



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
Curso de Engenharia Mecânica

WANG FE YEN

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DE UM MOTO PERPÉTUO DO MODELO
V-GATE**

SÃO LUÍS
2018

WANG FE YEN

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DE UM MOTO PERPÉTUO DO MODELO
V-GATE**

Monografia de graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Paulo Roberto Campos Flexa Ribeiro Filho

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA MONOGRAFIA
DEFENDIDA PELA ALUNA WANG FE YEN
E ORIENTADA PELO PROF. ME. PAULO
ROBERTO CAMPOS FLEXA RIBEIRO FILHO

.....
ASSINATURA DO(A) ORIENTADOR(A)

SÃO LUÍS

2018

Yen, Wang Fe.

Estudo da viabilidade técnica de um moto perpétuo do modelo v-gate / Wang Fe Yen. – São Luís, 2018.

45f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2018.

Orientador: Prof. Paulo Roberto Campos Flexa Ribeiro Filho.

1.Vgate. 2.Moto perpétuo. 3.Imãs. I.Título

CDU: 621

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA DE UM MOTO PERPÉTUO DO MODELO
V-GATE**

Autor: Wang Fe Yen

Orientador: Prof. Me. Paulo Roberto Campos Flexa Ribeiro Filho

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Monografia:

Prof. Me. Paulo Roberto Campos Flexa Ribeiro Filho
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

Prof. Me. Diego Rosa Santos
Universidade Ceuma

Prof. Me. Carlos Ronyhelton Santana de Oliveira
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís/MA, 13 de dezembro de 2018

Dedico este trabalho à minha família, meu namorado e meus amigos por estarem sempre presentes ao meu lado quando eu mais precisei.

AGRADECIMENTOS

Agradeço minha família pelo constante apoio e por terem cuidado de mim por todo esse tempo, além de colaborado para que eu seguisse o caminho de engenharia mecânica.

Ao meu namorado, Adriano do Amor por sempre estar ao meu lado, me erguendo nos momentos de angústia quando surgiam pedras no caminho da conclusão do TCC, sendo a luz no fim do túnel por muitas vezes, além de colaborar na construção do protótipo e correção do TCC.

Ao meu orientador Paulo Flexa por ter me guiado na construção deste trabalho e dado algumas ideias para que isso ocorresse.

Ao meu amigo Nicolas Dias por ter me ajudado tentar decifrar a equação de Besseli e achado esta função no Matlab.

À minha amiga Ágatha Ferreira por ter gasto muito tempo no auxílio da correção do TCC.

Ao meu amigo José Airton por ter dedicado seu tempo a desenhar o Vgate.

Ao professor mestre Denner Guilhon por ter fornecido os imãs de excitação para o protótipo.

Ao laboratório de lubrificação (LABLUB) e aos professores do prédio de Matemática e Física da Universidade Estadual do Maranhão por ter disposto os dinamômetros para os testes de forças entre imãs.

À Universidade Estadual do Maranhão e seus docentes por ter fornecido uma qualidade de ensino.

"Não importa o quanto a vida possa ser ruim,
sempre existe algo que você pode fazer e triunfar."

(Stephen Hawking)

RESUMO

O moto perpétuo do modelo V-gate é um dispositivo que busca se manter em contínuo movimento através da ação das forças geradas entre ímãs dispostos em forma de V e ímãs de excitação. Ele é questionado por ferir algumas leis da física clássica, como a primeira e a segunda lei da Termodinâmica, mas como a força entre ímãs é estudada pela física quântica, surge a possibilidade de sua existência. Caso este dispositivo seja possível, e dependendo de sua capacidade, esse seria uma fonte de energia própria ou externa, como gerador de energia elétrica ou até motor de grandes máquinas. O trabalho busca estudar os fenômenos ocorrentes de um moto perpétuo do modelo V-gate, assim como a construção de um protótipo que viabilize melhor análise dos fenômenos. Como forma de metodologia deste trabalho, foi aplicado o método analítico e experimental para estimar as forças entre ímãs. Com estes dados, aplicou-se em um modelo V-gate onde também pôde se encontrar a aceleração angular. Paralelamente ao modelo analítico, onde foi considerada a geometria do projeto, foi construído o protótipo que viabilizou, por meio de afastamento dos ímãs, outra forma de gerar movimento ao modelo.

Palavras chave: V-gate, moto perpétuo, ímãs.

ABSTRACT

The perpetual moto of the V-gate model is a device that seeks to keep in continuous movement through the action of forces generated between V-shaped magnets and excitation magnets. It is questioned for hurting some laws of classical physics, such as the first and second law of thermodynamics, but as the force between magnets is studied by quantum physics, the possibility of its existence arises. If this device is possible, and depending on its capacity, this would be a source of its own or external energy, such as electric power generator or even large machine engine. The work seeks to study the phenomena of a perpetual V-gate model, as well as the construction of a prototype that allows a better analysis of the phenomena. As a form of methodology of this work, the analytical and experimental method was applied to estimate the forces between magnets. With this data, it was applied in a V-gate model where the angular acceleration could also be found. Parallel to the analytical model, where the geometry of the design was considered, the prototype was constructed, which enabled, through the removal of the magnets, another way of generating movement to the model.

Keywords: V-gate, perpetual moto, magnets.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 – Roda de movimento perpétuo de Bhaskara (Adaptado de Lancellotti, Caetano, Bergamaschi e Scheremeta, 2015)..... | 1 |
| Figura 2.1 – Localização de Manisa (Adaptado de Word Atlas, 2015) | 3 |
| Figura 2.2 – Interação entre ímãs (Adaptado de SO física, 2018)..... | 3 |
| Figura 2.3 – Ímãs de Neodímio (Adaptado de Portal Energia, 2009). | 5 |
| Figura 2.4 – Um esquema da interação entre dois ímãs cilíndricos permanentes: (a) com um eixo em comum e (b) paralelos entre si sem coincidência de eixos (Adaptado de Vokoun, Beleggia, Heller e Sittner, 2009). | 7 |
| Figura 2.5 – Torque gerado por uma força F em um braço de alavanca r (Adaptado de Física Ilustrada, 2017)..... | 10 |
| Figura 2.6 – Modelo V-gate (Adaptado de Rosa, 2018) | 12 |
| Figura 3.1 - Demonstração dos testes de forças (Fonte: Autora, 2018) | 14 |
| Figura 3.2 – Testes de força entre ímã atizador e ímã do cilindro com eixos paralelos (Fonte: Autora, 2018)..... | 14 |
| Figura 3.3– Imagem ilustrativa da vista frontal apenas para auxílio dos cálculos (Fonte: Autora, 2018)..... | 15 |
| Figura 3.4 – Triângulos isolados da Figura 3.3 (Fonte: Autora, 2018) | 16 |
| Figura 3.5 – Imagem ilustrativa de vista superior apenas para auxílio dos cálculos (posição 1 do ímã 1 sobre o cilindro) (Fonte: Autora, 2018)..... | 17 |
| Figura 3.6 – Comparação de dimensões do projeto (referentes à Figura 3.4) e as forças ocorrentes nos ímãs 2 (Fonte: Autora, 2018) | 19 |
| Figura 3.7 – Cilindro com ímãs sendo pesado em balança de precisão (Fonte: Autora, 2018)..... | 21 |
| Figura 3.8 – Fabricação do gabarito (Fonte: Autora, 2018) | 23 |
| Figura 3.9 – Disco para apoio do cilindro no eixo (Fonte: Autora, 2018) | 24 |
| Figura 3.10 – Eixo finalizado. (Fonte: Autora, 2018) | 24 |
| Figura 4.1 – Plotagem do Matlab das equações 2.2., com J_d igual à Equação 2.7; Equação 2.9, pontos obtidos pela média das forças e seu devido ajuste polinomial (Fonte: Autora, 2018).. | 25 |
| Figura 4.2 – Gráfico de pontos obtidos pelo ajuste polinomial no sentido de x e r da força z entre ímãs com os eixos dispostos em paralelo (Fonte: Autora, 2018) | 27 |
| Figura 4.3 – Vista isométrica do protótipo: 1 – Eixo de PVC; 2 – Ímãs de excitação; 3 – Cilindro com ímãs em V; 4 – Suporte (Fonte: Autora, 2018) | 29 |
| Figura 4.4 – Vista lateral do protótipo: 1 – Rolamento; 2 – Suporte dos ímãs de excitação; 3 – Base dos guias (Fonte: Autora, 2018) | 30 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1 – Descrição dos componentes e máquinas para fabricação do protótipo. (Fonte: Autora, 2018)..... | 22 |
| Tabela 3.2 – Dimensões dos canos para o cilindro principal e para o eixo. (Fonte: Autora, 2018)..... | 23 |
| Tabela 4.1 – Valores das forças obtidas experimentalmente com suas respectivas médias (Fonte: Autora, 2018) | 25 |
| Tabela 4.2 – Média dos valores dos obtidos experimentalmente (Fonte: Autora, 2018)..... | 26 |
| Tabela 4.3 – Dimensões pré-definidas do V-gate para os cálculos no Matlab (Fonte: Autora, 2018)..... | 27 |
| Tabela 4.4 – Força resultante tangencial e aceleração angular para cada posição do cilindro utilizando um ímã de excitação (Fonte: Autora, 2018) | 28 |
| Tabela 4.5 – Força resultante tangencial e aceleração angular para cada posição do cilindro utilizando dois ímãs de excitação (Fonte: Autora, 2018) | 28 |

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Obs: Se aparecerem dois significados para um mesmo símbolo, o contexto da aplicação esclarecerá.

| | |
|--|---|
| A | Integrais elípticas |
| a | Aceleração linear |
| a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l, m, n | Parâmetros do projeto |
| E | Energia de interação magnetostática de um sistema |
| e | Exponencial |
| F | Força |
| F_R | Força resultante |
| F_{RZ} | Força resultante na direção z |
| F_y | Força tangencial, na direção y |
| F_z | Força entre ímãs na direção do eixo z |
| F_{Z12} | Força entre os ímãs 1 e 2 |
| F_{Z13} | Força entre os ímãs 1 e 3 |
| grad | Gradiente |
| h | Distância entre ímã 3 e centro do cilindro na direção z |
| I | Inércia |
| J_1 e J_0 | Função de Bessel modificada |
| J_d | Integral de união dos dipolos magnéticos |
| K_d | Constante de energia magnetostática |
| M | Magnetismo de saturação |
| m | Dipolo magnético |
| m | Massa |
| N | Norte |
| N | Grau de ímãs de neodímio |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| q | Carga do elétron |
| R | Raio |
| r | Deslocamento lateral |
| r | Comprimento braço de alavanca |
| R_1 | Raio interno do cilindro |
| R_2 | Raio externo do cilindro |
| S | Sul |
| sen | Seno |
| senh | Seno hiperbólico |
| t | Espessura dos ímãs |
| x | Separação entre polos |
| Z | Distância entre os centros dos ímãs |
| α | Aceleração angular |
| ζ | Distância reduzida entre centros |
| θ | Ângulo entre o vetor força e o braço de alavanca |
| μ_0 | Permeabilidade do vácuo |
| τ | Proporções entre ímãs |
| τ | Torque |
| φ | Ângulo para cálculos |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 Objetivo Geral | 2 |
| 1.2 Objetivos Específicos | 2 |
| 2 REVISÃO TEÓRICA | 3 |
| 2.1 Imãs e dipolos magnéticos | 3 |
| 2.2 Tipos de imãs | 4 |
| 2.1.1 NEODÍMIO | 4 |
| 2.1.2 SAMÁRIO COBALTO | 5 |
| 2.1.3 ALNICO | 5 |
| 2.1.4 FERRITE | 6 |
| 2.1.5 IMÃS FLEXÍVEIS | 6 |
| 2.3 Força Entre Imãs | 6 |
| 2.1.6 DOIS IMÃS PERMANENTES DE MESMO EIXO | 7 |
| 2.1.7 DOIS IMÃS PERMANENTES DISPOSTOS EM EIXOS PARALELOS | 8 |
| 2.4 Materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos | 9 |
| 2.5 Resistência de Rotação | 10 |
| 2.1.8 TORQUE EM TORNO DE UM EIXO E INÉRCIA | 10 |
| 2.6 Sustentabilidade e fontes alternativas de energia | 11 |
| 2.7 Moto perpétuo | 11 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 13 |
| 3.1 Forças entre ímãs | 13 |
| 3.2 Cálculos das forças tangenciais no cilindro e aceleração dos componentes rolantes . | 15 |
| 3.3 Montagem do protótipo | 22 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 25 |
| 4.1 Força entre imãs | 25 |
| 4.2 Cálculo das forças tangenciais no cilindro e aceleração angular dos componentes rolantes | 27 |
| 4.3 Montagem do protótipo | 29 |

| | |
|--|----|
| 5 CONCLUSÃO..... | 31 |
| 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 32 |
| REFERÊNCIAS | 33 |
| ANEXO A - Graus dos ímãs de neodímio existentes no mercado e algumas de suas propriedades..... | 37 |
| ANEXO B – Tabela de momento de inércia | 38 |
| APÊNDICE A – Programação no Matlab para gerar gráfico comparativo entre os cálculos de força dos ímãs e testes experimentais..... | 39 |
| APÊNDICE B – Programação no Matlab para plotar o gráfico obtido pelo ajuste polinomial no sentido x e r dos resultados da Tabela 4.2 | 41 |
| APÊNDICE C – Programação no Matlab para encontrar o valor do arco j da Figura 3.4..... | 42 |

1 INTRODUÇÃO

O moto perpétuo, também conhecido como moto-contínuo, é um dispositivo que se mantém em ininterrupto funcionamento. A polêmica da viabilidade de um moto perpétuo tem sido discutida há muito tempo por infringir algumas leis da física, como a primeira e segunda lei da Termodinâmica (ROSA, 2018).

