

Universidade Estadual de Maringá



CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GUILHERME HITOSHI KANEKO

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM MOTOR TERMOMAGNÉTICO
TIPO TESLA

Guilherme Hitoshi Kaneko

Projeto e Construção de um Motor Termomagnético Tipo Tesla

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração Ciências Térmicas

Universidade Estadual de Maringá
Departamento de Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Paulo Vinicius Trevizoli

Maringá

2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá - PR., Brasil)

Kaneko, Guilherme Hitoshi

Projeto e Construção de um Motor Termomagnético Tipo Tesla/ Guilherme Hitoshi Kaneko. – Maringá, 2019-

100p. : il. (algumas color.); figs., tabs., 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Vinicius Trevizoli

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Maringá

Departamento de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Área de Concentração: Ciências Térmicas, 2019.

1. Motor Termomagnético. 2. Motor de Tesla. 3. Circuito Magnético. 4. Magnetização. 5. Efeito Magnetocalórico I. Trevizoli, Paulo Vinicius, Orientador. II. Universidade Estadual de Maringá. Centro de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - Área de Concentração: Ciências Térmicas. III. Título

Guilherme Hitoshi Kaneko

Projeto e Construção de um Motor Termomagnético Tipo Tesla

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia da Universidade Estadual de Maringá, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração Ciências Térmicas

Trabalho aprovado. Maringá, 18 de Abril de 2019:

Prof. Dr. Paulo Vinicius Trevizoli
Orientador

Prof. Dr. Jader Riso Barbosa Jr
Membro - UFSC

Prof. Dr. Alexandre Magnus
Membro - Unicamp

Maringá
2019

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à minha família, meus pais e irmã pelo apoio sempre. À minha namorada Dani que esteve ao meu lado e atravessou comigo toda as dificuldades e me deu forças nos momentos que mais precisei.

Aos meus amigos Alisson Cocci, Felipe Rigon, Lucas Somensi e Emanoella Ruffo, pelo alívio mental que me proporcionaram, pelas risadas nos momentos difíceis e pela amizade que já superou a década.

Aos vários orientadores que tive a oportunidade de ter, os quais, cada um à sua maneira contribuíram muito ao desenvolvimento da minha pesquisa e também crescimento pessoal, inicialmente Cleber Santiago e Wagner Conceição que confiaram em mim, me convidaram para a linha de pesquisa dos motores e disponibilizaram recursos e conhecimentos que possibilitaram toda a minha pesquisa. Ao Paulo Trevizoli, que com toda a experiência, paciência e conhecimento científico me proporcionou grande aprendizado. E também ao Flávio Colman que sempre esteve presente dando sugestões e apoio.

À todo o grupo de pesquisa, em especial ao Fernando Moro, que foi de extrema ajuda e mesmo durante um período conturbado nunca se negou a me ajudar e ensinar. Ao Paulo Moreira, e aos alunos que orientei durante minha pesquisa, Elis Ravagnani, Gabriel Kubota, Gabriel Pupim, Geovane Belizario e Vinícius Cabral.

Ao pessoal do DEM e PEM da Universidade Estadual de Maringá pela educação proporcionada desde o período de graduação, e agora também ao longo do mestrado. Agradeço à todos os professores, colegas e funcionários pela dedicação e conhecimento.

Agradeço também às agências CAPES e CNPQ que proporcionaram os recursos financeiros para minha bolsa de estudos e compra de material, sem os quais minha pesquisa seria muito mais difícil.

*“He who receives an idea from me, receives instruction himself without lessening mine;
as he who lights his taper at mine, receives light without darkening me.
(Thomas Jefferson)*

Resumo

O princípio de operação de um motor termomagnético é baseado na transição de fase magnética (Ferro - Paramagnético) de um material magnético próxima à temperatura de transição, ou de Curie. Os principais componentes deste tipo de motor são o material magnético e o circuito magnético. Se o material magnético apresenta temperatura de Curie próxima da temperatura ambiente, ele pode ter potencial para ser aplicado nesses motores. Hoje em dia são conhecidos vários materiais de transição de primeira e segunda ordem com temperatura de Curie $\geq 20^{\circ}\text{C}$, que também apresentam elevado efeito magnetocalórico ao redor da transição de fases. O circuito magnético é responsável por garantir uma região de alto campo magnético o qual interage magneticamente com o material. Desta forma, o objetivo principal da presente pesquisa é o projeto e construção de um motor termomagnético do tipo Tesla, utilizando gadolínio como material magnético. O projeto e construção se dividiu em duas etapas. A primeira foi referente ao projeto e construção do circuito magnético, do tipo duplo-C, a base de ímãs permanentes. Já a segunda parte refere-se ao projeto e construção do motor. Deste modo, obteve-se resultados tanto da caracterização do circuito magnético, além da força que pode ser produzida pelo motor utilizando gadolínio como material. Por fim, alguns resultados preliminares para frequência de operação do motor são apresentados e discutidos.

Palavras-chave: Motor Termomagnético, Motor de Tesla, Circuito magnético, Magnetização, Efeito Magnetocalórico.

Abstract

The operating principle of a thermomagnetic motor is based on the phase transition (Ferro to Paramagnetic) of a magnetic material around its transition, or Curie, temperature. The main components of this kind of motor are the magnetic material and the magnetic circuit. If the magnetic material presents the Curie temperature around the room temperature, it may have potential to be applied in thermomagnetic motors. Today are known several first and second order transition magnetic materials with Curie temperature of $\geq 20^{\circ}\text{C}$ wich also present large magnetocaloric effect around phase transition. The magnetic circuit is responsible to guarantee a high magnetic field region which magnetically interacts with the magnetic material. This way, the main objective of the present research is to design and construction of a Tesla type thermomagnetic motor, wich uses gadolinium as magnetic material. The design and construction was divided in two stages. The first one was related to the design and construction of the double-C type permanent magnet magnetic circuit. The second stage refers to the motor design and construction. Therefore, results for the characterization of the magnetic circuit and for the force produced by the motor using gadolinium as a magnetic material were obtained. Finally, some preliminary results for the motor operating frequency are presented and discussed.

Keywords: Thermomagnetic motor, Tesla Motor, magnetic circuit, magnetization, magnetocaloric effect.

Lista de ilustrações

Figura 1.1 – Roda de Curie.	29
Figura 1.2 – Motor de Tesla	30
Figura 2.1 – Ímã Permanente composto por ímãs atômicos	34
Figura 2.2 – Evolução histórica dos ímãs permanentes	37
Figura 2.3 – Matriz Halbach com 16 segmentos	38
Figura 2.4 – Ciclo do motor Termomagnético (Ericson) (a) $M \times B$ (b) $M \times T$ (c) $T \times s$	41
Figura 2.5 – Diagrama esquemático de um ciclo Ericson de um motor termomagnético. Os blocos vermelhos com flechas brancas representam o circuito magnético, o gradiente de cores no volume de campo magnético representa as linhas de campo iso-magnéticas; MM é o material magnético, e a força magnética é contrabalanceada pela tração da mola	42
Figura 3.1 – Desenho esquemático do motor termomagnético e seus componentes: V é o transdutor de vazão volumétrica, T os termopares, S as válvulas solenoides, P os sensores de posição	43
Figura 3.2 – Diagrama Esquemático do Ciclo do Motor	44
Figura 3.3 – Esferas de diferentes diâmetros	46
Figura 3.4 – Acoplador	46
Figura 3.5 – Trocador de Calor Magnético (TCM)	46
Figura 3.6 – Esquema de Ligação do Sistema de Aquecimento e Resfriamento	48
Figura 3.7 – Circuito magnético em Duplo C. Os blocos vermelhos com as setas brancas representam o circuito magnético; as setas indicam o sentido da remanência; em cinza escuro tem-se o material ferromagnético mole utilizado para guiar as linhas de fluxo magnético	49
Figura 3.8 – Detalhe da distribuição dos blocos de ímã permanente no arranjo Halbach. Os blocos vermelhos com as setas brancas representam o circuito magnético; as setas indicam o sentido da remanência; em cinza escuro tem-se os materiais ferromagnéticos moles útil	50
Figura 3.9 – Dependência da permeabilidade relativa com o campo magnético para o aço 1020	51
Figura 3.10–Modelo 3D em SolidWorks simplificado	53
Figura 3.11–Detalhes dos planos de corte XYZ0 e X88.9YZ, incluindo as linhas de centro do eixo-x e do eixo-z	54
Figura 3.12–Posicionamentos do cilindro para a medição de densidade de fluxo	55
Figura 3.13–CNC e Gaussímetro	57
Figura 3.14–Malha para a medição da densidade de fluxo magnética no plano X0Z	58

Figura 3.15–Malha para a medição no plano XY0 (a) Malha completa (b) malha em detalhe para apenas um dos polos magnéticos	58
Figura 3.16–Esquema de ligação Célula de Carga, Módulo HX711 e Arduino	60
Figura 3.17–Aparato para medição de força (a) aparato posicionado (b) medição	60
Figura 4.1 – Resultado da simulação 2D para uma média em área da densidade de fluxo magnético como função da distância entre polos parametrizada: (a) Para a região de alto campo; (b) Para a região de baixo campo	63
Figura 4.2 – Resultados da simulação 2D para uma média em área da densidade de fluxo magnética em função do gap parametrizado: (a) para a região de alto campo; (b) para a região de baixo campo	64
Figura 4.3 – Distribuição da densidade de fluxo magnética: (a) ao longo do Plano XY0; (b) ao longo do eixo-x (linha de centro, ver Figura 3.11a). As flechas vermelhas indicam a direção da densidade de fluxo.	65
Figura 4.4 – Distribuição da densidade de fluxo magnética (a) ao longo do Plano 88.9YZ; (b) ao longo do eixo-z (linha de centro Figura 3.11b)	66
Figura 4.5 – Projeto final do circuito magnético em duplo C	67
Figura 4.6 – Circuito magnético construído	67
Figura 4.7 – Densidade de fluxo magnética x posição no eixo x no plano XY0, simulado em preto e medido em vermelho	69
Figura 4.8 – Densidade de Fluxo magnético x posição no eixo z no plano 88.9YZ, simulado em preto e medido em vermelho	69
Figura 4.9 – Corte do plano XY0 e densidade de fluxo magnético simulado em vermelho e medido em amarelo, destacando a região medida.	70
Figura 4.10–Corte no plano ZY88.9 e densidade de fluxo magnético simulado em vermelho e medido em amarelo, destacando a região medida.	70
Figura 4.11–Densidade de Fluxo Magnético Distribuída ao longo do plano X0Z	71
Figura 4.12–Densidade de Fluxo Magnético distribuída ao longo do plano X0Z; destacando a região da medida	71
Figura 4.13–Densidade de fluxo magnético médio no volume em função da distância x , onde $x = 0$ seria o centro do polo magnético, região onde o campo magnético é máximo.	72
Figura 4.14–Curva para $\frac{dB}{dx}$ característica para o circuito magnético projetado em função da distância x	73
Figura 4.15–Curva de magnetização em função da distância x , considerando o campo aplicado (curva azul) e considerando o campo resultante (curva alaranjada).	73
Figura 4.16–Força (F) em função da distância x , considerando o campo aplicado (curva azul) e considerando o campo resultante (curva alaranjada).	74
Figura 4.17–Comparação resultados Reais (medido) x Simulados	74

Figura 4.18–Força em função da posição para diferentes temperaturas (lado A) . . .	75
Figura 4.19–Força em função da posição para diferentes temperaturas (lado B) . . .	75
Figura 4.20–Montagem do motor, Banhos termostáticos	76
Figura 4.21–Vista superior da bancada, à esquerda tubulações e válvulas do sistema de aquecimento e resfriamento	77
Figura 4.22–Detalhe do TCM no interior do polo magnético, com suas respectivas válvulas, mangueiras, acopladores, adaptadores em U e guias lineares	77
Figura 4.23–Montagem do Motor: Sistema de aquecimento e resfriamento, Meca- nismo de Biela Manivela, Circuito magnético	78
Figura A.1 – Equipamentos de proteção individual (a) Luvas de Látex; (b) Luvas de proteção; (c) Espátula de Plástico; (d) Papel toalha	90
Figura A.2 – Estação de trabalho para manuseio dos ímãs e armazenamento e ace- tona para a limpeza	90
Figura A.3 – Identificação dos Polos	91
Figura A.4 – Ex Polo 2/3 visto de cima	91
Figura A.5 – Cola epóxi SP460	92
Figura A.6 – (a) Bloco de ímã permanente jateado e limpo; (b) peça de aço 1020 usinada, face jateada para cima; (c) resultado final da colagem dos ímãs frontais	92
Figura A.7 – Peça Lateral de Alumínio	93
Figura A.8 – Aplicação de desmoldante na ferramenta	93
Figura A.9 – (a) Bloco de ímã permanente jateado e limpo; (b) peça de aço 1020 usinada, face jateada para cima; (c) resultado final da colagem dos ímãs frontais	93
Figura A.10 – Posicionamento do ímã (a) aproximação do ímã na placa principal da ferramenta; (b) Ímã na placa da ferramenta (c) Posicionamento do ímã (d) Ímã em sua posição final	94
Figura A.11 – Fixação do primeiro e segundo ímãs (a) Posicionamento do bloco de fi- xação do primeiro ímã (b) Fixação do bloco de fixação na placa principal (c) Fixação do segundo ímã (d) Fixação da placa frontal da ferramenta	94
Figura A.12 – Término da montagem do concentrador lateral (a) Posicionamento do ímã central; (b) e (c) Utilização do bloco de fixação para empurrar o ímã para sua posição final; (d) Ímã na posição final com bloco de fixação fixado no bloco frontal	95
Figura A.13 – Concentrador lateral finalizado	95
Figura A.14 – (a) bloco de ímã permanentes; e (b) peça em aço 1020, devidamente limpos, os quais compõem a peça central do circuito magnético.	96

Figura A.15–Aplicação de cola e montagem da ferramenta (a) aplicação de cola; (b) Montagem da placa principal da ferramenta; (c) Placa principal fixada; (d) Montagem final da ferramenta	96
Figura A.16–(a) aplicação de cola; (b) aproximação com a placa principal da ferramenta; (c) utilização peça de fixação da ferramenta para empurrar o ímã até sua posição final; (d) bloco de ímã em sua posição final; (e) desmontagem da ferramenta; (f) montagem parcial da peça após a cura da cola epóxi.	97
Figura A.17–Aplicação de cola e montagem da ferramenta (a) aplicação de cola; (b) Montagem da placa principal da ferramenta; (c) Placa principal fixada; (d) Montagem final da ferramenta	97
Figura A.18–Ímã principal montado	98
Figura A.19–(a) fixação do concentrador lateral interno na base e instalação de barras roscadas guias; (b) aproximação do conjunto central utilizando as barras roscadas guias; (c) aproximação do concentrador lateral utilizando as guias; (d) aplicação de cola; (e) posição parcial para montagem dos concentradores frontais; (f) aproximação do concentrador frontal; (g) aplicação de cola; (h) posicionamento parcial dos concentradores frontais; (i) montagem final de todos os conjuntos; (j) Aplicação de cola para colagem da placa de proteção; (k) instalação da placa de proteção.	99
Figura A.20–Aplicação de cola e montagem da ferramenta (a) aplicação de cola; (b) Montagem da placa principal da ferramenta; (c) Placa principal fixada; (d) Montagem final da ferramenta	100

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Trocador de Calor Magnético	47
Tabela 3.2 – Ímãs Permanentes selecionados (NdFeB) e suas propriedades	50
Tabela 3.3 – Constantes	57

Lista de abreviaturas e siglas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ID	Diâmetro Interno
EMC	Efeito Magnetocalórico
Gd	Gadolínio
GMCE	Efeito Magnetocalórico Gigante (Em inglês - Giant Magnetocaloric Effect)
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (em inglês - Intergovernmental Panel on Climate Change)
NdFeB	Neodímio-Ferro-Boro
OECD	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (em inglês - Organization for Economic Cooperation and Development)
TCM	Trocador de Calor Magnetocalórico
UEM	Universidade Estadual de Maringá
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

