, 2005).

A variação do fluxo magnético depende de três grandezas: B , A , θ . Se variarmos uma das grandezas referidas, conseqüentemente, teremos uma variação do fluxo do campo magnético através da superfície considerada (Faria, et al., 2005).

3.3. Levitação magnética

3.3.1. Conceito

Entre as várias formas de levitação de objetos, a técnica de levitação magnética é a que desperta a curiosidade dos investigadores da academia e da indústria, uma vez que pode ser utilizada para criar soluções tecnológicas inovadoras para o mercado, principalmente no setor do transporte, na indústria e no setor da construção civil.

O ato de um corpo permanecer no espaço a uma dada distancia de uma superfície graças a uma força de sustentação que compensa a força de gravidade, sem nenhum suporte visível é chamado de levitação.

Atualmente existem várias formas de levitação magnética como: levitação com ímanes permanentes, eletromagnéticas, diamagnéticas, eletrodinâmica, supercondutora. Neste trabalho apenas será caracterizada a levitação por ímanes permanentes.

3.3.2. Levitação com ímanes permanentes

Este fenómeno também conhecido como repulsão entre ímanes permanentes, ocorre entre ímanes permanentes devido à repulsão entre os polos da mesma natureza, gerando assim a levitação (Figura 3.6) (Costa, 2005). Segundo o teorema de Earnshaw não é possível uma levitação em equilíbrio estável utilizando apenas um arranjo estático de ímanes permanentes (Puppin, et al., 2002). Desta forma, uma combinação estática de ímanes permanentes dá origem ao que é chamado de pseudo-levitação, onde não é possível atingir um equilíbrio estável do sistema em todos os seus graus de liberdade simultaneamente (Ferreira, 2017). Sendo assim é necessário a utilização de vínculos mecânicos para estabilizar o sistema. Com a introdução de ligações mecânicas, há uma recuperação de parte do atrito que foi eliminado pela levitação (Figura 3.7).

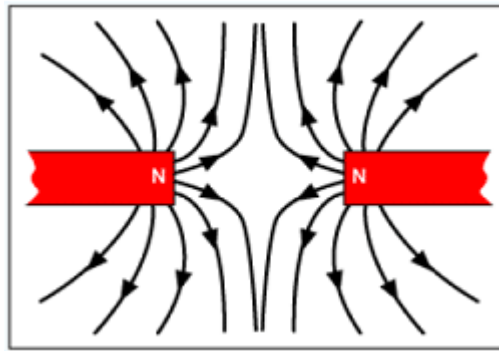


Figura 3.6 – Repulsão entre ímãs permanentes do mesmo polo.

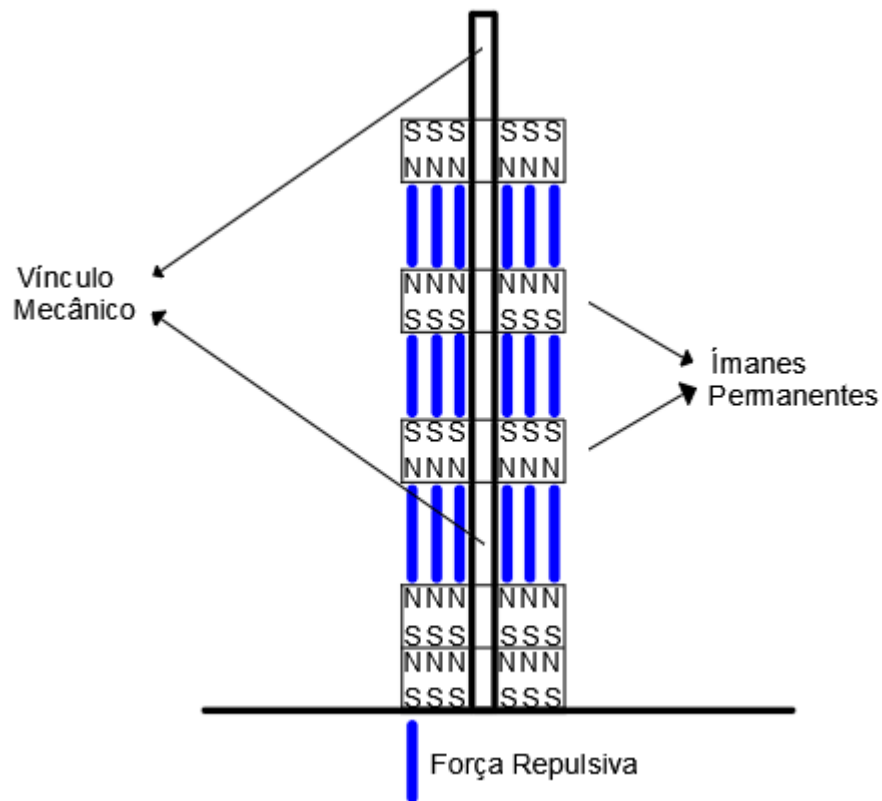


Figura 3.7 N – Diagrama de um levitador com ímãs permanentes (Adaptado de Costa , 2005).

Apesar do contacto devido ao vínculo mecânico que é introduzido, a levitação por ímãs permanentes tem aplicações em diversas áreas, como brinquedos, transporte, setor da construção civil e na indústria.

3.3.3. Levitação magnética no campo da proteção sísmica de estruturas

A força resultante da interação entre dois ímãs permanentes pode ser utilizada de várias maneiras para suportar cargas. É no contexto de tirar proveito da força magnética que vem sendo investigada a possibilidade da utilização da levitação magnética para criar soluções inovadoras para isolamento sísmico, sejam ativas, passivas e mistas de modo a mitigarem os danos causados pelos sismos nas estruturas.

A ineficiência dos sistemas de isolamento de base convencionais para sismo de baixa amplitude e em estruturas leves levou a que Puppín e Featello (Puppín, et al., 2002) desenvolvessem um dispositivo para o isolamento de vibrações baseado no princípio de suspender a carga com quatro pares de ímãs permanentes. Na Figura 3.9 a) é possível observar o dispositivo desenvolvido por eles, em que a mesa está suspensa e é apresentada junto com as molas magnéticas. Eles posicionaram os polos dos ímãs de modo a obter a força repulsiva necessária para suspender a carga. Como já mencionado nas secções anteriores, que, segundo o teorema de Earnshaw's a levitação magnética por ímanes permanentes não é estável, introduziram 4 rolamentos adicionais, conectados à mesa superior, sendo que cada rolamento se move ao longo do eixo vertical. Os rolamentos estão fixados numa mesa inferior, permitindo manter o sistema em equilíbrio estável (Figura3.9 b)).

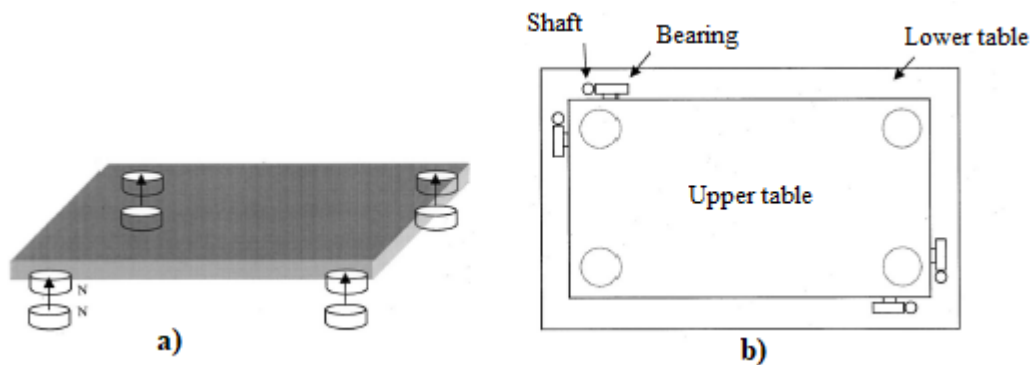


Figura 3.8 – a) Quatro pares de ímanes repelentes mantêm a mesa flutuando; b) Para garantir a estabilidade mecânica introduziu-se um sistema feito de quatro eixos verticais fixados na mesa que correm ao longo de eixos verticais (Puppín, et al., 2002).

Um outro estudo também desenvolvido é dos investigador japoneses Tsuda (Tsuda, et al., 2010), que desenvolvem um dispositivo de isolamento sísmico baseado

em levitação magnética supercondutora, investigando as características da força de levitação e a transmissão de vibrações à estrutura.

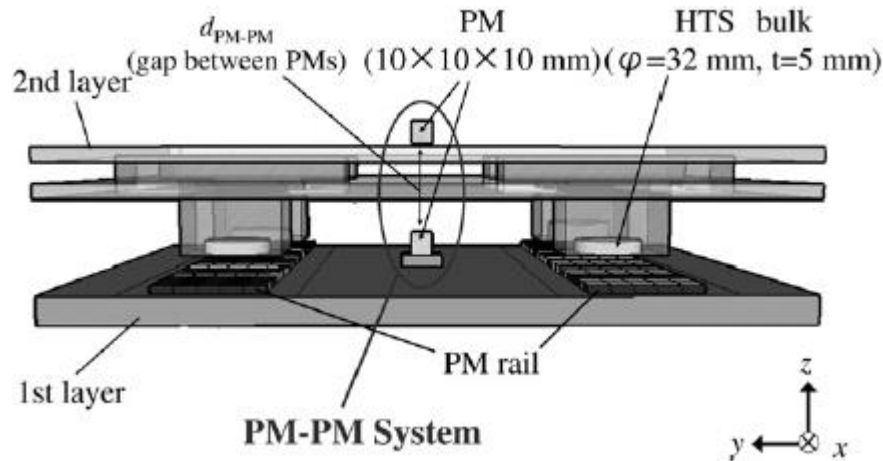


Figura 3.9 – Desenho esquemático do sistema PM-PM composto por dois ímãs permanentes de modo obter a levitação estacionária (Tsuda, et al., 2010).

3.4. Caracterização da força magnética

Nesta secção será efetuada a caracterização da força magnética entre dois ímãs permanentes. Será caracterizada a força magnética entre dois ímãs cilíndricos de neodímio. Esta caracterização será efetuada com recurso ao programa de elementos finitos (Finite Element Method Magnetics - FEMM) e experimentalmente.

3.4.1. Cálculo da força magnética entre dois ímãs cilíndricos com recurso ao programa FEMM

O FEMM é um software de distribuição livre, utilizado para resolver problemas eletromagnéticos de baixa frequência, em duas dimensões e nos domínios planar e axi-simétrico utilizando, para tal, uma análise de elementos finitos e a definição das condições de fronteira. São quatro os casos que ele pode resolver:

- Problemas magnetostáticos;
- Problemas magnéticos harmónicos lineares e não lineares;

- Problemas eletrostáticos lineares;
- Problemas de fluxo de calor em estado estacionário.

O FEMM também é dividido em três fases: Pré-processamento, processamento e pós-processamento.

- Pré-processamento: Nesta etapa é definido o domínio de estudo. Isto consiste na descrição geométrica do problema, onde são definidos parâmetros como unidade de comprimento, frequência, profundidade (tratando-se de um software 2D), precisão, materiais e as condições de fronteira. A etapa é finalizada com a geração da malha de elementos finitos;
- Processamento: É nessa etapa que ocorre a resolução das equações pertinentes no domínio discretizado, conforme o caso em estudo (eletrostático, magnetostático, etc.) e a formulação correspondente (no caso do FEMM, é utilizada a formulação em potencial vetor magnético nos cálculos magnetostáticos);
- Pós-processamento: Na etapa final ocorre a análise da distribuição de campos e de outras grandezas que podem ser calculadas rapidamente a partir do potencial vetor elétrico ou magnético pelo software com base nas equações de Maxwell. Essas grandezas podem ser elétricas ou magnéticas.

As condições de fronteira são condições que devem ser impostas nas fronteiras do domínio de estudo para que a resolução da formulação seja correta e forneça uma solução única. São considerados dois tipos de condições de fronteira:

- Condição de Dirichlet: nas fronteiras às quais é aplicada uma condição de Dirichlet, o valor do potencial vetor magnético é especificado. Logo, o campo magnético e a indução são tangenciais à fronteira, enquanto o campo elétrico lhe é perpendicular.
- Condição de Neumann: no FEMM, nenhuma condição é imposta a essa fronteira. Consequentemente, o campo elétrico deve ser paralelo a ela, e a indução e o campo magnético, perpendiculares.

Para caracterização do valor da força magnética é utilizado o modelo magnetostático, onde são descritas duas das quatro leis de Maxwell no domínio do eletromagnetismo de baixa frequência. As equações de Maxwell são referidas nos dois campos vetoriais,

ou seja, o campo elétrico e o campo magnético, que interagem de acordo com os princípios do eletromagnetismo.

Problemas magnetostáticos são problemas nos quais os campos são invariantes no tempo. Neste caso, a intensidade do campo magnético (H) e densidade de fluxo magnético (B) devem obedecer as seguintes equações de Maxwell, que descreve o modelo magnetostático (Meeker, 2018):

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (3.10)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{0} \quad (3.11)$$

As Equações 3.10 e 3.11 são também conhecidas como Lei de Ampère e a Lei de Gauss Magnética. J é a densidade de corrente nos condutores das bobinas [A/mm²].

A relação constitutiva entre a intensidade do campo magnético (H) e densidade de fluxo magnético (B) é definida pela Equação 3.1.

Para alcançar o objetivo de calcular a força magnética serão efetuadas várias simulações no software FEMM variando a distância (d) entre os dois ímãs cilíndricos. A Figura 3.10 mostra as diferentes disposições para o cálculo da força em função da distância.

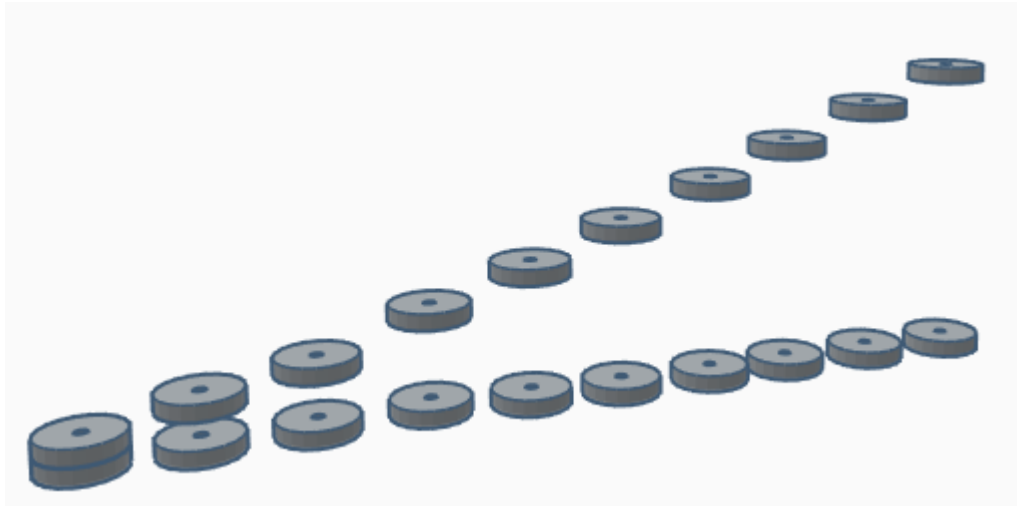


Figura 3.10 – Disposições para o cálculo da força magnética entre dois ímãs cilíndricos em função da distância. Os ímãs utilizados têm um diâmetro $\varnothing = 34 \text{ mm}$ e uma altura de 4mm.

O ímã cilíndrico utilizado nas simulações é constituído pelo material Nd2Fe14B (neodímio-ferro-boro), de denominação NdFeB 35 MGOe. O número, na denominação do ímã refere-se ao seu valor $BH_{max} = 35 \text{ MGOe} = 279 \text{ kJ/m}^3$. Este material existe na biblioteca de materiais do software FEMM, especificado pelo seu campo coercitivo $H_c = 905659 \text{ A/m}$ e por sua permeabilidade magnética relativa $\mu_r = 1.05$ (Meeker, 2018). O valor da indução magnética remanente para este ímã é de $B_r = 1.21 \text{ (T)}$ (Supermagnete, 2020). A partir da equação 3.8 calcula-se o valor da suscetibilidade magnética (χ) dos ímãs.

$$\chi = 1.05 - 1 = 0.05$$

Na Tabela 3.1 estão organizadas as propriedades magnéticas dos ímãs utilizados na simulação e na Tabela 3.2 e a Figura 3.12 apresentam-se as informações técnicas fornecidas pelo fabricante dos ímãs.

Tabela 3.1 – Propriedades magnéticas dos ímãs NdFeB 35 MGOe

BH_{max} (MGOe)	μ_r	χ	H_c (A/m)	B_r (T)
35	1.05	0.05	905659	1.21

Tabela 3.2 – Informação técnica dos ímãs (Supermagnete, 2020)

Informação Técnica	
Referência	CS-S-34-04-N
Material	NdFeB
Força	approx. 10 kg (approx. 98,1 N)
Diametro (D)	34 mm
Altura (H)	4 mm
Diametro interno 1 (d1)	4,5 mm
Diametro interno 2 (d2)	9,46 mm
Countersink t	2,48 mm
Tolerancia	+/- 0,1 mm
Revestimento	nickel-coated (Ni-Cu-Ni)
Magnetização	N35
Temperatura máx	80°C
Peso	26,6600 g

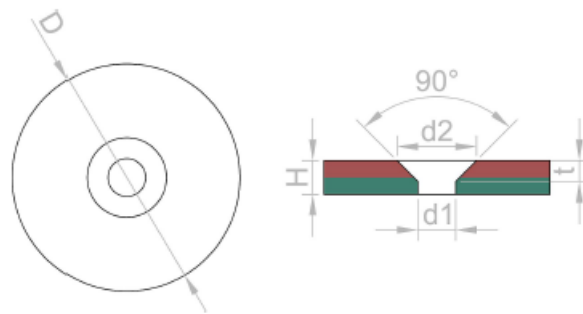


Figura 3.11 – Dimensões do ímã em planta e corte (Supermagnete, 2020).

Como o modelo apresenta simetria axial o mesmo foi definido no FEMM como um problema do tipo Axisimétrico (Figura 3.12 a)). Definiu-se uma malha com 1 mm no interior dos ímãs e também no ar em seu redor. Desta forma, obtiveram-se 3473 nós e 6634 elementos (Figura 3.12 b)). As simulações foram realizadas com espaçamento d entre os dois ímãs para $d = 0.5$ mm até o espaçamento $d = 40$ mm, com incremento de 5 mm, exceto no inicial onde se usou um incremento de $d = 0.5$ mm.