De acordo com Lancellotti, Caetano, Bergamaschi e Scheremeta (2015), a máquina de Bhaskara (Figura 1.1) foi a primeira com movimento perpétuo, descrita no século XII. Ela tinha por base um conjunto de tubos igualmente distribuídos ao longo de uma roda, contendo a mesma quantidade de mercúrio. A partir dela, muitas outras tentativas de obter um moto perpétuo se prosseguiram.

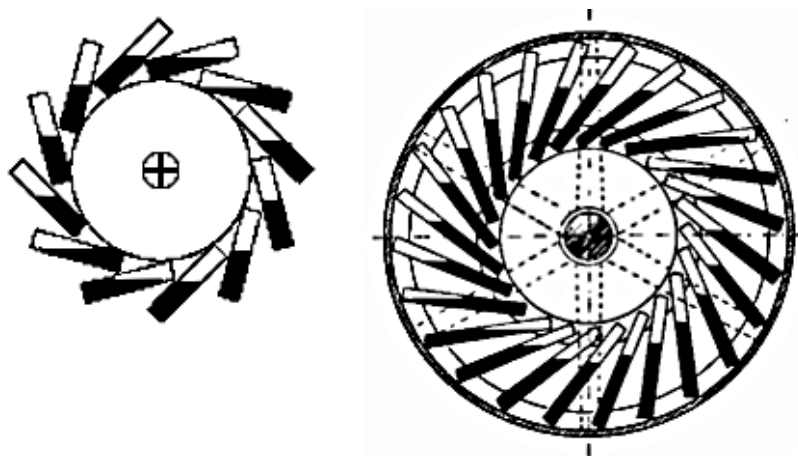


Figura 1.1 – Roda de movimento perpétuo de Bhaskara (Adaptado de Lancellotti, Caetano, Bergamaschi e Scheremeta, 2015)

Os ímãs são dispositivos que se atraem ou repelem sem auxílio de nenhuma força externa, sendo analisada não pela física clássica, mas pela física quântica (SILVA, 2015), assim, nasce a possibilidade de um moto perpétuo movido a ímã.

Para todos os casos, a viabilidade da aplicação do projeto está sujeita à capacidade de energia mecânica produzida por ele, possibilitando a geração de energia para si, alimentação de pequenas baterias como celular ou até mesmo o funcionamento de motores em grandes máquinas (RODRIGUES, 2013).

Com a capacidade suficiente da geração de energia a partir da atração ou repulsão de ímãs, surgiria uma nova fonte energética, que pode reduzir o uso de materiais não renováveis

como o carvão, gás natural, petróleo nas usinas termoelétricas e materiais radioativos nas usinas nucleares, promovendo sustentabilidade.

Esse gerador também poderia ser aplicado em locais que cuidam diretamente da saúde humana. Alguns equipamentos que mantem a vida do paciente não dependeriam da energia externa, diminuindo os riscos caso houvesse uma queda na rede elétrica do hospital por um longo período de tempo. Além disso, não necessitaria de grandes instalações em locais fixos por ser movido apenas por ímãs, promovendo mobilidade e portabilidade.

As cadeiras de rodas elétricas possuem limitações, pois dependem do carregamento de suas baterias, com o gerador acoplado não haveria limite de distância percorrida e nem perda de tempo devido a quantidade limitada de energia delas, possibilitando maior liberdade. Equivalente ao princípio anterior seria a aplicação em motores de veículos, além de fornecer mobilidade sem limites, seria uma fonte de energia mais sustentável que a gasolina, um derivado do petróleo.

1.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo analítico e experimental da viabilidade técnica de um moto perpétuo do modelo V-gate.

1.2 Objetivos Específicos

- I. Realizar levantamento bibliográfico sobre ímãs, força de interação entre eles, resistência para a rotação, e moto perpétuo;
- II. Calcular força e aceleração angular atuantes no dispositivo;
- III. Construir um protótipo;
- IV. Testar e analisar resultados obtidos;

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Imãs e dipolos magnéticos

Cerca de 2.500 anos, fenômenos magnéticos foram observados pela primeira vez em fragmentos de minério de ferro imantados próximos da antiga cidade de Magnésia, hoje chamada de Manisa (Figura 2.1), localizada no oeste da Turquia. Estes fragmentos são conhecidos atualmente como imãs permanentes ou naturais (YOUNG e FREEDMAN, 2016).



Figura 2.1 – Localização de Manisa (Adaptado de Word Atlas, 2015)

Segundo Silva (2015), um ímã permanente exerce força sobre outro ou sobre um pedaço de metal. Um ímã em forma de barra é dividido em dois extremos, o polo norte (N) e o polo sul (S). Polos opostos se atraem e os iguais se repelem (Figura 2.2). Um corpo metálico quando em contato com um ímã, se torna imantado apresentando a configuração dos extremos norte e sul definidos.

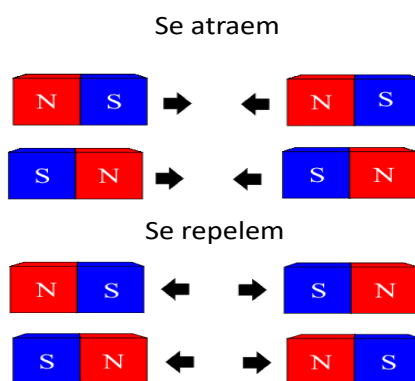


Figura 2.2 – Interação entre ímãs (Adaptado de SO física, 2018)

No nível atômico de quaisquer materiais, há dois tipos possíveis de corrente: a corrente convencional (movimento de elétrons livres ou de íons carregados, substâncias que possuem átomos com camadas ou subcamadas eletrônicas incompletas), onde há transporte de carga; e correntes atômicas (movimento circulatório dos elétrons em um só átomo), que não transportam cargas. Ambos os casos podem produzir campos magnéticos. (REITZ, MILFORD e CHRISTY, 1982).

A corrente atômica é uma pequena corrente elétrica que se move em trajetórias fechadas ao redor do núcleo, podendo ser descrita como um dipolo magnético (m). Os dipolos magnéticos determinam dois polos diferentes (norte e sul), dando origem às propriedades magnéticas da matéria. Dipolos próximos de mesma intensidade alinhados de maneira oposta (N-S ou S-N) se anulam e no mesmo sentido, paralelamente (N-N ou S-S), seus efeitos se somam. Logo, um ímã é formado por milhões de dipolos orientados da mesma maneira (FERREIRA, 2017).

A temperatura é um parâmetro que influencia nas características magnéticas. A elevação da temperatura resulta em um aumento no movimento dos átomos tendendo a tornar aleatório o alinhamento de dipolos magnéticos. A temperatura de Curie é o ponto de desmagnetização de um ímã por completo. (CALLISTER e RETHWISCH, 2013).

2.2 Tipos de ímãs

Ímãs podem ser naturais (magnetita) ou artificiais. No primeiro tipo, os minerais (óxido de ferro) retirados da natureza já apresentam propriedades magnéticas embutidas; o segundo é um material ferromagnético (citado futuramente no tópico 2.4.) cujas propriedades foram criadas (OS TIPOS, 2018).

Comercialmente, há 5 tipos de ímãs: Neodímio, Samário Cobalto, AlNiCo, Ferrite e ímãs Flexíveis (MAGTEK SOLUÇÕES MAGNÉTICAS, 2018b).

2.1.1 NEODÍMIO

Fabricado por sinterização ou aglomeração, é composto pelas substâncias neodímio, ferro e boro ($Nd_2Fe_{14}B$), também chamado de Terra Rara ou super ímã. Esse tipo de ímã é o de maior força magnética do mercado na relação indução/peso, porém, é mecanicamente

frágil pelo fato da sua dureza estar em torno de 600HV (dureza Vickers). (FULLBUSTER, 2012; MAGTEK SOLUÇÕES MAGNÉTICAS, 2018c).

Esses possuem alta susceptibilidade de corrosão, por isso eles costumam ser revestidos por níquel (Figura 2.3), zinco ou resina epóxi (FMAGNET XINFENG, 2013).



Figura 2.3 – Imãs de Neodímio (Adaptado de Portal Energia, 2009).

É classificado por graus que se referem ao máximo produto energético do material magnético de que é feito o imã, onde, quanto maior o grau (o número após o "N" na sua nomenclatura), maior sua força. O mais alto grau disponível no mercado é o N52 (ITAL EQUIPAMENTOS PARA A INDÚSTRIA, 2005; IMA NEODIMIO, 2018).

Também pode ser classificado pela temperatura de Curie (Letras após o número do grau) (IMA NEODIMIO, 2018).

Algumas das classificações e algumas de suas características se encontram no Anexo A.

2.1.2 SAMÁRIO COBALTO

Possui um alto custo, pois são fabricados por prensão de ligas pulverizadas e posteriormente, sintetizadas a altas temperaturas. São frágeis à colisão, resistentes a elevadas temperaturas (até 250°C) e razoavelmente resistentes à corrosão, não precisando de revestimento. (FMAGNET XINFENG, 2013).

2.1.3 ALNICO

Possuem um bom campo magnético, mas são pouco resistentes à desmagnetização. Podem ser usadas e suportam temperaturas de até 550°C, contudo, sua temperatura de Curie

é em torno de 850°C. São resistentes à corrosão, não necessitando de revestimento. (MAGTEK SOLUÇÕES MAGNÉTICAS, 2018a).

2.1.4 FERRITE

São os de custo mais baixo do mercado. Resistentes à ácidos, sais lubrificantes, gases e temperaturas altas (300°C) e corrosão, dispensando revestimento. São usados em brinquedos ou até em alto falantes. (FULLBUSTER, 2012).

2.1.5 IMÃS FLEXÍVEIS

Possuem grande flexibilidade, vendidos em tiras ou folhas, fabricados a partir de pó de ferrite e borracha, pouco resistentes à oxidação e possuem baixo poder magnético. (OS TIPOS, 2018).

2.3 Força Entre Imãs

Conforme Vokoun, Beleggia, Heller e Sittner (2009), a equação da força de atração entre conjuntos de imãs cilíndricos pode ser encontrada a partir da derivação do total da energia de interação magnetostática de um sistema **E**, de acordo com a Equação 2.1:

$$\vec{F} = -\text{grad}(E) \quad (2.1)$$

Porém, a aplicação desta fórmula somente é possível, se a distância entre os dois imãs for considerável. Por isso, estes autores aprimoraram a equação utilizando a forma analítica com integrais elípticas.

Para continuação dos cálculos, foram considerados todos os imãs sendo cilíndricos de mesmo raio (**R**), magnetizados uniformemente ao longo do eixo de simetria do cilindro, feitos de mesmo material, caracterizado pelo magnetismo de saturação (**M**) e não permitindo a rotação durante a interação.

As equações para a força entre imãs são tratadas conforme a disposição dos imãs na Figura 2.4.

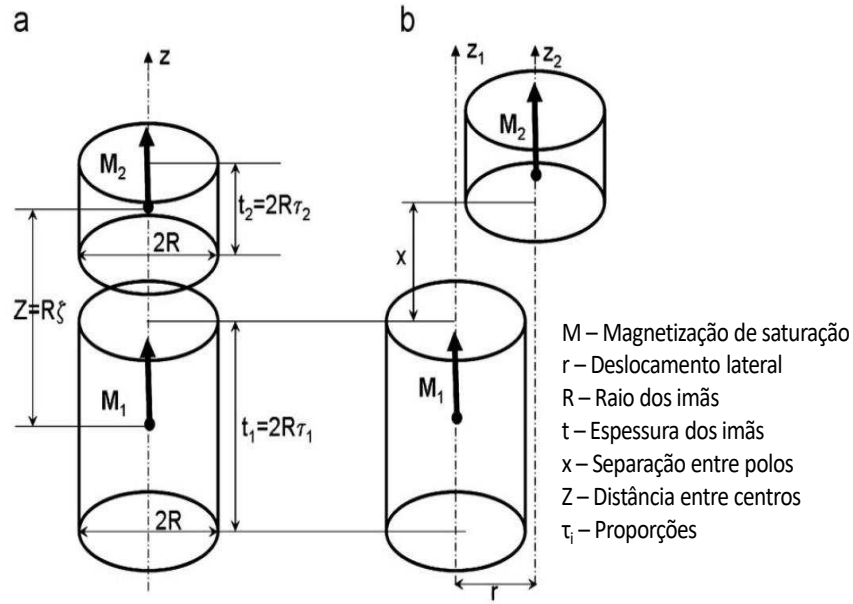


Figura 2.4 – Um esquema da interação entre dois ímãs cilíndricos permanentes: (a) com um eixo em comum e (b) paralelos entre si sem coincidência de eixos (Adaptado de Vokoun, Beleggia, Heller e Sittner, 2009).