Lista de símbolos

Letras Latinas

B	Densidade de Fluxo Magnético [T]
$B_J(\chi)$	Função de Brillouin [-]
B_r	Remanência [T]
Bi	Número de Biot [-]
c_p	Calor específico [$Jkg^{-1}K^{-1}$]
Dpolos	Distância entre os polos magnéticos de centro à centro [mm]
F	Força [N]
Fo	Número de Fourier [-]
g	Fator de Landé [-]
H	Campo Magnético Interno [Am^{-1}]
H_{ap}	Campo Magnético Aplicado [Am^{-1}]
H_{dem}	Campo Desmagnetizante [Am^{-1}]
J	Momento Angular [\hbar]
k_B	Constante de Boltzmann [Jkg^{-1}]
L	Comprimento útil do trocador de calor [mm]
M	Magnetização [Am^{-1}]
N_d	Fator desmagnetizante [-]
N	Fator de Magnetização [-]
N_s	Número de spins magnéticos por unidade de massa [kg^{-1}]
\emptyset	Diâmetro interno do invólucro (Tubo de G10) [mm]
R	Relutância [H^{-1}]
S	Entropia [JK^{-1}]

T	Temperatura [K]
T_C	Temperatura de Curie [K]
V	Volume [m^3]
V_m	Potencial escalar magnético
X	Eixo X [mm]
Y	Eixo Y [mm]
Z	Eixo Z [mm]

Letras Gregas

α	Difusividade [m^2s^{-1}]
μ	Permeabilidade Magnética/ Momento Magnético [NA^{-2}]
μ_0	Permeabilidade do Vácuo [NA^{-2}]
μ_b	Magneton de Bohr [Am^2]
ρ	Massa Específica [kgm^{-3}]
σ	Magnetização específica [Am^2kg^{-1}]
ϕ	Fluxo Magnético [Vs]
χ	Susceptibilidade Magnética [-]

Sumário

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Motores Termomagnéticos	28
1.2	Objetivos	30
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1	Propriedades Magnéticas dos Materiais	33
2.1.1	Magnetização	33
2.1.2	Campo Desmagnetizante Interno	34
2.1.3	Remanência	34
2.1.4	Classificação dos Materiais	35
2.1.4.1	Paramagnéticos	35
2.1.4.2	Ferromagnéticos	36
2.2	Ímãs Permanentes	37
2.3	Geradores de Energia Termomagnéticos	38
2.4	Motores Termomagnéticos	38
2.5	Ciclo Termodinâmico dos Motores Termomagnéticos	40
3	METODOLOGIA	43
3.1	Esquema Construtivo do Aparato do Motor Termomagnético	43
3.2	Trocador de Calor	45
3.3	Empacotamento Leito Poroso de Esferas	47
3.4	Sistema de Bombeamento para Aquecimento e Resfriamento	48
3.5	Circuito Magnético	48
3.6	Dimensionamento do Circuito Magnético Utilizando o COMSOL Multiphysics	51
3.6.1	Simulação Bidimensional (2D)	51
3.6.2	Simulação Tridimensional (3D)	52
3.7	Cálculo da Força	54
3.7.1	Campo Desmagnetizante Interno	55
3.7.2	Cálculo da Magnetização	56
3.8	Medição do Campo Magnético	56
3.9	Medição do Diagrama de Forças Estáticas	59
3.10	Medição da Frequência de Operação	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1	Simulação Bidimensional (2D)	63

4.2	Simulação Tridimensional (3D)	64
4.3	Projeto Final e Montagem do Circuito Magnético em Duplo C	66
4.4	Caracterização Experimental do Campo Magnético	68
4.5	Força Magnética	70
4.5.1	Força Magnética Teórica	70
4.5.2	Força Magnética Experimental	72
4.6	Diagrama de Forças Estáticas	73
4.7	Montagem Final do Motor	76
5	CONCLUSÃO	79
5.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	81
	REFERÊNCIAS	83
	APÊNDICES	87
	APÊNDICE A – MONTAGEM DO CIRCUITO MAGNÉTICO	89
A.1	Preparação	89
A.1.1	Equipamentos de Proteção	89
A.1.2	Preparação inicial para a colagem dos ímãs	90
A.2	Colagem	91
A.2.1	Colagem dos ímãs frontais na peça de aço	91
A.2.2	Colagem dos ímãs laterais no alumínio	92
A.2.3	Colagem dos Ímãs Centrais	95
A.3	Montagem	98

1 Introdução

Energia é um insumo primordial para o desenvolvimento socioeconômico de uma nação. Devido ao aumento populacional e fatores econômicos, a demanda por energia vem aumentando nos últimos anos ([WORLD ENERGY COUNCIL, 2016](#)) ([INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018](#)). Esse aumento da demanda é ainda mais expressivo quando se observam os dados referentes aos países emergentes ou não membros da OECD. As mesmas referências fazem projeções para as próximas décadas. O consumo de energia pode aumentar na casa dos 64%, para os países não membros da OECD, entre os anos de 2018 e a estimativa para 2040 ([INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2018](#)).

Para suprir o rápido crescimento da demanda, é trivial a escolha por fontes de energia bem estabelecidas, baratas e de fácil acesso. Em outras palavras, dá-se preferência ao uso de combustíveis fósseis para a produção primária de energia, o que culmina no aumento das emissões de gases de efeito estufa e demais poluentes. Além disso, as fontes fósseis não são renováveis e estão sujeitas à instabilidades políticas o que, de tempos em tempos, resulta no aumento nos preços dos combustíveis. Esse cenário, associado às projeções do IPCC quanto às potenciais mudanças climáticas causadas pela produção excessiva de CO₂ ([IPCC, 2018](#)), motiva a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias alternativas para produção de energia, as quais podem ser mais eficientes e menos poluentes.

Além disso, uma grande parte da energia térmica gerada a partir da queima de qualquer combustível, fóssil ou renovável, é desperdiçada ao ser liberada para a atmosfera na forma de energia térmica de baixa temperatura. O aproveitamento dessa energia desperdiçada e a sua conversão em outra forma de energia (mecânica ou elétrica), tem sido amplamente pesquisada e diversos sistemas têm sido desenvolvidos. Dentre eles, destacam-se o ciclo de Rankine Orgânico (ORC: Organic Rankine Cycle), ciclo Kalina, conversão por meio do efeito termoelétrico, motores a base de materiais com mudança de fase (PCM: Phase Change Material engine system) e, como proposto neste trabalho, motores termomagnéticos.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo projetar, construir e avaliar experimentalmente um motor termomagnético do tipo Tesla. Tal motor pode produzir potência mecânica ou energia elétrica utilizando como fonte de calor a energia solar ou um sistema cogeração ao aproveitar rejeitos térmicos industriais. Ou seja, são capazes de operarem sem a produção de carbono.

1.1 Motores Termomagnéticos

O físico francês Pierre Curie (1895) reportou que materiais magnéticos possuem uma variação na susceptibilidade magnética em função de sua temperatura, sendo a temperatura de transição da fase ferromagnética para paramagnética denominada Temperatura de Curie (T_C) em sua homenagem. O princípio do funcionamento dos motores termomagnéticos é baseado em tal transição de fases magnéticas, ou seja, transformam energia térmica em mecânica através de interações magnéticas.

As primeiras descrições de motores termomagnéticos datam do final dos anos 1800, com as patentes de [Edison \(1888\)](#) e de [Tesla \(1889\)](#). Entretanto, devido às limitações tecnológicas da época, principalmente em relação aos ímãs permanentes e materiais magnéticos disponíveis, esta classe de motores foi pouco estudada e pesquisada durante o século XX. Apenas recentemente, o desenvolvimento de motores termomagnéticos voltou a ser tema de diversos trabalhos ([\(KARLE, 2001\)](#); [\(CHRISTIAANSE; BRÜCK, 2014\)](#); [\(ALVES et al., 2014\)](#)). Esse ressurgimento deve-se a: (i) surgimento de ímãs permanentes de alto desempenho, como os à base de NdFeB ([\(COEY, 2010\)](#)); (ii) o desenvolvimento de circuitos magnéticos capazes de gerar campos magnéticos intensos, na ordem de 1 a 2 T, em um volume considerável e utilizando cada vez menos massa de ímãs permanentes ([\(BJØRK et al., 2010\)](#)); (iii) e a descoberta de novos materiais magnéticos com transição de primeira ordem ao redor da temperatura ambiente ([\(PRECHARSKY; GSCHNEIDNER, 1997\)](#) e [\(PRECHARSKY et al., 2001\)](#)).

Os materiais magnéticos que apresentam transição de primeira ordem possuem uma elevada variação de entropia magnética (ΔS_T) quando o material é submetido, sob condições isotérmicas, à uma variação de campo magnético externo. A este fenômeno dá-se o nome de Efeito Magnetocalórico (EMC) ([\(PRECHARSKY et al., 2001\)](#); [\(SMITH et al., 2012\)](#); [\(GUTFLEISCH et al., 2016\)](#)), de modo que tais materiais foram desenvolvidos inicialmente para o aplicações em bombas de calor e refrigeradores magnetocalóricos ([\(BARCLAY; STEYERT, 1982\)](#); [\(TREVIZOLI et al., 2016\)](#)). Uma segunda maneira de caracterizar o EMC seria promover a variação do campo magnético sobre o material, o mantendo sob condições adiabáticas. Neste caso, o EMC se manifesta por meio de uma variação da temperatura, chamada de variação adiabática da temperatura (ΔT_{ad}).

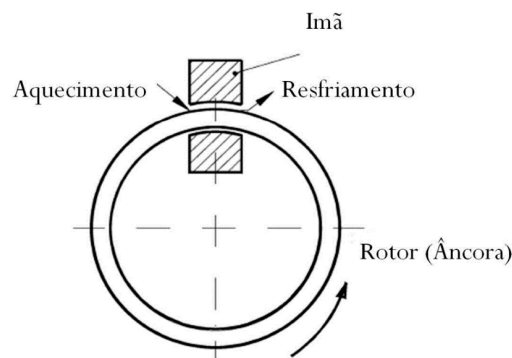
No que diz respeito aos motores termomagnéticos, a transição de primeira ordem e o elevado EMC presente nesses materiais estão associados à um alto valor da magnetização específica. Este é um primeiro fator relacionado ao desempenho termodinâmico do motor, uma vez que a força magnética é diretamente proporcional a esta propriedade. Um segundo fator é a mudança abrupta no ordenamento magnético característica da transição de primeira ordem. Em outras palavras, a transição de fases ocorre em uma reduzida faixa de temperatura, o que pode possibilitar a operação do motor em uma pequena faixa de temperatura, e resultar no aumento da frequência de operação do motor. Por fim, um

terceiro fator seria um elevado EMC. Se as variações de campo magnético ocorrerem sob condições adiabáticas, o material sofrerá um aumento (ou redução) da sua temperatura em $\pm(\Delta T_{ad})$. Assim, o material necessitaria de uma menor quantidade de energia a partir de uma fonte (ou sumidouro) de calor para ser aquecido (ou resfriado), resultando na mudança de fase magnética. Portanto, os materiais magnetocalóricos com transição de primeira ordem são potenciais candidatos para o desenvolvimento e aplicação em motores termomagnéticos.

Entretanto, uma limitação encontrada em tais materiais é a histerese térmica (GUTFLEISCH et al., 2016). Um material sem histerese térmica possui a mesma temperatura de transição de fases, independente se o material está sendo aquecido ou resfriado. Quando a histerese está presente, a transição ocorre em temperaturas diferentes quando o material é aquecido ou resfriado. Assim, aumenta-se a faixa de temperatura necessária para ocorrer a mudança de fase. Além disso, a histerese térmica também diminui a intensidade do EMC ((GUTFLEISCH et al., 2016), e (CHRISTIAANSE et al., 2017)). Como resultado, deve-se fornecer uma maior quantidade de energia para o material mudar de fase e, conseqüentemente, a frequência de operação do motor tende a diminuir.

Dentre os motores termomagnéticos propostos destacam-se a Roda de Curie e o Motor de Tesla, os quais vêm sendo utilizados como base para o projeto dos motores em desenvolvimento. A roda de Curie, ilustrada na Figura 1.1, consiste em um anel de material magnético a qual interage com um ímã permanente externo. A fonte e o sumidouro de calor são colocados próximo ao ímã, mas em lados opostos, formando um gradiente de temperatura que promove a movimentação e rotação do anel. Deste modo, seu funcionamento é contínuo, mas, em geral, a potência gerada é baixa devido à pequena quantidade de material utilizado.

Figura 1.1 – Roda de Curie.

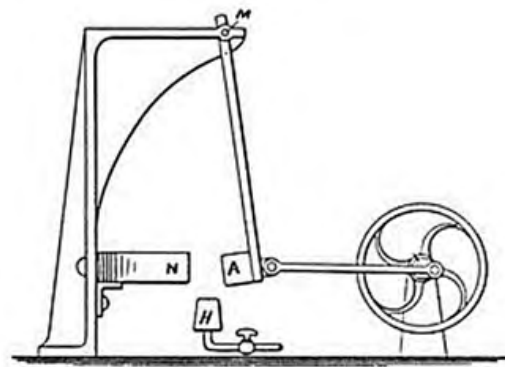


Fonte: Karle (2001)

Já o Motor de Tesla com retorno por mola, apresentado na Figura 1.2, é composto

por um bloco de material magnético (indicado por A), um ímã (indicado por N) que pode ser permanente ou eletromagnético, uma mola (indicada por M) e uma fonte de calor (indicada por H). Este tipo de motor pode produzir uma maior força magnética, uma vez que todo o material magnético está envolvido no seu funcionamento. Entretanto, como a ação não é contínua a potência produzida também é baixa. Além disso, é necessário algum mecanismo para transformar o movimento linear em rotacional para ser acoplado a um gerador.

Figura 1.2 – Motor de Tesla



Fonte: [Tesla \(1889\)](#)

Portanto, os principais componentes do motor termomagnético, tanto a roda de Curie como o motor de Tesla, são o circuito magnético à base de ímãs permanentes e o material magnético. O circuito magnético é o componente mais caro e complexo do sistema, e pode ser projetado com diferentes tamanhos e formatos, como: Cilindro Oco ([HALBACH, 1980](#)), Circuito Halbach em forma de C ([BOHIGAS et al., 2000](#)), Halbach de Cilindros Concêntricos ([TREVIZOLI et al., 2015](#)). [BjØrk et al. \(2010\)](#) descreveram diferentes circuitos magnéticos e propuseram uma figura de mérito para avaliar a sua performance quando empregados em sistemas de refrigeração magnéticos. Resumidamente, um circuito magnético ideal deve utilizar uma quantidade mínima de ímãs permanentes e gerar um alto campo magnético em um grande volume.

1.2 Objetivos

Esta dissertação de mestrado tem como objetivo principal o projeto, construção e avaliação experimental de um motor termomagnético do tipo Tesla puramente magnético, ou seja, aquele sem a necessidade de utilizar uma mola ou a gravidade para operar. Para cumprir os objetivos propostos, o estudo foi dividido em duas etapas principais.

A primeira etapa diz respeito ao projeto e construção de um circuito magnético a base de ímãs permanentes do tipo duplo-C composto por diversos blocos de ímãs permanentes à base de NdFeB, montados em um arranjo Halbach. Este tipo de circuito possui duas regiões de alto campo, a qual viabilizou a construção de um motor puramente magnético. O projeto do circuito foi desenvolvido por meio de modelos em SolidWorks e de simulações 2D e 3D no software COMSOL Multiphysics. A construção e caracterização experimental do circuito foi realizada no laboratório de máquinas térmicas da Universidade Estadual de Maringá, seguindo o trabalho de [Schafer \(2016\)](#).