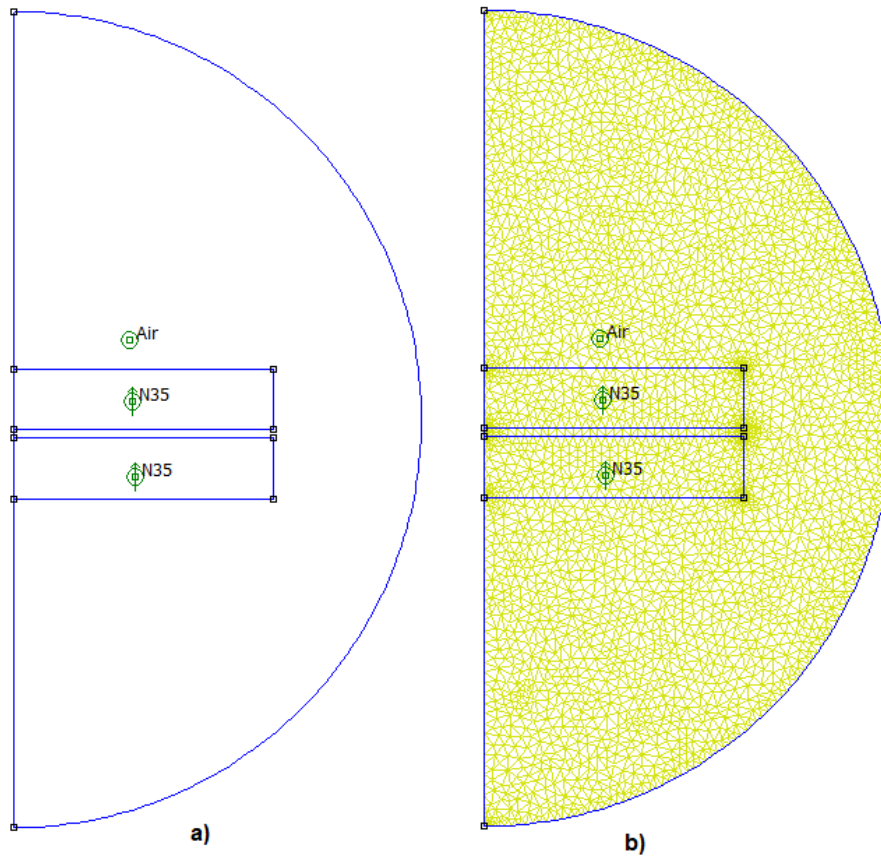


Figura 3.12 – a) Definição geométrica do problema no programa. b) Malha triangular de 1mm gerada no programa

A Tabela 3.3 apresenta o valor da força entre ímãs cilíndricos, obtidas através das simulações com o programa FEMM, de acordo com as disposições apresentadas na Figura 3.10.

Tabela 3.3 – Resultados da força magnética (de repulsão) entre dois ímãs cilíndricos obtidos nas simulações com o programa FEMM

d (mm)	Força (N)
0.5	68.99
1	61.34
5	29.74
10	13.6
15	7.92
20	5.12
25	3.42
30	2.37
35	1.73
40	1.26

A Figura 3.13 representa graficamente os resultados da Tabela 3.3.

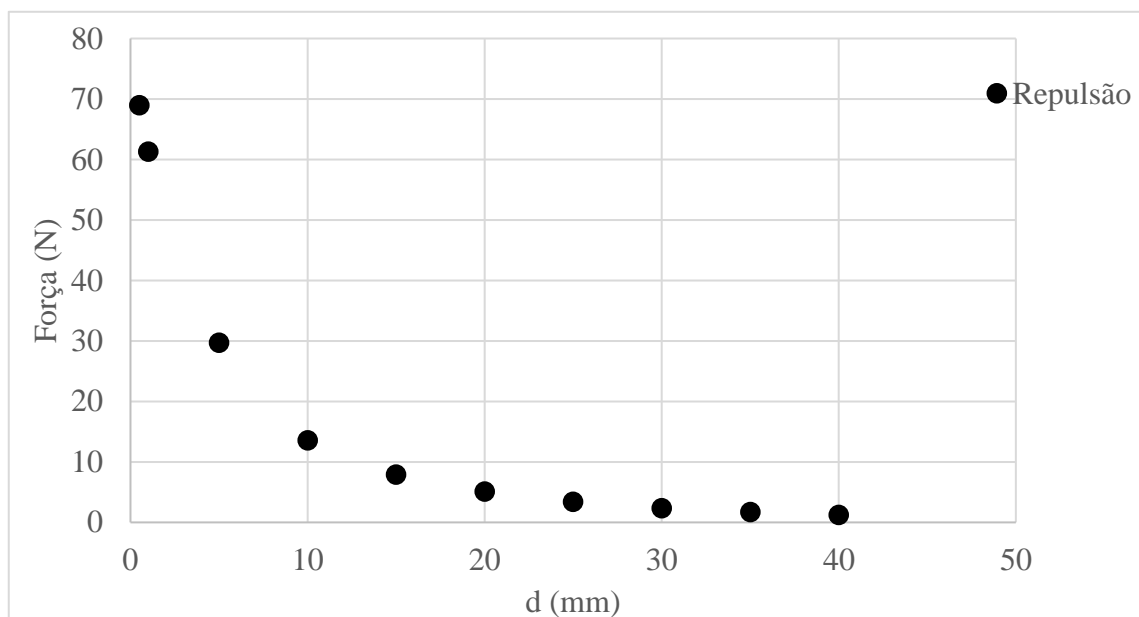


Figura 3.13 – Gráfico do valor da força magnética (de atração e repulsão) entre dois ímãs cilíndricos, obtidos pelas simulações no programa FEMM de acordo com as disposições apresentadas na Figura 3.11.

As Figuras 3.14 e 3.15 apresentam os resultados gráficos dos valores da densidade magnética e do campo magnético obtidos da simulação para uma determinada distância (d) entre os ímãs.

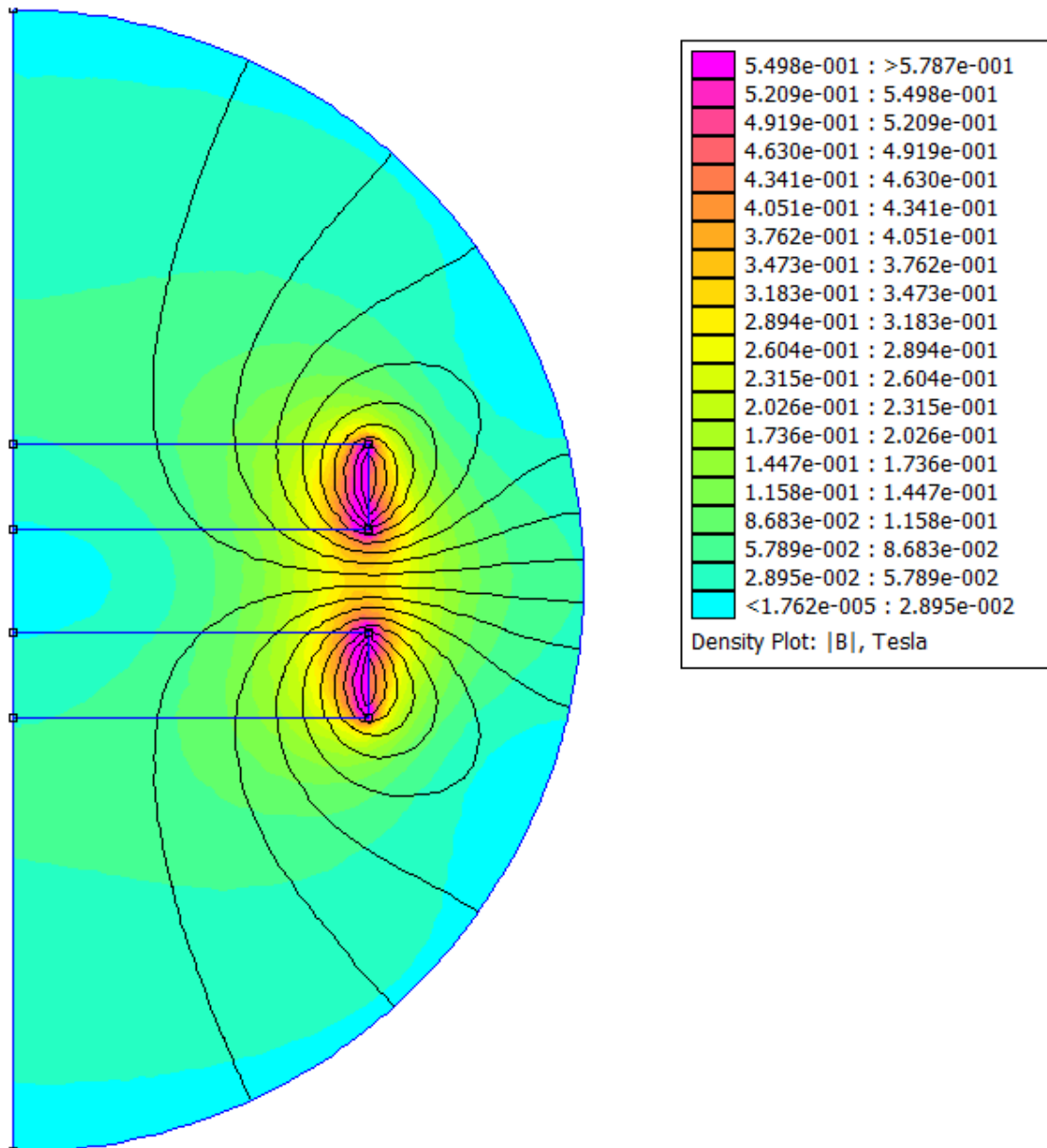


Figura 3.14 – Gráfico da densidade de fluxo magnético obtido da simulação no FMM da interação magnética entre dois ímãs cilíndricos, com um espaçamento entre eles de 5mm.

Com base na Figura 3.14 constata-se que a densidade do fluxo magnético é maior nos polos uma vez que a distância entre as linhas de fluxo é bastante pequena nessa zo-

na, enquanto que nas zonas onde a distância entre as linhas de fluxo é maior a densidade do fluxo magnético é menor.

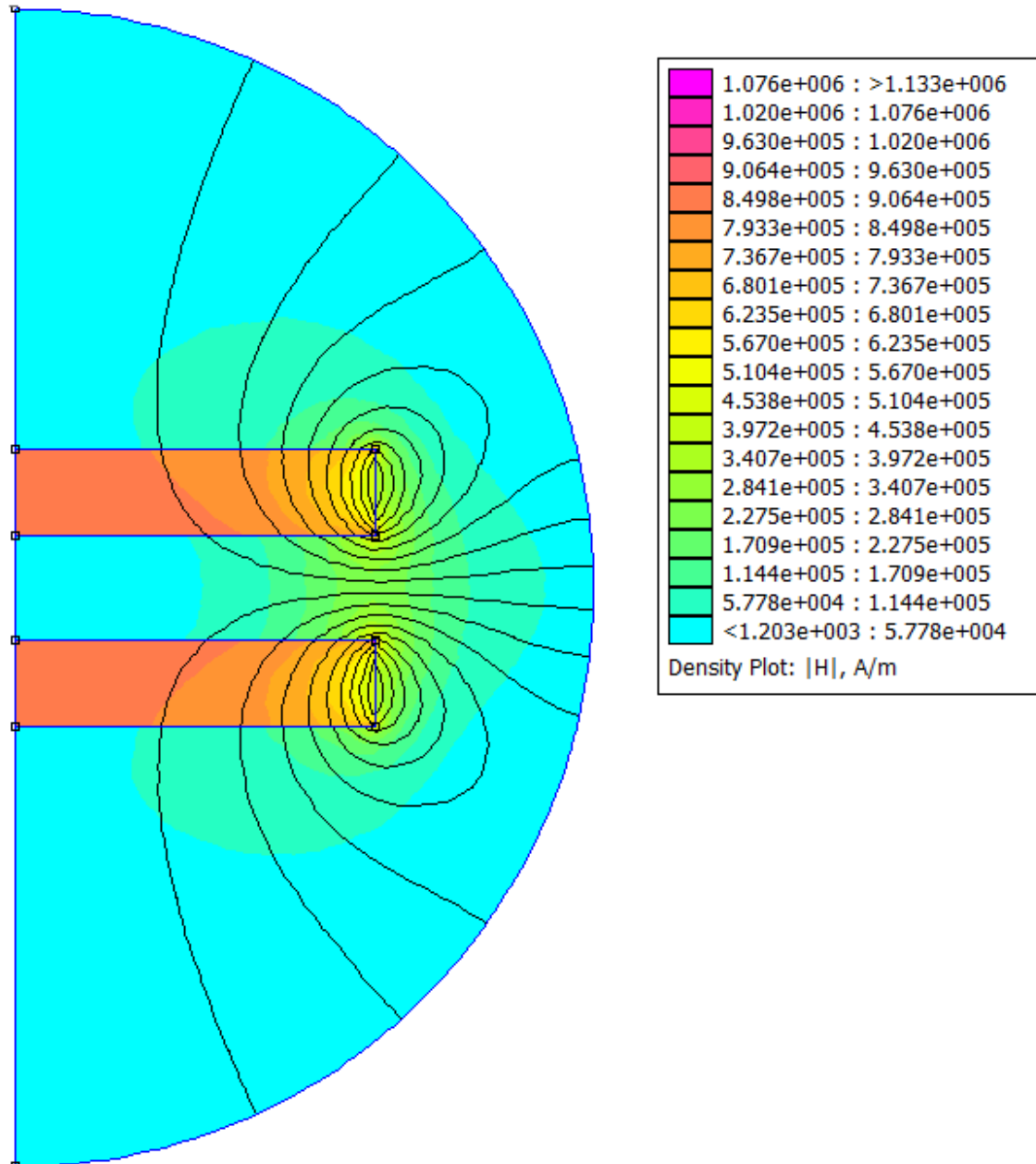


Figura 3.15 - Gráfico da intensidade do campo magnético obtido da simulação no FMM da interação magnética entre dois ímãs cilíndricos, com um espaçamento entre eles de 5mm.

Com base na Figura 3.15 constata-se que a intensidade do campo magnético é menor nos polos.

3.4.2. Cálculo experimental da força magnética entre dois ímãs cilíndricos.

Realizou-se uma análise experimental entre dois ímanes cilíndricos para verificar se os valores da força magnética obtidos da simulação correspondem aos valores da medição física. As características dos ímanes utilizados são apresentadas na tabela 3.1 e 3.2.

Foi necessário criar um molde de suporte para os ímanes de modo a serem encaixados no equipamento de medição da força como mostra a Figura 3.16.

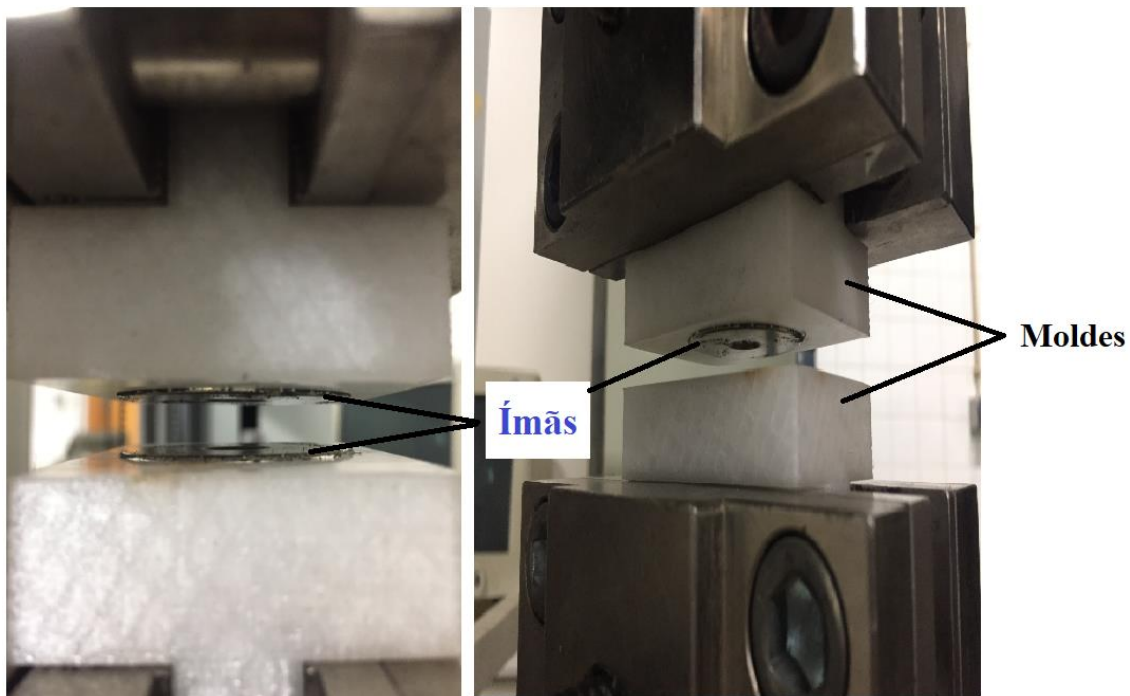


Figura 3.16 – Molde de suporte dos ímanes

Na experiência, os ímanes repelem um ao outro, sendo submetidos a diferentes intensidades de força, uma vez que a distancia entre eles vai variando (distância d). A força magnética foi medida entre as distâncias de 0.10 mm a 40.10 mm em intervalos de 0.01mm.

Na Tabela 3.4 são apresentados os resultados da medição física da força, de acordo com as disposições estabelecidas na Figura 3.10. A Figura 3.17 apresenta graficamente os resultados da Tabela 3.4.

Os valores apresentados na Tabela 3.4 correspondem a uma média dos valores obtidos das 14 medições que foram realizadas. É importante referir que na análise experimental somente mediu-se a força de repulsão.

Tabela 3.4 – Média dos valores da força magnética (de repulsão) que resultam da interação entre dois ímanes cilíndricos, obtidos experimentalmente em função da distância d .

d (mm)	Força (N)
0.5	61.7
1	53.84
5	22.5
10	10.1
15	6.17
20	4.21
25	2.24
30	1.4
35	1.12
40	0.84

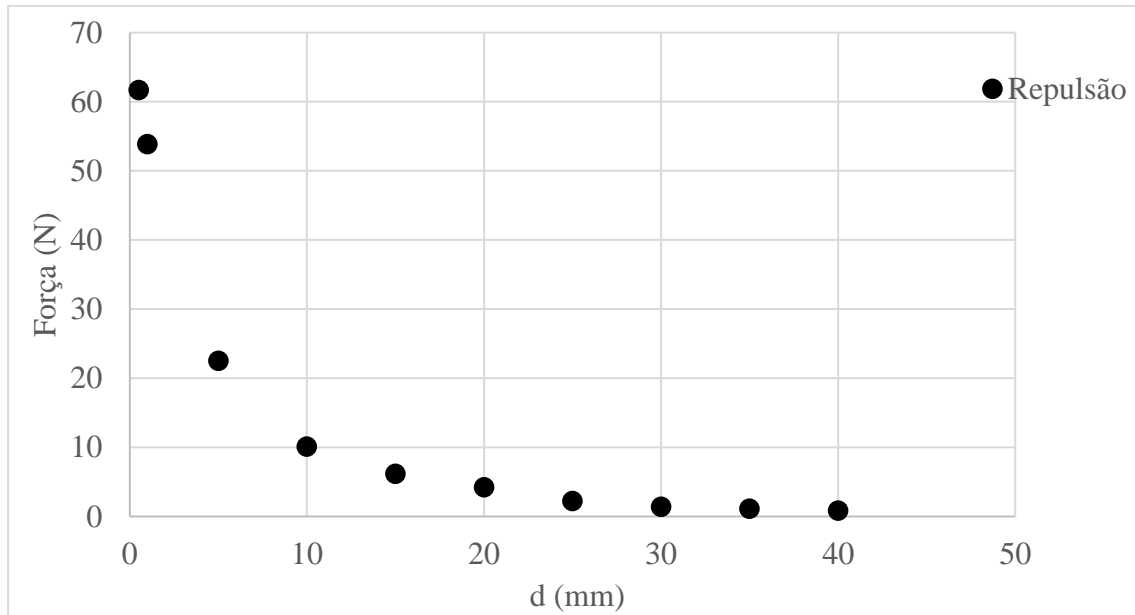


Figura 3.17 - Gráfico da força magnética média (de repulsão) entre dois ímãs cilíndricos, obtidos experimentalmente em função da distância d.