2.1.6 DOIS IMÃS PERMANENTES DE MESMO EIXO

Para o caso de dois ímãs permanentes de eixos coincidentes (Figura 2.4a), foi utilizado como referência o eixo de simetria dos cilindros como o eixo z. A força de atração ao longo de z foi obtida a partir da Equação 2.1, tem-se:

$$F_z = -\frac{\partial E}{\partial Z} = 2\pi\mu_0 M^2 R^3 \frac{\partial J_d}{\partial Z} \quad (2.2)$$

Onde μ_0 é a permeabilidade do vácuo e J_d é a integral de união dos dipolos calculada conforme os métodos computacionais de Belggia, Tandon, Zhu e Graef (2003) e definida por Vokoun, Beleggia, Rahman, Hou e Lai (2008) como:

$$J_d(\tau_1, \tau_2, \zeta) = 2 \int_0^\infty \frac{J_1^2(q)}{q^2} \sinh(q\tau_1) \sinh(q\tau_2) e^{-q\zeta} dq \quad (2.3)$$

Onde i são os correspondentes ímãs (1 ou 2), $\tau_i = t_i/(2R)$, $\zeta = Z/R$ é a distância reduzida entre seus centros (Figura 2.4a) e $J_1(q)$ é a função de Bessel modificada de primeiro tipo, expressada de acordo com Biezuner (2007) pela Equação 2.4:

$$J_1(q) = \frac{q}{2} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{q^{2k}}{2^{2k} (k+1)! k!} \quad (2.4)$$

Conforme Vokoun, Beleggia, Heller e Sittner (2009), a força para este caso também pode obtida por meio de integrais elípticas (Equação 2.5):

$$F_z = -2\pi K_d R^2 \sum_{ij=-1}^1 i \cdot j \cdot A_{11}^0(\zeta + i\tau_1 + j\tau_2, 1, 1) \quad (2.5)$$

Onde $K_d = \frac{\mu_0 M^2}{2}$ é a constante de energia magnetostática e:

$$A_{\mu\nu}^\alpha(a, b, c) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-\alpha x} J_\mu(bx) J_\nu(cx) dx \quad (2.6)$$

2.1.7 DOIS IMÃS PERMANENTES DISPOSTOS EM EIXOS PARALELOS

Baseado na mesma ideia de formulação da equação da força obtida a partir de interações magnetostáticas do tópico anterior, a fórmula da força para dois imãs permanentes dispostos em eixos paralelos (Figura 2.4b) é igual ao da Equação 2.2, mas com J_d (deduzida a partir do artigo de Vokoun, Beleggia, Heller e Sittner (2009)) sendo igual a:

$$J_d(\tau_1, \tau_2, \zeta) = 2 \int_0^\infty J_0\left(\frac{rq}{R}\right) \frac{J_1^2(q)}{q^2} \sinh(q\tau_1) \sinh(q\tau_2) e^{-q\zeta} dq \quad (2.7)$$

Onde r é a distância entre os eixos e J_0 também é a equação de Bessel modificada de primeiro tipo dada conforme Biezuner (2007) como:

$$J_0(q) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{(k!)^2} \left(\frac{q}{2}\right)^{2k+p} \quad (2.8)$$

A força obtida por meio de integrais elípticas é dada por:

$$F_z = -2\pi K_d R^2 \int_0^{+\infty} J_0\left(\frac{rq}{R}\right) \frac{J_1^2(q)}{q} \sum_{ij=-1}^1 i \cdot j \cdot e^{-q(\zeta+i\tau_1+j\tau_2)} dq \quad (2.9)$$

Segundo Vokoun, Beleggia, Heller e Sittner (2009), para distâncias entre os imãs muito maiores que seus raios, é possível aproximar a integral da Equação 2.7 expandindo as funções de Bessel em torno de $q=0$. Então, utiliza-se $\zeta = (t_1 + t_2)/2R + x/R$, onde x é a distância entre os imãs no eixo z (Figura 2.4b), obtém-se:

$$F_z \approx -\frac{1}{4}\pi\mu_0 M^2 R^4 \sum_{ij=0}^1 \frac{(-1)^{i+j}}{(x + it_1 + jt_2)^2} \left[1 - \frac{3}{2} \frac{r^2}{(x + it_1 + jt_2)^2} \right] \quad (2.10)$$

2.4 Materiais diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos

De acordo com Callister e Rethwisch (2013), um material sólido, quando é colocado em um campo magnético externo reage de diferentes formas:

Materiais diamagnéticos reagem de forma fraca ao magnetismo, não são permanentes e só persistem enquanto um campo externo está sendo aplicado. Sua função ocorre pela indução do movimento orbital dos elétrons e seu dipolo magnético resultante ocorre em um sentido oposto ao campo aplicado.

Materiais paramagnéticos possuem momento de dipolo magnético por causa do cancelamento incompleto de spin (rotação do elétron no próprio eixo; corrente convencional) e/ou orbital do elétron (corrente atômica). Estes momentos se dispõem de forma aleatória na ausência de um campo externo apresentando magnetismo insignificante. Já na presença desse, os momentos se orientam no sentido do campo e o ampliam de forma fraca.

Já os ferromagnéticos possuem o momento de dipolo magnético das duas formas, tendo como principal fonte a do cancelamento incompleto dos spins. Diferente dos materiais paramagnéticos, uma interação entre esses spins existe de tal forma que se alinha uns aos outros (os dipolos nos paramagnéticos não exercem interações entre si) promovendo um momento magnético forte e permanente na ausência de um campo externo.

2.5 Resistência de Rotação

2.1.8 TORQUE EM TORNO DE UM EIXO E INÉRCIA

"Torque é uma medida de força que pode causar um objeto a girar ao redor de um eixo."
(KHAN ACADEMY, 2018).

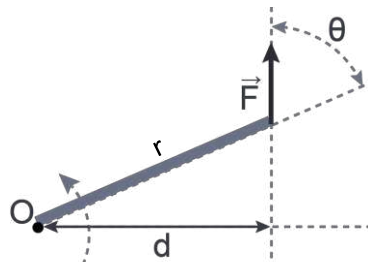


Figura 2.5 – Torque gerado por uma força F em um braço de alavanca r (Adaptado de Física Ilustrada, 2017)

De acordo com Henrique e Silva (2017), o torque é dado pela equação:

$$\tau = Fr \sin \theta \quad (2.11)$$

Onde F é a força de aplicação no corpo, r é o comprimento do braço de alavanca e θ é o ângulo entre o vetor força e o braço de alavanca. Com base das Equações a seguir:

$$F = ma \quad (2.12)$$

$$a = r \alpha \quad (2.13)$$

$$I = mr^2 \quad (2.14)$$

Onde m é a massa, a é aceleração linear, α é a aceleração angular e I é o momento de inércia (o momento de inércia de alguns formatos conhecidos se encontram no Anexo B), obtém-se:

$$\tau = I\alpha \quad (2.15)$$

2.6 Sustentabilidade e fontes alternativas de energia

Após grandes danos gerados ao meio ambiente, oriundos do uso de fontes energéticas de origem mineral (carvão, petróleo, etc.) na Revolução Industrial, somente nos anos 70 houve a atenção para este assunto de forma abrangente; se tornando discussão internacional no seio da ONU (LABORATÓRIO DE SUSTENTABILIDADE, 2018).

Sustentabilidade tem por objetivo garantir a sobrevivência dos recursos naturais do planeta e viabilizar soluções ecológicas de desenvolvimento. Tem por base aspectos ambientais, sociais e econômicos, onde há interseções entre eles (SIGNIFICADOS, 2018).

Fontes alternativas de energia buscam menor impacto ambiental no planeta promovendo menor poluição e conseqüentemente a sustentabilidade. Essas derivam de energias renováveis, ou seja, não cessam e se renovam na natureza espontaneamente (TODA MATÉRIA, 2017). Utilizando-as, evitamos consumo de combustíveis fósseis ou radioativos; materiais que são repostos de forma menos rápida pela natureza que são consumidos pelos humanos, tendendo a extinção destes componentes (PORTAL SOLAR, 2018).

2.7 Moto perpétuo

Um moto perpétuo ou moto-contínuo é um dispositivo capaz de produzir energia perpétua pelo próprio movimento (RODRIGUES, 2013).

Conforme Passos (2014) há três classificações para o moto perpétuo: de primeira, segunda e terceira espécie.

O moto-contínuo de primeira espécie viola a primeira lei da termodinâmica (lei da conservação de energia), onde esta gera mais energia do que consome.

O de segunda espécie viola a segunda lei (nenhuma máquina tem rendimento de 100%), energia que entra é convertida 100% em energia útil, sem perdas para o meio.

O de terceira espécie elimina o atrito e outras formas dissipativas. Mantendo o moto perpétuo movido somente pela inércia.

Essas leis eram desconhecidas na Idade Média, período que mais se buscou o moto contínuo. A primeira tentativa fracassada foi de Bhaskara Akaria (1114-1185) (Figura 1.1), formada por uma roda com vários recipientes cheios de mercúrio, buscando deixar um dos lados mais pesado com seu deslocamento (RODRIGUES, 2013).

A máquina de movimento perpétuo mais bem sucedida já feita de acordo com Lopes (2016) foi de um pintor e escultor norueguês chamado Reinar Finsrud com eficiência de 90%. Afirma que a máquina permanece funcionando ininterruptamente desde o dia 28 de abril de 1996 e tem como base de funcionamento uma bola, ímãs e pêndulos.

Rosa (2018) informa muitos registros históricos de tentativas de motores magnéticos, como: Ecklin, Johnson, Adams, Reed e Wang. Além disso, destaca alguns dos modelos mais conhecidos de motores magnéticos. Dentre eles, há o modelo V-gate, onde há um rotor cilíndrico na posição horizontal, com referência na Figura 2.6, em que são dispostos ímãs de neodímio cilíndricos na configuração de “V” distribuído na superfície curva. Seu nome vem a partir deste formato em "V" da disposição dos ímãs. Seu movimento se deve à indução de um ímã próximo e paralelo ao eixo horizontal do rotor.



Figura 2.6 – Modelo V-gate (Adaptado de Rosa, 2018)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Visando que o projeto deve ser movido somente com a interação entre ímãs, a intensidade dessa força de interação deverá ser significativa a ponto de a excitação de giro ser realizada de forma contínua. Com redução do tamanho do protótipo tem-se maior portabilidade e menor massa (com maior versatilidade e menor resistência de rotação); portanto, por conter a maior relação força/peso (muita força em pequena massa), foi escolhido o ímã de neodímio de grau N52. A especificação do comportamento do ímã em referência a grandeza de temperatura, não se faz necessária, visto que esta não excedera a temperatura mínima de 80°C (temperatura de operação demonstrado no Anexo A).

3.1 Forças entre ímãs

Com base no referencial teórico, utilizou-se o Matlab para gerar gráfico a partir da Equação 2.2 com J_d igual à Equação 2.7, a Equação 2.9 e os pontos obtidos experimentalmente com ajuste polinomial (rotinas dispostas no Apêndice A) com o intuito de demonstrar a veracidade dessas equações ao compará-las.

Os ímãs utilizados neste estudo possuem as dimensões de diâmetro e espessura respectivamente de 10 e 3 mm, com esses parâmetros objetiva o seu fácil manuseio e devida quantidade comprada, seu custo aumentaria muito com ímãs de maiores dimensões.

Como metodologia experimental inicial, é utilizado um dinamômetro da CROWN, de modelo AT 06214, de capacidade máxima de 20N e precisão de 0,5 N. Fixou-se um ímã no extremo desse equipamento, com o propósito de medir a força exercida entre o ímã de excitação e os ímãs do cilindro do sistema do moto perpétuo.

Com o objetivo de obter os resultados das forças, fixou-se diferentes distâncias entre os ímãs através de placas de acrílico com padronização de 2 mm em sua espessura. As mesmas são componentes que não fluem significativamente no campo magnético dos ímãs, o que viabilizou sua utilização.

Os dados para o estudo comparativo do experimental e analítico foram definidos pelas distâncias de 2, 4 e 6 mm (valor de "x" representado na Figura 2.4). Com o ímã anexado em uma placa, houve aproximação do mesmo com o ímã encontrado no dinamômetro por meio da aderência magnética, ao distanciar o dinamômetro aferiu-se a força exercida até o desprendimento dos mesmos (como observado na Figura 3.1). Ambos se encontram com eixos coincidentes.

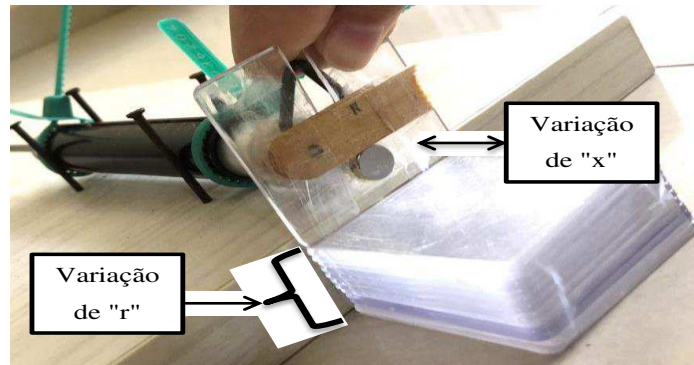


Figura 3.1 - Demonstração dos testes de forças (Fonte: Autora, 2018)

Por inviabilidade de ímãs de excitação serem do mesmo diâmetro que os do cilindro, o ímã de excitação em estudo passou a ter as dimensões de 30 e 10 mm respectivamente para o diâmetro e espessura com um furo passante em seu centro de 6 mm (diâmetro). Este se encontra na classificação de grau N52.

Como as equações citadas na revisão teórica (rever tópico 2.3) são entre ímãs de mesmo raio, foi utilizado o método experimental para encontrar as forças entre os ímãs dispostos de forma paralela.

Para tal, foi necessário um dinamômetro, uma madeira de apoio e placas de acrílico para separar os ímãs a uma distância variável, onde o “r” varia de 4 a 22 e o “x” de 6 a 12, ambos possuem a variação de dois em dois. Tanto a madeira quanto o acrílico são diamagnéticos (definição tratada no tópico 2.4), conforme Mirica, Ilievski, Ellerbee, Shevkoplyas e Whitesides (2011), materiais que pouco interferem nos testes.