A segunda etapa contemplou o projeto e construção do aparato experimental do motor. Esta etapa se desenrolou com o projeto detalhado do aparato, constando os trocadores de calor magnéticos, o sistema de bombeamento, a seleção e compra dos equipamentos e instrumentação necessários para o funcionamento e caracterização experimental do aparato. Na sequência, o motor foi construído no laboratório de máquinas térmicas da Universidade Estadual de Maringá, e posteriormente, o diagrama de forças estáticas do motor foi caracterizado. Por fim, foram realizados alguns ensaios dinâmicos preliminares, em que mediu-se sua frequência de operação, em função de parâmetros operacionais fixos, como temperaturas nas fontes térmicas e vazão.

2 Revisão Bibliográfica

O presente capítulo apresenta alguns conceitos fundamentais sobre o magnetismo e demais fenômenos envolvidos no funcionamento dos motores termomagnéticos. Além disso será apresentada uma visão geral sobre os geradores e motores termomagnéticos desenvolvidos e publicados na literatura.

2.1 Propriedades Magnéticas dos Materiais

Para o pleno entendimento da presente dissertação, faz-se necessária a apresentação de conceitos relacionado ao magnetismo e materiais magnéticos. A propriedade fundamental do magnetismo é o campo magnético, H , o qual produz uma magnetização, M , nos materiais magnéticos. Outra propriedade de interesse é a densidade de fluxo magnético, B , que é a quantidade de linhas de fluxo magnéticos por unidade de área. É esta última que possui unidades de Tesla (T).

As propriedades dos materiais magnéticos são caracterizadas não apenas pela magnitude de sua magnetização, como também como pela sua variação com o campo aplicado. A razão entre M e H é chamada susceptibilidade, χ :

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2.1)$$

Já a razão entre a densidade de fluxo e o campo aplicado é chamada permeabilidade relativa, μ .

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2.2)$$

2.1.1 Magnetização

Quando um material ferromagnético é submetido à um campo magnético externo ele se torna magnetizado, sendo que a intensidade do magnetismo é diretamente proporcional à intensidade do campo aplicado. Deste modo, pode-se entender que a magnetização descreve o quão magnetizado um volume de material fica ao ser submetido ao campo externo ((CULLITY; GRAHAM, 2008)).

Em alguns casos é mais conveniente utilizar a magnetização por unidade de massa ao invés de unidade de volume, uma vez que a massa pode ser facilmente medida. Além disso, a massa não sofre alterações com a temperatura, como a expansão térmica, a qual

altera o volume do material. A magnetização específica, σ , é definida a seguir, sendo ρ a densidade do material:

$$\sigma = \frac{M}{\rho} \quad (2.3)$$

2.1.2 Campo Desmagnetizante Interno

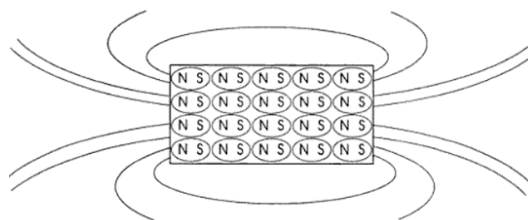
A Figura 2.1 representa o esquema de um ímã permanente com os ímãs atômicos que o constitui. Pode-se verificar que internamente cada polo dos ímãs atômicos encontra-se encostado a outro polo de polaridade oposta, de forma que exista uma neutralização dos polos ou cargas magnéticas. No entanto, há uma descontinuidade nos ímãs atômicos localizados nas extremidades, formando uma carga de magnetismo livre nestas regiões, o que resulta na geração do campo magnético externo ou os polos livres.

Por convenção, as linhas de campo magnético externo vão do polo livre N (norte) para o polo livre S (sul). Além disso, também são formadas linhas de campo interno, as quais também saem do polo norte e entram no polo sul, mas passando pelo interior do corpo magnetizado. Desta forma, gera-se um campo contrário ao sentido de M e H , denominado campo desmagnetizante interno, H_{dem} .

A magnitude do campo desmagnetizante é proporcional à magnetização e ao fator desmagnetizante, N . Este último é uma constante adimensional de proporcionalidade, cujo valor varia entre 0 e 1 e depende diretamente da geometria do material e da direção da magnetização.

$$H_{\text{dem}} = NM \quad (2.4)$$

Figura 2.1 – Ímã Permanente composto por ímãs atômicos



Fonte: [Faria e Lima \(2005\)](#)

2.1.3 Remanência

A remanência, B_r , é definida como o campo magnético produzido por um material que tenha sido magnetizado até sua saturação e que não possua nenhum campo desmag-

netizante interno. O limite superior de B_r depende da orientação cristalográfica média dos grãos magnéticos e também da magnetização de saturação, a qual é intrínseca do material do ímã permanente.

Pode-se entender a remanência como a força do ímã. Por exemplo, considere dois blocos de ímãs permanentes com as mesmas dimensões, mas remanências diferentes. Ao aproximá-los de uma mesma chapa de ferro, aquele que possuir maior remanência é o que apresentará maior força magnética.

2.1.4 Classificação dos Materiais

Todos os materiais possuem algum efeito relacionado ao magnetismo. O único meio não magnético é aquele em que não há matéria (o vácuo) cuja permeabilidade relativa é 1. De maneira geral, os materiais são classificados de acordo com a sua permeabilidade relativa ou pela sua susceptibilidade: ferromagnético, paramagnéticos, diamagnéticos, entre outras. No presente trabalho, são de interesse os materiais que possuem transição de fases do tipo ferro e paramagnéticas.

2.1.4.1 Paramagnéticos

Os materiais paramagnéticos possuem uma permeabilidade relativa ligeiramente superior a 1, e susceptibilidade na ordem de 10^{-3} e 10^{-5} , o que resulta numa baixa atração à um campo magnético aplicado. Em 1895, Pierre Curie fez a primeira medição sistemática da susceptibilidade em uma grande quantidade de substâncias e em uma ampla faixa de temperaturas. Ele concluiu que a susceptibilidade varia inversamente com a temperatura absoluta para paramagnéticos.

$$\chi_m = \frac{C}{T} \quad (2.5)$$

Essa relação é conhecida como Lei de Curie, e C é a constante de Curie por grama. Langevin, em 1905, propôs a teoria do paramagnetismo em que assumiu que um material paramagnético consiste de átomos que possuem um mesmo momento magnético. Devido ao não cancelamento dos spins e momentos orbitais dos elétrons, esses momentos atômicos apontam aleatoriamente e se cancelam, resultando numa magnetização do material igual a zero. Quando um campo é aplicado, se não houver nenhuma força contrária, há a tendência para cada momento atômico girar na direção do campo, produzindo-se o completo alinhamento dos momentos atômicos e o material como um todo deveria adquirir um grande momento na direção do campo. Entretanto, a agitação térmica dos átomos se opõem à essa tendência e o resultado é apenas um alinhamento parcial na direção do campo e uma pequena susceptibilidade positiva. O efeito do aumento da tempera-

tura é aumentar a agitação térmica reduzindo a susceptibilidade ((CULLITY; GRAHAM, 2008)).

A teoria de Langevin, que resulta na Lei de Curie, é baseada na suposição de que os portadores individuais de momento magnético (átomos ou moléculas) não interagem entre si e são influenciados apenas pelo campo aplicado e pela agitação térmica. Entretanto, muitos materiais paramagnéticos não obedecem esta lei, mas sim a chamada Lei de Curie-Weiss, expressa pela Eq. 2.6

$$\chi_m = \frac{C}{T - \theta} \quad (2.6)$$

em que θ é uma constante, e igual a zero para as substâncias que obedecem a lei de Curie.

2.1.4.2 Ferromagnéticos

O ferromagnetismo é observado nos metais de transição, como o ferro (ferrita-CCC), cobalto, níquel, e algumas terras-raras tal como gadolínio. Os materiais ferromagnéticos possuem a propriedade de que seus momentos magnéticos se alinham fortemente na direção de um campo magnético aplicado. Possuem alta susceptibilidade e permeabilidade relativa muito maior que a unidade.

Os materiais ferromagnéticos possuem momento magnético permanente, mesmo na ausência de um campo externo. A origem desses momentos magnéticos está relacionada principalmente ao momento de spin dos átomos, devido ao cancelamento incompleto desses na estrutura eletrônica do material. Há uma contribuição do momento magnético orbital, porém pouco representativo comparado ao momento de spin. Além disso, mesmo sem a aplicação de um campo externo, o acoplamento de interações faz com que os momentos magnéticos de spin resultantes de átomos adjacentes se alinham uns aos outros.

Em 1906, Weiss sugeriu duas hipóteses para os materiais ferromagnéticos. A primeira dizia que o campo molecular age nos materiais ferromagnéticos tanto abaixo quanto acima da temperatura de Curie, e este campo é tão forte que pode magnetizar a substância até a saturação, mesmo na ausência de um campo aplicado externo. A substância é então espontaneamente magnetizada. Esta hipótese levou à questão do porquê pode-se obter facilmente ferro na condição desmagnetizada. Já na segunda hipótese, um material ferromagnético no estado desmagnetizado pode ser dividido em domínios. Cada domínio é espontaneamente magnetizado até a saturação, mas as direções de magnetização dos vários domínios ficam de forma a se anularem e o material como um todo fica desmagnetizado. O processo de magnetização nesses materiais consiste em aplicar um campo externo, que converte todos os domínios em um único, e assim é magnetizado numa única direção. Acima da temperatura de Curie os materiais ferromagnéticos se tornam paramagnéticos,

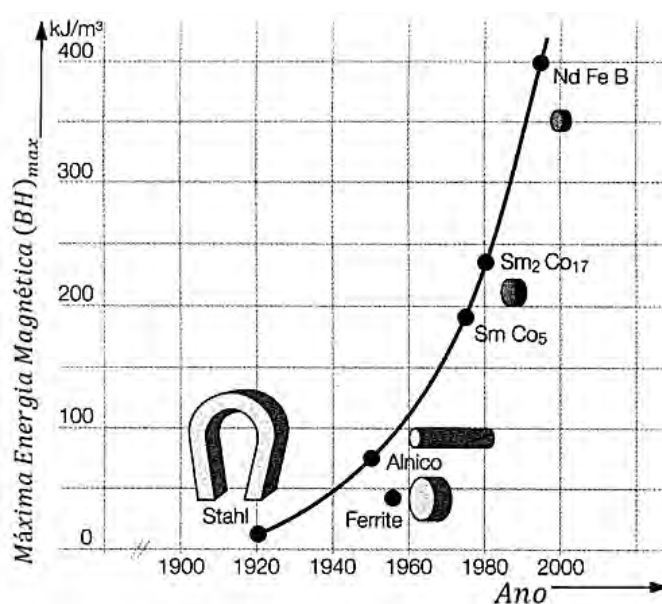
e passam a obedecer a lei de Cuie-Weiss, com valor de θ aproximadamente igual à sua Temperatura de Curie.

2.2 Ímãs Permanentes

Alguns materiais ferromagnéticos permanecem magnetizados após serem submetidos à um campo magnético externo. Nesses materiais, após a retirada do campo externo, o material é capaz de gerar o seu próprio campo magnético. A intensidade do campo gerado depende do tipo e volume de material.

A Figura 2.2 apresenta a evolução no desenvolvimento dos ímãs permanentes. Pela figura pode-se notar um aumento expressivo na energia magnética $(BH)_{\text{máx}}$ o que culmina numa quantidade muito menor de material para se atingir uma mesma intensidade de campo, quando comparamos os atuais ímãs de NdFeB com aqueles de décadas passadas.

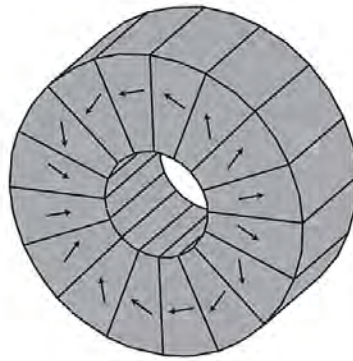
Figura 2.2 – Evolução histórica dos ímãs permanentes



Fonte: Karle (2001)

Em 1980, Halbach propôs uma configuração para ímãs permanentes conhecida como Arranjo Halbach. Este arranjo visa maximizar o campo magnético de um lado do ímã enquanto minimiza o outro. A Figura 2.3 mostra um arranjo Halbach com 16 segmentos na forma de cilindro, onde as flechas indicam o sentido da remanência. Esse arranjo em específico proporciona a concentração das linhas de campo no centro do cilindro e minimiza o campo nas demais regiões.

Figura 2.3 – Matriz Halbach com 16 segmentos



Fonte: Bjørk, 2010

2.3 Geradores de Energia Termomagnéticos

Segundo [Kishore e Priya \(2018\)](#), os dispositivos geradores de energia termomagnética (do inglês: TMEG - thermomagnetic energy generator) são aqueles que transformam energia térmica em elétrica ou mecânica a partir da transição ferro-paramagnético ao redor da T_C . Eles são divididos em dois tipos, dependendo do método empregado para a geração. O primeiro utiliza o método de conversão direta de energia térmica em elétrica, e são conhecidos como dispositivos termomagnéticos ativos ou geradores termomagnéticos. O segundo utiliza a conversão da energia térmica em energia mecânica, a qual pode ser diretamente utilizada ou ser convertida em energia elétrica, e são conhecidos como dispositivos termomagnéticos passivos, motores termomagnéticos, ou motores de Tesla, os quais são o foco do presente trabalho.

2.4 Motores Termomagnéticos

O princípio de funcionamento dos motores termomagnéticos foi proposto inicialmente na patente de Tesla no final do séc. XIX. Naquela época, foi proposta a utilização de ferro como material magnético, o qual possui T_C próximo dos $700\text{ }^\circ\text{C}$. O uso de temperaturas elevadas, no entanto, acarreta danos aos ímãs permanentes, além de ser necessário o fornecimento de uma grande quantidade de calor para garantir o funcionamento do motor. Logo, o estudo dos motores termomagnéticos foi deixado de lado por décadas.

O estudo destes motores foi retomado na década de 1950, com os trabalhos de [Stauss \(1959\)](#) e [Elliott \(1959\)](#). Esses autores já tinham a disposição ímãs permanentes com melhores propriedades, como ligas de Alnico, e utilizaram o gadolínio como material magnético. Porém, os trabalhos de Stauss e Elliott apresentaram que a eficiência dos motores era baixa.

Murakami e Nemoto. (1972) apresentaram os primeiros resultados experimentais de um TMEG . O material utilizado denominado apenas como peças magnéticas sensíveis à temperatura (do inglês: temperature sensitive magnetic material), possuía T_C em torno de 50 °C e o motor tinha estrutura semelhante à roda de Curie. A partir deste trabalho, os autores concluíram que os materiais conhecidos à época não eram apropriados para o desenvolvimento de motores termomagnéticos, mas deixaram boas perspectivas quanto ao desenvolvimento de materiais com melhores propriedades e sua aplicação em motores.

Já nos anos 2000, o desenvolvimento de novos materiais - agora denominados magnetocalóricos - e a descoberta do EMC gigante ao redor da temperatura ambiente ((PRECHARSKY; GSCHNEIDNER, 1997)), impulsionou a pesquisa e desenvolvimento de refrigeradores e bombas de calor magnéticos, e os motores termomagnéticos também voltaram ao foco. Embora o EMC não esteja diretamente ligado ao seu funcionamento dos motores, os materiais magnetocalóricos possuem propriedades interessantes do ponto de vista de conversão de energia térmica em mecânica, como a T_C ao redor da temperatura ambiente e a elevada magnetização específica.

Karle (2001), modelou e simulou o funcionamento de uma roda de Curie utilizando Alnico como ímã permanente e uma liga de 30% de NiFe (comercialmente conhecida como termoflux) como material magnético, a qual possui T_C em torno de 90 °C . A proposta de Karle ainda incluía o uso da radiação solar como fonte de calor quente. O motor projetado foi considerado inviável economicamente, visto que tanto a energia mecânica produzida como a eficiência encontrada foram baixas. Assim, seria necessário um motor de grandes dimensões para produzir valores de potência mecânica úteis, o que aumentaria os custos desta máquina.