3.4.3. Comparação dos resultados obtidos pelas simulações no FEMM com os obtidos experimentalmente

Foi efetuada uma comparação para os valores da força de repulsão. A figura 3.18 apresenta graficamente essa comparação.

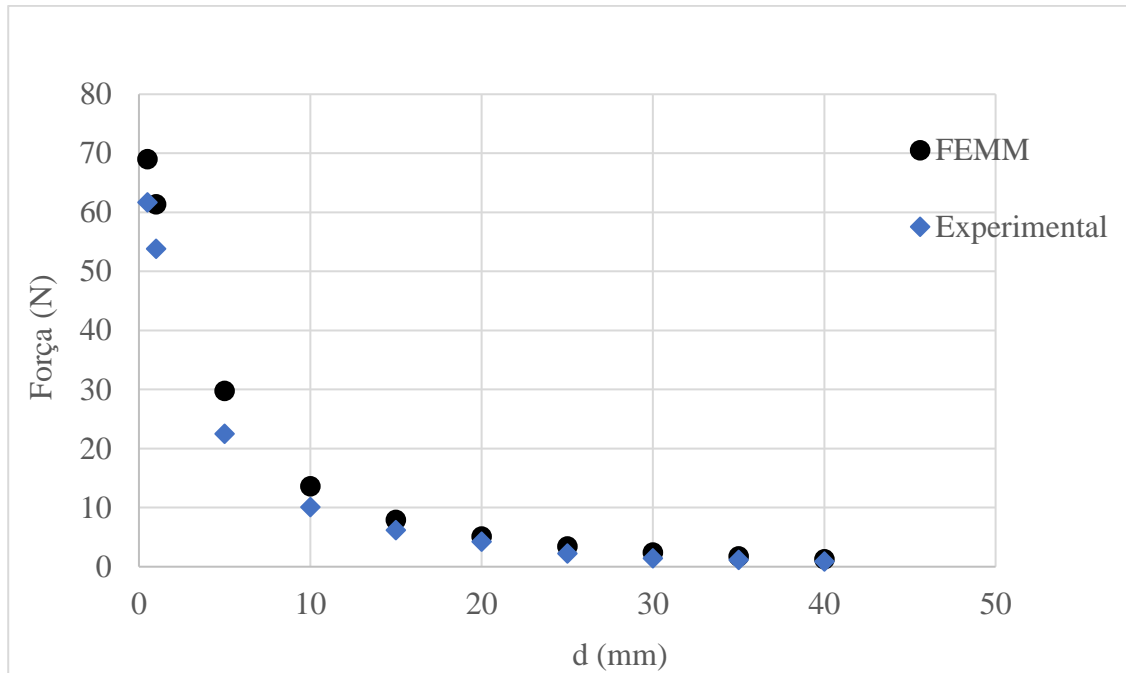


Figura 3.18 – Comparação da força magnética de repulsão entre a medição experimental e o cálculo por elementos finitos no FEMM

Em relação à comparação da força magnética de repulsão (Figura 3.18) constata-se que os valores experimentais e os obtidos pelo FEMM são similares, apresentado uma diferença um pouco mais acentuada para valores da distância (d) entre 0 e 1 mm.

Com base nesses valores obteve-se por via de regressão exponencial uma expressão aproximada para a força magnética de repulsão, com um coeficiente de determinação (R^2) $R^2 = 0.9773$.

$$\mathbf{F = 50.324e^{-0.101d}} \quad (3.12)$$

4. PROPOSTA DE UM DISPOSITIVO DE ISOLAMENTO DE VIBRAÇÕES BASEADO EM LEVITAÇÃO MAGNÉTICA.

4.1. Introdução

Neste capítulo vai ser apresentada uma proposta para um aparelho de isolamento de vibrações baseado no conceito de levitação magnética.

4.2. Apresentação do protótipo

O protótipo experimental que foi projetado e construído como parte deste estudo é representado esquematicamente na Figura 4.1. A Figura 4.2 mostra uma fotografia do mesmo. O protótipo consiste em dois pares de ímãs em repulsão para suporte de carga vertical e um par de molas elásticas para estabilizar o sistema magnético e conferir a rigidez horizontal. As molas elásticas foram conectadas à plataforma de levitação e a fixações mecânicas laterais, que foram introduzidas para manter o sistema em equilíbrio.

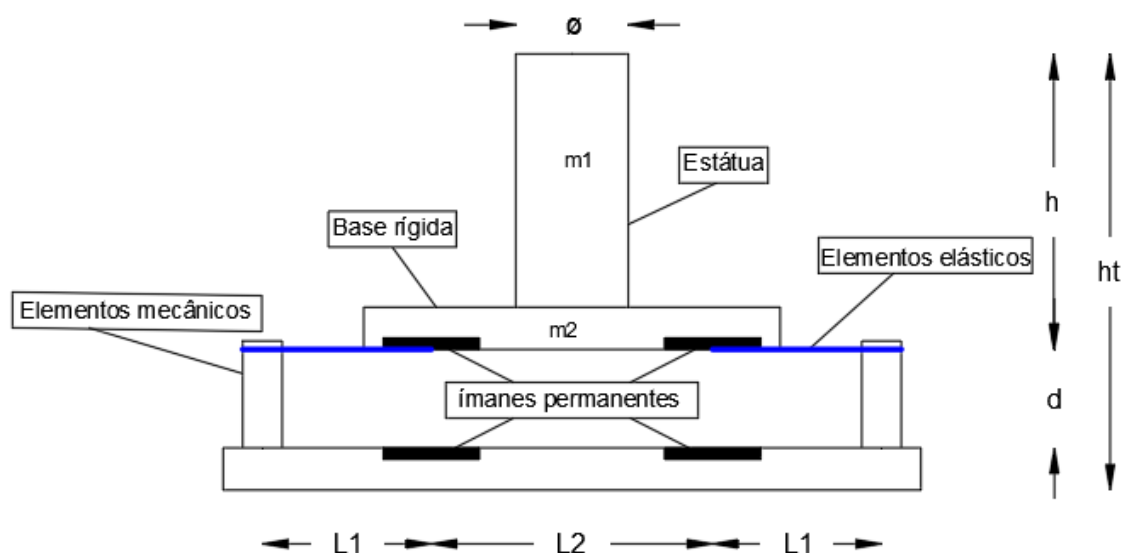


Figura 4.1 - Esquema do aparelho desenvolvido

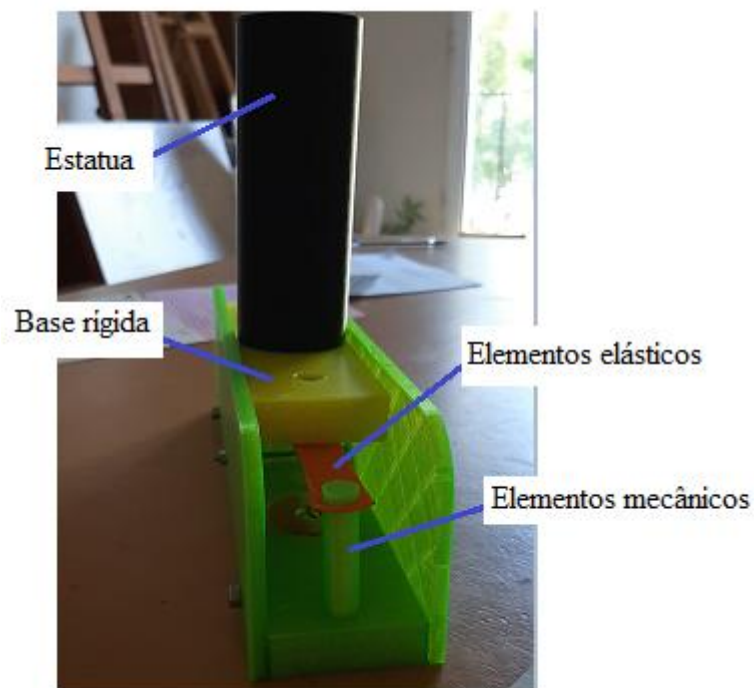


Figura 4.2 - Foto do aparelho desenvolvido para análise experimental

Os valores dos parâmetros físicos do protótipo são apresentados na Tabela 4.1. O dispositivo que será ensaiado foi construído para servir de base para investigação da resposta dinâmica de um sistema de quatro graus de liberdade suportado por ímãs com rigidez variável. Pretende-se demonstrar a eficiência desse sistema na mitigação de vibrações induzidas pelos sismos de baixa amplitude às estruturas, nomeadamente estátuas. Todo o protótipo foi materializado utilizando uma tecnologia de impressão 3D, utilizando filamentos polimérico do tipo PLA e de poliuretano.

Tabela 4.1 – Parâmetros físicos do Protótipo

Altura total do dispositivo	ht	155 mm
Altura da estátua	h	100.05 mm
Diâmetro da estátua	Ø	40 mm
Comprimento	L1	60 mm
Comprimento da base rígida	L2	100 mm
Altura inicial de levitação	d	35 mm

O corpo escolhido para representar a estátua apresenta uma secção circular e é regular em altura, sendo que as suas características geométricas estão apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Características geométrica do Protótipo

Massa da estatua	m1	0.362 kg
Massa da base	m2	0.1 kg
Inercia da estátua	I	125664 mm ⁴
Módulo de elástecidade da estátua	E	30 GPa
Módulo de elástecidade das molas elasticas	Ep	2.9 GPa
Area das molas elasticas	A	3.14159x10 ⁻⁶ mm ²

As molas elásticas estão fixadas ao nível da face inferior da plataforma de levitação sendo materializadas por bandas finas de plástico flexível (poliuretano) que por sua vez estão fixas à base do aparelho. A existência de elementos físicos que permitem manter estável a levitação magnética por ímanes permanentes, compromete a ideia da inexistência de contacto no uso levitação magnética para isolamento de vibrações. Para criar um sistema completamente sem contato seria necessário um sistema de controle com eletroímãs, uma vez que os mesmos podem ser utilizados para aplicar a restrição horizontal. No caso em estudo não serão utilizados eletroímãs por isso foram introduzidos elementos físicos que desempenham esse papel.

4.2.1. Ímanes

Os ímanes usados para o protótipo experimental foram escolhidos com base na facilidade, disponibilidade e construção. Ímanes cilíndricos foram usados, com dimensões de $\phi 34\text{mm} \times 4\text{mm}$ e propriedades do material conforme mostrado nas Tabelas 3.1 e 3.2. Os ímanes cilíndricos foram escolhidos pela sua facilidade de integração na construção do aparelho. Os ímanes são fixos perfurando um orifício redondo na base inferior (tem 15mm de espessura) assim como na superior (15mm de espessura) que com ajuda de um parafuso permite fixar os ímanes.

4.2.2. Elementos elásticos

As molas elásticas do protótipo experimental são materializadas por redes muito finas feitas de poliuretano (Figura 4.3), cujo comprimento é representado por L_1 . As características geométricas e físicas das molas estão indicadas na Tabela 4.1.

Os elementos elásticos estão fixados à base de levitação e ancoradas a elementos mecânicos existentes na base inferior do aparelho, como se pode ver na Figura 4.3.

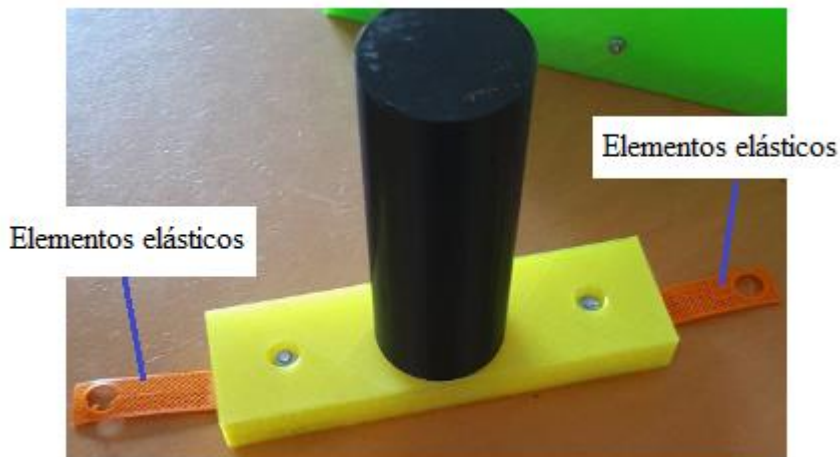


Figura 4.3 - Molas elásticas fixadas nos cantos da base rígida

4.3. Ensaio do modelo na mesa sísmica

Os ensaios foram realizados no laboratório de dinâmica de estruturas da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Para medição da aceleração foram colocados três acelerómetros: na base, no topo do da estátua e ao nível da própria mesa sísmica, para a medição das acelerações impostas na estrutura. A Figura 4.4 mostra todo protótipo experimental. Também se pode observar na mesma imagem os acelerómetros montados.

As ações aplicadas ao modelo, durante a análise experimental tiveram como base um conjunto de excitações harmónicas, com várias frequências e amplitudes e podem ser encontradas no Anexo 1.

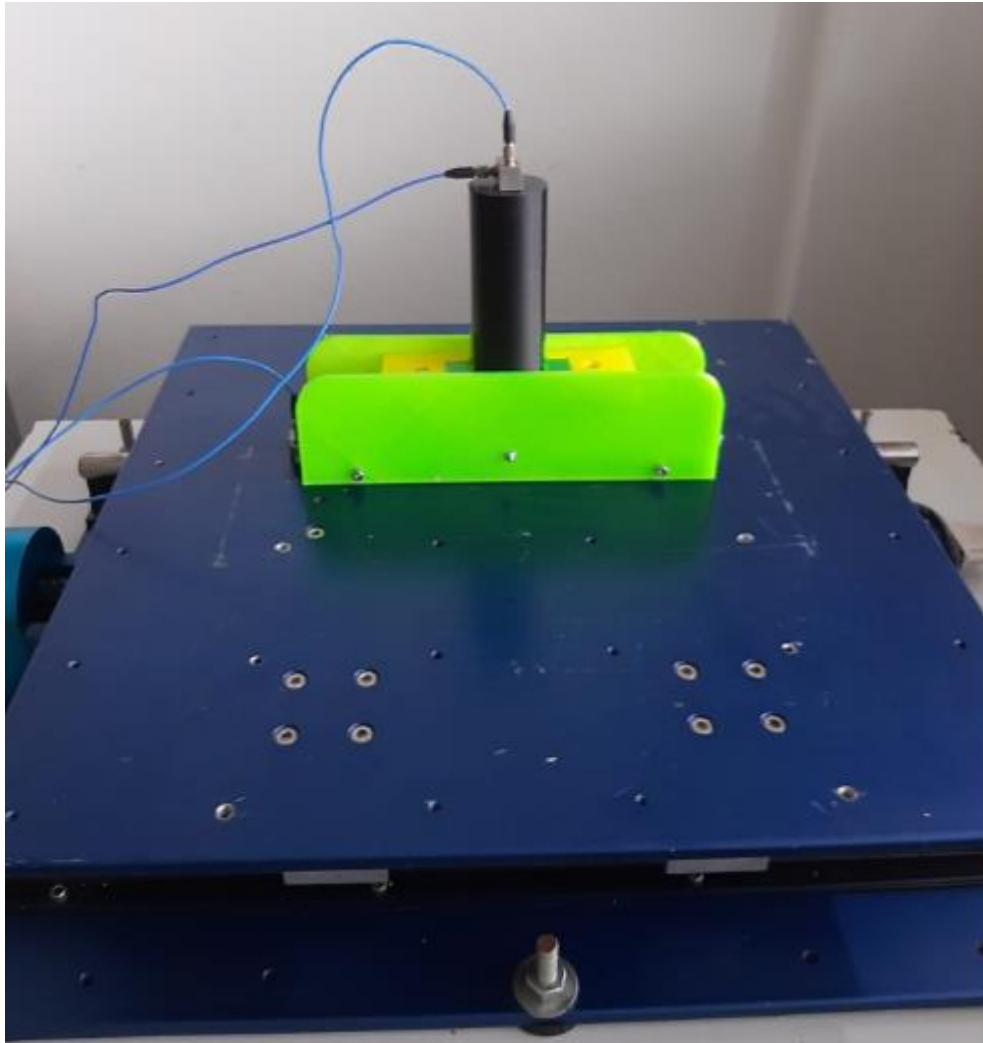


Figura 4.4 – Configuração do teste do protótipo na mesa sísmica

4.3.1. Análise de resultados do ensaio

Foi efetuada uma análise do desempenho do protótipo com base na comparação entre a aceleração de resposta da estrutura e a respetiva aceleração introduzida ao nível da base, de modo verificar a redução da aceleração da estrutura isolada. A Figura 4.5 apresenta a aceleração de pico da massa versus a aceleração de base (aceleração da mesa) para o sistema proposto.

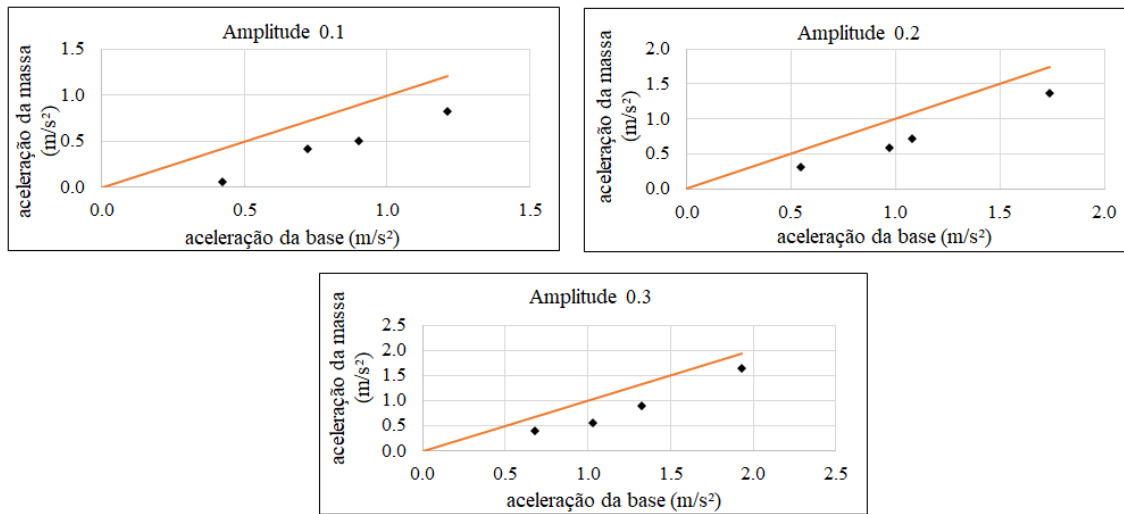


Figura 4.5 - Aceleração de pico da massa em função da aceleração de base para diferentes excitações.