O ímã de excitação está à esquerda das placas de acrílico, enquanto o ímã, que se encontrará na superfície curva do tambor, está na extremidade do dinamômetro. Com um suporte para o deslizamento do dinamômetro e elevação do ímã para diferentes posições do “r” fez-se necessário a utilização de outro dinamômetro de maior precisão da CIPEDA, com alcance máximo de 2N variando de 0,02 N (testes apresentados na Figura 3.2).

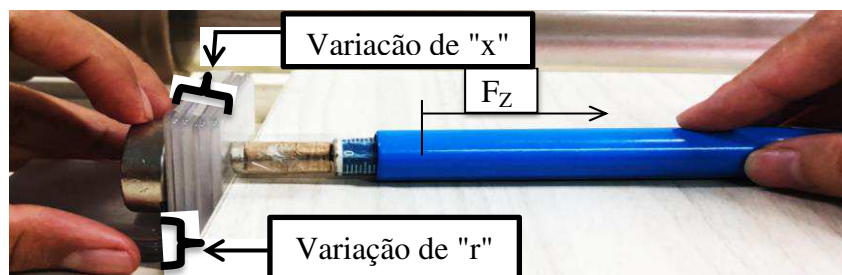


Figura 3.2 – Testes de força entre ímã atizador e ímã do cilindro com eixos paralelos (Fonte: Autora, 2018)

Foram efetuadas 5 aferições de força para cada variação no experimento e fez-se a média para alcançar um valor-base em relação as suas oscilações. Os resultados obtidos foram inseridos no Matlab com intuito de fazer um ajuste polinomial da força em "z", que está em função das variáveis "x" e "r", e assim, obter uma malha que represente todos os pontos de força para qualquer distância dessas variáveis (rotina se encontra no Apendice B).

3.2 Cálculos das forças tangenciais no cilindro e aceleração dos componentes rolantes

Para que haja movimento do dispositivo, o somatório das forças entre o imã de excitação (imã 1 da Figura 3.3) e os que estão mais adiante no cilindro (imãs 3 e 5 da Figura 3.3), devem ser maiores que as forças entre o imã de excitação e os imãs anteriores ao cilindro (imãs 2 e 4 da Figura 3.3).

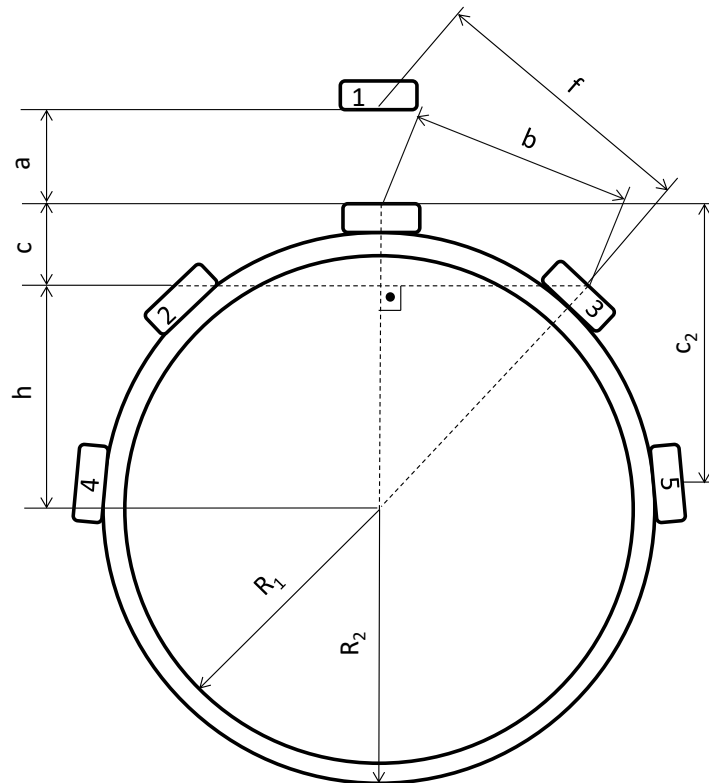


Figura 3.3– Imagem ilustrativa da vista frontal apenas para auxílio dos cálculos (Fonte: Autora, 2018)

A força F_z é em função de "x" e de "r", ou seja:

$$F_{zij} = F_{zij}(r, x) \quad (3.1)$$

Onde i e j são os respectivos imãs. Tanto para F_{Z12} quanto para F_{Z13} o parâmetro "x" seria o valor $a + c$ (apresentado na Figura 3.3) e tanto para F_{Z14} quanto para F_{Z15} seria o valor $a+c_2$, onde c foi encontrado da seguinte forma:

Foi isolado o triângulo de lados $c + h$, b e $R_2 + t$; e o triângulo de lados R_2 , R_2 e i para melhoria do entendimento (Figura 3.4).

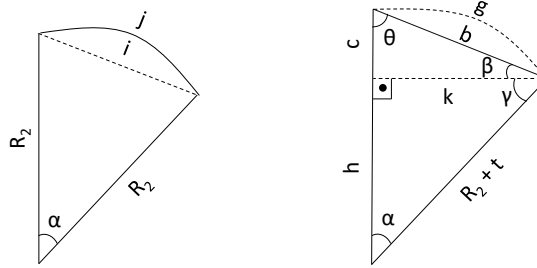


Figura 3.4 – Triângulos isolados da Figura 3.3 (Fonte: Autora, 2018)

O valor de j foi deduzido a partir da quantidade de imãs, ambos calculados com o auxílio do Matlab (rotinas no Apêndice C). Com ele, podemos encontrar o valor de α analisando o setor circular à esquerda da Figura 3.4 demonstrado na Equação 3.2:

$$\alpha = \frac{j}{R_2} \quad (3.2)$$

Tal qual o setor circular à direita da Figura 3.4, o valor de b é dado por:

$$b = (R_2 + t)\sqrt{2 - 2 \cos \alpha} = (R_2 + t) \sqrt{2 - 2 \cos \left(\frac{j}{R_2} \right)} \quad (3.3)$$

Como $h + c = R_2 + t$, o segundo triângulo da Figura 3.4 é isósceles e $\theta = \beta + \gamma$, podendo relacionar α com θ :

$$\theta = \frac{\pi - \alpha}{2} \quad (3.4)$$

Logo:

$$c = b \cos\theta \quad (3.5)$$

O valor de c_2 é encontrado da mesma forma com $\alpha_2 = 2 \times \alpha$.

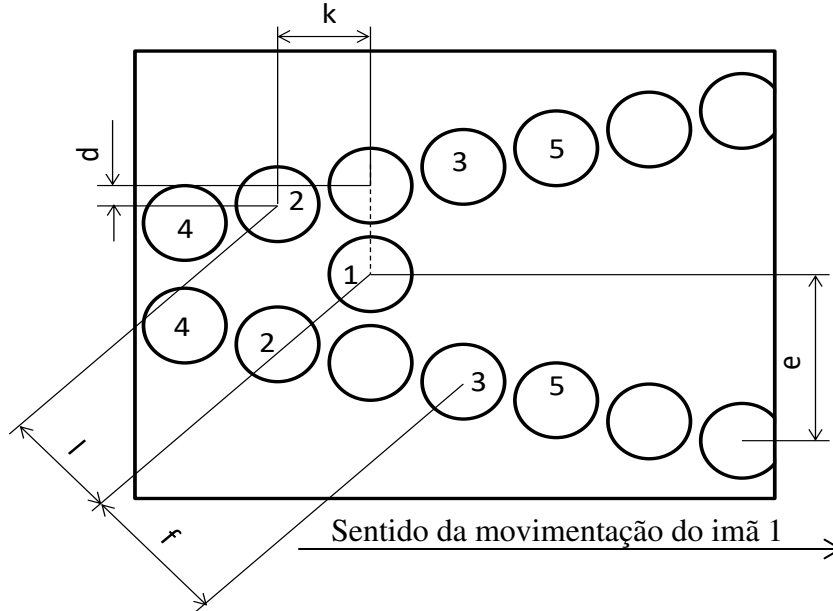


Figura 3.5 – Imagem ilustrativa de vista superior apenas para auxílio dos cálculos (posição 1 do ímã 1 sobre o cilindro) (Fonte: Autora, 2018)

Para F_{Z12} , o parâmetro r seria a dimensão l da Figura 3.5, dada por:

$$l = \sqrt{k^2 + \left(e - \left(\frac{q_i}{4} - i - 1\right) \times d\right)^2} \quad (3.6)$$

Onde q_i é a quantidade total de ímãs e i é a posição do ímã 1 sobre o cilindro iniciando do terceiro ímã a partir da parte mais estreita do V, conforme a Figura 3.5. Para F_{Z13} , seria a dimensão f , dada por:

$$f = \sqrt{k^2 + \left(e - \left(\frac{q_i}{4} - i - 3\right) \times d\right)^2} \quad (3.7)$$

Para F_{Z14} :

$$l_2 = \sqrt{k^2 + \left(e - \left(\frac{qi}{4} - i\right) \times d\right)^2} \quad (3.8)$$

E Para F_{Z15} :

$$f_2 = \sqrt{k^2 + \left(e - \left(\frac{qi}{4} - i - 3\right) \times d\right)^2} \quad (3.9)$$

Logo:

$$F_{Z12} = F_{Z12}(l, a + c) \quad (3.10)$$

$$F_{Z13} = F_{Z13}(f, a + c) \quad (3.11)$$

$$F_{Z14} = F_{Z14}(l_2, a + c_2) \quad (3.12)$$

$$F_{Z15} = F_{Z15}(f_2, a + c_2) \quad (3.13)$$

Como a força dos imãs dada pelo teste com o dinamômetro é na direção z, a qual corresponde à direção radial do cilindro e que o torque (apresentada na Equação 2.11) é em função do seno do ângulo entre o raio e a direção da força; temos por consequência um torque nulo, pelo fato desse ângulo corresponder a zero. Portanto, foi calculada a componente perpendicular à força, ou seja, a força tangencial.

Com esse objetivo, foi feita a relação entre as forças e algumas dimensões do protótipo por meio de semelhança de triângulos. Foi traçada uma linha tangente ao imã dois no cilindro propiciando a criação de novas variáveis conforme a Figura 3.6. (O modo a se calcular a força tangencial para o imã três é equivalente ao do imã dois, modificando apenas o sentido e a direção desta, assim como para os imãs quatro e cinco, utilizando $\alpha_2 = 2 \times \alpha$ com seus respectivos sentidos e direções).

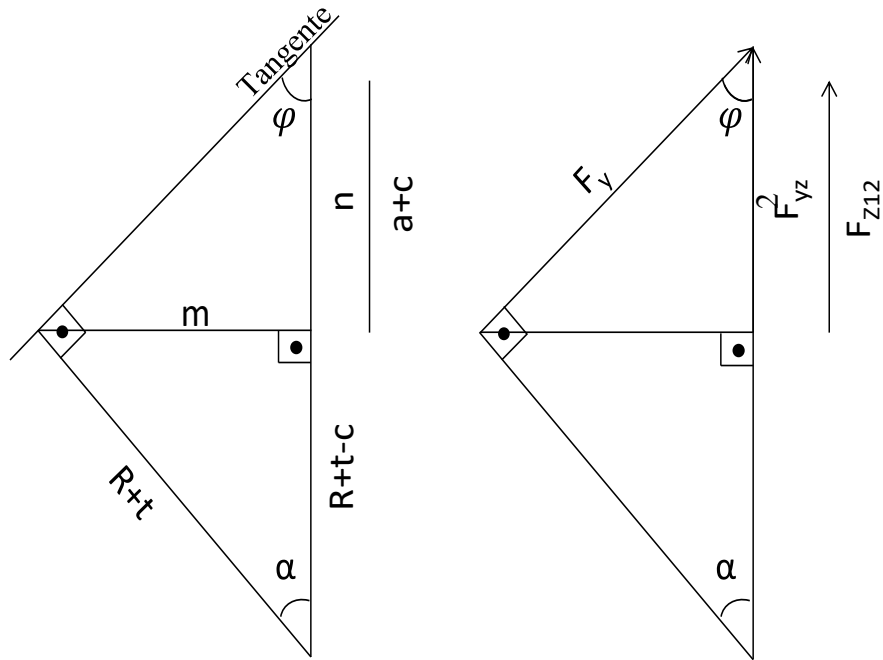


Figura 3.6 – Comparação de dimensões do projeto (referentes à Figura 3.4) e as forças ocorrentes nos ímãs 2 (Fonte: Autora, 2018)

Inicialmente serão apresentados os valores de m e n :

$$m = (R + t)\text{sen}\alpha \quad (3.14)$$

$$n = \frac{m}{\text{tg}\varphi} \quad (3.15)$$

Onde:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (3.16)$$

Para encontrarmos os valores de F_{yz} (componente de força na direção de z para encontrar o valor da força tangencial), utilizou-se semelhança de triângulos e uma regra de três, equiparando as proporções:

$$\frac{n}{a + c} = \frac{F_{yz}}{2 F_{z12}} \quad (3.17)$$

Logo:

$$F_{yz} = \frac{n \times 2 \times F_{z12}}{a + c} \quad (3.18)$$

Pode-se encontrar os valores de F_y utilizando:

$$\cos\varphi = \frac{n}{\sqrt{m + n}} = \frac{F_{yz}}{F_y} \quad (3.19)$$

Como há forças dissipativas e não foi considerado o ângulo dos eixos dos ímãs no cilindro, foi adotado um coeficiente de erro de 50%, calculando F_y como:

$$F_y = 0,5 \frac{F_{yz} \sqrt{m + n}}{n} \quad (3.20)$$

Observando que as distâncias entre os ímãs são as mesmas ($R+t$) e levando em conta o conceito de torque, podemos obter a força resultante atuante no cilindro como o somatório das forças tangenciais.