Takahashi, Yamamoto e Nishikawa (2006), novamente com base na roda de Curie, modelaram e construíram um motor que possuía três ímãs permanentes de NdFeB ao redor do seu rotor. Neste sistema, água nas temperaturas de 95 °C e 11 °C foram utilizadas nas fontes quente e fria, respectivamente. Os autores conseguiram gerar uma potência líquida de 3,7 W operando a uma frequência de 0,4 rps. A potência total produzida foi de 5,4 W, entretanto 1,7 W se perdia devido à atrito e frenagem eletromagnética no Rotor

Ujihara, Carman e Lee (2007) construiu um pequeno motor de tesla (dimensões de 20x20x60mm) com retorno por mola, o qual utilizava Gd como material magnético e ímãs de NdFeB. O autor concluiu que o motor proposto poderia funcionar com um gradiente de temperatura de 10 K entre as fontes quente e fria. Outra contribuição importante foi a comparação deste motor com um gerador termoelétrico, o qual utiliza o efeito Seebeck e pode gerar energia a partir de um gradiente de temperatura na faixa < 100 K. Comparando os dois sistemas, para um mesmo gradiente de temperatura, o autor concluiu por meio de simulações que o motor de Tesla proposto conseguiria uma eficiência consideravelmente maior que os geradores termoelétricos, produzindo entre 18,5 e 36,1 mW/cm² frente aos

12 mW/cm² do sistema termoelétrico.

Foleiss, Vieira e Szpak (2012), baseando-se no motor proposto por Karle (2001), modelaram e simularam uma roda de Curie solar utilizando como materiais magnéticos liga de 30% NiFe, Gd e MnAs. Os resultados obtidos foram a força gerada e frequência de operação para cada um desses materiais. Os autores chegaram à conclusão que essa configuração ainda é inviável, mas que materiais com propriedades melhores podem vir a ser a solução para estes motores.

Evaristo (2016) e Souza (2017), utilizando como material magnético placas de MnAs e Gd, respectivamente, propuseram motores do tipo Tesla com retorno gravitacional. A principal diferença entre os trabalhos foi o foco do estudo, enquanto Evaristo fez a análise buscando como principal parâmetro a frequência de operação do motor, Souza verificou a força atuante no sistema.

Gargaro (2018), utilizando como circuito magnético um Halbach de cilindros concêntricos, semelhante ao utilizado por Trevizoli (2015), e Gd como material de magnético, simulou e projetou um motor de Tesla com retorno por mola. A partir da simulação da densidade de fluxo gerada no interior do ímã, a autora conseguiu calcular a força de atração magnética em função da posição e temperatura do material magnético.

2.5 Ciclo Termodinâmico dos Motores Termomagnéticos

O ciclo termodinâmico do motor de Tesla é baseado no ciclo Ericson, descrito a seguir. Esse ciclo é composto por dois processos isotérmicos e dois processos isocampo magnético. A Figura 2.4(a) apresenta o diagrama $M \times B$, (magnetização versus densidade de fluxo magnético aplicado), enquanto a Figura 2.4(b) o diagrama $M \times T$ (magnetização versus temperatura). Por fim, a Figura 2.4(c) mostra o ciclo de Ericson esquematizado no diagrama $T - s$ (temperatura versus entropia). A Figura 2.5 ilustra, esquematicamente, as etapas do ciclo.

- Ponto 1 - o material está na fase ferromagnética, sob ação de um campo alto (Balto) e sua temperatura, T_{baixa} , é menor que T_C ;
- 1→2 - o material é aquecido ao receber calor de uma fonte térmica, e sua temperatura aumenta de T_{baixa} até T_{alta} , sob B_{alto} fixo, ocorrendo assim a mudança de fase magnética de ferro para paramagnética;
- 2→3 - o material magnético a $T_{\text{alta}} > T_C$ pode ser facilmente removido da região de campo alto para a região de campo baixo (B_{baixo}) pela ação de uma mola (que também pode ser pela ação da força gravitacional ou magnética). Assim, trabalho é realizado sobre sistema, conforme na Figura 2.5;

- 3→4 - o material é resfriado ao trocar calor com um sumidouro de calor, e sua temperatura é reduzida de T_{alta} para T_{baixa} , sob B_{baixo} fixo, retornando para sua fase inicial ferromagnética;
- 4→1 - o material é atraído para a região de campo alto, retornando à sua posição inicial. Deste modo, movimento e trabalho são produzidos pelo sistema.

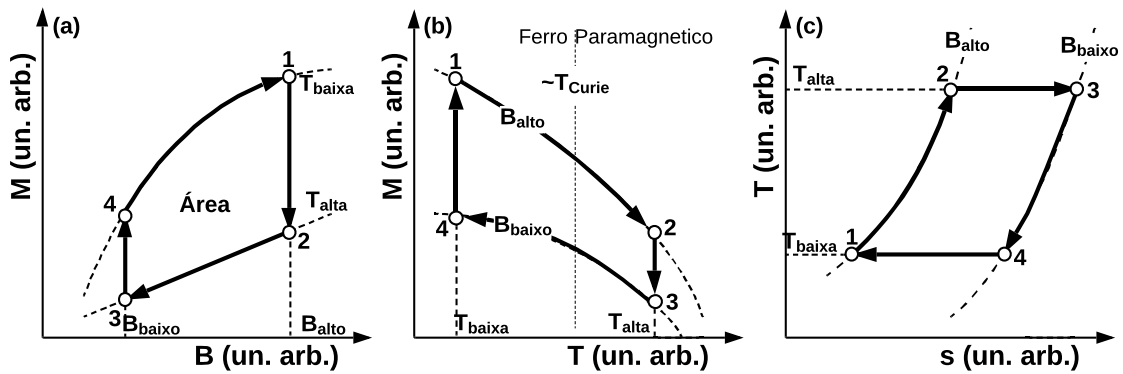
A área dentro do diagrama $M \times B$ ou $T - s$ (Figura 2.4(a) e (c), respectivamente) é proporcional ao trabalho realizado pelo ciclo:

$$W = V \oint B \cdot dM(T, B) \quad (2.7)$$

sendo V o volume. O EMC é verificado nos processos isotérmicos, 2-3 e 4-1 na Figura 2.5(c), na forma de (ΔS_T) . Quanto maior a variação da entropia, maior é a área e consequentemente maior o trabalho bruto.

$$W = \oint T ds \quad (2.8)$$

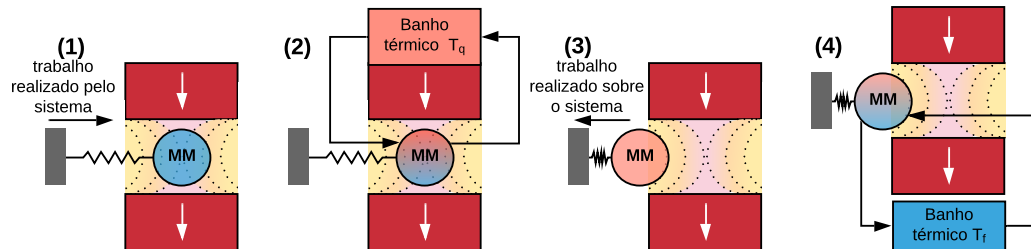
Figura 2.4 – Ciclo do motor Termomagnético (Ericson) (a) $M \times B$ (b) $M \times T$ (c) $T \times s$



Fonte: Adaptado de [Christiaanse e BrÜck \(2014\)](#)

No funcionamento do motor termomagnético duas fontes térmicas devem promover as trocas de calor com o material magnético nas etapas 1-2 e 3-4. A troca de calor pode ser realizada por meio de um fluxo de massa quente (a T_{alta}) e um frio (a T_{baixa}). Deste modo, em uma aplicação prática, calor poderia ser fornecido a partir de sistemas de recuperação de calor, utilizando gases de combustão ou vapor à baixas temperaturas, enquanto calor poderia ser rejeitado para o ar à temperatura ambiente.

Figura 2.5 – Diagrama esquemático de um ciclo Ericson de um motor termomagnético. Os blocos vermelhos com flechas brancas representam o circuito magnético, o gradiente de cores no volume de campo magnético representa as linhas de campo iso-magnéticas; MM é o material magnético, e a força magnética é contrabalanceada pela tração da mola



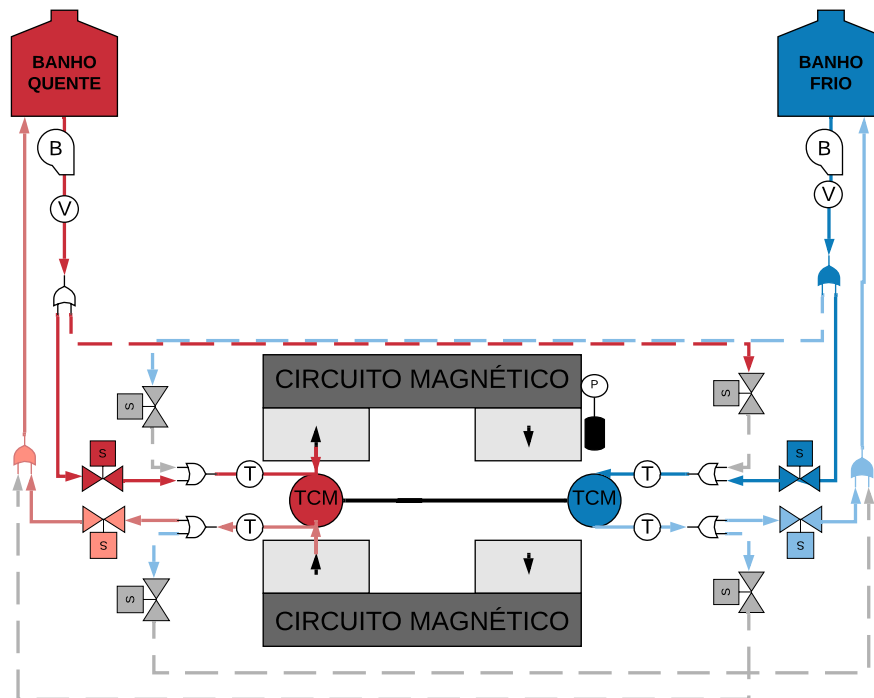
3 Metodologia

Inicialmente nessa seção é apresentado o esquema de funcionamento do aparato proposto, juntamente com a descrição de seus principais componentes. Em seguida, são apresentados os métodos utilizados para o dimensionamento dos componentes e por fim, a metodologia empregada para a obtenção dos dados experimentais.

3.1 Esquema Construtivo do Aparato do Motor Termomagnético

O aparato do motor termomagnético possui como principais componentes o circuito magnético, o trocador de calor composto pelo material magnético (chamado de trocador de calor magnético ou TCM), o sistema de bombeamento, uma fonte e um sumidouro de calor, o mecanismo para converter o movimento linear em rotacional, e diversos instrumentos de medição. A Figura 3.1 mostra o desenho esquemático do aparato proposto.

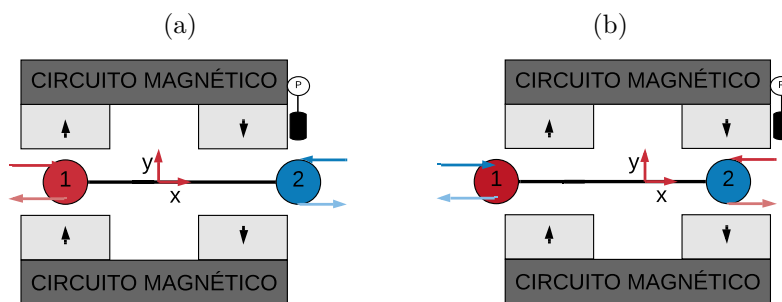
Figura 3.1 – Desenho esquemático do motor termomagnético e seus componentes: V é o transdutor de vazão volumétrica, T os termopares, S as válvulas solenoides, P os sensores de posição



O aparato experimental do motor será composto de dois TCMs defasados entre si em 180° e interligados por um eixo. Quando um TCM passa pelo período de aquecimento

do ciclo, o oposto passa pelo período frio, conforme a Figura 3.1. Na Figura 3.2, tem-se os TCM indicados por 1 e 2, e as temperaturas (dos fluxos e dos TCM) acima e abaixo da T_C indicados pelas cores vermelho e azul respectivamente. Na Figura 3.2a o TCM 2 encontra-se ferromagnético na região de campo baixo, sendo atraído para a região de campo alto, enquanto o TCM 1 está paramagnético. Logo, a força magnética move o TCM 2 para a região de campo alto e, conseqüentemente, o TCM 1 é movido para a região de campo baixo, ilustrado pela Figura 3.2b. Neste ponto, o TCM 1 é resfriado, e o TCM 2 aquecido, continuando o ciclo, até que a força magnética mova o TCM 1 para a região de campo alto e o TCM 2 para a região de campo baixo. Portanto, o motor tem o mesmo princípio de funcionamento proposto por Tesla, entretanto a utilização de uma mola ou da força gravitacional como força externa é substituída pelo balanço de forças magnéticas entre os dois TCMs em fases magnéticas distintas.

Figura 3.2 – Diagrama Esquemático do Ciclo do Motor



Os principais e mais complexos componentes do sistema são o TCM e o circuito magnético, os quais serão descritos em mais detalhes adiante. A fonte e sumidouro de calor utilizados no aparato são dois banhos térmicos da marca Quimis, Modelo Q214M2, com volume de 11 L e faixa de temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Os banhos possuem uma bomba de circulação com vazão de 6 L/min. As temperaturas de operação do banho são ajustadas ao redor da temperatura ambiente, sendo inicialmente proposta a utilização de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ na fonte quente e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ na fonte fria. O fluido de trabalho é uma mistura de água e etileno glicol (80/20%vol) para evitar o congelamento do fluido de trabalho e também reduzir oxidação dos componentes do aparato.

O sistema de bombeamento utiliza a própria bomba de circulação do banho (B na Figura 3.1), sendo a vazão regulada por um by-pass. As bombas estão conectadas ao sistema de distribuição dos escoamentos quente e frio. O sistema de distribuição é composto por válvulas solenoides (S na Figura 3.1) acionadas por sensores de posição (P na Figura 3.1). Tais sensores enviam um sinal aos solenoides indicando se o respectivo TCM está na região de campo baixo ou alto, e assim direciona o escoamento frio ou quente, respectivamente. Desta forma, o conjunto sensores de posição e solenoides é o que garante o sincronismo entre o ciclo magnético e os escoamentos.

A instrumentação é basicamente composta por termopares (T na Figura 3.1) tipo T, da Omega Instruments, alocados em diferentes pontos do experimento. A vazão é medida por dois transdutores de vazão volumétrica (V na Figura 3.1) do tipo turbina, modelo SPX-038 da Seametrics (com faixa de medição entre 0,27 a 18,9 L/min, com temperatura de operação entre 0 a 70 °C, e precisão de +/- 1 % de F.E.). Os transdutores de vazão são posicionados na saída das bombas de circulação. Por meio do uso do by-pass pode-se variar a vazão volumétrica utilizada no experimento, a qual será prontamente mensurada pelos transdutores de vazão. Por fim, são utilizadas células de carga para avaliar a força produzida pelo motor.

A aquisição de dados será feita através de arduino, que é um conjunto composto por um microcontrolador (hardware), e por um software (que pode ser desenvolvido na própria plataforma do arduino ou utilizando a linguagem Scilab/Matlab). O arduino pode controlar os componentes a ele conectados, como motores, válvulas e LEDs, bem como ler dados de entrada a partir de sensores, como termopares, transdutores de pressão ou vazão, sensores de posição, entre outros (GEDDES, 2017). O sistema realiza a leitura dos dados de temperatura dos termopares, vazão volumétrica dos transdutores de vazão e posição dos TCM e desta forma controla a entrada e saída dos fluxos quentes e frios a partir do fechamento e abertura de válvulas solenoide a ele conectadas, é também responsável por interpretar os resultados obtidos pelas células de carga convertendo os sinais elétricos em força.