Como se pode observar a partir a Figura 4.5, para as excitações analisadas, o dispositivo apresenta um bom desempenho, reduzindo aceleração de resposta em comparação com aceleração imposta.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISES NUMÉRICAS DA PROPOSTA PARA APARELHO DE ISOLAMENTO SÍSMICO BASEADO EM LEVITAÇÃO MAGNÉTICA

5.1. Introdução

Nos capítulos anteriores foram abordadas diversas temáticas relacionadas com o eletromagnetismo, tendo-se efetuado a caracterização da força magnética entre dois ímãs e apresentado uma proposta de um protótipo experimental para o isolamento de vibrações de estruturas baseado no conceito de levitação magnética. No presente capítulo será apresentado um modelo numérico para efetuar o estudo da resposta dinâmica de uma estátua sujeita a uma excitação dinâmica.

5.2. Apresentação do modelo numérico

O modelo estrutural sob investigação está apresentado na Figura 5.1 e composto de um corpo que se assume flexível, com a massa (m) concentrada no topo do mesmo (representa uma estátua), estando apoiado numa base rígida. O corpo pode mover-se horizontalmente, estando fixo nos cantos por meio de molas elásticas (com rigidez kh) que o conectam a um suporte fixo. A rigidez vertical é conferida por meio de molas magnéticas com rigidez km .

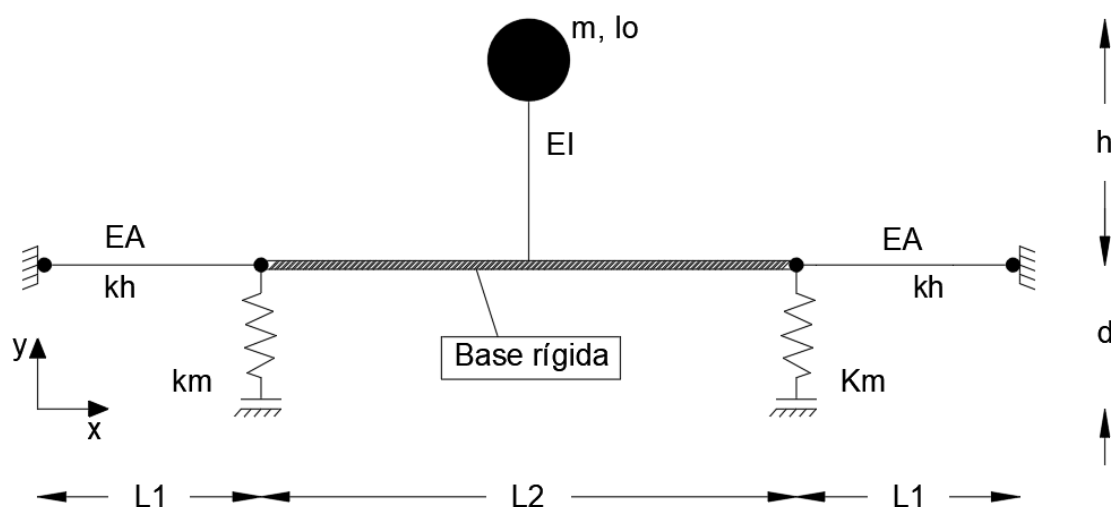


Figura 5.1 – Modelo estrutural proposto

Para efetuar a análise do modelo proposto é necessário primeiro definir o número de graus de liberdade da estrutura que interessam para o estudo em questão. Foram definidos quatro graus de liberdade no modelo proposto, como mostra a Figura 5.2.

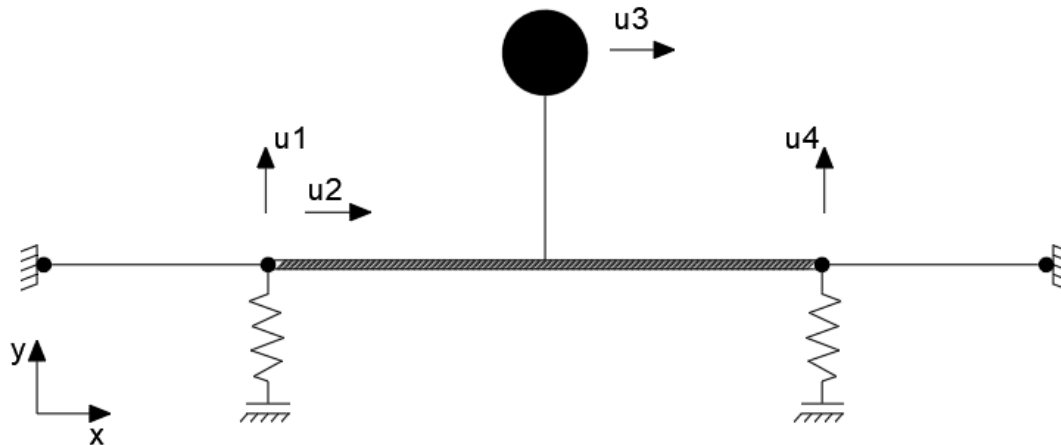


Figura 5.2 – Representação dos graus de liberdade no modelo estrutural.

Iniciou-se por estudar um modelo mais simples, apenas para carregamentos estáticos, ou seja, sem introdução de ações dinâmicas e a massa. Esse estudo permitiu analisar o comportamento do sistema em termos da força e da rigidez conferida pelas molas magnéticas durante a fase de carregamento e descarga (incremento ou redução da distância entre os ímanes). Para efetuar esse estudo adotou-se um modelo simples com quatro ímanes colocados na posição vertical. Os ímanes que se encontram nos cantos estão fixos e os ímanes que se encontram conectados a plataforma central (que contém dois ímanes um em cada canto) podem se movimentar direção x, uma vez que a plataforma central é móvel nessa direção (Figura 5.3).

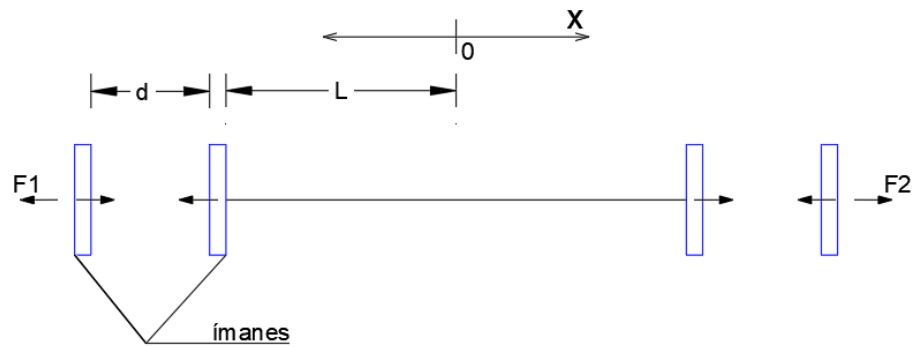


Figura 5.3 – Modelo utilizado para estudar o comportamento da rigidez durante o carregamento e descarga, ou seja, para um incremento ou redução da distância d entre os ímãs.

Onde x representa a direção dos deslocamentos que serão impostos ao modelo.

Foi feita uma implementação numérica em ambiente Matlab para analisar a força e rigidez. A força de repulsão dos ímãs é calculada a partir da equação 3.12. a força total de repulsão é dada por:

$$F_T = F_2 - F_1 \quad (5.1)$$

E a rigidez é dada por:

$$K = \Delta F_T / \Delta u \quad (5.2)$$

Onde u é vetor dos deslocamentos impostos ao modelo.

A título de exemplo serão efetuadas análises numéricas (Figuras 5.4 e 5.5) para um vetor de deslocamentos imposto de $u = [2, -4]mm$ e outra para $u = [10, -20]mm$ para um valor de $d = 20mm$ e $L = 20mm$.

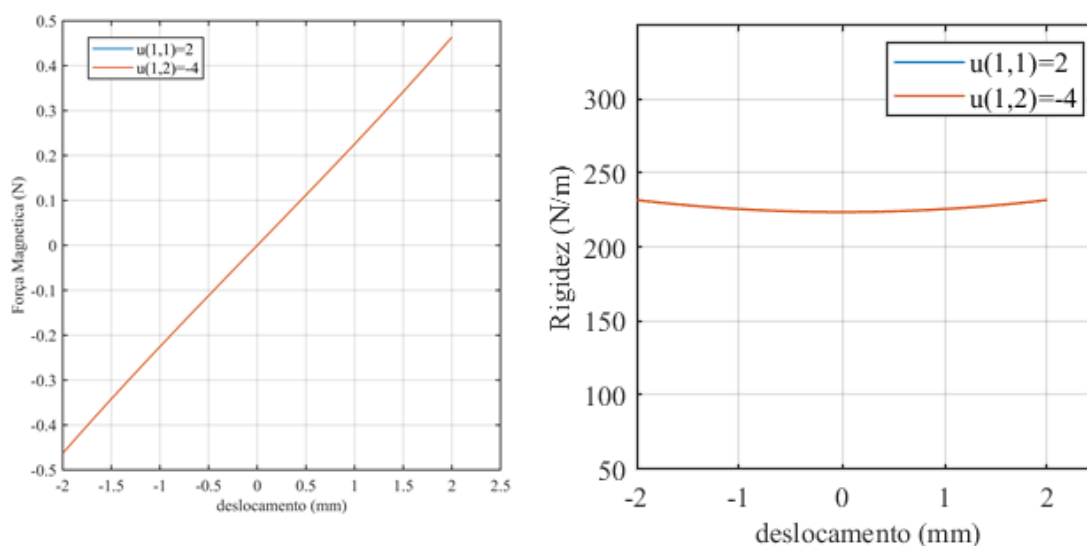


Figura 5.4 - a) gráfico que mostra o comportamento da força magnética durante os ciclos de incremento ou redução da distância d entre os ímãs; b) gráfico mostra o comportamento da rigidez das molas magnéticas durante os ciclos de incremento ou redução da distância d entre os ímãs.

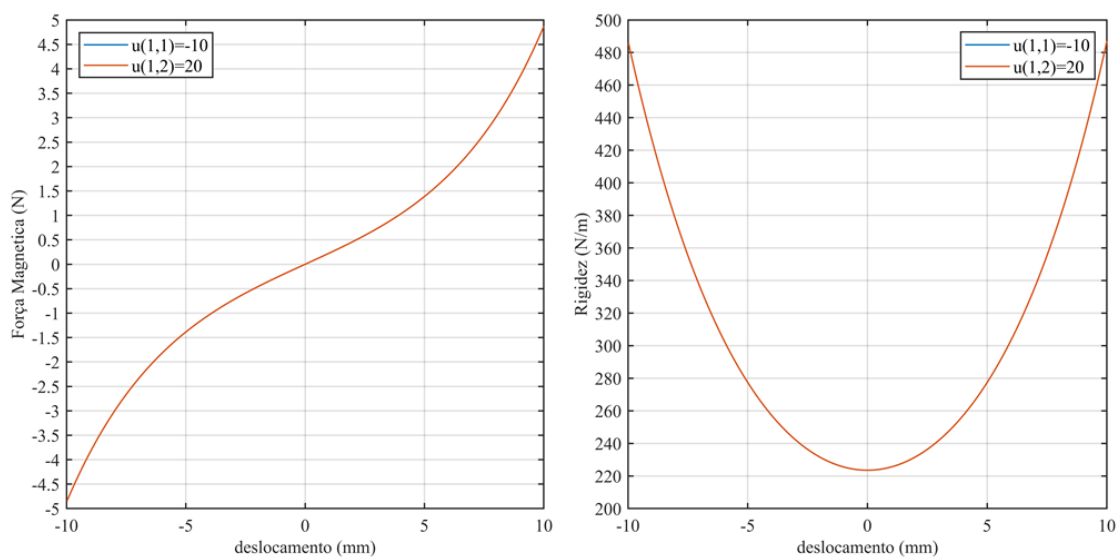


Figura 5.5 - a) gráfico que mostra o comportamento da força magnética os ciclos de incremento ou redução da distância d entre os ímãs; b) gráfico mostra o comportamento da rigidez das molas magnéticas durante os ciclos de incremento ou redução da distância d entre os ímãs.

É possível observar que, no primeiro caso (Figura 5.4) em que os deslocamentos impostos são da ordem de 1 a 2 mm a força magnética apresenta um comportamento linear, enquanto no segundo caso (Figura 5.5) os deslocamentos impostos são maiores

em relação ao primeiro na ordem dos 10 a 20 mm, onde pode se observar um comportamento não linear na força.

Sabendo o modelo de comportamento da força e da rigidez magnética para aumento ou redução da distância entre os ímãs, na seção seguintes será apresentado os estudos para análise do modelo proposto.

5.3. Equação do movimento

A equação que traduz o comportamento dinâmico de uma estrutura com N graus de liberdade, sujeita a uma força exterior pode ser definida através de um sistema de N equações diferenciais lineares de 2ª ordem a N incógnitas, dada por:

$$\underbrace{\underline{m}\ddot{\underline{u}}(t)}_{\text{Força de inércia}} + \underbrace{\underline{c}\dot{\underline{u}}(t)}_{\text{Força de amortecimento}} + \underbrace{\underline{k}\underline{u}(t)}_{\text{Força elástica}} = \underbrace{\underline{F}(t)}_{\text{Força exterior}} \quad 5.3)$$

Sendo que \underline{m} , \underline{c} e \underline{k} representam respetivamente as matrizes de massa, amortecimento e de rigidez do modelo estrutural, e $\ddot{\underline{u}}(t)$, $\dot{\underline{u}}(t)$ e $\underline{u}(t)$ representam respetivamente os vetores com as acelerações, velocidades e dos deslocamentos e $\underline{F}(t)$ corresponde ao vetor de forças exteriores aplicado em cada grau de liberdade.

5.3.1. Matriz de massa

Para modelos em que a massa se encontra somente nos graus de liberdade e não distribuída em toda a estrutura, a matriz de massa é uma matriz diagonal, com a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{44} \end{bmatrix}$$

Como no modelo proposto a massa encontra-se concentrada segundo um grau de liberdade escolhido e os deslocamentos do sistema estrutural são independentes a matriz de massa é diagonal.

5.3.2. Matriz de amortecimento

Para a construção da matriz de amortecimento, considerou-se o amortecimento Rayleigh:

$$\underline{c} = \alpha \underline{M} + \beta \underline{K} \quad (5.4)$$

Em que α e β são parâmetros independentes, convenientemente definidos.

O fator de amortecimento é definido por:

$$\zeta_n = \frac{\alpha}{2} \frac{1}{w_n} + \frac{\beta}{2} w_n \quad (5.5)$$

Em que w_n é a frequência natural.

Os parâmetros α e β podem ser determinados, especificado o valor do fator de amortecimento ζ_i e ζ_j para os modos de vibração i e j respectivamente. Escrevendo na forma matricial a equação 5.5 para dois modos fica:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1/w_i & w_i \\ 1/w_j & w_j \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \zeta_i \\ \zeta_j \end{Bmatrix} \quad (5.5)$$

Com base neste sistema (Chopra,2011), determina-se os coeficientes α e β como proporcionais às frequências de vibração de cada modo de amortecimento i e j . Se assumirmos que os dois modos de vibração têm o mesmo fator de amortecimento (ζ_n), então:

$$\alpha = \zeta \frac{2w_i w_j}{w_i + w_j} \quad \beta = \zeta \frac{2}{w_i + w_j} \quad (5.6)$$

Desse modo a matriz de amortecimento pode ser calculada a partir da equação 5.4 e o fator de amortecimento para qualquer modo de vibração, será obtido pela equação 5.5, que varia em função da frequência natural.

5.4. Análise do modelo

Para realizar a análise são utilizados os parâmetros físicos do protótipo em modelo reduzido que são apresentados na Tabela 4.1 e 4.2.

Inicialmente é necessário definir a altura inicial de levitação (d), com a estrutura em repouso. Esta altura é definida pela equação (3.13) que define a lei constitutiva dos ímanes. A total do sistema em levitação é dada por $m = m_1 + m_2 = 0.462 \text{ kg}$ e a força devido à massa é, portanto $F = m \times g = 0.462 \times 9.81 = 4.62N$. Pela equação (3.12):

$$4.62 = 2 \times 50.324e^{-0.101d} \Rightarrow d = 30.51mm$$

Onde, o dois corresponde ao número de pares de imanes.

O valor do fator de amortecimento considerado para todos os modos de vibração é $\zeta = 0.001$.

A seguir é apresentada a matriz de massa com os valores correspondente para cada grau de liberdade:

$$m = \begin{bmatrix} 0.0333 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2143 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1810 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0333 \end{bmatrix} kg$$

5.4.1. Análise do comportamento das molas magnéticas

Uma vez que a rigidez das molas magnéticas é variável com o tempo torna-se necessário verificar se a mesma têm o comportamento esperado. Para isso são apresentados dois gráficos, na Figura 5.9, que mostram o comportamento das molas magnéticas para dois níveis de excitação diferentes (para aceleração de base máxima 0.422 m/s^2 e frequência 0.5 Hz e para aceleração de base máxima de 1.08 m/s^2 e frequência de 1.5).

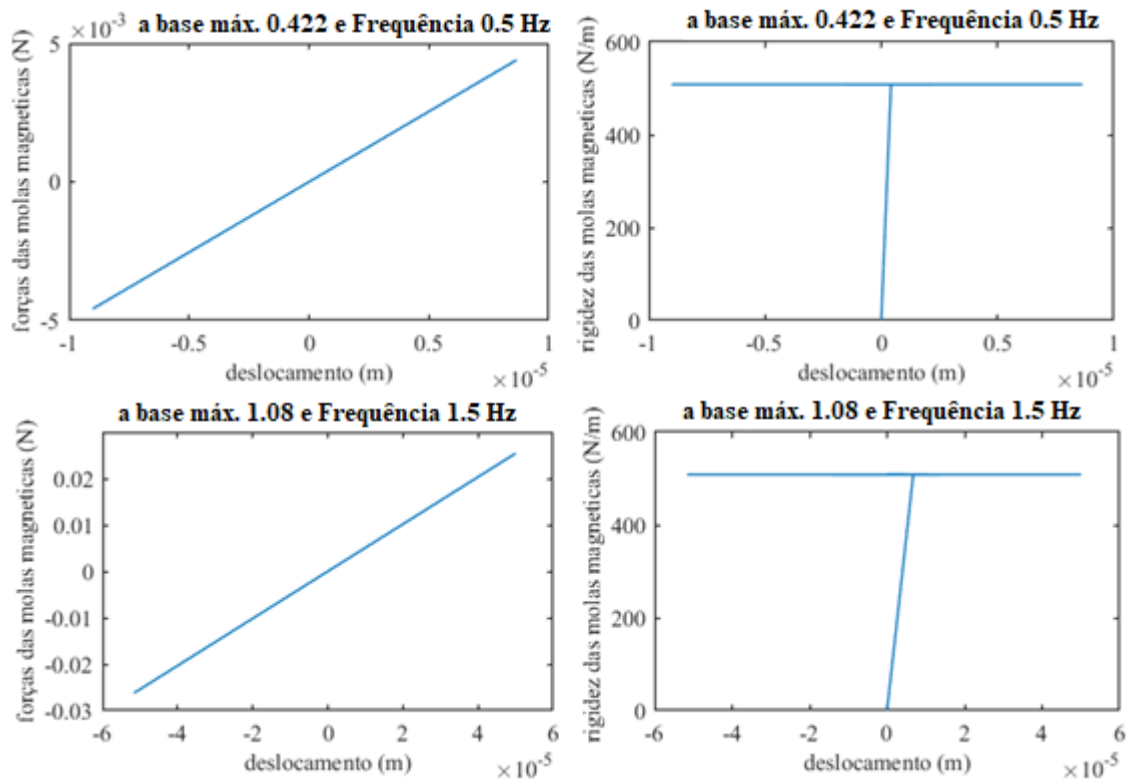


Figura 5.6 – Comportamento das molas magnéticas

Tendo em conta os resultados apresentados na Figura 5.9 pode afirmar-se que, para o caso em estudo, as molas magnéticas têm um comportamento linear. Também é possível aferir a influência do deslocamento no valor da força magnética desenvolvida entre os ímanes.