Também foram calculadas as forças equivalentes utilizando um segundo ímã, sendo aplicadas as mesmas fórmulas, mas com 90° de diferença (posição $qi/8+i$) e somado os novos valores à força resultante.

Relacionando as Equações 2.11 e 2.15, obtemos:

$$F_{rsen\theta} = I\alpha \quad (3.21)$$

As massas dos componentes rolantes (cilindro com ímãs, discos e eixo) são necessárias para obtenção da inércia. Elas foram encontradas dos componentes do protótipo já fabricadas, utilizando a balança digital de alta precisão da marca CASITA de capacidade máxima de 10 kg (ver Figura 3.7).



Figura 3.7 – Cilindro com imãs sendo pesado em balança de precisão (Fonte: Autora, 2018)

A fórmula da inércia foi calculada de acordo com dados retirados do Anexo B conforme a Equação 3.22, na qual no cilindro com imãs aplicou-se a fórmula de cilindro oco em relação ao eixo central; na do eixo, a fórmula de anel fino em relação ao eixo central e na dos discos, a fórmula de cilindro maciço em relação a um diâmetro central. Nesse último, por não rotacionar no mesmo eixo dado pela fórmula, deve-se acrescentar a massa vezes a distância deslocada do eixo ao quadrado.

$$I = \frac{m_{\text{cil}} \times (R_{\text{cil externo}}^2 + R_{\text{cil interno}}^2)}{2} + m_{\text{eixo}} \times R_{\text{eixo}}^2 + \frac{m_{\text{disco}} \times R_{\text{disco}}^2}{2} + \frac{m_{\text{disco}} \times e_{\text{disco}}^2}{6} + m_{\text{disco}} \times \frac{H^2}{2} \quad (3.22)$$

Como $F_{\text{sen}\theta} = F_{y \text{ resultante}}$ e $r = R_2 + t$, temos:

$$F_{y \text{ resultante}} \times (R_2 + t) = I \times \alpha \quad (3.23)$$

Logo:

$$\alpha = \frac{F_{y \text{ resultante}} \times (R_2 + t)}{I} \quad (3.24)$$

Tanto para os cálculos da força resultante quanto para o cálculo para a aceleração angular obtiveram resultados com o auxílio do Matlab, cujas rotinas se encontram no Apêndice C.

3.3 Montagem do protótipo

No desenvolvimento do protótipo foram utilizados os materiais e ferramentas listados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Descrição dos componentes e máquinas para fabricação do protótipo. (Fonte: Autora, 2018)

| Quantidades | Descrição |
|--------------------|--|
| 01 | Tubo de PVC de diâmetro 75,7 mm e 300mm de comprimento |
| 01 | Tubo de PVC de diâmetro 20 mm e 60mm de comprimento |
| 01 | Placa de Aglomerado de madeira 400 x 400 mm |
| 05 | Prego |
| 01 | Fita Durex |
| 40 | Ímas (diâmetro de 10 mm e espessura de 3 mm) |
| 02 | Ímas (diâmetro de 30 mm e espessura de 10 mm) |
| 01 | Micro retífica com acessórios BLACK & DECKER |
| 01 | Serra Tico-Tico SKILL |
| 01 | Furadeira BOSCH |
| 22 | Palito de madeira |
| 08 | Tubo de polímero |
| 02 | Rolamento 6004 ZE |
| 01 | Cola adesivo de contato CASCOLA |
| 01 | Martelo |

Para o cilindro e eixo, foram utilizados canos de PVC por ser um material diamagnético, de acordo com UFJF (2013) e pelo fato de ser um material leve, o que auxilia na redução da inércia. Os parâmetros dos canos estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Dimensões dos canos para o cilindro principal e para o eixo. (Fonte: Autora, 2018)

| | Diâmetro externo | Diâmetro interno | Comprimento |
|--------------------|------------------|------------------|-------------|
| Cano para cilindro | 75,7 mm | 67,7 mm | 60 mm |
| Cano para eixo | 20 mm | 15 mm | 230 mm |

Como os ímãs do cilindro exercem forças entre si, foi feito um gabarito a partir de outro cano de PVC sobreposto ao cano do cilindro, objetivando facilidade e garantia na fixação. Para se definir as posições dos ímãs utilizaram-se os resultados dos cálculos obtidos da rotina do Matlab do Apêndice C, e com os valores definidos realizou-se o desenho computacional destes. Outro fator importante é dispor todos os ímãs com o mesmo polo magnético virado para a superfície do tambor.

Com a configuração de montagem dos ímãs impresso e fixado no tambor, conforme a Figura 3.8, destinou-se a etapa de realização dos furos, onde utilizou-se a furadeira da BOSCH de modelo GSB 550 RE PROFESSIONAL, com a broca de diâmetro de 10 mm. O diâmetro final do cano com o gabarito foi de 80 mm e espessura igual a 4 mm.

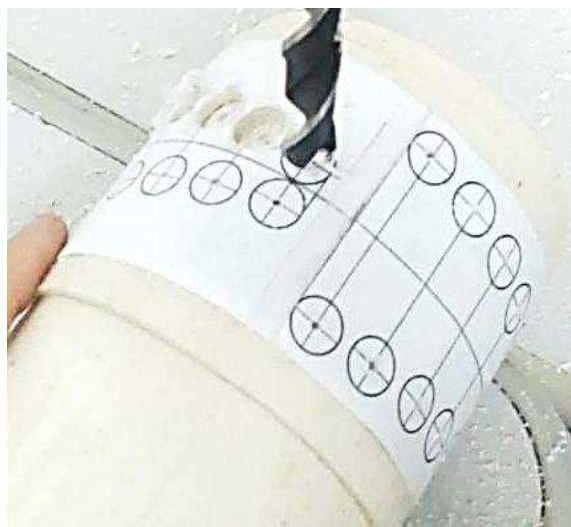


Figura 3.8 – Fabricação do gabarito (Fonte: Autora, 2018)

Para fixar o cilindro ao eixo, foram utilizados discos de PVC fabricados através de um cano da mesma espessura do cilindro, o qual foi cortado ao meio e aquecido no forno à 200 °C durante três minutos para transformá-lo em placa. Esta foi usinada utilizando a micro retífica da marca BLACK & DECKER® do modelo RT650 obtendo a forma de um disco, demonstrado na Figura 3.9.

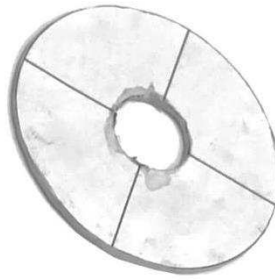


Figura 3.9 – Disco para apoio do cilindro no eixo (Fonte: Autora, 2018)

As dimensões do disco dependem do diâmetro interno do cilindro e o diâmetro externo do eixo que são respectivamente os valores 67,7 e 20 mm.

Para se obter maior desempenho de rolagem e redução de atrito, inseriu-se no sistema dois rolamentos da NACHI, modelo 6004 ZE. Porém mesmo com o rolamento, a resistência deste apresentava o comprometimento da rolagem do protótipo, visto que sua blindagem de fábrica e o lubrificante sólido para o caso aumentava a sua resistência, logo se retirou os anéis de proteção e mergulhou em querosene para retirada da graxa. O diâmetro interno do rolamento foi escolhido com a medida de 20 mm, onde se fez necessário o lixamento do eixo para passar com facilidade até no ponto de fixação, conforme a Figura 3.10.



Figura 3.10 – Eixo finalizado. (Fonte: Autora, 2018)

Para fixação dos rolamentos, projetou-se e construiu-se uma base feita de madeira, objetivando a fixação do protótipo, com a finalidade de servir como mancais para o rolamento além de dar suporte aos mecanismos de acionamento do moto perpetuo. A confecção foi realizada com a utilização de um tico-tico da SKILL, modelo 4380.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Força entre imãs

Os dados obtidos experimentalmente aplicando-se imãs de iguais parâmetros (10 mm de diâmetro e 3 mm de espessura), com o uso do dinamômetro estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Valores das forças obtidas experimentalmente com suas respectivas médias (Fonte: Autora, 2018)

| Espessura (mm) | Forças obtidas experimentalmente (N) | | | | | Média (N) |
|----------------|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----------|
| 2 | 4,3 | 4,5 | 4,3 | 4,3 | 4,5 | 4,37 |
| 4 | 2,3 | 2,5 | 2,3 | 2,3 | 2,4 | 2,33 |
| 6 | 1,1 | 1 | 1,1 | 0,9 | 1 | 1,03 |

Os gráficos obtidos do Matlab das equações contidas no referencial teórico do tópico 2.3, e os pontos experimentais (média das forças da Tabela 4.1) com seu ajuste polinomial utilizando dos comandos polyfit e polyval estão apresentados na Figura 4.1.

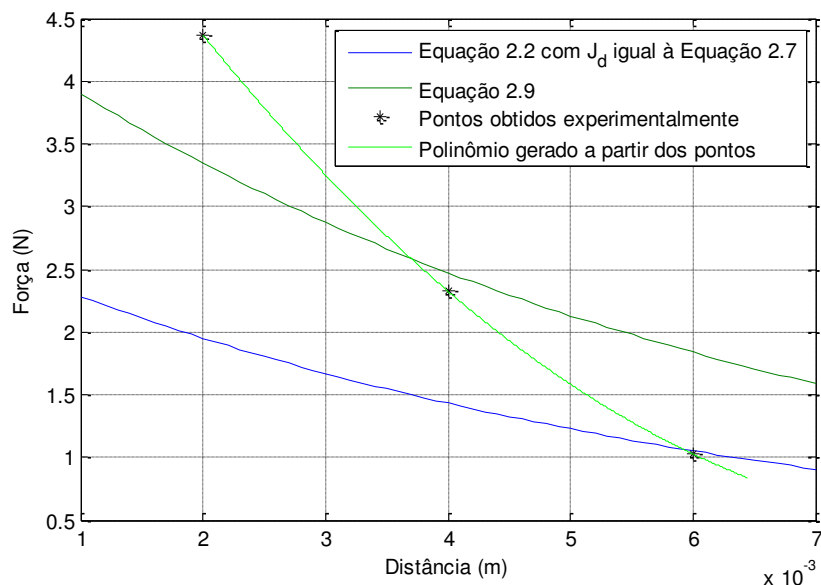


Figura 4.1 – Plotagem do Matlab das equações 2.2., com J_d igual à Equação 2.7; Equação 2.9, pontos obtidos pela média das forças e seu devido ajuste polinomial (Fonte: Autora, 2018)

Pôde se observar que o erro adquirido comparando a Equação 2.9 e o experimento foi aumentando conforme se aumenta a distância de "x" igual a quatro milímetros. O mesmo

ocorreu no uso da Equação 2.2 com J_d igual a Equação 2.7, mas com o valor de x igual a seis milímetros. Portanto a equação só foi validada para valores próximos de quatro milímetros, para a Equação 2.9 e para valores próximos de seis milímetros, para a Equação 2.2 com J_d igual à Equação 2.7.

Com aplicação dos ímãs iguais utilizando “ r ” diferente de zero (configuração representada na Figura 2.4b), notou-se a inviabilidade do seu uso devido ao seu pequeno alcance, o que faria o “ V ” ter uma pequena angulação que prejudicaria o seu movimento, necessitando a troca do ímã de excitação com área de atuação magnética maior.

A média dos valores das forças entre dois ímãs de diferentes tamanhos e eixos dispostos em paralelo obtidos de forma experimental estão apresentados na Tabela 4.2

Tabela 4.2 – Média dos valores dos obtidos experimentalmente (Fonte: Autora, 2018)

| r | x | | | | |
|-----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 |
| 4 | 3,73 | 2,93 | 2,40 | 1,37 | 1,16 |
| 6 | 3,97 | 2,97 | 2,27 | 1,33 | 1,12 |
| 8 | 3,80 | 2,85 | 1,83 | 1,28 | 1,00 |
| 10 | 3,60 | 2,45 | 1,65 | 1,18 | 0,96 |
| 12 | 2,40 | 1,97 | 1,49 | 1,05 | 0,92 |
| 14 | 1,50 | 1,63 | 1,25 | 0,88 | 0,74 |
| 16 | 1,21 | 1,40 | 0,94 | 0,69 | 0,66 |
| 18 | 0,55 | 0,72 | 0,58 | 0,51 | 0,44 |
| 20 | 0,15 | 0,33 | 0,34 | 0,39 | 0,24 |
| 22 | - | - | 0,09 | 0,37 | 0,20 |

O gráfico obtido pelo ajuste polinomial no sentido x e r dos resultados da Tabela 4.2 está apresentado na Figura 4.2. O algoritmo para a plotagem deste gráfico se encontra no Apêndice A.