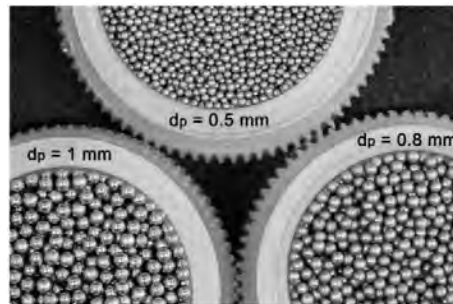
3.2 Trocador de Calor

O trocador de calor magnético, numa analogia com um motor convencional, atua como um pistão. O TCM trata-se de um meio poroso composto pelo material magnético processado em uma geometria definida alocado em uma carcaça. Um meio poroso com baixa porosidade, em geral, possui elevada área superficial de transferência de calor, o que aumenta as taxas de transferência de calor, e conseqüentemente, a frequência de operação do motor. Por outro lado, à eles estão associados maiores perdas viscosas.

No presente trabalho é utilizado um leito fixo de esferas de gadolínio (Gd) compactadas (Figura 3.3). As esferas possuem diâmetro entre 500 μm e 850 μm , e são empacotadas em tubo de fibra de vidro G10 com dimensões de 19,05 mm ID (diâmetro interno) e 82 mm de comprimento. O leito é mantido compactado por meio do uso de acopladores (Figura 3.4), os quais foram projetados seguindo o trabalho de Trevizoli (2015).

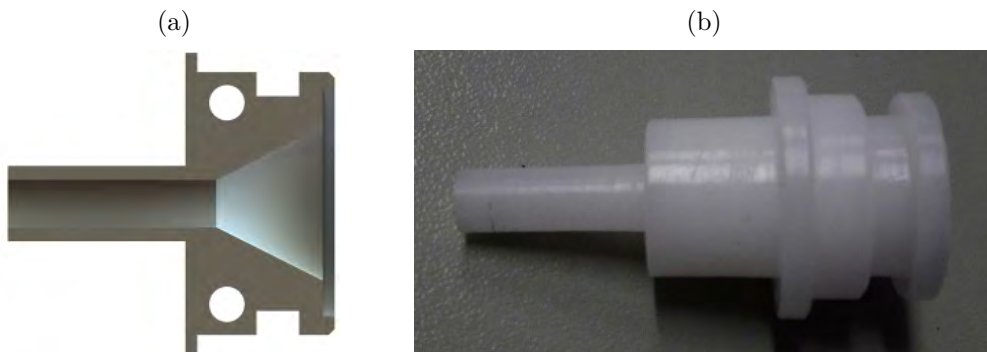
A conexão entre os acopladores e a tubulação que distribui os escoamentos quente e frio é feita por engates rápidos. Um adaptador em U, de aço inox, conecta a estrutura do TCM às guias lineares. Esta última garante que o TCM, ao interagir com o campo aplicado, se movimente apenas ao longo do eixo-x, com baixo atrito, e não se desloque nas

Figura 3.3 – Esferas de diferentes diâmetros



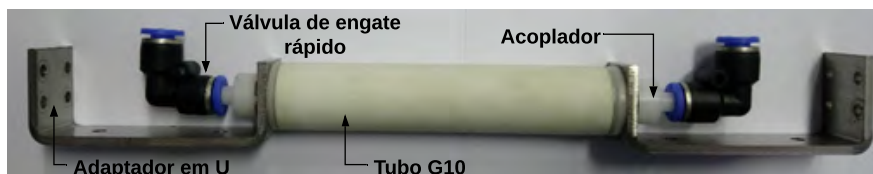
Fonte: Trevizoli (2015)

Figura 3.4 – Acoplador



Fonte: Trevizoli (2015) e Autor (2018)

Figura 3.5 – Trocador de Calor Magnético (TCM)



demais direções. Caso o TCM tenha um deslocamento, mesmo pequeno, no eixo-y pode resultar em obstruções ao movimento linear no eixo-x, ou o TCM pode entrar em contato com uma das faces do polo magnético e gerar atrito. A Figura 3.5 apresenta a estrutura do trocador de calor, incluindo os adaptadores em U nas extremidades para a fixação nas guias lineares, o tubo de G10 onde são empacotadas as esferas de Gd, os acopladores e os engates rápido.

3.3 Empacotamento Leito Poroso de Esferas

O procedimento de empacotamento seguiu o trabalho de [Trevizoli \(2015\)](#), e é explicado a seguir.

1. Inicialmente pesou-se uma quantidade determinada de esferas de Gd;
2. Cortou-se telas finas de aço inoxidável, com malha 80, e as colou no bocal do acoplador;
3. Montou-se um dos acopladores em uma das extremidades do tubo de G10 e o fixou com os parafusos de aço inoxidável não magnético. Os acopladores possuem o-rings para evitar o vazamento de fluido de trabalho.
4. A partir das esferas previamente pesadas, adicionam-se pequenas quantidades delas no interior do tubo de G10;
5. Utilizando um pilão compactam-se as esferas no tubo;
6. Repetem-se os passos (4) e (5) até o completo preenchimento;
7. Monta-se o outro acoplador e sela-se o TCM.

Após o selamento do TCM, mede-se a massa das esferas remanescentes. Pelo uso das massas inicial e final, calcula-se a porosidade por:

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{V_{Gd}}{V_{Cil}} \right) \quad (3.1)$$

sendo, V_{Gd} o volume de gadolínio empacotado e V_{Cil} o volume do cilindro na região de empacotamento.

Devido à divergências em relação à construção do circuito magnético, foram necessários comprimentos diferentes entre os trocadores de calor, entretanto, a porosidade resultante ficou bastante próxima, em torno de 37%, os dados referentes ao empacotamento dos TCMs são apresentados na Tabela 3.1,

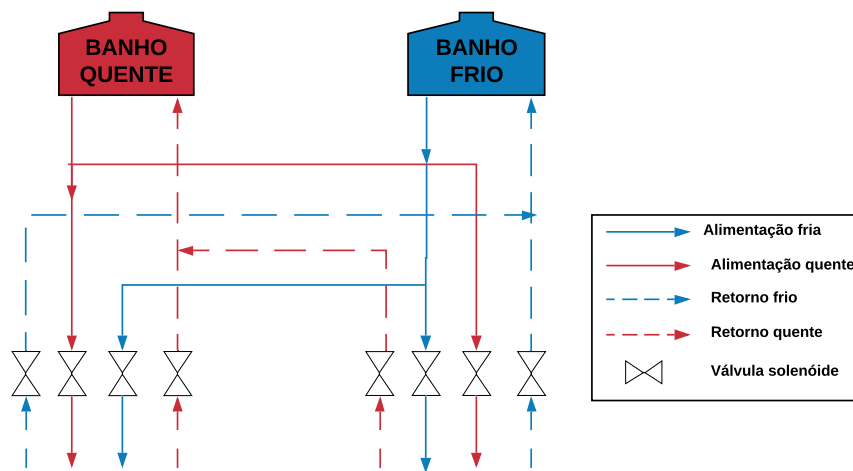
Tabela 3.1 – Trocador de Calor Magnético

TCM	Comprimento Cilindro (mm)	Volume Cilindro (mm^3)	Massa Gd (g)	Volume Gd (mm^3)	Porosidade (%)
1	80.8	2.30 E-5	114.63	1.45 E-5	37
2	83.3	2.38 E-5	118.00	1.49 E-5	37.13

3.4 Sistema de Bombeamento para Aquecimento e Resfriamento

O sistema de bombeamento para o aquecimento e resfriamento do TCM é composto por mangueiras com isolamento térmico de borracha elastomérica, conexões de engate rápido e as válvulas solenoides. A Figura 3.6, apresenta o esquema da montagem, onde as flechas indicam a direção do fluxo, as linhas vermelhas indicam água quente e as linhas azuis indicam água fria.

Figura 3.6 – Esquema de Ligação do Sistema de Aquecimento e Resfriamento



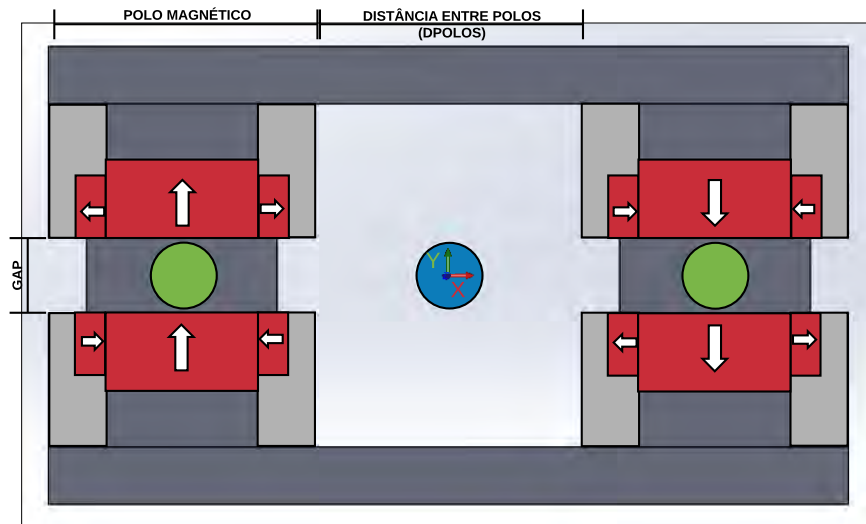
3.5 Circuito Magnético

O projeto e procedimento de montagem do circuito magnético foram adaptados do trabalho de Schafer (2016), desenvolvido na Universidade de Victoria (Canadá). O circuito magnético projetado tem a configuração de duplo C, conforme ilustra a Figura 3.7, e trata-se de uma associação de blocos de ímãs permanentes de NdFeB (blocos vermelhos na Figura 3.7, onde as flechas brancas indicam a direção da remanência) montados em um arranjo Halbach. Para fechar o circuito e guiar as linhas de fluxo magnético entre os dois polos magnéticos, um material ferromagnético mole com alta permeabilidade relativa (μ_r), como Fe, FeCo ou Ligas de aço, é utilizado, conforme as regiões em cinza escuro na Figura 3.7. As regiões em cinza claro na Figura 3.7 são de materiais paramagnéticos com função apenas estrutural.

O presente projeto utiliza três diferentes tipos de blocos de ímãs permanentes, os quais são empregados com diferentes propósitos, e são nomeados conforme segue:

- Ímãs Principais - indicados por polos norte e sul na Figura 3.8, são os maiores blocos na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Circuito magnético em Duplo C. Os blocos vermelhos com as setas brancas representam o circuito magnético; as setas indicam o sentido da remanência; em cinza escuro tem-se o material ferromagnético mole utilizado para guiar as linhas de fluxo magnético



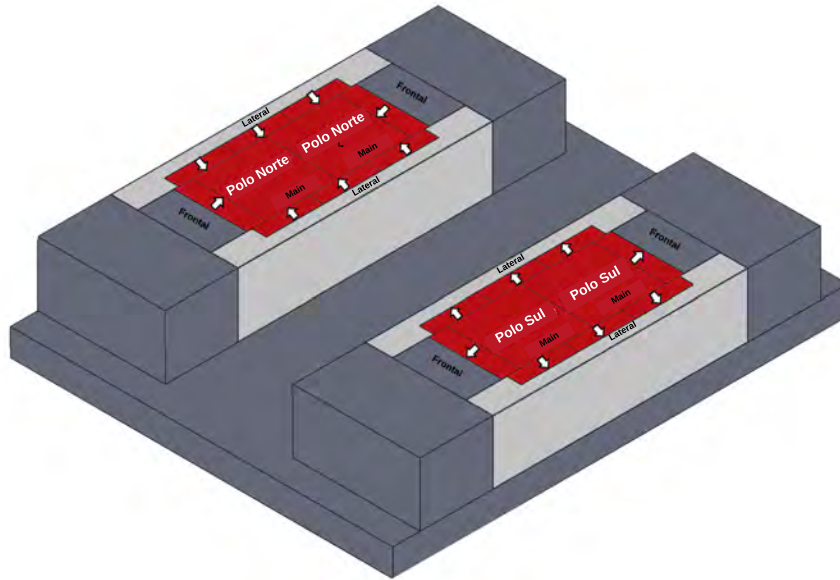
- Concentradores Laterais - indicados por lateral na Figura 3.8, são os menores blocos na Figura 3.7.
- Concentradores Frontais - que não aparecem na Figura 3.7.

Os Ímãs Principais são posicionados no centro do polo magnético e são os responsáveis por gerar o campo magnético, em uma direção principal e em um volume específico (como na região do círculo verde na Figura 3.7). Os ímãs concentradores (laterais e frontais) são utilizados para reduzir os efeitos de borda, e assim, garantir um campo magnético mais intenso e homogêneo no volume de campo gerado.

O parâmetro de projeto tomado como função objetivo para o dimensionamento do circuito magnético foi obter uma intensidade de fluxo magnético em torno de 1 T para um gap magnético de 25,4 mm (1"). Logo, os blocos de ímãs permanentes de NdFeB e os materiais ferromagnético moles foram inicialmente selecionados para que o circuito projetado atingisse o critério da função objetivo. Por outro lado, como o circuito magnético foi construído na Universidade Estadual de Maringá, a seleção final destes materiais foi realizada a partir da sua disponibilidade em território brasileiro e, preferencialmente, no comércio local, para reduzir despesas com fretes.

Deste modo, ao longo do desenvolvimento do projeto, a maioria das dimensões do circuito magnético, bem como as propriedades dos ímãs permanentes, foram frequentemente ajustadas de acordo com os tamanhos de blocos e tipos de NdFeB disponíveis.

Figura 3.8 – Detalhe da distribuição dos blocos de ímã permanente no arranjo Halbach. Os blocos vermelhos com as setas brancas representam o circuito magnético; as setas indicam o sentido da remanência; em cinza escuro tem-se os materiais ferromagnéticos moles útil



Posteriormente, as configurações obtidas foram avaliadas por meio de simulações em duas dimensões em COMSOL Multiphysics. A Tabela 3.2 resume as dimensões, tipo, remanência e máxima temperatura de operação dos ímãs permanentes de NdFeB selecionados os quais, segundo as simulações realizadas, mais se aproximaram da função objetivo deste projeto.

Tabela 3.2 – Ímãs Permanentes selecionados (NdFeB) e suas propriedades

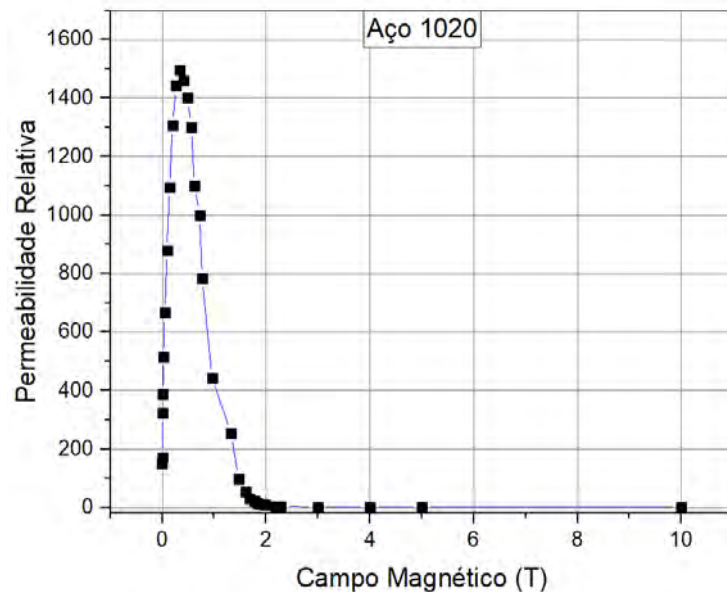
Função	Tamanho (mm)	Categoria	Remanência (T)	Max. Temp de Operação (°C)
Principal	50,8x50,8x25,4	N50	1,41	70
Frontal	50,8x25,4x12,7	N50	1,41	70
Lateral	40x20x10	N42	1,32	70

Após a seleção dos ímãs permanentes, foram feitas diversas simulações em duas dimensões no COMSOL Multiphysics para selecionar o material ferromagnético mole mais adequado. Foram estudados os aços 1006, 1008, 1010, 1018 e 1020. Para simular os diferentes tipos de aços, foi implementada dentro da rotina iterativa do COMSOL Multiphysics a sua respectiva curva de permeabilidade relativa (μ_r) em função da densidade de fluxo magnético (FIELD PRECISION LLC, 2017)¹. Os resultados obtidos para os diferentes

¹ Consultado em <http://www.fieldp.com/magneticproperties.html> em setembro de 2017

aços não apresentaram diferenças significativas quanto à intensidade do campo magnético gerado e sua distribuição no gap magnético. Por outro lado, apenas o aço 1020 foi encontrado em fornecedores locais. A Figura 3.9 apresenta a curva característica de μ_r em função da densidade de fluxo magnético do aço 1020.