5.4.2. Matriz de rigidez

O cálculo da matriz de rigidez foi efetuado considerando os deslocamentos que interessam na análise, um por grau de liberdade e aplicando a estrutura um conjunto de deslocamentos prescritos em que um deles é unitário e os restantes são nulos (este método é conhecido como método dos deslocamentos), obtém-se assim a matriz de rigidez k pretendida.

A Figura 5.6 apresenta o processo mencionado acima, em que são representadas as deformadas pela ação de um deslocamento unitário no grau de liberdade u_2 e u_3 .

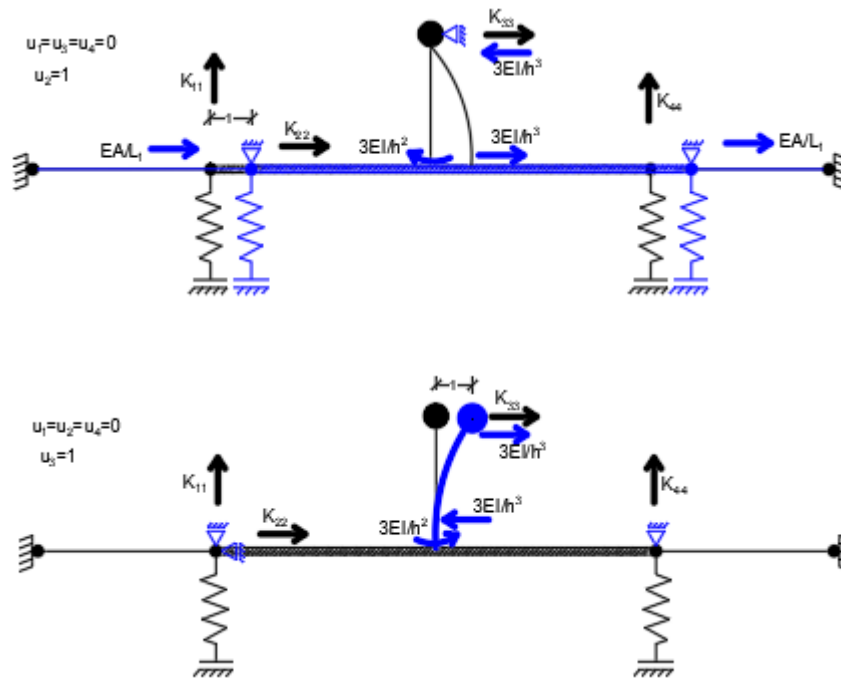


Figura 5.7 – Estrutura deformada pela ação de um deslocamento unitário na direção u_2 e u_3 .

Na Figura 5.6 estão representadas duas deformadas, onde a primeira corresponde à imposição de um deslocamento unitário segundo o grau de liberdade u_2 , e nulo os restantes graus de liberdade u_1 , u_3 e u_4 . E a segunda deformada representa a imposição de um deslocamento unitário segundo o grau de liberdade u_3 , e nulos os restantes graus de liberdade. As forças de fixação dos nós, nas posições estabelecidas representam a segunda e a terceira coluna da matriz de rigidez \underline{k} .

Os outros elementos da matriz de rigidez foram calculados de maneira semelhante. Sendo \underline{k} uma matriz simétrica.

5.4.2.1. Rigidez vertical

A rigidez vertical será garantida partir da força de repulsão entre dois pares de ímãs permanentes que no modelo estrutural são representados pelas molas magnéticas. Esta rigidez é variável no tempo, consoante a distância relativa entre os ímãs, que é função dos deslocamentos nos graus de liberdade u_1 e u_4 .

5.4.2.2. Rigidez horizontal

A rigidez horizontal do sistema será garantida através de elementos que resistem somente ao esforço axial (compressão e tração). A rigidez horizontal de cada elemento é dada por:

$$k_h = 2 \frac{E_p A}{L} + \frac{3EI}{h^3} \quad (5.7)$$

Sendo E_p é o módulo de elasticidade do material, A a secção transversal do mesmo e L , é o comprimento da barra. A rigidez horizontal é constante em todo o processo de cálculo.

5.4.2.3. Matriz de rigidez do modelo proposto

Com base em todos os princípios mencionados nas secções acima calculou-se a matriz de rigidez para o modelo estrutural em estudo, que é apresentada a seguir:

$$\underline{k} = \begin{bmatrix} \frac{3EI}{h} + k_m & \frac{3EI}{h^2} & -\frac{3EI}{h^2} & -\frac{3EI}{h} \\ \frac{3EI}{h^2} & 2 \frac{E_p A}{L_1} + \frac{3EI}{h^3} & -\frac{3EI}{h^3} & -\frac{3EI}{h^2} \\ -\frac{3EI}{h^2} & -\frac{3EI}{h^3} & \frac{3EI}{h^3} & \frac{3EI}{h^2} \\ -\frac{3EI}{h} & -\frac{3EI}{h^2} & \frac{3EI}{h^2} & \frac{3EI}{h} + k_m \end{bmatrix}$$

5.4.3. Equação do equilíbrio dinâmico

Depois de serem definidas as matrizes de massa \underline{m} e de rigidez \underline{k} , para o modelo proposto, pode-se escrever a correspondente equação matricial de equilíbrio dinâmico:

$$\begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u}_1(t) \\ \ddot{u}_2(t) \\ \ddot{u}_3(t) \\ \ddot{u}_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1(t) \\ \dot{u}_2(t) \\ \dot{u}_3(t) \\ \dot{u}_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ u_3(t) \\ u_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \\ F_4(t) \end{bmatrix}$$

Esta equação matricial corresponde a um sistema de quatro equações diferenciais lineares de 2ª ordem e quatro incógnitas, que correspondem aos deslocamentos $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$ e $u_4(t)$.

5.5. Algoritmos de integração numérica no tempo

O sistema de equações diferenciais de segunda ordem pode ser resolvido por qualquer método numérico considerando a existência de uma excitação externa aplicada no sistema e/ou uma condição inicial de deslocamento e velocidade em algum nó. Entre estes métodos, o de Newmark é um dos mais versáteis e populares para solução de grandes sistemas de equações diferenciais de segunda ordem.

Este método apresenta algumas vantagens, é o caso da sua simplicidade de implementação computacional, sendo que tem como base processos computacionais simples e fáceis de aplicar e uma outra vantagem é que este é um método que apresenta uma relação entre qualidade e refinamento necessário muito favorável. O único parâmetro possível de refinar é o intervalo de tempo, sendo que a solução aproximada tende para a solução exata quando o intervalo de tempo se aproxima de zero (Rebelo, 2015).

A seguidamente vai-se descrever de forma sucinta o método de Newmark, uma vez que é o método que será utilizado para a análise da resposta dinâmica do modelo proposto.

5.5.1. Método de Newmark

Desenvolvido em 1959 pelo professor de engenharia civil da Universidade de Illinois Nathan M. Newmark, este método assume uma forma de integração implícita que procura satisfazer a equação diferencial no instante $t + \Delta t$ utilizando a solução do instante t . Em cada instante a integração é feita através de um conjunto de equações lineares (Mendes, 2012).

Desenvolvendo as funções $u(t)$ e $\dot{u}(t)$ (soluções de equações de equilíbrio dinâmico), em séries de Taylor resulta:

$$\mathbf{u}(t_0 + \varepsilon) = \mathbf{u}(t_0) + \dot{\mathbf{u}}(t_0)\varepsilon + \ddot{\mathbf{u}}(t_0)\frac{\varepsilon^2}{2} + \dddot{\mathbf{u}}(t_0)\frac{\varepsilon^3}{6} + \dots \quad (5.8)$$

$$\dot{\mathbf{u}}(t_0 + \varepsilon) = \dot{\mathbf{u}}(t_0) + \ddot{\mathbf{u}}(t_0)\varepsilon + \dddot{\mathbf{u}}(t_0)\frac{\varepsilon^2}{2} + \dots \quad (5.9)$$

Considerando u_t o valor no instante t e $\varepsilon = \Delta t$, as equações (5.8) e (5.9) induzem à seguinte sequencia temporal:

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \dot{\mathbf{u}}_t\Delta t + \ddot{\mathbf{u}}_t\frac{\Delta t^2}{2} + \dddot{\mathbf{u}}_t\frac{\Delta t^3}{6} \quad (5.10)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{u}}_t + \ddot{\mathbf{u}}_t\Delta t + \dddot{\mathbf{u}}_t\frac{\Delta t^2}{2} \quad (5.11)$$

Para a convergência do método definido pelas equações (5.10) e (5.11) escrevem-se na seguinte forma:

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \dot{\mathbf{u}}_t\Delta t + \ddot{\mathbf{u}}_t\frac{\Delta t^2}{2} + \beta\ddot{\mathbf{u}}_t\Delta t^3 \quad (5.12)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{u}}_t + \ddot{\mathbf{u}}_t\Delta t + \gamma\ddot{\mathbf{u}}_t\Delta t^2 \quad (5.13)$$

O método das diferenças divididas fornece uma aproximação para $\ddot{\mathbf{u}}_t$:

$\ddot{\mathbf{u}}_t = \frac{\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} - \dot{\mathbf{u}}_t}{\Delta t}$ que se considera exata, pois assume-se a aceleração com variação linear. Assim, as expressões (5.12) e (5.13) dão origem às expressões de Newmark, que possibilitam o cálculo dos deslocamentos $\underline{\mathbf{u}}$ e das velocidades $\underline{\dot{\mathbf{u}}}$ para o instante de tempo $(t + \Delta t)$:

$$\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{u}_t + \dot{\mathbf{u}}_t\Delta t + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)\Delta t^2\ddot{\mathbf{u}}_t + \beta\Delta t^2\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} \quad (5.14)$$

$$\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} = \dot{\mathbf{u}}_t + (\mathbf{1} - \gamma)\Delta t\ddot{\mathbf{u}}_t + \gamma\Delta t\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} \quad (5.15)$$

As constantes γ e β definem a variação da aceleração dentro de cada intervalo de tempo Δt , ou seja, determinam a estabilidade e exatidão do método.

Acrescenta-se a estas equações (5.14 e 5.15) a equação de equilíbrio dinâmico (5.3) para o instante $(t + \Delta t)$, dada por:

$$\underline{\mathbf{m}}\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + \underline{\mathbf{c}}\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + \underline{\mathbf{k}}\mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{F}_{t+\Delta t} \quad (5.16)$$

As equações (5.14), (5.15) e (5.16) permitem estabelecer um método para obtenção de soluções numéricas de problemas dinâmicos. Desse modo, substituindo as equações (5.14) e (5.15) na equação (5.16) obtém-se a aceleração $\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$, uma vez conhecido o deslocamento, velocidade, a aceleração e a força exterior aplicada no instante t . Conhecido $\ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$, recorre-se às equações (5.14) e (4.15) para calcular o deslocamento $\mathbf{u}_{t+\Delta t}$ e a velocidade $\dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t}$.

Para garantir a estabilidade incondicional deste método é necessário satisfazer duas condições. As condições de estabilidade (5.17) e (5.18) definem a gama de valores a adotar para os parâmetros γ e β , que garantem em todos os intervalos de tempo utilizados.

$$\gamma \geq \frac{1}{2} \quad (5.17)$$

$$\beta \geq \frac{1}{4} \left(\frac{1}{2} + \gamma \right)^2 \quad (5.18)$$

Normalmente considera-se $\gamma = \frac{1}{2}$ e utilizar um valor de β compreendido de $\frac{1}{6}$ a $\frac{1}{4}$. A estabilidade para $\beta = \frac{1}{6}$, apenas é garantida para $\Delta t < 0.551T_n$ (Rebelo, 2015).

5.5.1.1. Algoritmo

Existem uma grande variedade de algoritmos deste método numérico na literatura e optou-se por desenvolver o processo de integração de acordo com (Chopra, 2011).

Para iniciar o processo iterativo de resolução de equações de equilíbrio dinâmico é necessário conhecer as condições iniciais do problema (que são os valores iniciais dos vetores de deslocamento iniciais \underline{u}_0 e de velocidade $\dot{\underline{u}}_0$) e do vetor de forças exteriores inicial F_0 , de modo a determinar o valor da aceleração inicial $\ddot{\underline{u}}_0$ através da equação de equilíbrio dinâmico (5.), sendo:

$$\ddot{\underline{u}}_0 = \underline{m}^{-1}(\underline{F}_0 - \underline{c}\dot{\underline{u}}_0 - \underline{k}\underline{u}_0)$$

Apos o cálculo da aceleração inicial deve-se agora adotar um intervalo de tempo Δt constante em todo processo iterativo.

Depois de definir o passo de integração Δt , calcula-se a matriz de rigidez efetiva \underline{k}_e que é formada por parcelas das matrizes de rigidez, de amortecimento e de massa, através da seguinte expressão:

$$\underline{k}_e = \underline{k} + \frac{\gamma}{\beta\Delta t}\underline{c} + \frac{1}{\beta\Delta t^2}\underline{m}$$

Geralmente assume-se a hipótese de comportamento elástico linear, e tornando assim a matriz \underline{k}_e constante ao longo do tempo, e por isso pode ser determinada antes do processo de iteração. No caso do modelo propostos é necessário calcular a matriz \underline{k}_e antes do processo iterativo e, durante o processo, ir procedendo à atualização da mesma, uma vez que, a rigidez das molas magnéticas será atualizada a cada passo de tempo, o que obriga a atualização da matriz de rigidez \underline{k} a cada passo de tempo e consequentemente a matriz de rigidez efetiva \underline{k}_e .

Também antes de iniciar o processo iterativo, calcula-se duas matrizes \underline{A}_1 e \underline{A}_2 que auxiliam o cálculo e compostas por parcelas das matrizes de massa e de amortecimento:

$$\underline{A}_1 = \frac{1}{\beta\Delta t} \underline{m} + \frac{\gamma}{\beta} \underline{c} \quad ; \quad \underline{A}_2 = \frac{1}{2\beta} \underline{m} + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - \mathbf{1} \right) \underline{c}$$

Geralmente no processo iterativo, calcula-se as variações que ocorrem nos deslocamentos, nas velocidades e nas acelerações em cada intervalo de tempo Δt por consequência da variação das forças exteriores F . Como mencionado acima para o caso em estudo, dentro do processo iterativo após a determinação das variações nos deslocamentos, nas velocidades e nas acelerações e sua respetiva atualização vai se proceder-se o cálculo da força magnética e da rigidez vertical (k_m) e a respetiva atualização das matrizes rigidez \underline{k} e de rigidez efetiva \underline{k}_e também dentro do mesmo processo iterativo.

A seguir é o passo a passo do processo iterativo:

1. Resolução da equação de equilíbrio dinâmico para o cálculo de ΔF_t :

$$\Delta F_t = (F_t - F_{t-\Delta t}) + \underline{A}_1 \dot{u}_{t-\Delta t} + \underline{A}_2 \ddot{u}_{t-\Delta t}$$

2. Variações do deslocamento, da velocidade e da aceleração:

$$\Delta u_t = \underline{k}_e^{-1} \Delta F$$

$$\Delta \dot{u}_t = \frac{\gamma}{\beta\Delta t} \Delta u_t - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_{t-\Delta t} + \Delta t \left(\mathbf{1} - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{u}_{t-\Delta t}$$

$$\Delta \ddot{u}_t = \frac{\mathbf{1}}{\beta\Delta t^2} \Delta u_t - \frac{\mathbf{1}}{\beta\Delta t} \dot{u}_{t-\Delta t} - \frac{\mathbf{1}}{2\beta} \ddot{u}_{t-\Delta t}$$

3. Atualização das variáveis u_t , \dot{u}_t , \ddot{u}_t e \underline{k}_e :

$$u_{t+\Delta t} = u_{t-\Delta t} + \Delta u_t \quad ; \quad \dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_{t-\Delta t} + \Delta \dot{u}_t \quad ; \quad \ddot{u}_{t+\Delta t} = \ddot{u}_{t-\Delta t} + \Delta \ddot{u}_t$$

$$\underline{k}_{e+\Delta t} = \underline{k}_{t+\Delta t} + \frac{\gamma}{\beta\Delta t} \underline{c} + \frac{\mathbf{1}}{\beta\Delta t^2} \underline{m}$$

Fez-se uma implementação computacional em ambiente MATLAB do método Newmark para efetuar as análises numéricas do modelo para as ações impostas.

5.6. Definição da ação dinâmica

Para o estudo do comportamento dinâmico do modelo proposto a partir de análise numéricas no tempo foram utilizados os registos de aceleração de base obtidos durante os ensaios experimentais do protótipo.

A introdução de ação sísmica no método numérico desenvolvido é efetuada com a substituição da parcela $F_{t+\Delta t}$ pela força produzida pelo efeito do produto do valor da aceleração de base, correspondente ao grau de liberdade em questão e pela massa respetiva.

As análises do modelo foram efetuadas para diferentes acelerações de base e frequências de excitação como apresentado na Tabela 5.1. O passo de tempo considerado é $\Delta t = 0.01$.

Tabela 5.1– Valores da aceleração de base máxima, frequência e duração das excitações impostas ao modelo

a base máx (m/s ²)	Frequencia (Hz)	Duração (s)
0.422	0.5	14.39
0.723	1	19.9
0.900	1.5	22.39
1.210	2	21.59
0.5449	0.5	13.89
0.9695	1	19.89
1.0824	1.5	30.29
1.7365	2	23.89
0.68	0.5	19.79
1.03	1	16.39
1.32	1.5	23.59
1.93	2	17.89

Somente serão apresentados dois acelerogramas sendo que os restantes podem ser observados no Anexo 1. As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam os acelerogramas referentes as acelerações de base máxima de 0.422 e 0.723 m/s², e frequências de 0.5 e 1.0 Hz.