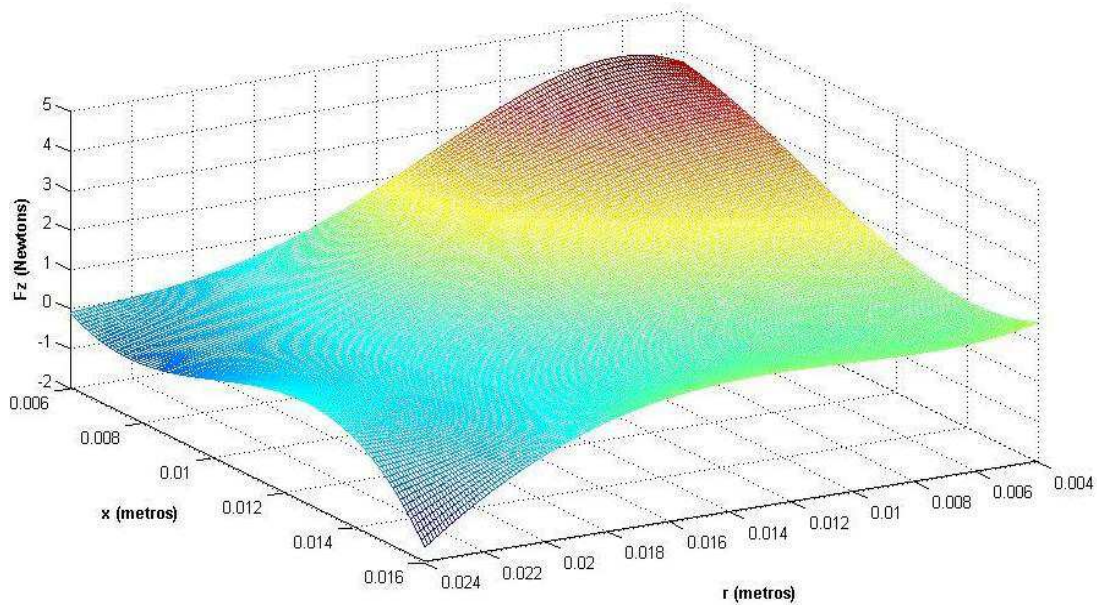


Figura 4.2 – Gráfico de pontos obtidos pelo ajuste polinomial no sentido de x e r da força z entre ímãs com os eixos dispostos em paralelo (Fonte: Autora, 2018)

Pode-se observar que em grande parte do gráfico da Figura 4.2, quanto maior a distancia entre os ímãs para os dois sentidos, menor a força; porém, nas distâncias para x pequeno e r de 0 até 9 mm, a força decresce com a redução do r. Isso ocorre devido o ímã atizador conter um furo central de raio 3 mm, logo, a maior força se encontra no centro da parte maciça, 9 mm do centro. Além disso, um fenômeno não esperado ocorreu, para distâncias de r acima de 23 mm, a força agia no sentido contrário às demais forças obtidas.

4.2 Cálculo das forças tangenciais no cilindro e aceleração angular dos componentes rolantes

Para um Vgate com 2 Vs e os parâmetros da Tabela 4.3, foram obtidos os resultados de força resultante tangencial e de aceleração angular para um ímã de excitação (apresentados na Tabela 4.4) e dois ímãs de excitação dispostos a 90° entre si (apresentados na Tabela 4.5) no Matlab utilizando o algoritmo do Apêndice C.

Tabela 4.3 – Dimensões pré-definidas do V-gate para os cálculos no Matlab (Fonte: Autora, 2018)

| Variáveis | Dimensões |
|-----------------|-----------|
| a (Figura 3.3) | 7 mm |
| e (Figura 3.5) | 20 mm |

| | |
|---|---------|
| R (raio do imã do cilindro) | 5 mm |
| R ₂ (raio externo do cilindro) | 37,9 mm |
| t (espessura do imã do cilindro) | 3 mm |

Tabela 4.4 – Força resultante tangencial e aceleração angular para cada posição do cilindro utilizando um imã de excitação (Fonte: Autora, 2018)

| Posição do cilindro | Força tangencial (F _y) | Aceleração angular ($\times 10^{-3}$) |
|---------------------|------------------------------------|---|
| 1 | 2.0193 | 22.0756 |
| 2 | 2.3060 | 25.2101 |
| 3 | 2.5350 | 27.7129 |
| 4 | 2.7211 | 29.7472 |
| 5 | 2.8811 | 31.4970 |
| 6 | 2.9759 | 32.5335 |
| 7 | 3.0371 | 33.2017 |
| 8 | -9.7086 | -106.1368 |
| 9 | -20.9449 | -228.9743 |
| 10 | 3.4112 | 37.2918 |

Tabela 4.5 – Força resultante tangencial e aceleração angular para cada posição do cilindro utilizando dois imãs de excitação (Fonte: Autora, 2018)

| Posição do cilindro | Força tangencial (F _y) | Aceleração angular ($\times 10^{-3}$) |
|---------------------|------------------------------------|---|
| 1 | 4.9952 | 54.6091 |
| 2 | 5.3431 | 58.4119 |
| 3 | -7.1736 | -78.4239 |
| 4 | -18.2238 | -199.2271 |
| 5 | 6.2923 | 68.7888 |
| 6 | 4.9952 | 54.6091 |
| 7 | 5.3431 | 58.4119 |
| 8 | -7.1736 | -78.4239 |
| 9 | -18.2238 | -199.2271 |
| 10 | 6.2923 | 68.7888 |

Observa-se que nas posições oito e nove da Tabela 4.4, a forças tangenciais foram opostas ao sentido de rotação. Isso ocorre devido estas posições serem na passagem de um V para o outro. A intensidade da força oposta foi amenizada com o acréscimo de outro imã de excitação (exposto na Tabela 4.5), observando-se que aumentando a quantidade de imãs de excitação, as forças citadas tendem a zero.

Máquinas que usam energia transmitida por rotação costumam obter êxito para uma velocidade constante, ou seja, aceleração angular igual a zero. Observando-se as Tabelas 4.4 e 4.5, concluímos que a aceleração tem vantagem com apenas um imã de excitação.

4.3 Montagem do protótipo

O protótipo do Vgate construído está demonstrado na Figura 4.3, onde no item 1 é apresentado o eixo de PVC, cuja finalidade é sustentar o mecanismo em rotação no suporte além de transmitir o movimento gerado do V-gate para ser utilizado em uma possível aplicação externa. Os itens 2 são os ímãs de excitação do moto perpétuo, os quais interagem com os ímãs do item 3 (cilindro principal) para gerar o movimento rotacional do tambor. O suporte está representado no item 4, este possui a finalidade de sustentar todo o mecanismo.

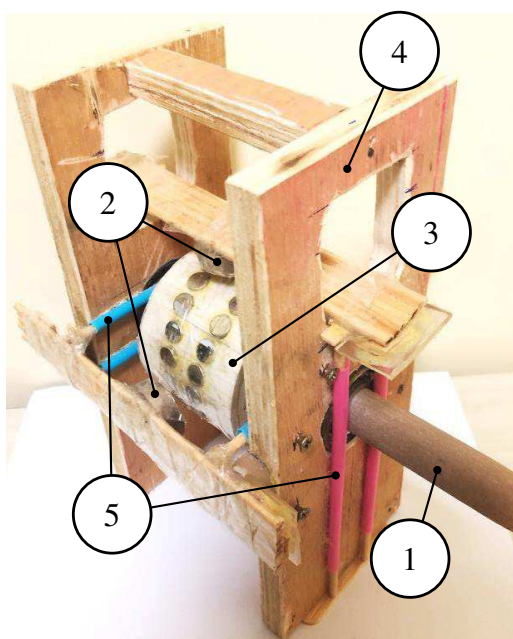


Figura 4.3 – Vista isométrica do protótipo: 1 – Eixo de PVC; 2 – Ímãs de excitação; 3 – Cilindro com ímãs em V; 4 – Suporte (Fonte: Autora, 2018)

Com ênfase na vista lateral do protótipo, demonstrado na Figura 4.4, tem-se no item 1 o rolamento o qual tem por objetivo reduzir o atrito entre o eixo e o suporte. Itens 2 demonstram os suportes para os ímãs de excitação. Estas bases são guiadas pelos elementos do item 5 da Figura 4.3, guias que servem para não ocorrer movimento rotacional do ímã de excitação.

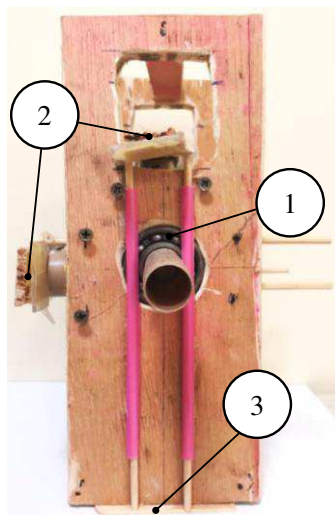


Figura 4.4 – Vista lateral do protótipo: 1 – Rolamento; 2 – Suporte dos ímãs de excitação; 3 – Base dos guias (Fonte: Autora, 2018)

O item 3 funciona como baterdor que finaliza o curso do suporte do ímã de excitação, promovendo a distância mínima calculada.

Conforme foi testado o dispositivo, visualizou-se que quando os dois ímãs de excitação se encontram no menor valor de "x", este se mantém estático devido às forças contrárias ao movimento (calculadas no tópico 4.2) serem equivalentes das a favor. Porém, quando é erguido o ímã de excitação localizado sobre a parte mais estreita do V (posição cujas forças contrárias são mais intensas), as forças opositoras se tornam inferiores das que promovem o movimento fazendo o Vgate rotacionar 90 graus; posição em que esta parte do V alcança o outro ímã de excitação.

Analisando esta ocorrência, se obtém outra forma de fabricação de um moto perpétuo do modelo Vgate, sendo esta a criação de um dispositivo que afaste o ímã de excitação nos devidos momentos, uma possibilidade, seria algo similar ao eixo de comando de válvula de um motor movido à combustão.

5 CONCLUSÃO

A partir do levantamento bibliográfico foi possível a escolha dos ímãs do projeto. Em relação ao referencial teórico da força entre ímãs não foi satisfatório devida equações para cálculo de forças entre ímãs dispostos de forma paralela não serem generalizadas para todos os pontos, portanto, para obtenção das forças, o método válido é o experimental.

Foram feitos estudos sobre moto perpétuo que culminou na escolha do modelo V-gate dentre outros modelos existentes, onde a escassez de materiais bibliográficos para este modelo possibilita um estudo técnico do princípio de funcionamento muito pouco citado.

A bibliografia para resistência para a rotação obteve êxito, sendo utilizada para encontrar a aceleração angular pontual do V-gate. Para um bom funcionamento de diversas aplicações, como motores, geradores de energia, etc., é recomendada uma aceleração angular igual a zero, ou seja, velocidade constante.

Comparando a Tabela 4.4 e a Tabela 4.5, pôde-se observar que as acelerações angulares pontuais para um ímã de excitação foram mais próximas de zero do que para dois ímãs, prejudicando o projeto de um V-gate utilizando dois ímãs excitadores.

Por métodos geométricos, foi possível encontrar a força de cada posição do cilindro em função do ímã de excitação. Pode-se observar forças de sentido contrário atuantes sobre o tambor e que, aumentando a quantidade de ímãs de excitação, a força de sentido oposto tende a zero, possibilitando a continuidade do movimento.

Baseando-se nos testes do protótipo, com o afastamento do ímã de excitação na parte mais estreita do V, o V-gate se movimentou apenas com a atração do outro ímã de excitação. Logo, o moto perpétuo do modelo V-gate pode ser construído fabricando-se um mecanismo acoplado ao eixo que erga o suporte dos ímãs de excitação neste exato momento, algo similar ao funcionamento do eixo de comando de válvulas de um motor à combustão interna.

O trabalho apresentado não possibilitou a viabilidade de um moto perpétuo do modelo Vgate, necessitando de continuidade para este estudo. Porém, duas formas de fabricação para este projeto puderam ser observadas para se obter este devido objetivo: por acréscimo de ímãs de excitação ao longo do V-gate ou com um mecanismo para suspender os ímãs de excitação sobre a parte mais estreita do "V" do cilindro.

Para se alcançar a viabilidade seria necessário calcular a quantidade de ímãs de excitação a ser acrescentado para promover o movimento contínuo ou projetar o mecanismo de afastamento, o qual poderia ser similar ao eixo de comando de válvulas de um motor à combustão.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros:

- Calcular acréscimo de imãs de excitação no protótipo;
- Projetar mecanismo para afastamento dos imãs de excitação;
- Calcular vida útil do projeto;
- Realizar testes experimentais do torque em um protótipo;
- Aplicar o V-gate como gerador de energia e definir o rendimento energético;
- Fazer estudo para V-gates de diferentes diâmetros.

REFERÊNCIAS

BELEGGIA, M.; TANDON, S.; ZHU, Y.; GRAEF, M. On the magnetostatic interactions between nanoparticles of arbitrary shape. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. Holanda, 23 out. 2003. Elsevier, Caderno 278 (2004), p. 270 – 284. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 26 out. 2018.

BIEZUNER, R. J. **Introdução às Equações Diferenciais Parciais**. Minas Gerais: Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

FERREIRA, F. G. **Princípios básicos de eletromagnetismo e termodinâmica**. Curitiba: Inter Saberes, 2017.

FÍSICA ILUSTRADA. **Torque**. 17 fev. 2017. Disponível em: <<http://fisicailustrada.blogspot.com/2017/02/torque.html>>. Acesso em: 11 nov. 2018.

FMAGNET XINFENG. **Tipos de ímãs**. 28 jun. 2013. Disponível em: <<http://www.imas-neodimio.com/news/Tipos-de-m-s-57.html>>. Acesso em: 04 out. 2018.

FULLBUSTER, C. **Alguns tipos e modelos de Imãs**. Imas da física, 15 nov. 2012. Disponível em: <<http://imasdafisica.blogspot.com/2012/11/alguns-tipos-e-modelos-de-imas.html?m=1>>. Acesso em: 04 out. 2018.