Figura 3.9 – Dependência da permeabilidade relativa com o campo magnético para o aço 1020



3.6 Dimensionamento do Circuito Magnético Utilizando o COM-SOL Multiphysics

3.6.1 Simulação Bidimensional (2D)

A Figura 3.7 apresenta o modelo 2D utilizado na simulação. Novamente, a estrutura cinza escura é o aço 1020 e os ímãs permanentes estão em vermelho. Como parâmetros iniciais, é necessário implementar a intensidade da remanência (conforme Tabela 3.2) e sua direção (ilustrada nas Figura 3.7 e Figura 3.8 pelas setas brancas) para cada bloco de ímã permanente, bem como o valor da permeabilidade relativa dos ímãs permanentes ($\mu_r = 1,05$) e do aço 1020, conforme descrito anteriormente. O círculo verde (Figura 3.7) indica os trocadores de calor onde o material magnético está alocado na região de campo alto (região de interesse), e o círculo azul (Figura 3.7) na região de campo baixo. Deste modo, a máxima intensidade de campo magnético é obtida por meio de uma média na área do círculo verde, e a mínima intensidade pela média no círculo azul. Por fim, para configurar as condições de contorno de forma apropriada, o circuito magnético foi envolto por uma área quadrada contendo ar com as dimensões de 5080x5080mm.

As simulações em 2D foram feitas utilizando o software COMSOL Multiphysics (v. 5.3, AC/DC module, magnetic fields, no currents formulation). O problema magneto-estático é modelado por meio das seguintes equações::

$$H = -\nabla V_m \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r H + B_r) = 0 \quad (3.3)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H + B_r \quad (3.4)$$

sendo V_m o potencial escalar magnético, H o campo magnético, μ a permeabilidade magnética (o subscrito r é relativo, e 0 significa no vácuo), B a densidade de fluxo magnética, B_r a remanência. A simulação 2D foi feita utilizando uma malha de cerca de 10114 elementos com uma qualidade de elemento média de 0,894. O critério de convergência adotado foi 10^{-5} .

Conforme discutido na seção anterior, inicialmente a simulação 2D foi realizada para selecionar o material ferromagnético mole. Em seguida, por meio de um estudo paramétrico foi possível determinar as dimensões finais do circuito magnético do ímã: altura do gap magnético (GAP na Figura 3.7); e a distância entre polos (D_{polos} na Figura 3.7). Para realizar tal estudo, seguiu-se a seguinte estratégia: (a) para um GAP fixo de 25,4mm, D_{polos} foi variado de 44,45mm até 181,6mm em passos de 13,715mm; (b) para um D_{polos} fixo de 88,9 mm, o GAP foi variado de 12,7 mm até 38,1 mm em passos de 1,5875mm. Como já explicado anteriormente, as funções objetivadas para o campo magnético são:

- (i) média na área da densidade de fluxo magnético alto (círculos verdes na Figura 3.7) próximas de 1 T;
- (ii) média em área da densidade de fluxo magnético baixo (círculo azul na Figura 3.7) o mais próximo possível de 0 T.

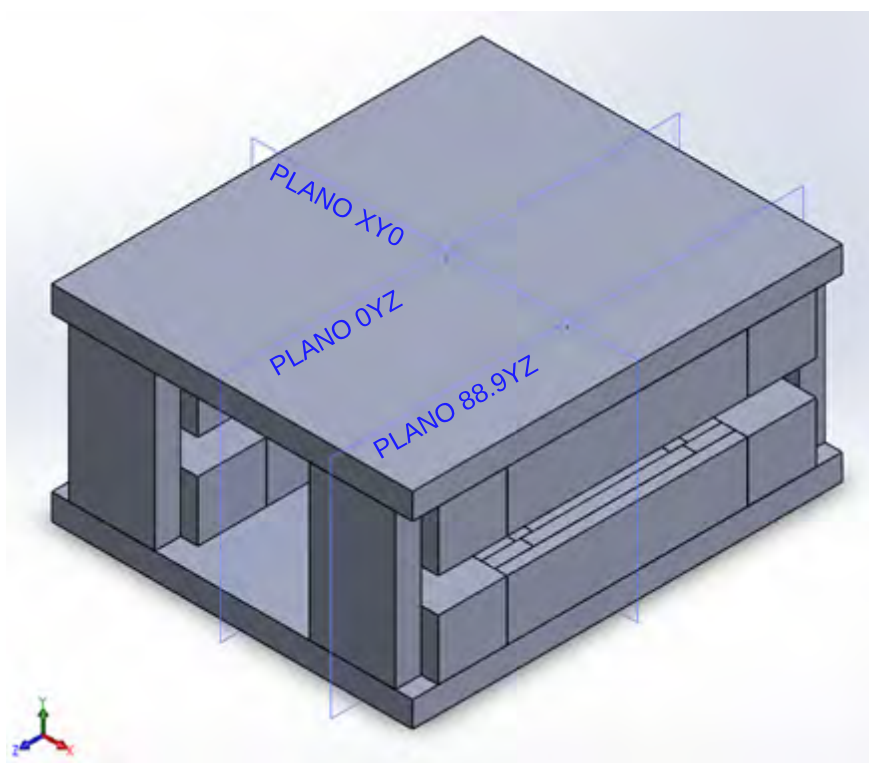
3.6.2 Simulação Tridimensional (3D)

As dimensões finais do circuito magnético, as quais resultaram do estudo paramétrico 2D, foram implementadas no SolidWorks 2017 no modelo 3D apresentado nas Figuras 3.10 e 3.11. O modelo tridimensional foi posteriormente importado para o software COMSOL Multiphysics (v. 5.3, AC/DC module, magnetic fields, no currents formulation) e uma simulação final foi realizada. Os resultados numéricos obtidos por meio das simulações 3D são mais realistas, uma vez que efeitos de borda são levados em conta e, assim,

pode-se avaliar os perfis longitudinal e transversal do campo magnético. Tais informações são fundamentais para obter as dimensões finais, comprimento e diâmetro, do TCM. Além disso, é possível avaliar os campos magnéticos máximos e mínimos utilizando uma média no volume do corpo cilíndrico do TCM (seria o equivalente em 3D do círculo verde na Figura 3.7).

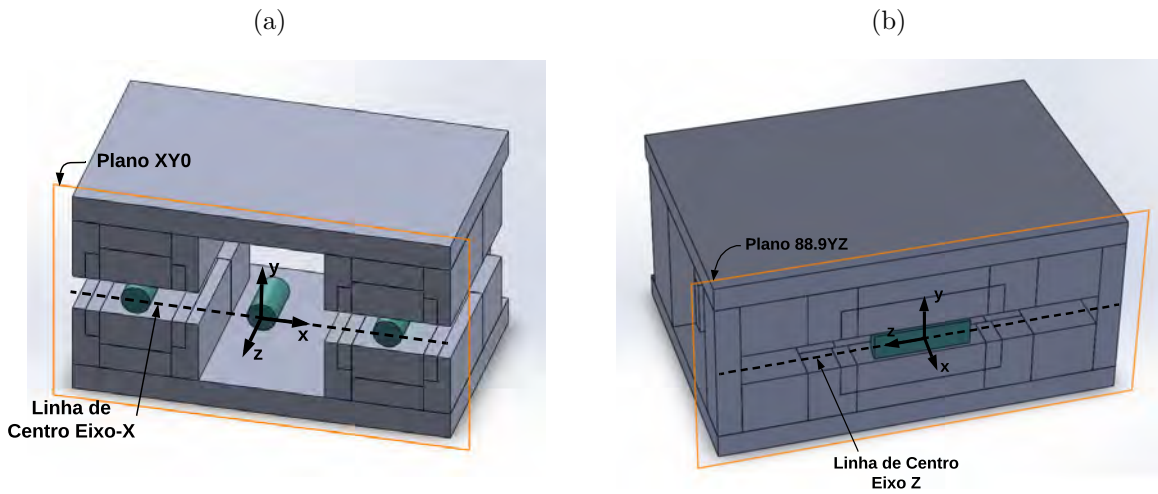
A formulação magneto-estática é a mesma apresentada nas Equações 3.2; 3.3 e 3.4. Para implementar as condições de contorno de forma adequada, foi definido um bloco de ar com as dimensões de 400 x 300 x 300 mm em volta do circuito magnético. A malha utilizada nas simulações tridimensionais possui 495.919 elementos tetraédricos com qualidade média dos elementos de 0,70. O critério de convergência adotado de 10^{-5} .

Figura 3.10 – Modelo 3D em SolidWorks simplificado



Na Figura 3.10 são mostrados três diferentes planos de corte: (1) Plano XY0, também apresentado na Figura 3.11a, que permite analisar a distribuição da densidade de fluxo magnética ao longo do eixo x (linha central); (2) Plano 0YZ; (3) Plano 88.9YZ, também apresentado na Figura 3.11b, que permite analisar a densidade de fluxo magnética da região de campo alto ao longo do eixo z (longitudinal). A distribuição da densidade de fluxo nos planos XY0 e 88.9YZ são fundamentais para o projeto do TCM. Além disso, estas informações podem ser utilizadas como parâmetros de entrada em modelos matemáticos para simular o motor termomagnético.

Figura 3.11 – Detalhes dos planos de corte XYZ0 e X88.9YZ, incluindo as linhas de centro do eixo-x e do eixo-z



3.7 Cálculo da Força

Segundo Gama et al. (2016), a força magnética pode ser determinada pela Equação (3.5). Observe que esta equação considera a força magnética apenas na direção x .

$$F = VM \frac{dB}{dx} \quad (3.5)$$

Portanto, a força produzida por um motor termomagnético é diretamente proporcional ao volume de material magnético, V , à magnetização, $M(H_{res}, T)$, do material magnético (a qual é função do campo resultante interno, H_{res} , e da temperatura, T) e à variação da densidade de fluxo aplicado, B , na direção transversal x . H_{res} é abordado na próxima seção. O volume de material magnético é calculado por:

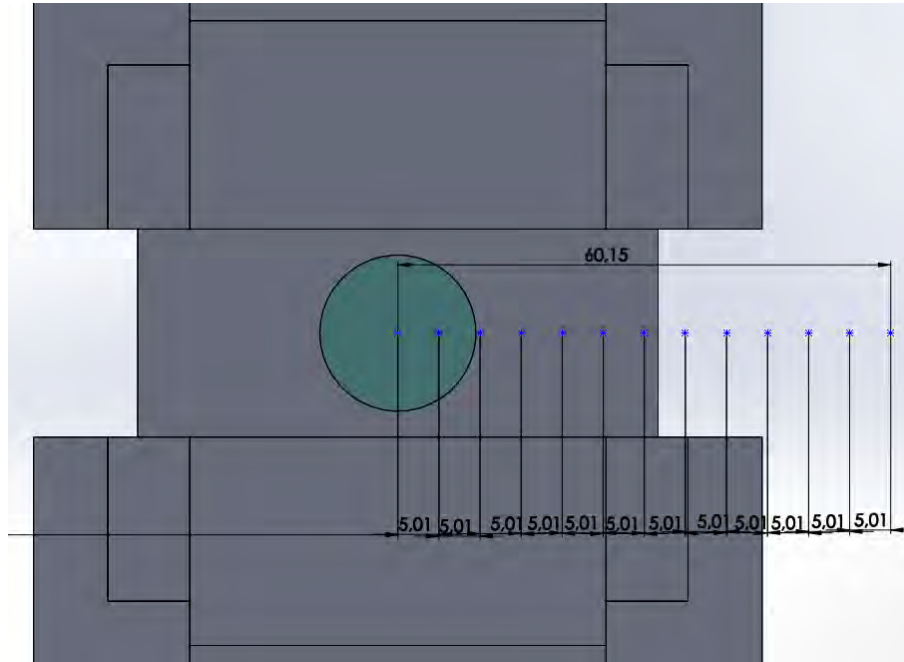
$$V = V_{cil}(1 - \varepsilon) \quad (3.6)$$

sendo V_{cil} o volume do trocador de calor magnético, calculado a partir do diâmetro interno do TCM (\emptyset), e de seu comprimento útil (L). A porosidade (ε), neste caso, é 0.37 conforme a Tabela 3.1.

A Equação 3.5 foi utilizada tanto para avaliar a força magnética experimental como a teórica. Para o cálculo da força teórica, foram realizadas novas simulações com o objetivo de determinar a densidade de fluxo média no volume do TCM para as 12 posições, espaçadas em 5,0125 mm, apresentadas na Figura 3.12.

Os resultados obtidos possibilitaram encontrar a distribuição da densidade de fluxo magnético médio no volume em função da posição transversal x . Em seguida, utilizando

Figura 3.12 – Posicionamentos do cilindro para a medição de densidade de fluxo



um software matemático, encontrou-se uma equação ajustada para tais dados, a qual permitiu, por fim, calcular $\frac{dB}{dx}$ a ser utilizado na Equação 3.5.

3.7.1 Campo Desmagnetizante Interno

Segundo Furlani (2001), quando um material magnético está sob a ação de um campo magnético externo, o campo magnético resultante, H_{res} , é diferente do campo magnético aplicado, H_{ap} . Isso ocorre devido ao campo desmagnetizante interno, H_{dem} , o qual depende da magnetização, M , e do fator de desmagnetização, N , sendo este último um parâmetro que depende da geometria do material magnético (COEY, 2010).

$$H_{res} = H_{ap} - H_{dem}(H_{ap}, T) \quad (3.7)$$

$$H_{res} = H_{ap} - NM(H_{ap}, T) \quad (3.8)$$

O campo aplicado (H_{ap}) pode ser calculado a partir da densidade de fluxo média.

$$H_{ap} = \frac{B}{\mu_0} \quad (3.9)$$

O fator de desmagnetização total, N , do trocador de calor, é uma combinação do fator de desmagnetização de uma esfera, $N_{D,geo} = 1/3$, com o fator desmagnetizante da

geometria do invólucro que envolve o meio poroso, $N_{D,invólucro}$, neste caso, um cilindro oco. O valor de $N_{D,invólucro}$ foi calculado de acordo com a equação proposta por Sato e Ishii (1989).

$$N = N_{D,geo} + (1 - \varepsilon)(N_{D,invólucro} - N_{D,geo}) \quad (3.10)$$

3.7.2 Cálculo da Magnetização

A magnetização está presente tanto para o cálculo do campo resultante (Eq. 3.8) como da força magnética (Eq. 3.5). Para determinar o valor da magnetização em função da temperatura e campo resultante, foi utilizada a Teoria dos Campos Médios - Mean Field Theory (MFT) ((MORRISH, 2001) e (DINESEN, 2004)), sendo $M(T, H)$ calculada por:

$$M(T, H) = N_s g J \mu_b \rho B_J(\chi) \quad (3.11)$$

em que N_s é o número de spins magnéticos por unidade de massa, g é o fator de Landè, J é a quantidade de momento angular total, μ_b é o magneton de Bohr, ρ a densidade. Por fim, B_J é a função de Brillouin e χ a susceptibilidade magnética, os quais são calculados iterativamente por meio das Eq. (3.12) e (3.13).

$$B_J(\chi) = \frac{2J+1}{2J} \coth\left(\frac{2J+1}{2J}\chi\right) - \frac{1}{2J} \coth\left(\frac{1}{2J}\chi\right) \quad (3.12)$$

$$\chi(H, B_J) = \frac{gJ\mu_b\mu_0 H}{k_B T} + \frac{3T_c J}{T(J+1)} B_J(\chi) \quad (3.13)$$

sendo que k_B é a constante de Boltzman e μ_0 a permeabilidade do vácuo. Todas as constantes e valores para as propriedades independentes são descritos na Tabela 3.3. Os valores para N_s , g , J , e T_C são respectivos ao Gd, material utilizado nos experimentos.