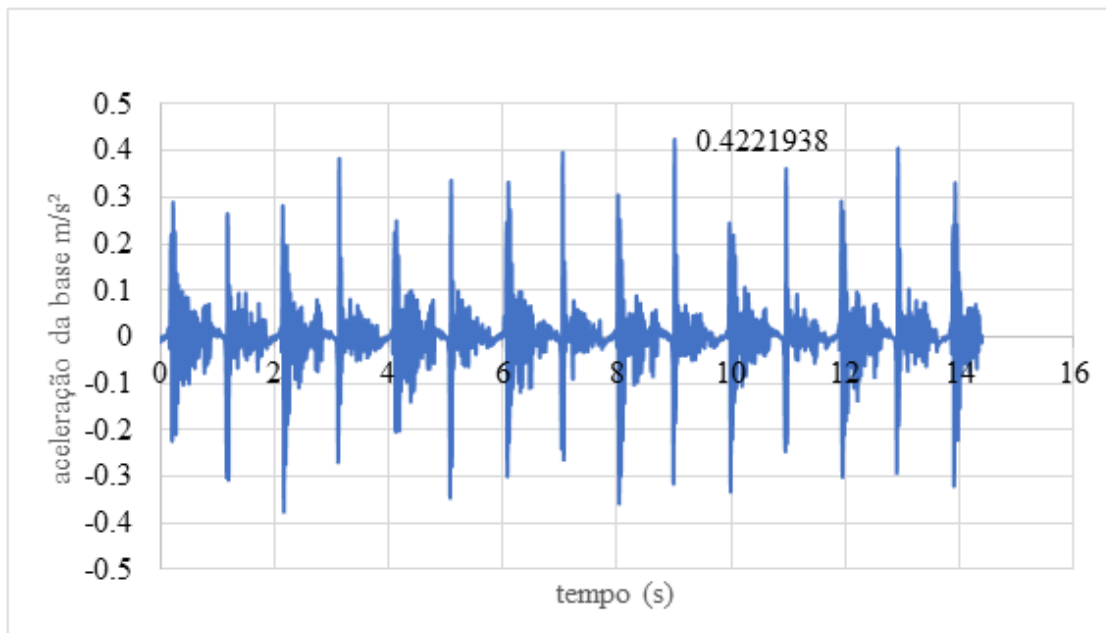


Figura 5.8 – Ação dinâmica para frequência de 0.5Hz utilizada no estudo

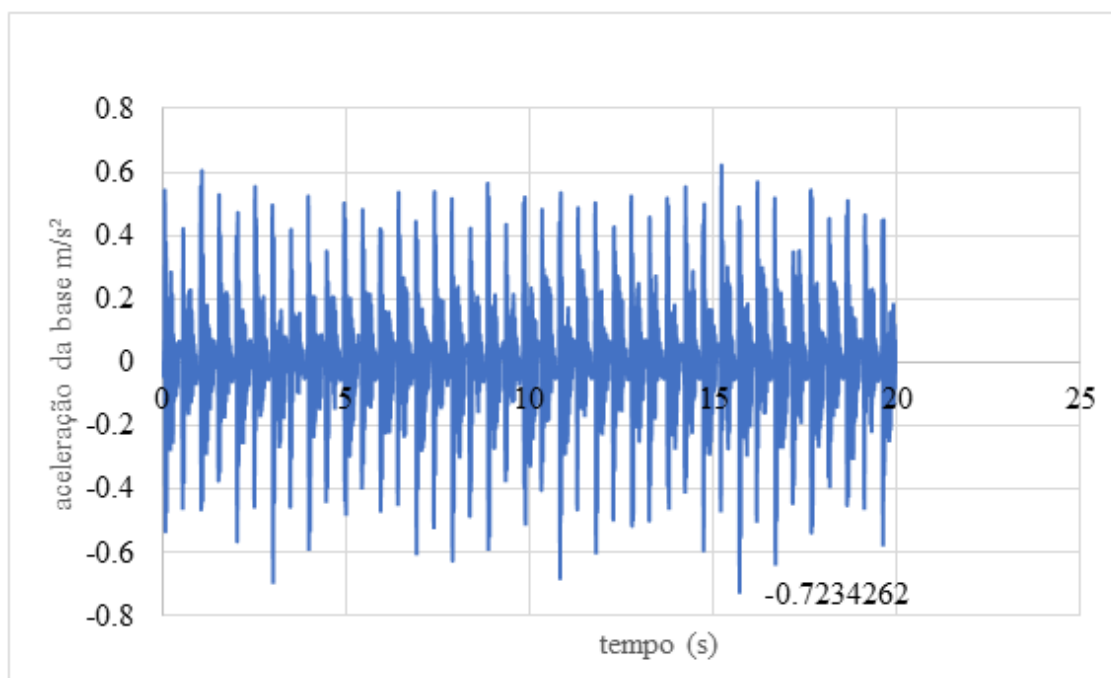


Figura 5.9 – Ação dinâmica para frequência de 1 Hz utilizada no estudo

Para o modelo analisado a ação dinâmica será aplicada somente no terceiro grau de liberdade porque nos restantes graus a massa é nula. Sendo assim, os resultados das análises numéricas referentes ao deslocamento, velocidade e aceleração estarão associados ao terceiro grau de liberdade.

5.7. Comparação de resultados

A avaliação da eficiência de qualquer sistema de isolamento sísmico pode ser analisada a partir da relação entre a aceleração associada à resposta da estrutura isolada e a aceleração de base. Esta relação permite avaliar a eficácia do sistema de isolamento na redução da aceleração da estrutura. A Figura 5.11 mostra a aceleração de pico da massa versus a aceleração de base (aceleração da mesa) para o sistema proposto.

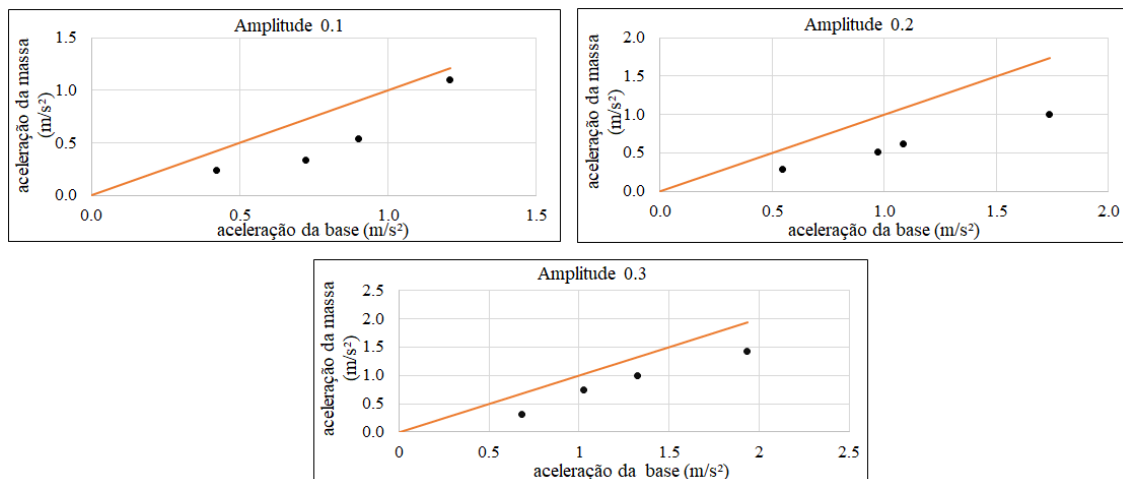


Figura 5.10 – Aceleração de pico da massa em função da aceleração de base para diferentes excitações.

Analisados os resultados apresentados na Figura 5.10 chegou-se à conclusão de que modelo analítico desenvolvido apresenta alguns desvios relativos às medições experimentais efetuadas.

Também foi efetuada uma análise no deslocamento de pico em função da aceleração de base (Figura 5.11). A partir dessa Figura 5.11 é possível que o maior deslocamento em todos os casos é obtido para frequência 2 Hz.

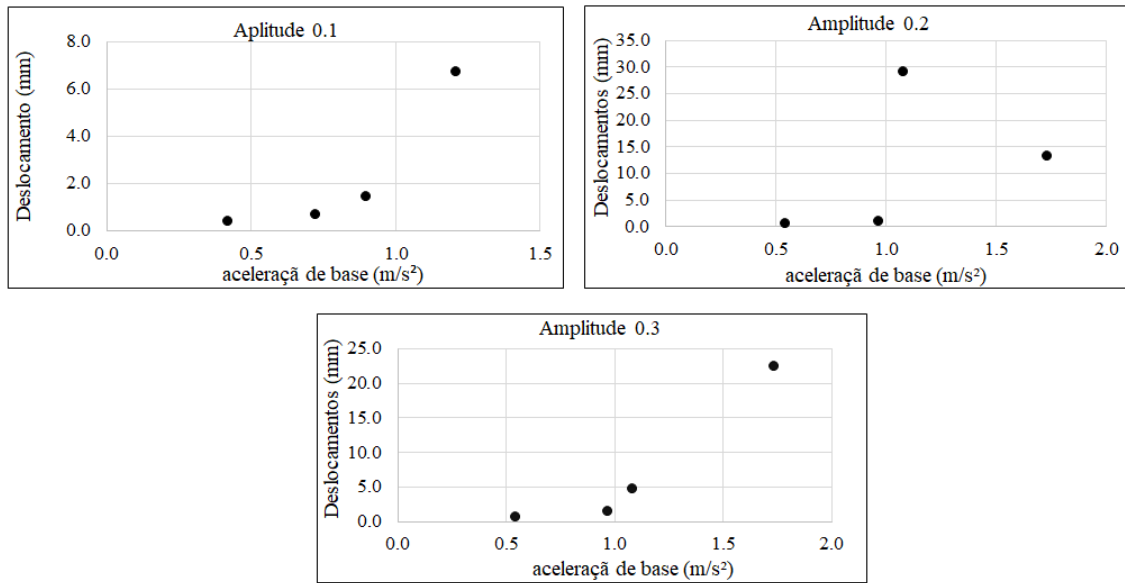


Figura 5.11 – Deslocamento máximo no topo da estatueta em função aceleração de base da máxima

As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam na parte superior a aceleração imposta na base da estrutura e na parte inferior uma comparação entre o modelo experimental e o modelo numérico para cada aceleração imposta.

Foi efetuada uma outra análise comparativa em termos de aceleração de pico em função da frequência de excitação, apresentada na Figura 5.14.

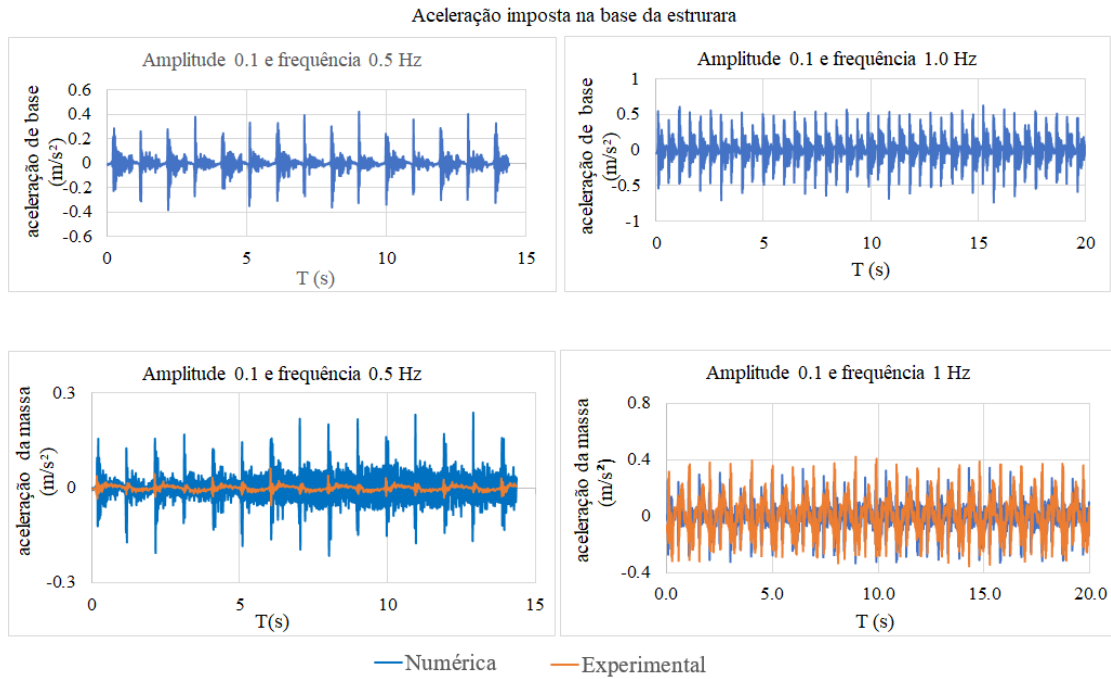


Figura 5.12 – Comparação da aceleração de resposta do modelo numérico com a do modelo experimental para uma determinada excitação.

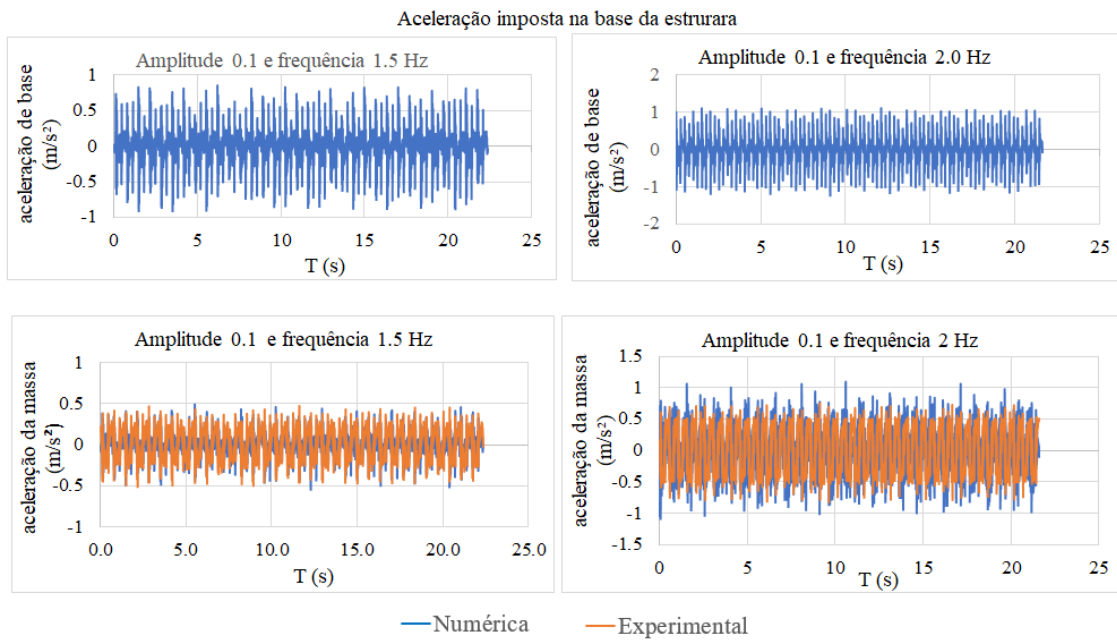


Figura 5.13 - Comparação da aceleração de resposta do modelo numérico com a do modelo experimental para uma determinada excitação.

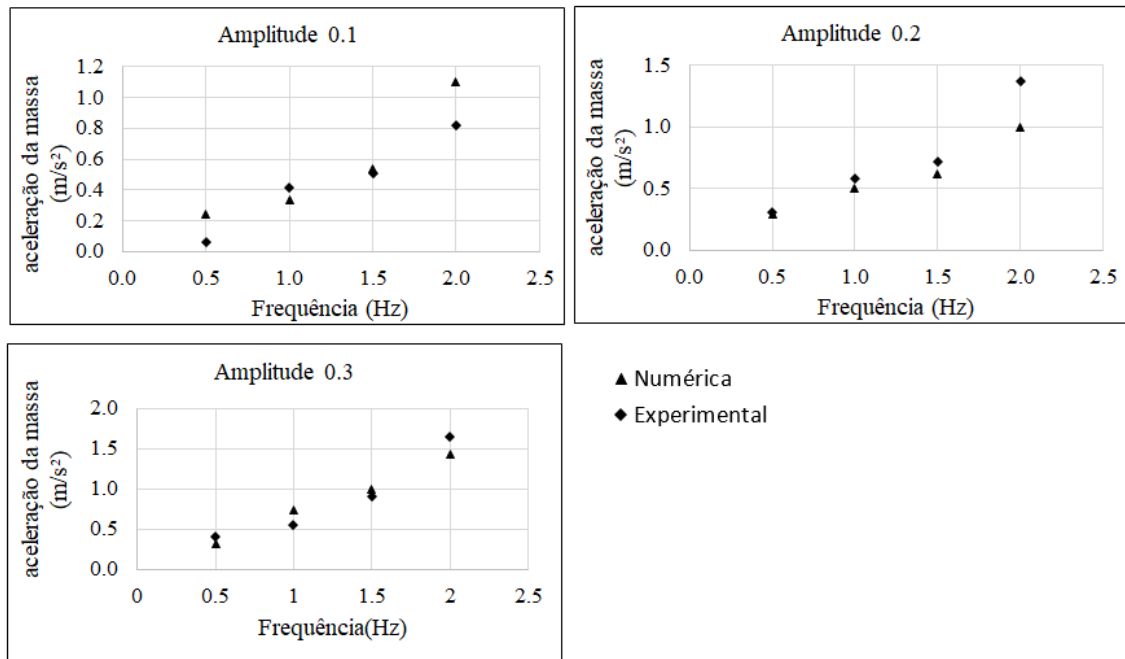


Figura 5.14 – Comparação da aceleração de resposta do modelo analítico com o modelo experimental em função da frequência de excitação

A partir dos resultados apresentados na Figura 5.8 é possível observar que os valores da aceleração de pico obtidos pela análise numérica são semelhantes aos obtidos da análise experimental.

5.8. Estudo paramétrico

O estudo paramétrico apresentado nesta seção inclui três casos de estudo para avaliar a influência da altura de levitação magnética no desempenho do modelo numérico.

Para efetuar esse estudo foram selecionados três tipos de ímãs, cujas características são apresentadas na Tabela 5.2 (as características do primeiro caso encontram-se na Tabela 3.2).

Tabela 5.2 - Informação técnica dos ímãs (Supermagnete, 2020).