HENRIQUE, O. ; SILVA, M. **Física e a dinâmica dos movimentos**. São Paulo: Inter Saberes, 2017.

IMA DE NEODIMIO. **Imã de neodímio: Entendendo**. Disponível em: <<https://imadeneodimio.com.br/ima-de-neodimio/>>. Acesso em: 03 nov. 2018

ITAL EQUIPAMENTOS PARA A INDÚSTRIA!. **Magnetismo**. Ital pro. São Paulo. Disponível em: < <http://www.italpro.com.br/page/magnetismo.html>>. Acesso em: 03 nov. 2018.

KHAN ACADEMY. **Torque**. Disponível em: <<https://pt.khanacademy.org/science/physics/torque-angular-momentum/torque-tutorial/a/torque>>. Acesso em: 02 nov. 2018

LABORATÓRIO DE SUSTENTABILIDADE. **Institucional – Sustentabilidade**. Universidade de São Paulo. Disponível em: < <http://www.lassu.usp.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: 26 out. 2018.

LANCELLOTTI, C. P. D; CAETANO, F. F.; BERGAMASCHI, L. Z. C. M.; SCHEREMETA, R. J. P. **Roda de Movimento Perpétuo**. Sorocaba: Universidade Estadual Júlio de Mesquita, 2015.

LOPES, J. **A máquina de movimento perpétuo**. Idea fixa, 2016. Disponível em: < <http://www.ideafixa.com/oldbutgold/a-maquina-de-movimento-perpetuo>>. Acesso em: 18 ago. 2018.

MAGTEK SOLUÇÕES MAGNÉTICAS. **Alnico**. Magtek. 2018. Disponível em: <<https://www.magtek.com.br/imas/alnico>>. Acesso em: 05 out. 2018.

_____. **Imãs**. Magtek. 2018. Disponível em: <<https://www.magtek.com.br/imas/>>. Acesso em: 03 out. 2018.

_____. **Neodímio ferro boro**. Magtek. 2018. Disponível em: <<https://www.magtek.com.br/imas/neodimio-ferro-boro/>>. Acesso em: 04 out. 2018.

MIRICA, K. A.; ILIEVSKI F.; ELLERBEE A. K.; SHEVKOPLYAS, S. S.; WHITESIDES, G. M. Using Magnetic Levitation for Three Dimensional Self-Assembly. **Advanced Materials Online**. Weinheim, 10 ago. 2011. Wiley – VCH, p. 4134 – 4140. Disponível em: < <https://gmwgroup.harvard.edu/pubs/pdf/1128.pdf> >. Acesso em: 20 nov. 2018.

OS TIPOS. **Os tipos de ímãs.** Os tipos de. 2018. Disponível em: <<https://www.ostiposde.com/os-tipos-de-imas/>>. Acesso em: 04 out. 2018.

PASSOS, G. **Por que o moto perpétuo é impossível?**. Universo racionalista, 8 abr. 2014. Disponível em: <<https://universoracionalista.org/por-que-o-moto-perpetuo-e-impossivel/>>. Acesso em: 13 ago. 2018.

PORTAL ENERGIA. **Ímãs de Neodímio para construção de Aerogeradores.** Portal energia, 15 out. 2009. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/imans-de-neodimio-para-a-construcao-de-aerogeradores/>>. Acesso em: 15 nov. 2018.

PORTAL SOLAR LTDA. **Energia Renovável.** Portal solar. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-renovavel/energia-renovavel.html>>. Acesso em: 23 set. 2018.

REITZ, J. R.; MILFORD, F. J.; CHRISTY, R. W. **Fundamentos da Teoria Eletromagnética.** Rio de Janeiro: Elsevier, 1982.

RODRIGUES, A. **Infinita busca pela energia infinita.** Revista Galileu, 2013. Disponível em: <<http://revistagalileu.globo.com/Revista/Common/0,,EMI343608-17773,00-INFINITA+BUSCA+PELA+ENERGIA+INFINITA.html>>. Acesso em: 18 ago. 2018.

ROSA, L. C. B. S. **Motores magnéticos.** [S.I.]: Monografias Brasil Escola, 2018. Disponível em: <https://monografias.brasilecola.uol.com.br/fisica/motores-magneticos.htm#capitulo_6.2>. Acesso em: 13 ago.2018.

SILVA, A. R. **Eletricidade e magnetismo.** São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015.

SIGNIFICADOS. **Significado de Sustentabilidade.** 27 abr. 2018. Disponível em: <<https://www.significados.com.br/sustentabilidade/>>. Acesso em: 23 set. 2018.

SO FÍSICA. **Ímãs e magnetos**. Tecnologia da Informação, 2018. Disponível em: <<https://www.sofisica.com.br/conteudos/Eletromagnetismo/CampoMagnetico/imasemagnetos.php>>. Acesso em: 03 nov. 2018.

TODA MATÉRIA. **Fontes Alternativas de Energia**. 2017. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/fontes-alternativas-de-energia/>>. Acesso em: 23 set. 2018.

UFJF. **Ferromagnetismo, paramagnetismo e diamagnetismo**. 2013. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/fisica/files/2013/10/FIII-10-02-Ferromagnetismo-paramagnetismo-e-diamagnetismo3.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2018.

VOKOUN, D.; BELEGGIA, M.; HELLER, L.; SITTNER, P. Magnetostatic interactions and forces between cylindrical permanent magnets. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials Online**. Holand, 17 jul. 2009. Elsevier, Caderno 321 (2009), p. 3758 – 3760. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/jmmm>. Acesso em: 23 out. 2018.

VOKOUN, D.; BELEGGIA, M.; RAHMAN, t.; HOU, H. C.; LAI, C. H. The two-spin model with dipolar interactions of the exchange coupled composite media. **Journal of applied physics**. Estados Unidos, 11 fev. 2008. American Instituta of Physics, Caderno 103,07F520 (2008), p. 1 – 3.

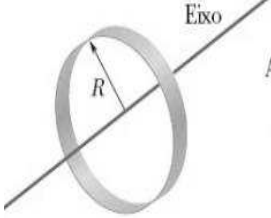
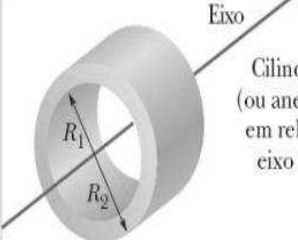
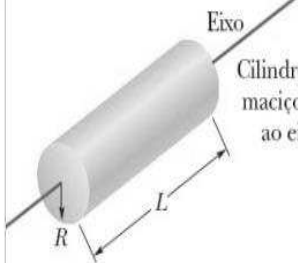


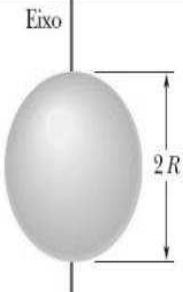
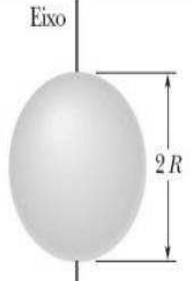

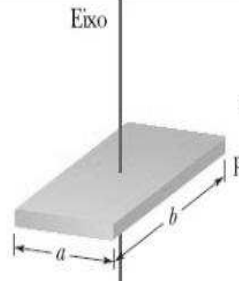
WORLD ATLAS. **Where Is Manisa, Turkey?**. Canada, 02 out. 2015. Disponível em: <<https://www.worldatlas.com/eu/tr/45/where-is-manisa.html>>. Acesso em: 03 nov. 2018.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física III: eletromagnetismo**. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

ANEXO A - Graus dos ímãs de neodímio existentes no mercado e algumas de suas propriedades

| GRAUS | REMANÊNCIA | | COERCITIVIDADE | | | | MAXIMO PRODUTO ENERGÉTICO | | COEFICIENTES MÉDIOS DE TEMPERATURA (20~ 10°C) | | TEMPERATURA MÁXIMA DE OPERAÇÃO |
|-----------|------------|-----------|----------------|--------|------|--------|---------------------------|---------|---|------------|--------------------------------|
| | Br | | HcB | | HcJ | | bhMAX | | Tk | | B/H> 0,7 |
| | KG | T | kOe | kA/m | kOe | kA/m | MGOe | KJ/m2 | %/°C (Br) | %/°C (HcJ) | °C |
| REN 35 | 11,8-12,5 | 1,8-1,25 | ≥ 10,8 | ≥ 860 | ≥ 12 | ≥ 955 | 33-38 | 263-302 | -0,12 | -0,70 | 80°C |
| REN 38 | 12,3-13,0 | 1,23-1,30 | ≥ 10,8 | ≥ 860 | ≥ 12 | ≥ 955 | 36-41 | 286-326 | -0,12 | -0,70 | |
| REN 42 | 13,0-13,5 | 1,30-1,35 | ≥ 10,8 | ≥ 860 | ≥ 12 | ≥ 955 | 40-44 | 318-350 | -0,12 | -0,70 | |
| REN 45 | 13,2-13,8 | 1,32-1,38 | ≥ 10,8 | ≥ 860 | ≥ 12 | ≥ 955 | 42-46 | 334-366 | -0,12 | -0,70 | |
| REN 50 | 13,9-14,6 | 1,39-1,46 | ≥ 10,5 | ≥ 836 | ≥ 11 | ≥ 875 | 47-51 | 374-406 | -0,12 | -0,70 | |
| REN 52 | 14,2-14,8 | 1,42-1,48 | ≥ 10,5 | ≥ 836 | ≥ 11 | ≥ 875 | 49-53 | 390-422 | -0,12 | -0,70 | |
| REN 35M | 11,8-12,5 | 1,18-1,25 | ≥ 11,0 | ≥ 876 | ≥ 14 | ≥ 1114 | 33-38 | 263-302 | -0,12 | -0,70 | 100°C |
| REN 50M | 13,9-14,6 | 1,39,1,46 | ≥ 12,5 | ≥ 995 | ≥ 13 | ≥ 1035 | 47-52 | 374-414 | -0,12 | -0,70 | |
| REN 35H | 11,8-12,5 | 1,18-1,25 | ≥ 11,0 | ≥ 876 | ≥ 17 | ≥ 1353 | 33-38 | 263-302 | -0,12 | -0,70 | 120°C |
| REN 42H | 12,8-13,4 | 1,28-1,34 | ≥ 12,0 | ≥ 955 | ≥ 16 | ≥ 1273 | 39-43 | 310-342 | -0,12 | -0,70 | |
| REN 46H | 13,4-14,0 | 1,34-1,40 | ≥ 12,5 | ≥ 995 | ≥ 16 | ≥ 1273 | 43-48 | 342-383 | -0,12 | -0,70 | |
| REN 48H | 13,6-14,2 | 1,36-1,42 | ≥ 12,7 | ≥ 1011 | ≥ 16 | ≥ 1273 | 45-50 | 358-398 | -0,12 | -0,70 | |
| REN 30SH | 10,9-12,2 | 1,09-1,22 | ≥ 10,2 | ≥ 812 | ≥ 20 | ≥ 1592 | 28-36 | 223-287 | -0,11 | -0,65 | 140°C |
| REN 33SH | 11,4-12,2 | 1,14-1,22 | ≥ 10,7 | ≥ 851 | ≥ 20 | ≥ 1592 | 31-36 | 247-287 | -0,11 | -0,65 | |
| REN 35SH | 11,8-12,5 | 1,18-1,25 | ≥ 11,1 | ≥ 883 | ≥ 20 | ≥ 1592 | 33-38 | 263-302 | -0,11 | -0,65 | |
| REN 38SH | 13,3-13,0 | 1,33-1,30 | ≥ 11,6 | ≥ 923 | ≥ 20 | ≥ 1592 | 36-41 | 287-326 | -0,11 | -0,65 | |
| REN 42SH | 12,8-13,4 | 1,28-1,34 | ≥ 12,0 | ≥ 955 | ≥ 19 | ≥ 1512 | 39-44 | 310-350 | -0,11 | -0,65 | |
| REN 46SH | 13,2-13,8 | 1,32-1,38 | ≥ 12,4 | ≥ 987 | ≥ 19 | ≥ 1512 | 42-47 | 334-374 | -0,11 | -0,65 | |
| REN 28UH | 10,4-11,3 | 1,04-1,13 | ≥ 9,8 | ≥ 780 | ≥ 25 | ≥ 1990 | 26-31 | 207-247 | -0,11 | -0,60 | 160°C |
| REN 33UH | 11,4-12,2 | 1,14-1,22 | ≥ 10,8 | ≥ 859 | ≥ 25 | ≥ 1990 | 31-36 | 247-287 | -0,11 | -0,60 | |
| REN 35UH | 11,8-12,5 | 1,18-1,25 | ≥ 11,2 | ≥ 891 | ≥ 25 | ≥ 1990 | 33-38 | 263-302 | -0,11 | -0,60 | |
| REN 38UH | 12,2-12,8 | 1,22-1,28 | ≥ 11,6 | ≥ 923 | ≥ 25 | ≥ 1990 | 36-41 | 287-326 | -0,11 | -0,60 | |
| REN 40UH | 12,6-13,2 | 1,26-1,32 | ≥ 12,0 | ≥ 955 | ≥ 25 | ≥ 1990 | 38-42 | 302-334 | -0,11 | -0,60 | |
| REN 42UH | 12,8-13,4 | 1,28-1,34 | ≥ 12,2 | ≥ 971 | ≥ 25 | ≥ 1990 | 39-44 | 310-350 | -0,11 | -0,65 | |
| REN 30EH | 10,9-11,7 | 1,07-1,17 | ≥ 10,3 | ≥ 820 | ≥ 30 | ≥ 2388 | 28-33 | 223-263 | -0,11 | -0,55 | 180°C |
| REN 33EH | 11,4-12,0 | 1,14-1,20 | ≥ 10,8 | ≥ 859 | ≥ 30 | ≥ 2388 | 31-36 | 247-287 | -0,11 | -0,55 | |
| REN 35EH | 11,7-12,3 | 1,17-1,23 | ≥ 11,1 | ≥ 883 | ≥ 30 | ≥ 2388 | 33-37 | 263-295 | -0,11 | -0,55 | |
| REN 30EHS | 10,9-11,7 | 1,09-1,17 | ≥ 10,3 | ≥ 820 | ≥ 35 | ≥ 2786 | 28-33 | 223-263 | -0,10 | -0,50 | 200°C |
| REN 33EHS | 11,3-12,0 | 1,13-1,20 | ≥ 10,7 | ≥ 852 | ≥ 35 | ≥ 2786 | 31-36 | 247-287 | -0,10 | -0,50 | |