O MFT foi implementado em uma rotina no software Matlab, o que permitiu calcular a magnetização em função da temperatura e do campo magnético, conforme apresenta a Eq. (3.11). O campo magnético H utilizado, pode ser tanto o campo magnético aplicado (estudo simplificado) como o campo magnético resultante (Eq. 3.8) para um estudo mais elaborado. Na seção de resultados serão consideradas as duas possibilidades para fins comparativos.

3.8 Medição do Campo Magnético

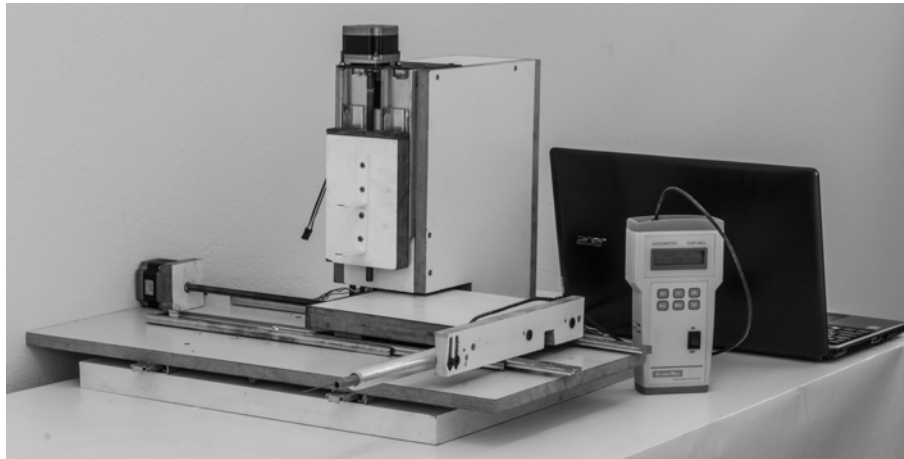
Após a construção do circuito magnético, melhor detalhado no Apêndice A, foi realizada a caracterização da densidade de fluxo magnético em diferentes posições do

Tabela 3.3 – Constantes

Símbolo	Nomenclatura	Valor	Unidade
N	Fator de Desmagnetização	0.417	-
N_s	Número de spins magnéticos por unidade de massa	3.83 E24	kg^{-1}
g	Fator de Landé	2	-
J	Momento Angular	3.5	\hbar
μ_b	Magneton de Bohr	9.27 E-24	Am^2
ρ	Densidade	7901	kg/m^3
μ_0	Permeabilidade do Vácuo	4π E-7	N/A^2
k_B	Constante de Boltzmann	1.38 E-23	J/kg
T_C	Temperatura de Curie	293	K

circuito. Para isto, foi utilizado um equipamento CNC disponível na UEM, capaz de se movimentar nas 3 direções (X, Y, Z), e um gaussímetro da MagTek (com precisão de 2% + 1% do F.E.) acoplado a uma sonda Hall do tipo TLMP-T2 da MagTek capaz de medir campos de até 2 T. O conjunto CNC e gaussímetro é apresentado na Figura 3.13.

Figura 3.13 – CNC e Gaussímetro



Para realizar as medições necessárias, fixou-se o plano central do gap magnético X0Z, ou seja, $Y = 0$, como a região de interesse. Assim varreu-se os eixos X e Z, em espaçamento de 5 mm, na faixa de $-140 \leq X \leq 140$ mm e $-90 \leq Z \leq 90$ mm, totalizando 2.109 pontos de medição ao longo do plano X0Z, conforme ilustra a Figura 3.14. Contudo, após feitas as primeiras medições, verificou-se a necessidade de diminuir o espaçamento entre pontos medidos na direção X e Z para aumentar a resolução da medida e garantir uma melhor comparação com os resultados da simulação obtidos durante o projeto do circuito magnético. Deste modo, fixou-se $Y = 0$ e $Z = 0$, varrendo, o eixo X na faixa de $-140 \leq X \leq 140$ mm com incrementos de 2 mm, conforme ilustra a Figura 3.15. Da mesma

forma, fixou-se $Y = 0$ e $X = 88,9$ mm (centro do polo magnético), varrendo o eixo Z na faixa de $-90 \leq Z \leq 90$ mm com incrementos de 2 mm.

Figura 3.14 – Malha para a medição da densidade de fluxo magnética no plano XOZ

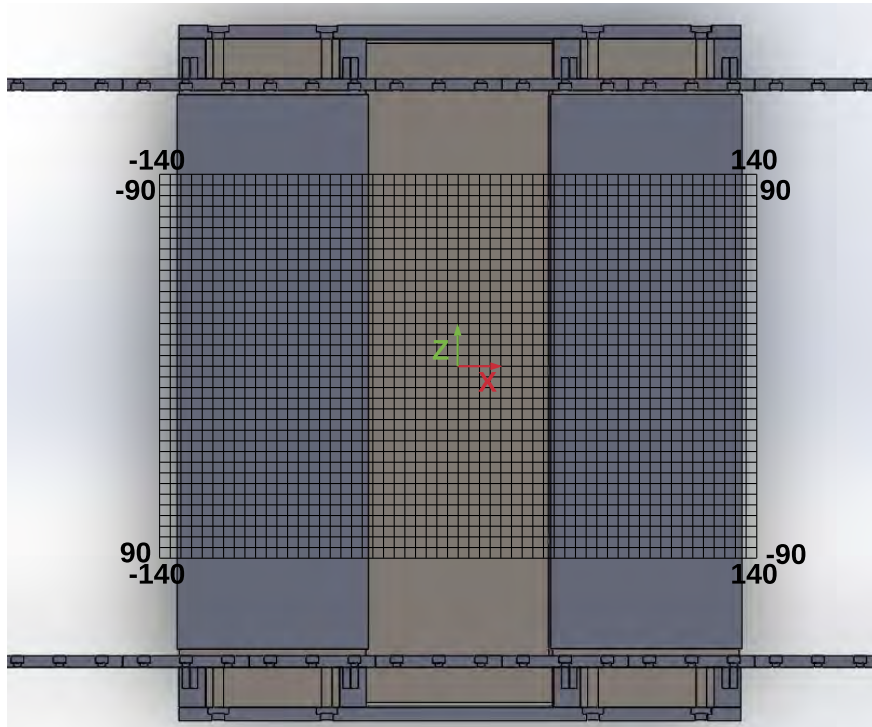
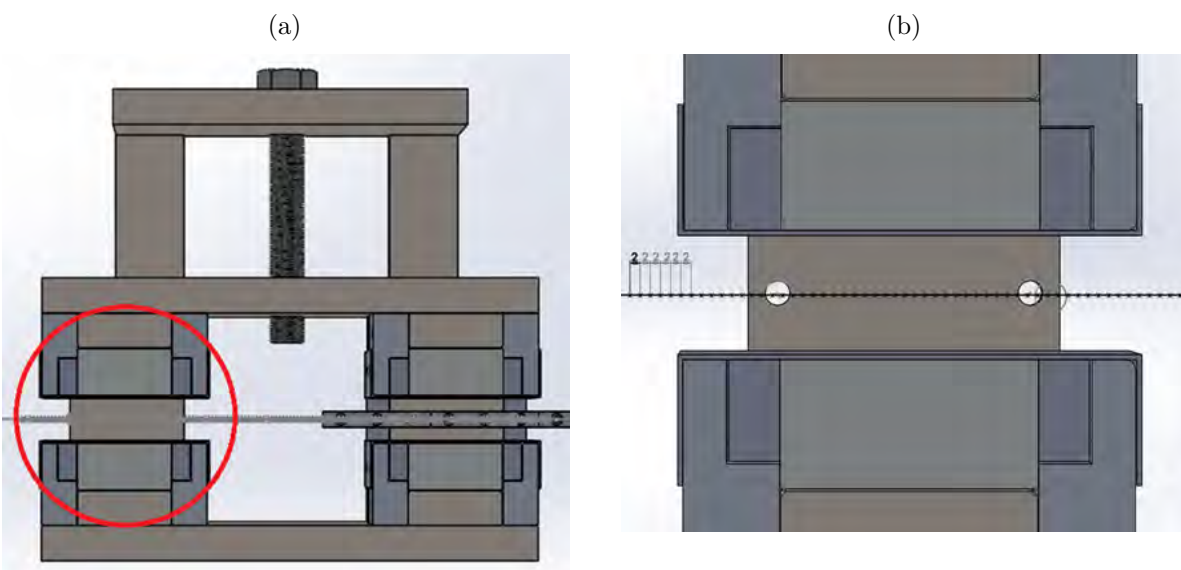


Figura 3.15 – Malha para a medição no plano $XY0$ (a) Malha completa (b) malha em detalhe para apenas um dos polos magnéticos



Logo após as medições foram avaliadas as incertezas experimentais, seguindo o procedimento indicado por [Holman \(2012\)](#). Os dados para a incerteza de medição do

campo magnético foram obtidos a partir do catálogo do fabricante (Magtek). Deste modo, foi assumida uma distribuição retangular, com 68% de confiabilidade e graus de liberdade infinito. Assim, chega-se ao seguinte equacionamento para avaliar as incertezas.

$$u_{c,med} = \frac{2}{100} \frac{1}{\sqrt{3}} (V_{mx}); v = \infty \quad (3.14)$$

sendo que $u_{c,med}$ é a incerteza combinada medida, V_{mx} é o valor máximo medido, e a incerteza desta variável, segundo o catálogo da MagTek, é de 2%.

$$u_{c,fe} = \frac{1}{100} \frac{1}{\sqrt{3}} (FE); v = \infty \quad (3.15)$$

sendo que $u_{c,fe}$ é a incerteza combinada fundo de escala, FE é o fundo de escala, e a incerteza desta variável, segundo o catálogo da MagTek, é de 1%. Combinando as duas incertezas (u_c), chega-se a,

$$u_c = \sqrt{u_{c,med}^2 + u_{c,fe}^2} \quad (3.16)$$

Por fim, encontra-se a incerteza expandida (U_c) assumindo distribuição normal, com 95% de confiabilidade e graus de liberdade infinito. Logo, o t-Student para este caso é de 2, e U_c é calculada por,

$$U_c = 2u_c \quad (3.17)$$

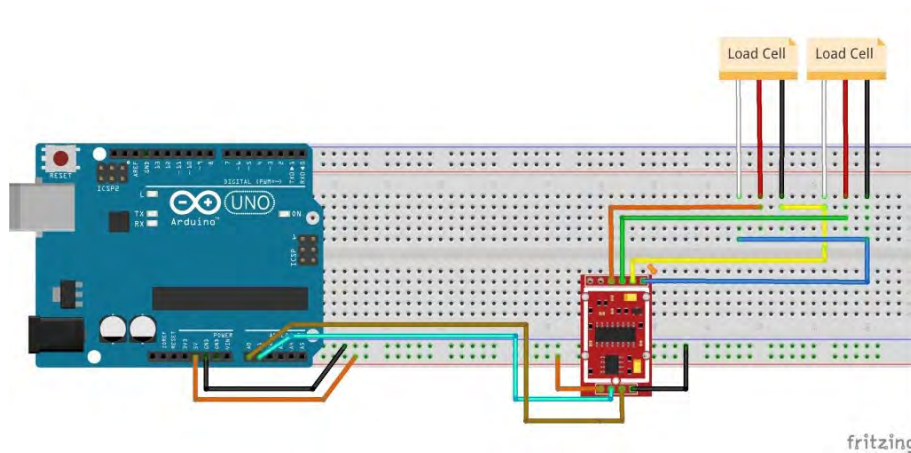
3.9 Medição do Diagrama de Forças Estáticas

O diagrama de forças estáticas do sistema proposto é composto por três parâmetros: a posição do TCM em relação ao centro do polo magnético (o que, na realidade representa a intensidade do campo magnético aplicado), a temperatura e a força magnética. Cada um destes parâmetros foram caracterizados de diferentes formas, explicadas a seguir.

Para a medição da força foram utilizadas duas células de carga com capacidade de 50 kg cada, acopladas à um módulo amplificador de sinal modelo HX711, e um arduino modelo Mega 2560. As células de carga foram previamente calibradas por meio de pesos padrão, e a sua incerteza de medição é de ± 5 N. O esquema de ligação encontra-se na Figura 3.16.

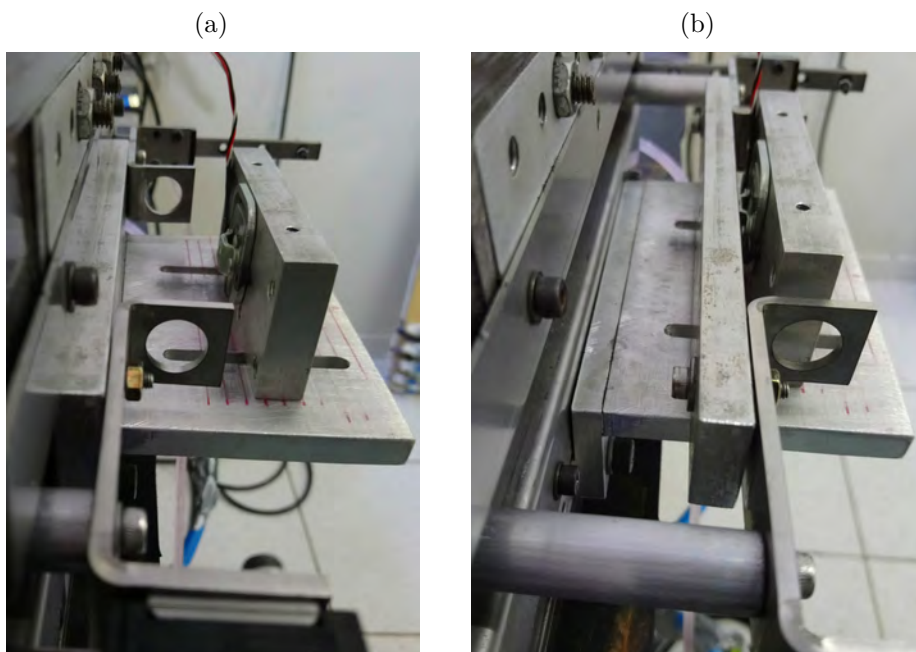
Já o controle e medição da temperatura é realizado por meio dos banhos térmicos e de termopares tipo T, respectivamente. A faixa de temperatura utilizada na presente análise foi de 0 °C a 50 °C, com incrementos de 5 °C. A leitura dos termopares também

Figura 3.16 – Esquema de ligação Célula de Carga, Módulo HX711 e Arduino



Fonte: Eletrogate Blog

Figura 3.17 – Aparato para medição de força (a) aparato posicionado (b) medição



é feita pelo arduino, e a incerteza relacionada a temperatura é de ± 0.7 °C, de acordo com o catálogo. Por fim, para o controle do posicionamento do TCM, foi projetado um dispositivo, apresentado na Fig. 3.17, o qual permite posicionar as células de carga na posição desejada na faixa de 0 mm (centro do polo magnético) até 45 mm de distância do centro, com passos de 5 mm. A incerteza relacionada ao posicionamento da célula de carga é de ± 1 mm. Assim sendo, para cada posição da célula de carga, varre-se a temperatura na faixa apresentada e mede-se a força.

3.10 Medição da Frequência de Operação

Após a medição das forças estáticas, fez-se a montagem completa do aparato do motor, com isso, verificou-se inicialmente sua frequência de operação. A medição da frequência se deu a partir da filmagem do funcionamento do motor, juntamente com a posterior análise *frame a frame* de sua movimentação. Desta forma, foi possível verificar os tempos de duração para cada ciclo e avaliar sua frequência de funcionamento.