	Caso 2	Caso 3
Referência	CS-S-18-04-N	CS-S-15-04-N
Material	NdFeB	NdFeB
Força	approx. 4 kg (approx. 39,2 N)	approx. 3 kg (approx. 29,4 N)
Diametro (D)	18 mm	15 mm
Altura (H)	4 mm	4 mm
Diametro interno 1 (d1)	4,5 mm	4,5 mm
Diametro interno 2 (d2)	9,46 mm	9,46 mm
Countersink t	2,48 mm	2,48 mm
Tolerancia	+/- 0,1 mm	+/- 0,1 mm
Revestimento	nickel-coated (Ni-Cu-Ni)	nickel-coated (Ni-Cu-Ni)
Magnetização	N35	N35
Temperatura máx	80°C	80°C
Peso	6,3 g	4 g

Para estudar a influência da altura e levitação no modelo numérico é efetuado um estudo paramétrico para três ímãs diferentes com as seguintes leis constitutivas (Tabela 5.3):

Tabela 5.3 – Lei constitutiva dos ímãs e altura de levitação inicial (d) para uma massa de 0.462kg

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Tipo de ímã	CS-S-34-04-N	CS-S-18-04-N	CS-S-15-04-N
Lei Constitutiva	$F = 50.324 \times e^{-0.101d}$	$F = 18.64 \times e^{-0.14d}$	$F = 14.25 \times e^{-0.153d}$
d (mm)	30.5073	14.9147	11.8922

As equações apresentadas na Tabela 5.3 foram obtidas através do FMM, de acordo com as disposições da Figura 3.10.

Com base nos dados indicados na Tabela 5.4 foram efetuadas as análises numéricas para ver a influência da altura de levitação no efeito de pêndulo invertido apresentado pelo modelo durante as análises efetuadas. A seguir é apresentada sob a forma de gráficos, a comparação das acelerações obtidas das análises para os três casos (Figura 5.15). Esses resultados podem ser observados com mais pormenores no anexo 4.

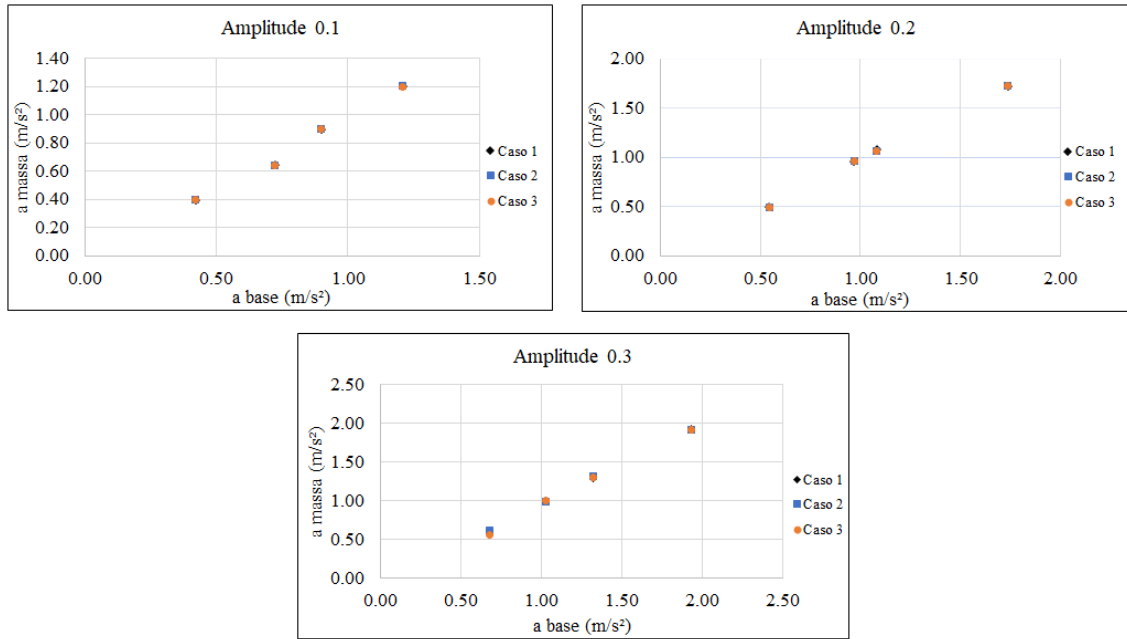


Figura 5.15 - Aceleração de pico da massa em função da aceleração de base para diferentes excitações.

Do estudo paramétrico efetuado acima verifica-se que o comportamento de pêndulo invertido apresentado pelo modelo não sofre grandes alterações. Ao escolher ímanes mais (caso 2 e 3) fracos, como a distância entre ímanes é menor, estaríamos num domínio de rigidez mais alta. Infelizmente, como pode se observar os resultados acima, esse estudo mostrou que a distância em repouso entre ímanes não tem uma influência significativa no comportamento de pêndulo invertido apresentado pelo modelo.

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O capítulo final deste estudo tem por objetivo apresentar as principais conclusões obtidas ao longo do seu desenvolvimento, assim como algumas perspectivas futuras no âmbito da proteção sísmica de estruturas.

6.1. Síntese e análise das conclusões obtidas

Do estudo realizado pode-se concluir que a solução de isolamento proposta, baseada no conceito de levitação magnética demonstrou ser eficiente. De facto, foi possível reduzir o valor da aceleração de 40 a 85%, para uma gama de frequências entre 0.5 e 1.0 Hz.

Para a gama de frequências entre 1 e 1.5 Hz o modelo experimental reduz o valor da aceleração de 31 a 43 %. Para a gama de frequências de 1.5 e 2.0 Hz o valor da aceleração é reduzida de 14.5 e 43 %.

Verificaram-se algumas discrepâncias entre os resultados obtidos através do modelo experimental e do modelo numérico, que podem estar associadas ao facto de se ter assumido um regime de pequenos deslocamentos, não se considerando os efeitos geometricamente não lineares. Embora se tenha admitido no modelo estrutural que o corpo a ser isolado era flexível, verificou-se com base nos deslocamentos (por sinal bastante pequenos) que o corpo tinha um comportamento de corpo rígido, o que mostra que o modelo estrutural, quando submetido a excitações dinâmicas tem um comportamento de pêndulo invertido muito significativo, uma vez que o sistema de estabilização adotado permite que ocorram rotações em torno do nó inferior da barra rígida.

6.2. Desenvolvimentos futuros

Para o futuro, sendo a levitação magnética muito pouco investigada para sua utilização no campo da proteção sísmica de estruturas, será interessante avaliar o desempenho desse modelo estrutural ou outro, mas com a utilização de ímanes eletromagnéticos (levitação eletromagnéticas), pois com os mesmos não é necessário a utilização de sistemas de estabilização, e dessa forma desacoplando totalmente a superestrutura da base. Seria importante também a realização de estudos para diferentes modelos estruturais com e sem amortecimento.

BIBLIOGRAFIA

Costa Giancarlo Cordeiro da Estudo da levitação magnética e determinação da corrente crítica de blocos supercondutores de alta T_c pelo método dos elementos finitos [Relatório] : Tese de Doutorado / Universidade federal do rio de Janeiro. - Rio de Janeiro, Brasil : [s.n.], 2005. - p. 128.

Ferreira Hugo Pelle Retrospectiva dos métodos de levitação e o estado da arte da tecnologia de levitação magnética [Relatório] : Projeto Final da Licenciatura / Universidade Federal do Rio de Janeiro. - Rio de Janeiro : [s.n.], 2017. - p. 183.

Tsuda M. [et al.] Stationary levitation and vibration transmission characteristic in a superconducting seismic isolation device with a permanent magnet system and a copper plate [Artigo] // Stationary levitation and vibration transmission characteristic in a superconducting seismic isolation device with a permanent magnet system and a copper plate. - Japão : [s.n.], 2010.

Agbabian M.S. [et al.] Seismic damage mitigation concepts for art objects in museums. [Artigo]. - Tokyo-Kyoto, Japan : [s.n.], 1998. - p. 6.

Augusti G., Airoidi L. e Ciampoli M. Mitigation of seismic risk for museum contents: An introductory investigation [Conferência] // Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering. - Balkema, Rotterdam. : [s.n.], 1992.

Buckle I. Development and application of base isolation and passive energy dissipation: A world overview, Proceedings of a Seminar and Workshop on Base Isolation and Passive Energy Dissipation [Relatório] / Applied Technology Council. - Palo Alto, California : [s.n.], 1986. - pp. 153-174.

Calio` I. e Marletta M. Passive control of the seismic rocking response of art objects [Artigo] // Passive control of the seismic rocking response of art objects. - Catania, Italia : [s.n.], 2003.

Castiglioni C.A. e Kanyilmaz A. Seismic Isolation Methods for Ancient Statues on Display [Artigo] // Seismic Isolation Methods for Ancient Statues on Display. - Bratislava : [s.n.], 2010.

Chopra Anil K. Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering [Livro]. - California : Prentice Hall, 2011. - Vol. Fourth.

Civil Laboratorio Nacional de Engenharia Sistemas passivos, activos, híbridos e semiactivos para a protecção sísmica de estruturas: Estado dos conhecimentos [Relatório]. - Lisboa : [s.n.], 2011.

Dames e Moore Review of seismic isolation for nuclear structures [Relatório] / Electric Power Research Institute. - Palo Alto, California : [s.n.], 1979. - pp. 1-106.

Facchini Luca, Betti Michele e Morandini Chiara SEISMIC PROTECTION SYSTEMS FOR ARTIFACTS: A BASE ISOLATION PROPOSAL FOR MICHELANGELO'S DAVID [Artigo]. - San Diego, Ca USA : [s.n.], 2015.

Faria R.N. e Lima L.F.C.P. Introdução ao magnetismo dos materiais. [Livro]. - São Paulo, Brasil : Livraria da Física, 2005.

Figueiredo Filipe Ribeiro de Isolamento Sísmico de Base Dimensionamento de Sistemas de Isolamento de Base em Edifícios [Relatório] : Dissertação de Mestrado / Instituto Superior Técnico. - Lisboa, Portugal : [s.n.], 2007. - p. 119.

Forni M. [et al.] Development of innovative anti-seismic systems in the framework of the LESSLOSS European integrated project, 10th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibrations Control of Structures [Relatório]. - Istanbul, Turkey : [s.n.], 2007.

Freyssinet Freyssinet [Online] // Freyssinet. - 2020. - 17 de Outubro de 2020. - <http://www.fpcitalia.it/>.

Guerreiro L. Isolamento Sísmico de Edifícios [Relatório] : Tese de Doutoramento / Engenharia Civil ; Instituto Superior Técnico. - Lisboa, Portugal : [s.n.], 1997.

Guerreiro Luís A Borracha na Concepção Anti-sísmica [Relatório] / FEUP. - Porto, Portugal : [s.n.], 2003.

Guerreiro Luís Comportamento de Blocos de Elastómero (Borrachas) [Relatório] : Textos de Apoio do Antigo Mestrado de Engenharia de Estruturas / Instituto Superior Técnico. - Lisboa, Portugal : [s.n.], 2004.

Guerreiro Luis, Azevedo João e Muhr Alan H. Seismic Tests and Numerical Modeling of a Rolling-ball Isolation System [Diário] // Journal of Earthquake Engineering. - Reino Unido : [s.n.], 25 de Maio de 2007.

Housner G.W. [et al.] Structural Control: Past, Present and future [Diário] // Journal of Engineering Mechanics, ASCE. - 1997. - pp. 897-971.

Hussain S., Lee D. e Retamal E. Viscous Damping for Base Isolated Structures [Artigo]. - 2001.

Lipscombe PR e Pellegrino S. Free rocking prismatic blocks. [Artigo]. - [s.l.] : Journal of Engineering Mechanics, 1993.

Loureiro Luís Alberto Bailão Pereira Mendes Isolamento de Base em Pontes - Análise do Efeito da Rigidez Pós-Cedência dos Sistemas de Isolamento [Relatório] : Dissertação de Mestrado / Instituto Superior Técnico. - Lisboa, Portugal : [s.n.], 2008. - p. 133.

Máximo Antonio, Alvarenga Beatriz e Guimarães Carla Física-Contexto e Aplicações [Livro]. - São Paulo, Brasil : Scipione, 2016.

Meeker David Finite Element Method Magnetics Version 4.2 : User's Manual [Livro]. - 2018.

Meireles Ari Daniel Silva de Dimensionamento de Sistemas de Isolamento de Base em Estruturas de Edifícios de Acordo com o Eurocodigo 8 [Relatório] : Dissertação de Mestrado / Universidade do Porto. - Porto, Portugal : [s.n.], 2011. - p. 126.

Mendes Pedro Tiago de Freitas Análise dinâmica de estruturas: Estudo numérico e experimental [Relatório] : Dissertação de Mestrado / Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. - Lisboa, Portugal : [s.n.], 2012.

Pinho Luís Carlos Almeida Bastos de Materiais Magnéticos e suas Aplicações [Relatório] : Dissertação de Mestrado / Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. - Porto, Portugal : [s.n.], 2009.

Puppin Ezio e Fratello Vincenzo Vibration isolation with magnet springs [Artigo] // Vibration isolation with magnet springs. - Italia : [s.n.], 2002.

Rebelo José Maria Giraldes Tavares da Cunha Integração no Dominio do Tempo Usando Modelos mistos [Relatório] : Dissertação de Mestrado / Instituto Superior Tecnico de Lisboa. - Lisboa, Portugal : [s.n.], 2015.

Robertson William Samuel Parker Modelling and design of magnetic levitation systems for vibration isolation [Relatório] : Thesis for P.H.D. / Faculty of Engineering, Computer and Mathematical Sciences - school of mechanical engineering. - Adelaide, Australia : [s.n.], 2013.

Santos Mariana Viseu dos Protecção Sísmica de Equipamentos com Isolamento de Base [Relatório] : Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil / Engenharia Civil ; Instituto Superior Técnico. - Lisboa : [s.n.], 2008.

SCHWEITZER G., MASLEN E. e BLEULER H. Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery [Relatório]. - Berlin : Springer, 2009.

Skinner R.I., Robinson W.H. e McVerry G.H. An Introduction to Seismic Isolation [Artigo]. - Wellington, New Zealand : [s.n.], 1993.

Soares Edson Pereira Caracterização Magnética e Microestrutural de Imãs Sinterizados de Pr-fe-B Processados pela Técnica de Transferência de Pós e Utilizando Decrepitação por Hidrogênio [Relatório] : Dissertação de Mestrado / Instituto de Pesquisas ENERGÉTICAS e Nucleares . - São Paulo, Brasil : [s.n.], 2005.

Stanton J. e Roeder C. Advantages and limitations of seismic isolation [Diário] // Earthquake Spectra. - 1991. - 2 : Vol. 7. - pp. 301-324.

Supermagnete supermagnete [Online] // supermagnete. - 2020. - Maio de 2020. - <https://www.supermagnete.pt/>.

Vestroni F. e Di Cintio S. Base isolation for seismic protection of statues [Conferência] // 12th World Conference on Earthquake Engineering. - Auckland, New Zealand : [s.n.], 2000.

ANEXOS

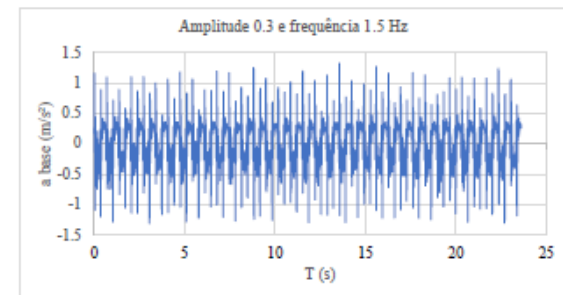
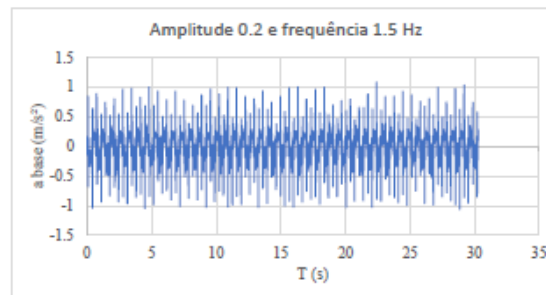
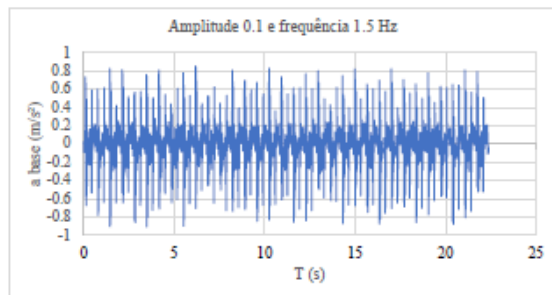
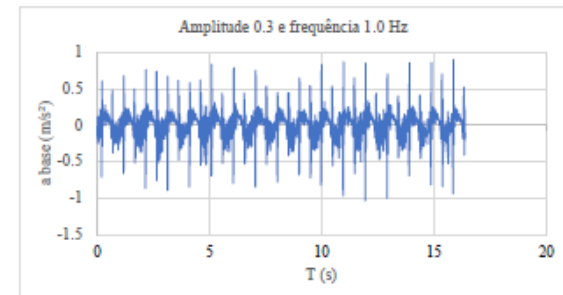
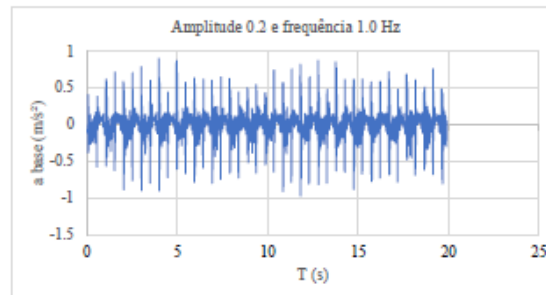
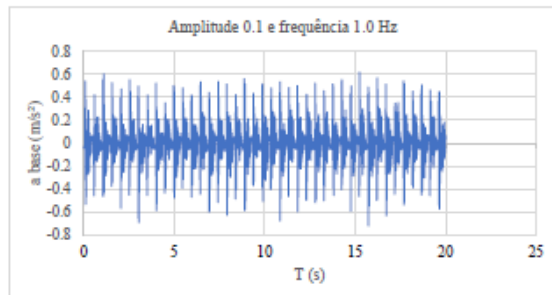
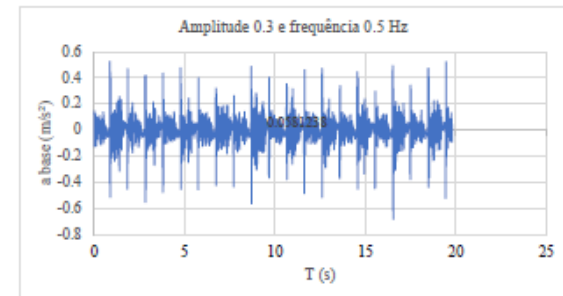
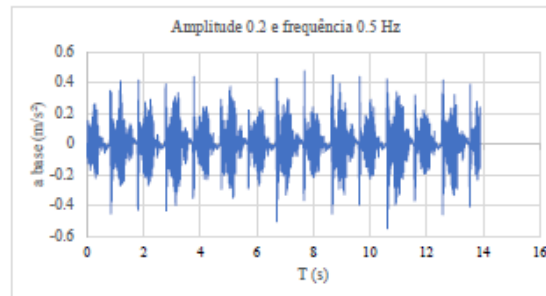
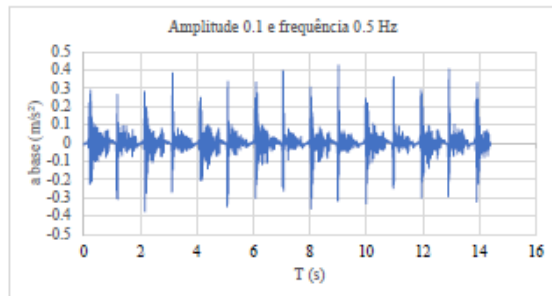
Anexo I – Acelerogramas utilizados na análise experimental e numérica.