ANEXO B – Tabela de momento de inércia

| | | |
|---|--|---|
|  <p>Anel fino em relação ao eixo central</p> |  <p>Cilindro oco (ou anel grosso) em relação ao eixo central</p> |  <p>Cilindro (ou disco) maciço em relação ao eixo central</p> |
| $I = MR^2$ (a) | $I = \frac{1}{2}M(R_1^2 + R_2^2)$ (b) | $I = \frac{1}{2}MR^2$ (c) |
|  <p>Cilindro (ou disco) maciço em relação a um diâmetro central</p> |  <p>Barra fina em relação a um eixo central perpendicular à maior dimensão</p> |  <p>Esfera maciça em relação a um diâmetro</p> |
| $I = \frac{1}{4}MR^2 + \frac{1}{12}ML^2$ (d) | $I = \frac{1}{12}ML^2$ (e) | $I = \frac{2}{5}MR^2$ (f) |
|  <p>Casca esférica fina em relação a um diâmetro</p> |  <p>Anel fino em relação a um diâmetro</p> |  <p>Placa fina em relação a um eixo perpendicular passando pelo centro</p> |
| $I = \frac{2}{3}MR^2$ (g) | $I = \frac{1}{2}MR^2$ (h) | $I = \frac{1}{12}M(a^2 + b^2)$ (i) |

APÊNDICE A – Programação no Matlab para gerar gráfico comparativo entre os cálculos de força dos imãs e testes experimentais

```

mi0 = 4*pi*10^(-7);
t = 3*10^-3;
t1 = t;
t2 = t;
R = 5*10^-3;
M = 1.272*10^6;
r = 0;
alfa = 0;
mi = 1;
nu = 1;
b = 1;
c = 1;
Kd = mi0*(M^2)/2;
syms x
syms Z
%% variáveis calculadas
tau1 = t1/(2*R);
tau2 = t2/(2*R);
zeta = Z/R;
%% J1 (J1)
syms q
J1 = besseli(1,q);
Jo = besseli(0,r*q/R);
%força eq. 2.2
F = -(8*pi*mi0*(M^2)/2)*R^2*int(((J1.^2./((Jo.*q))).*sinh(q.*tau1).*sinh(q.*tau2)).*exp(-
q.*zeta)),q,0,1);
x = 0.001:0.0001:0.007;
fpar = subs(F,Z,x+t);
fpara = vpa(fpar);
plot(x,-fpara)
hold all
% eq. 2.9
for i = -1:1:1
    for j = -1:1:1
        sompar = i*j*exp(-q*(zeta+i*tau1+j*tau2));
    end
end
Fzpar = -2*pi*Kd*(R.^2)*int((Jo.*(J1.^2).*q)*sompar,q,0,1);
fzzpar = subs(Fzpar,Z,x+t1);
fzza = vpa(fzzpar);
plot(x,-fzza)
% pontos dos testes experimentais
a = [2 4 6];

```

```
b = [4.37 2.33 1.03];  
p = polyfit(a*10^-3,b,2);  
ap = 2*10^-3:0.000001:6.45*10^-3;  
bp = polyval(p,ap);  
plot(a*10^-3,b,'black *',ap,bp,'g')  
grid on  
xlabel('Distância (m)')  
ylabel('Força (N)')  
legend('Equação 2.2 com J_d igual à Equação 2.7','Equação 2.9','Pontos obtidos  
experimentalmente','Polinômio gerado a partir dos pontos')
```

**APÊNDICE B – Programação no Matlab para plotar o gráfico obtido pelo ajuste
polinomial no sentido x e r dos resultados da Tabela 4.2**

```
m = 10^-3; %milímetro p metro
rgrid = 4*m:2*m:22*m;
xgrid = 6*m:2*m:14*m;
%pontos obtidos experimentalmente
fp = [3.73 2.93 2.40 1.37 1.16
3.97 2.97 2.27 1.33 1.12
3.80 2.85 1.83 1.28 1.00
3.60 2.45 1.65 1.18 0.96
2.40 1.97 1.49 1.05 0.92
1.50 1.63 1.25 0.88 0.74
1.21 1.40 0.94 0.69 0.66
0.55 0.72 0.58 0.51 0.44
0.15 0.33 0.34 0.39 0.24
0 0 0.09 0.37 0.20];
Rgr = 4*m:0.0001:22*m;
for i = 1:length(xgrid)
    p = polyfit(rgrid,fp(:,i)',4);
    bp(i,1:length(Rgr)) = polyval(p,Rgr);
end
bpx = bp';
Xgr = 6*m:0.0001:12*m;
for k = 1:length(Rgr)
    px = polyfit(xgrid,bpx(k,:),3);
    Fz(k,1:length(Xgr)) = polyval(px,Xgr);
end
[Xgri,Rgri] = meshgrid(Xgr,Rgr);
mesh(Rgri,Xgri,Fz)
xlabel('\bf r (metros)'),ylabel('\bf x (metros)'),zlabel('\bf Fz (metros)')
view(150,36)
```

APÊNDICE C – Programação no Matlab para encontrar o valor do arco j da

Figura 3.4

```
m = 10^-3; %milímetro para metro
R = 5*m; %raio do imã do cilindro
R2 = 75.7*m/2; % raio do cilindro
H = 60*m; % comprimento do cilindro
a = 7*m; % valor "a" da Figura 3.3
t = 3*m; % espessura do imã do cilindro
t1 = t;
t2 = t;
format short

%% quantidade de imãs e espaçamento entre eles
qi = 200; %palpite inicial da quantidade de imãs (valor aleatório)
j = 2*pi*R2/(qi/2); %medindo se a quantidade do palpite cabe no cilindro(duas colunas de
% imãs)
while j<2*R+1*m
    qi = qi-4;
    j = 2*pi*R2/(qi/2);
end
qi % quantidade de imãs
j %arco j entre eles no cilindro

%% pontos testados no experimento
rgrid = 4*m:2*m:22*m; % variável r
xgrid = 6*m:2*m:14*m; % variável x
%pontos obtidos experimentalmente (tabela 4.2)
fp = [3.73 2.93 2.40 1.37 1.16
3.97 2.97 2.27 1.33 1.12
3.80 2.85 1.83 1.280 1.00
3.60 2.45 1.65 1.18 0.96
2.40 1.97 1.49 1.05 0.92
1.50 1.63 1.25 0.88 0.74
1.21 1.40 0.94 0.69 0.66
0.55 0.72 0.58 0.51 0.44
0.15 0.33 0.34 0.39 0.24
-0.01 -0.01 0.09 0.37 0.20];

%% ajuste polinomial
% ajuste em r
Rgr = 4*m:0.00001:24*m; %novos pontos de r (quanto menor o acréscimo, maior a precisão)
for i = 1:length(xgrid)
    p = polyfit(rgrid,fp(:,i),4); % ajuste polinomial de quarto grau para cada linha
    bp(i,1:length(Rgr)) = polyval(p,Rgr); % substituição deste polinômio em mais pontos
end
bpx = bp';
% ajuste em x
```

```

Xgr = 6*m:0.00001:16*m; % novos pontos de x(quanto menor o acréscimo, maior a precisão)
for k = 1:length(Rgr)
    px = polyfit(xgrid,bpx(k,:),3);
    Fz(k,1:length(Xgr)) = polyval(px,Xgr);
end
[Xgri,Rgri] = meshgrid(Xgr,Rgr);

%% cálculos das forças no cilindro
% como serão 2 "V":
util = H-10*m; % parte a ser utilizada do comprimento do cilindro
% maior distância entre os centros dos imãs:
Mdei = util - 2*R;
% menor distância entre os centros dos imãs (adotado com mais 1 mm de distância):
mdei = 2*R + 1*m;
% d (Figura 3.5)
d = (Mdei - mdei)/((qi-4)/2)
e = Mdei/2

%% variáveis dos parâmetros das forças
alfa = j/R2; % Figura 3.4
b = (R2 + t)*sqrt(2 - 2*cos(alfa)); % Figuras 3.3 e 3.4
b2 = (R2 + t)*sqrt(2 - 2*cos(2*alfa)); % Parâmetro "b" para imãs 4 e 5
teta = (pi-alfa)/2; %Figura 3.4
teta2 = (pi - 2*alfa)/2; % Parâmetro "teta" para imãs 4 e 5
c = b*cos(teta); % Figuras 3.3 e 3.4
c2 = b2*cos(teta2); % Parâmetros para imãs 4 e 5
Ftd = [];
Ftd2 = [];
f = [];
f2 = [];
for i = 1:(qi/4-1)
    f(i) = sqrt((b*sin(teta))^2+((e-(qi/4 - i-1)*d)^2)); % Figura 3.5
    f2(i) = sqrt((b2*sin(teta2))^2+((e-(qi/4 - i)*d)^2)); % Parâmetro "f" para imãs 4 e 5
    [y,rpos(i)] = min(abs(Rgri(:,1)-f(i))); % encontrar valor próximo de "r" calculado na malha
    [y,rpos2(i)] = min(abs(Rgri(:,1)-f2(i))); % o mesmo para "r2"
    [y,xpos] = min(abs(Xgri(1,:)-(a+c))); % encontrar valor próximo de "r" calculado na malha
    [y,xpos2] = min(abs(Xgri(1,:)-(a+c2))); % o mesmo para "x2"
    Ftd= [Ftd
        Fz(rpos(i),xpos)]; % Fz para cada posição
    Ftd2= [Ftd2
        Fz(rpos2(i),xpos2)]; % Fz2 para cada posição
end

%% Forças tangenciais
% para um imã de excitação
f(qi/4) = sqrt((b*sin(teta))^2+((e-(qi/4 - 1)*d)^2));
f2(qi/4) = sqrt((b2*sin(teta2))^2+(e^2));
% para dois imãs de excitação
[y,rpos(qi/4)] = min(abs(Rgri(:,1)-f(qi/4)));
[y,rpos2(qi/4)] = min(abs(Rgri(:,1)-f2(qi/4)));

```

```

Ftd= [Ftd
      Fz(rpos(qi/4),xpos)];
Ftd2= [Ftd2
       Fz(rpos2(qi/4),xpos2)];
%força resultante
m = (R+t).*sin(alfa);
m2 = (R+t).*sin(2*alfa);
fi = (pi/2)-alfa;
fi2 = (pi/2)-2*alfa;
n = m/tan(fi);
n2 = m/tan(fi2);
%imãs 2 e 3 em cada posição
Fyz = [];
for i = 1:(qi/4)
    Fyz =[Fyz
          n*2*Ftd(i)/(a+c)];
end
Fy = [];
for i = 1:(qi/4)
    Fy = [Fy
          ((Fyz(i)*sqrt(m+n))/n)*0.5];
end
Fysoma = [];
for i =1:((qi/4)-2)
    Fysoma = [Fysoma
              Fy(i)-Fy(2+i)];
end
Fysoma = [Fysoma
          2*Fy((qi/4)-1) - 2*Fy(1)
          2*Fy((qi/4)) - 2*Fy(2)];
%imãs 4 e 5 para cada posição
Fyz2 = [];
for i = 1:(qi/4)
    Fyz2 =[Fyz2
           n*2*Ftd2(i)/(a+c2)];
end
Fy2 = [];
for i = 1:(qi/4)
    Fy2 = [Fy2
           ((Fyz2(i)*sqrt(m2+n2))/n2)*0.5];
end
Fysoma2 = [];
for i =1:((qi/4)-2)
    Fysoma2 = [Fysoma2
               Fy2(i)-Fy2(2+i)];
end
Fysoma2 = [Fysoma2
           2*Fy2((qi/4)-1) - 2*Fy2(1)
           2*Fy2((qi/4)) - 2*Fy2(2)];
Fyresul = Fysoma + Fysoma2

```

```

%% aceleração angular
%variáveis para inércia
R2final = 80*m/2;
R1final = R2final - 4*m;
massacil = 145*m;
Rdisco = 71*m/2;
edisco = 2*m;
Reixo = 20*m/2;
massaeixo = 27*m;
massadisco = 11*m;
%inércia
I = massacil*((R2final^2)+(R1final^2))/2 + massaeixo*Reixo^2 +
2*((1/4)*massadisco*Rdisco^2+(1/12)*massadisco*edisco^2 +massadisco*Rdisco^2);%
kg*m^2
%aceleração para cada posição
acel = Fyresul*(R2+t)/I
%para 2 imãs de excitação
Fyresul2 = [];
for i = 1:qi/8
Fyresul2(i) = Fyresul(qi/8 + i);
Fyresul2(qi/8 + i) = Fyresul(i);
end
Fyresultante = Fyresul+Fyresul2'
acel2 = Fyresultante*(R2+t)/I

```