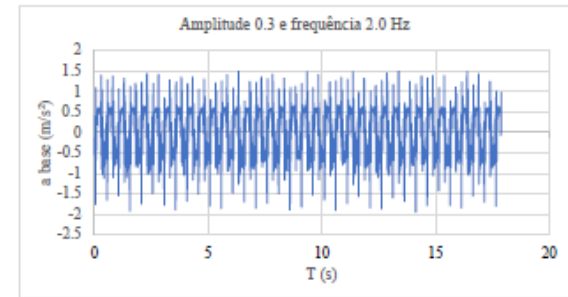
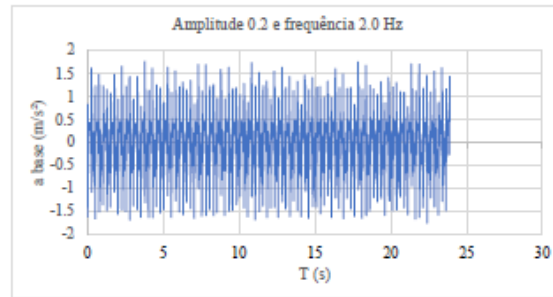
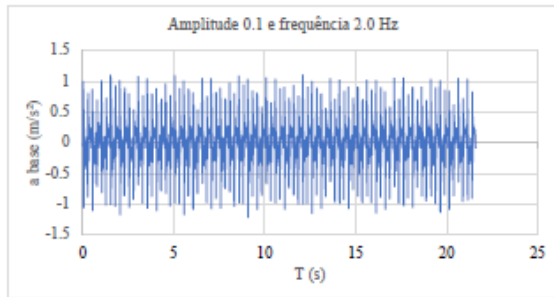
Anexo II – Aceleração de resposta obtidas da análise experimental.

Anexo III – Aceleração de resposta obtidas da análise numérica.

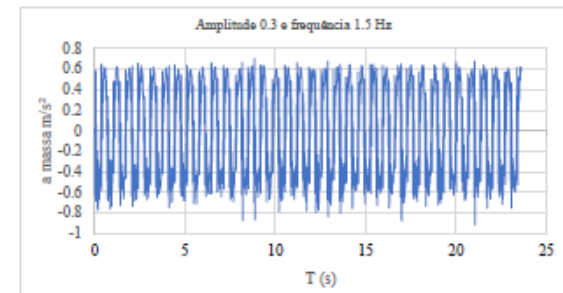
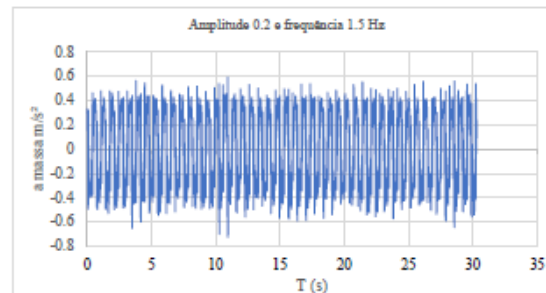
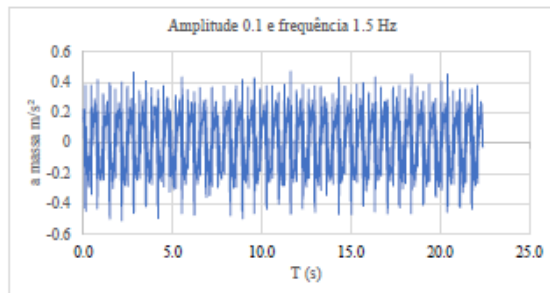
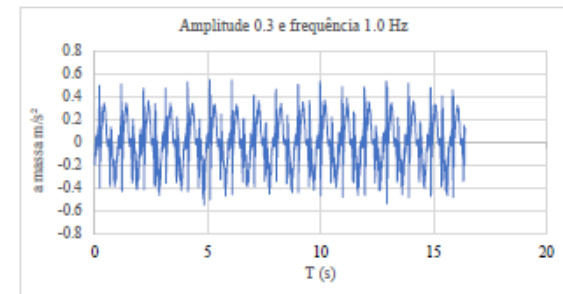
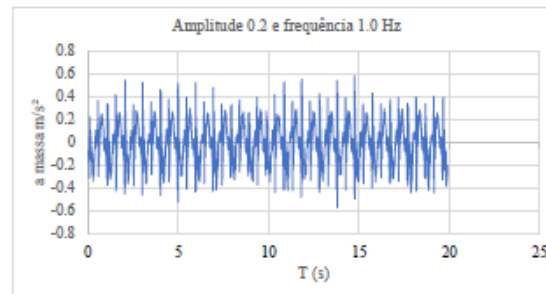
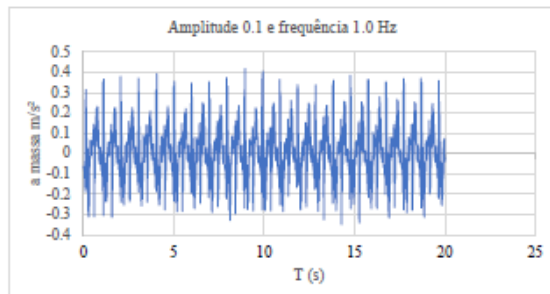
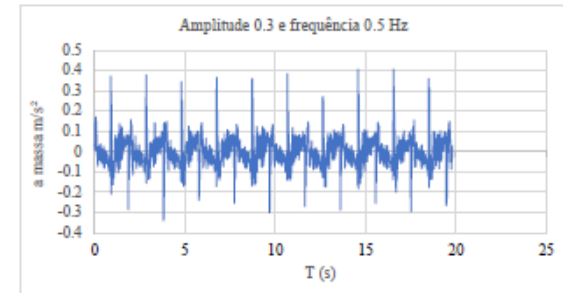
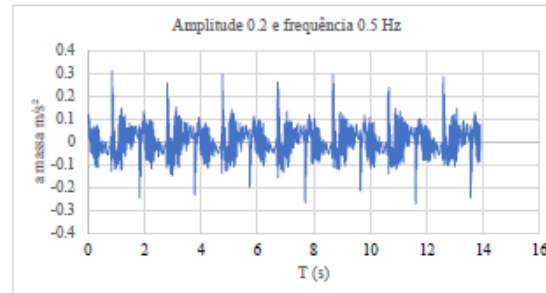
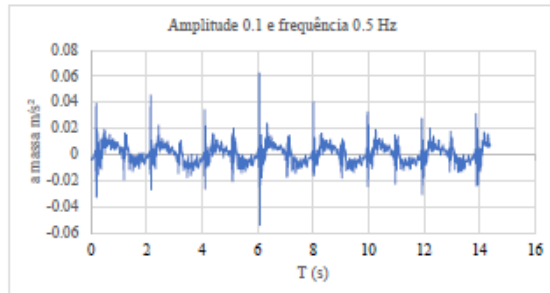
Anexo IV – Estudo paramétrico.

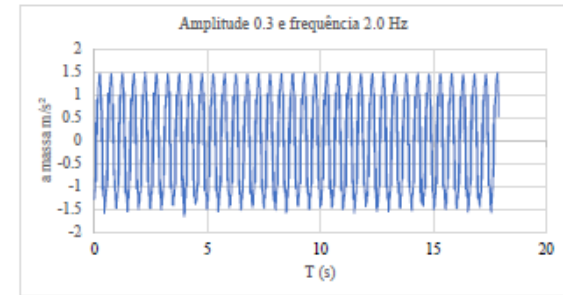
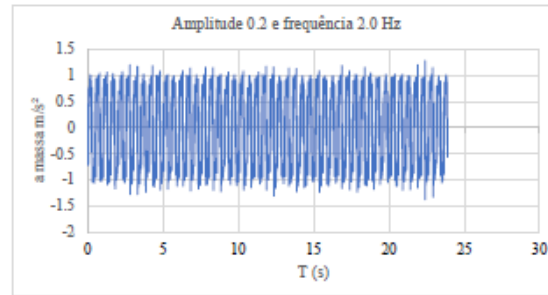
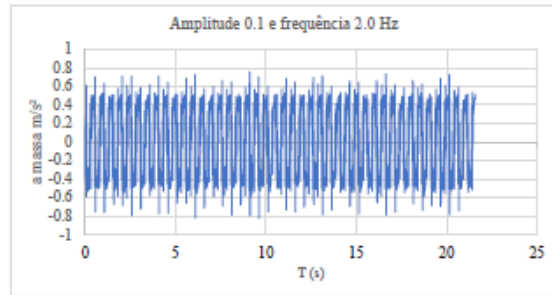
Anexo I - Acelerogramas utilizados na análise experimental e numérica



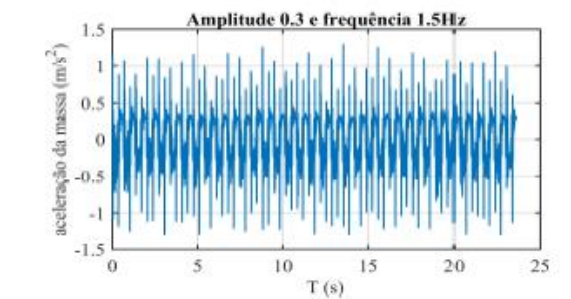
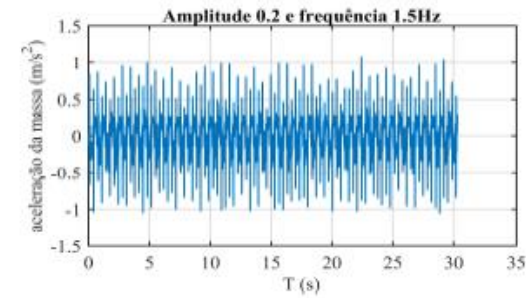
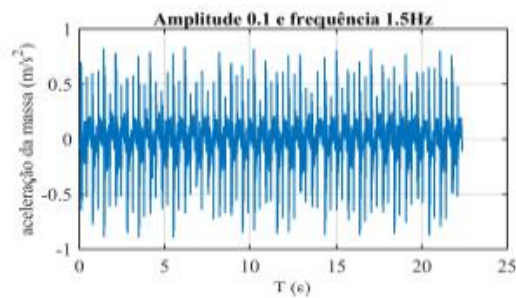
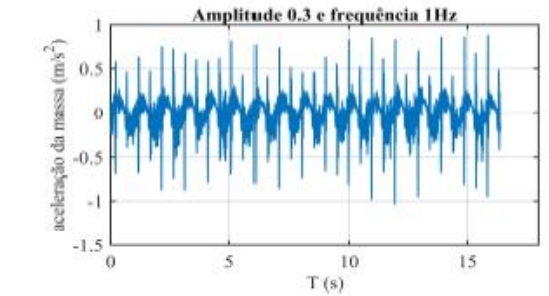
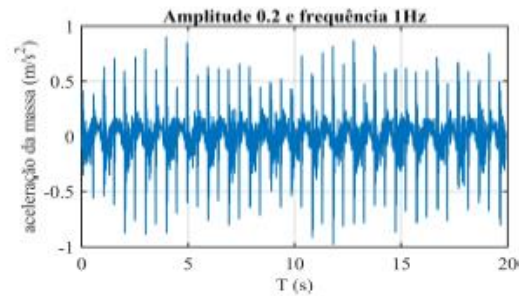
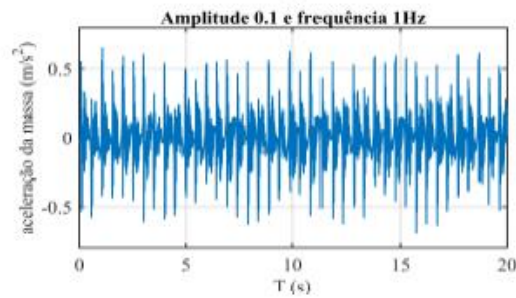
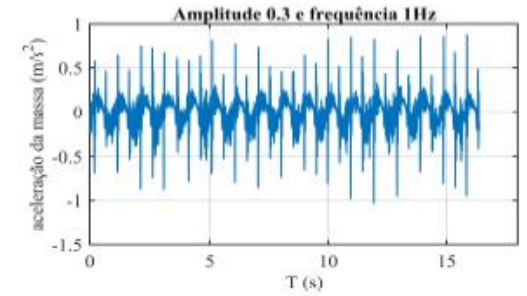
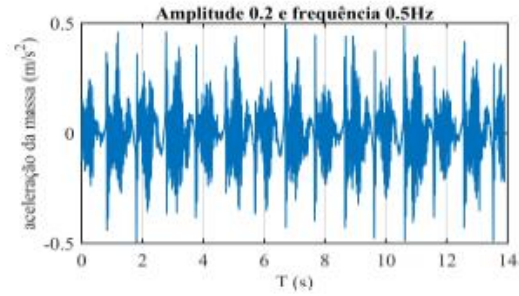
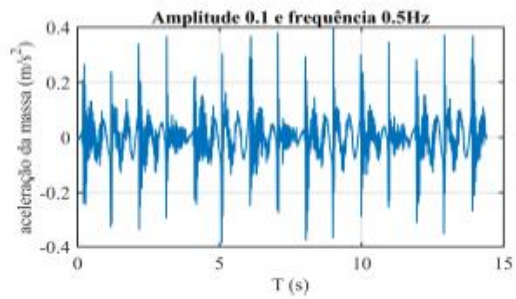


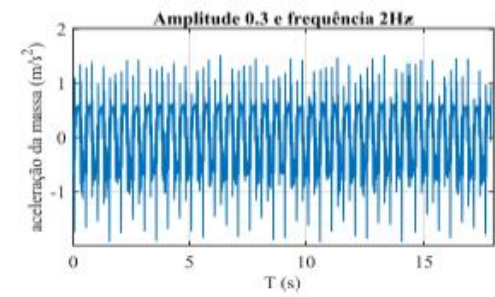
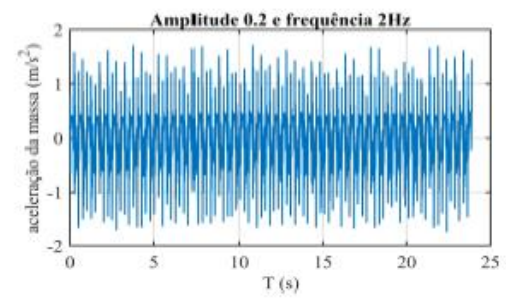
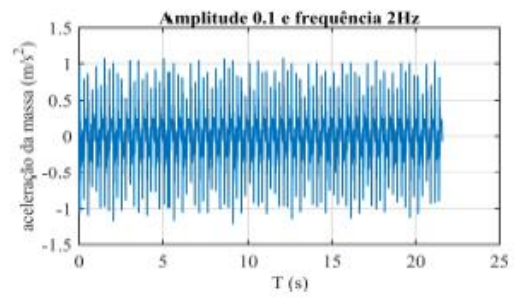
Anexo II - Aceleração de resposta obtidas da análise experimental





Anexo III - Aceleração de resposta obtidas da análise numérica



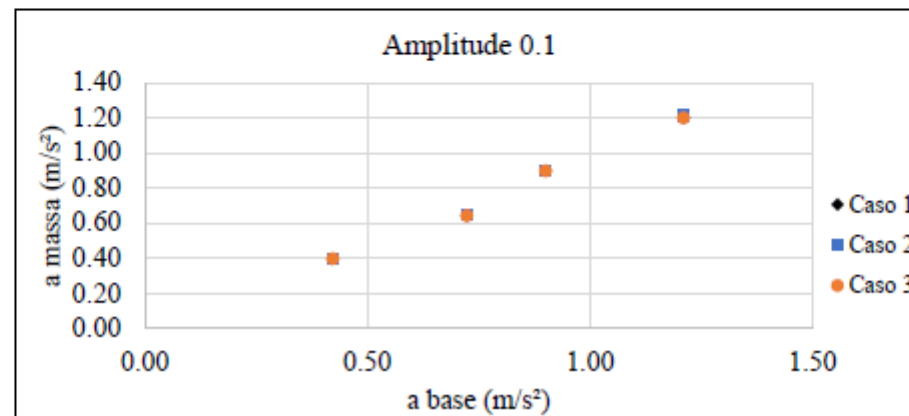


Anexo IV - Estudo paramétrico

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Tipo de ímã	CS S 31 04 N	CS-S-18-04-N	CS S 15 04 N
Lei Constitutiva	$F = 50.324 \times e^{-0.101d}$	$F = 18.64 \times e^{-0.14d}$	$F = 14.25 \times e^{-0.153d}$
d (mm)	30.5073	14.9147	11.8922

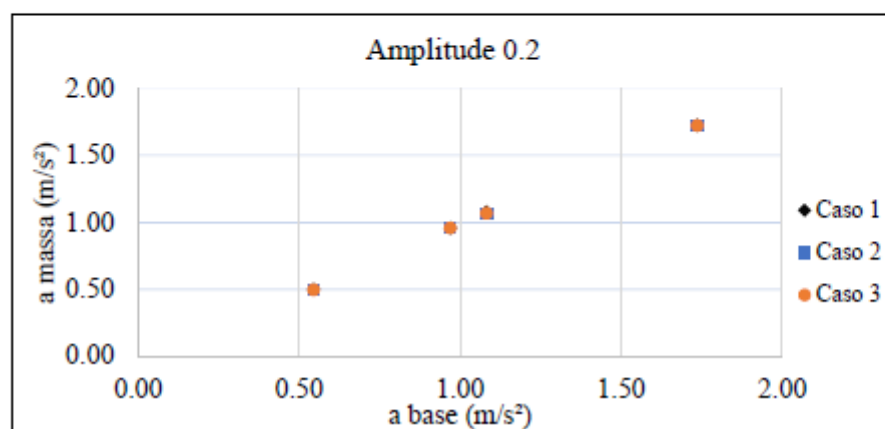
Amplitude 0.1

f (Hz)	a base (m/s ²)	Amplitude 0.1		
		Caso 1	Caso 2	Caso 3
0.5	0.422	a massa (m/s ²) 0.3951	a massa (m/s ²) 0.3974	a massa (m/s ²) 0.3968
1	0.723	0.64330	0.6441	0.6417
1.5	0.900	0.89720	0.896	0.897
2	1.210	1.20	1.208	1.1985



Amplitude 0.2

f (Hz)	a base (m/s ²)	Caso 1	Caso 2	Caso 3
		a massa (m/s ²)	a massa (m/s ²)	a massa (m/s ²)
0.5	0.5449	0.499	0.4949	0.4949
1	0.9695	0.958	0.958	0.9578
1.5	1.0824	1.076	1.067	1.068
2	1.7365	1.724	1.723	1.723



Amplitude 0.3

f (Hz)	a base (m/s ²)	Caso 1	Caso 2	Caso 3
		a massa (m/s ²)	a massa (m/s ²)	a massa (m/s ²)
0.5	0.68	0.6129	0.619	0.5647
1	1.03	1.009	0.9941	1.0076
1.5	1.32	1.287	1.3139	1.3044
2	1.93	1.92	1.9182	1.9139