Inicialmente, o controle das válvulas solenoides foi feito por meio do uso de um sensor de posição. De acordo com o posicionamento dos TCMS, o sensor enviava um sinal para abrir ou fechar as válvulas, controlando assim os fluxos quente e frio. Assim sendo, independentemente da vazão e temperatura da operação do motor, o seu funcionamento era garantido de acordo com a posição dos TCMS.

Entretanto, foi constatado durante a realização de testes preliminares, cujas vazão e temperaturas eram fixas, que o motor poderia operar em frequências mais altas quando as válvulas eram acionadas por meio de uma programação, onde os períodos do ciclo eram pré-estabelecidos. Nesse caso, substituiu-se os sensores de posição pela programação desenvolvida. O tempo de programação utilizado, para as vazão e temperaturas fixas, foi determinado por meio de ensaios variando-se os períodos do ciclo (quente e frio) até encontrar os seus respectivos valores mínimos que garantissem o funcionamento adequado do motor.

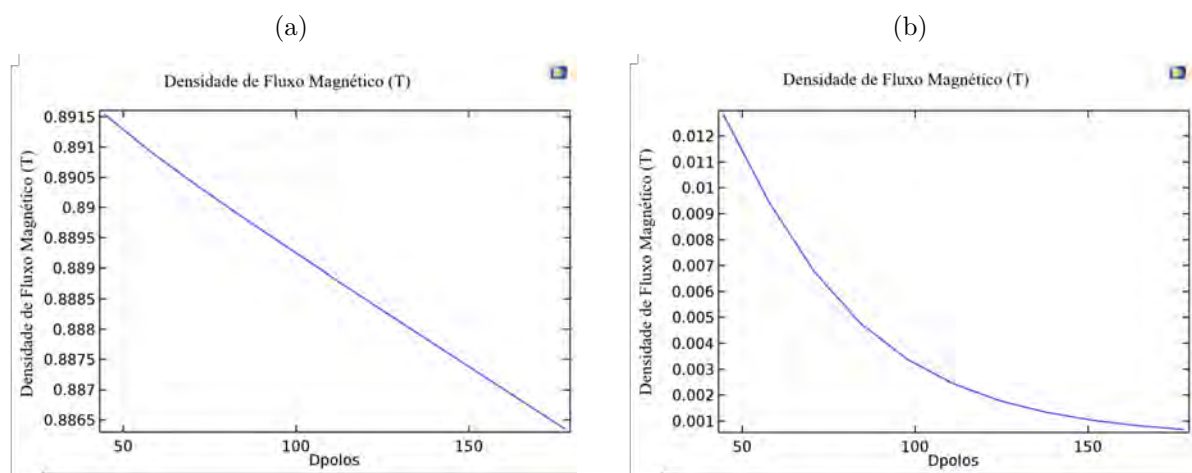
4 Resultados e Discussão

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos seguindo a metodologia previamente explicada. Para a análise dos resultados, definiu-se como resultados teóricos os provenientes das simulações, e os comparou-se com os resultados obtidos experimentalmente.

4.1 Simulação Bidimensional (2D)

A Figura 4.1 mostra os resultados da densidade de fluxo magnético em função da distância entre polos, D_{polos} , parametrizada. A Figura 4.1a são valores médios para a região de campo alto (círculo verde na Figura 3.7), e a Figura 4.1b para a região de campo baixo (círculo azul na Figura 3.7). Pode-se verificar que a dependência da densidade de fluxo magnética com D_{polos} é pequena, ou seja, qualquer uma das distâncias D_{polos} simuladas satisfazem as funções objetivos (i) e (ii), apresentadas na Seção 3.6.1. Assim, foi selecionada a dimensão $D_{polos} = 88,9$ mm, a qual julgou-se ser suficiente para permitir o trabalho e o manuseio de ferramentas no interior do circuito magnético durante a montagem do motor termomagnético, ao passo que não é demasiadamente grande, reduzindo o peso total do ímã.

Figura 4.1 – Resultado da simulação 2D para uma média em área da densidade de fluxo magnético como função da distância entre polos parametrizada: (a) Para a região de alto campo; (b) Para a região de baixo campo

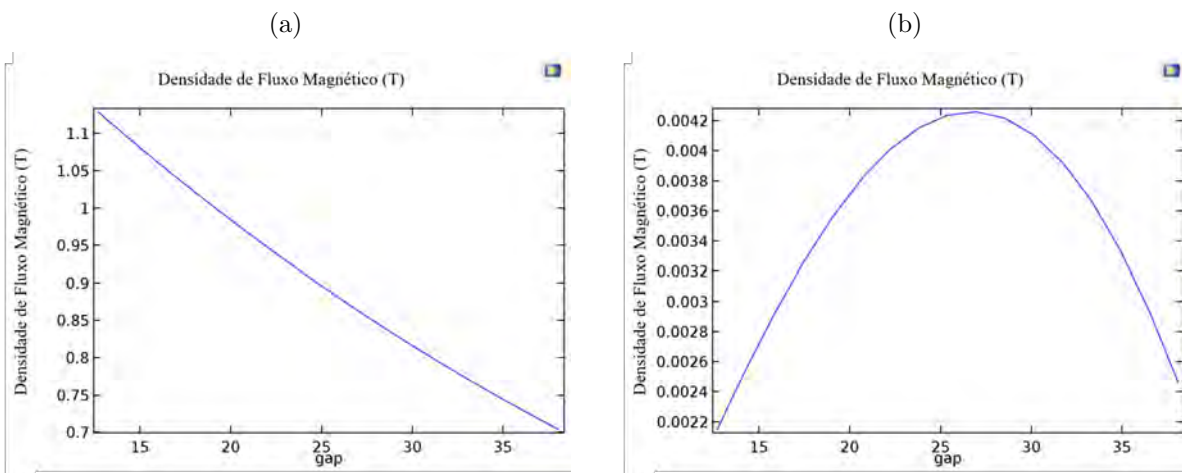


A Figura 4.2 mostra o resultado da densidade de fluxo magnético em função do gap magnético parametrizado. Novamente, a Figura 4.2a são valores médios para a região de campo alto e a Figura 4.2b para a região de campo baixo. Como esperado, o campo magnético mais alto é observado para menores gaps magnéticos, enquanto a região de

baixo campo magnético apresenta uma variação desprezível. De acordo com as simulações, o campo magnético pode atingir valores acima de 1,1 T para um gap de 12,7 mm. Contudo, foi selecionado o gap de 25,4 mm (1 in), o qual fornece uma densidade de fluxo magnético, segundo as simulações, na ordem de 0,9 T, em um volume avaliado como razoável para alocar o TCM com massa de Gd na ordem de 100 g. Vale ressaltar que uma maior massa de material magnético vai favorecer as medições de força, diminuindo as incertezas.

Portanto, as dimensões finais para o gap é de 25,4 mm e para Dpolos de 88,9 mm. Os resultados da simulação bidimensional para a densidade de fluxo magnético médio na área são de 0,89 T para a região de campo alto, e de 0,004 T para a região de campo baixo.

Figura 4.2 – Resultados da simulação 2D para uma média em área da densidade de fluxo magnética em função do gap parametrizado: (a) para a região de alto campo; (b) para a região de baixo campo

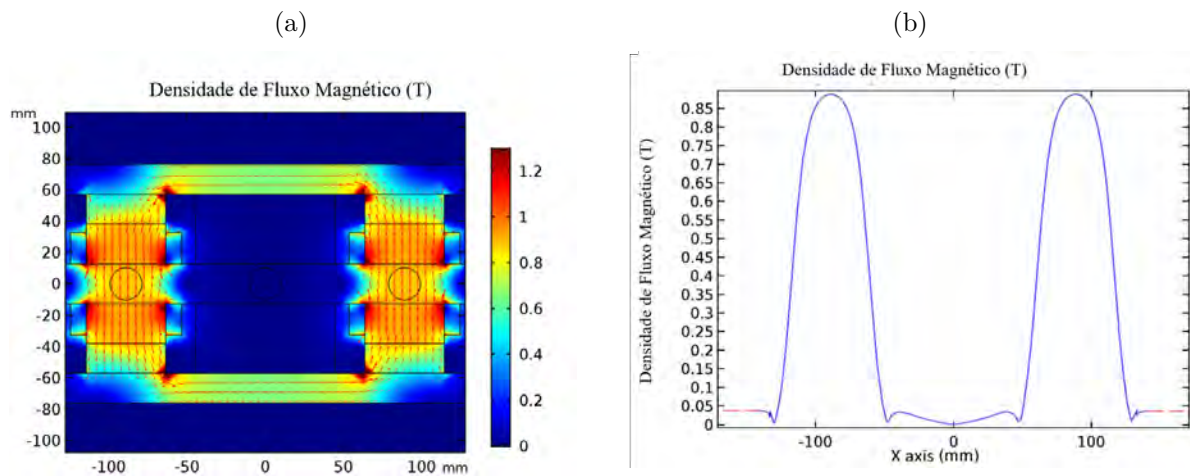


4.2 Simulação Tridimensional (3D)

A Figura 4.3 mostra os resultados da simulação 3D do plano XY0, o qual é o mesmo plano das simulações 2D. A Figura 4.3a é a distribuição da densidade de fluxo magnético ao longo do plano XY0 (circuito magnético e arredores). As flechas vermelhas indicam a direção da densidade de fluxo. A Figura 4.3b é o perfil da densidade de fluxo ao longo do eixo-x (linha central, ver Figura 3.11a). A região de interesse (círculos a $x \approx 90\text{mm}$) tem $0,89\text{T}$ de densidade de fluxo média, e a região de baixo campo próxima de 0T ($-50\text{mm} \leq x \leq 50\text{mm}$), como nas simulações 2D.

Adicionalmente, é possível verificar os efeitos de borda na Figura 4.3a, seguindo as cores da legenda e a distribuição das flechas vermelhas na região de alto campo (espaço de ar ao redor do círculo). É visível a variação da densidade de fluxo do centro do círculo para as bordas, resultando no perfil ao longo do eixo-x, conforme apresenta a Figura 4.3b. É

Figura 4.3 – Distribuição da densidade de fluxo magnética: (a) ao longo do Plano XY0; (b) ao longo do eixo-x (linha de centro, ver Figura 3.11a). As flechas vermelhas indicam a direção da densidade de fluxo.



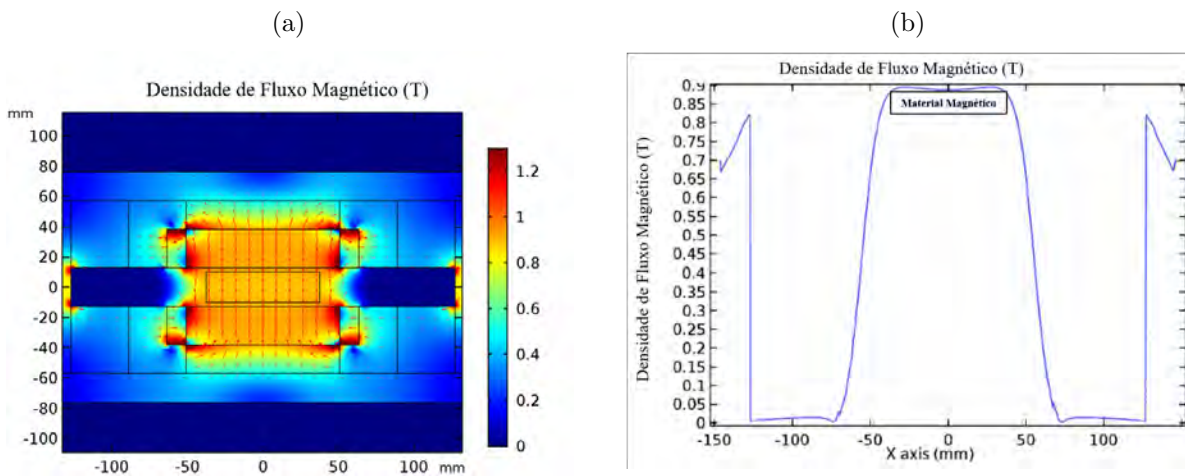
importante notar que se este circuito magnético não fosse projetado com os concentradores magnéticos laterais, os resultados para a intensidade de campo seria menor e distribuição diferente da apresentada.

Apesar dos efeitos de borda reduzirem a intensidade de campo magnético, a distribuição de campo ao longo do eixo-x é uma característica importante para o motor termomagnético proposto. Quando o TCM está na fase paramagnética, o mesmo se encontrará numa região de campo baixo. Contudo, sobre ele deverá existir um campo residual maior que 0 T, de modo que quando o TCM retorna à fase ferromagnética, a força magnética resultante a partir do campo residual seja o suficiente para quebrar a condição de equilíbrio e mover o TCM para a região de campo alto. Assim sendo, a posição ótima do TCM quando este estiver na região de campo baixo é um importante parâmetro para o projeto do motor, no que diz respeito ao balanço entre a intensidade do campo residual e a distância deslocada pelo TCM entre as posições de campo alto e baixo. Esses dois parâmetros são diretamente proporcionais ao torque produzido pelo motor.

A Figura 4.4 mostra os resultados da simulação 3D. A Figura 4.4a apresenta a distribuição da densidade de fluxo magnética ao longo do plano 88.9YZ (Circuito magnético e arredores). Novamente, as flechas vermelhas indicam a direção da densidade de fluxo. Já a Figura 4.4b é o perfil longitudinal da densidade de fluxo magnético (linha central do eixo-z, Figura 3.11b).

A distribuição axial de campo alto apresenta boa homogeneidade na região onde o TCM será colocado (ver a região retangular nas Figuras 4.4a e 4.4b). Neste caso, os efeitos de borda na direção axial é um parâmetro inicial utilizado para o dimensionamento do comprimento do TCM. Aumentando o comprimento do TCM, aumenta-se o seu volume e massa, logo, se o campo magnético é aproximadamente constante, maior será a força

Figura 4.4 – Distribuição da densidade de fluxo magnética (a) ao longo do Plano 88.9YZ; (b) ao longo do eixo-z (linha de centro Figura 3.11b)



magnética (ver Equação 3.5). Por outro lado, se o campo magnético não é constante, deve-se verificar se o aumento da força atrelada a uma maior massa irá garantir uma maior eficiência do motor, uma vez que o comprimento do TCM também é diretamente proporcional às perdas viscosas. Logo, observa-se uma oportunidade de otimizar o comprimento do TCM utilizando uma metodologia de otimização, o qual é tema de outros trabalhos em desenvolvimento.

Neste trabalho, é considerado um TCM em formato cilíndrico com 19,05 mm ID e aproximadamente 80 mm de comprimento, conforme a Tabela 3.1. Os resultados 3D para a densidade de fluxo magnético médio no volume do TCM são de aproximadamente 0,89 T para a região de campo alto, e de 0,004 T para a região campo baixo. Portanto, visto que não existem diferenças significativas entre os resultados das simulações 2D e 3D para as densidades de fluxo magnético médio, conclui-se que o projeto de circuito magnético proposto foi bem-sucedido e os concentradores frontais e laterais projetados adequadamente.

4.3 Projeto Final e Montagem do Circuito Magnético em Duplo C

A Figura 4.5 mostra o projeto final do circuito magnético em duplo C. Neste modelo em SolidWorks é possível verificar os furos e outros detalhes estruturais. Uma característica interessante incluída no projeto do circuito magnético é a possibilidade de mudar o gap magnético usando parafusos de ajuste. Enquanto os ímãs da base inferior são fixos, a base superior pode ser movida para cima e para baixo, e conseqüentemente, variando a intensidade do fluxo magnético (ver Figura 4.2a). A possibilidade de variar o campo magnético permite a realização estudos avançados no sentido a otimizar a intensidade de campo às custas de um menor ou maior volume de campo gerado. A Figura 4.6

apresenta uma fotografia do circuito magnético após a construção, a qual foi realizada seguindo o passo-a-passo descrito no Apêndice A. Vale ressaltar que o circuito magnético apresentado foi integralmente construído utilizando os equipamentos do Laboratório de Fabricação Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Maringá.

Figura 4.5 – Projeto final do circuito magnético em duplo C

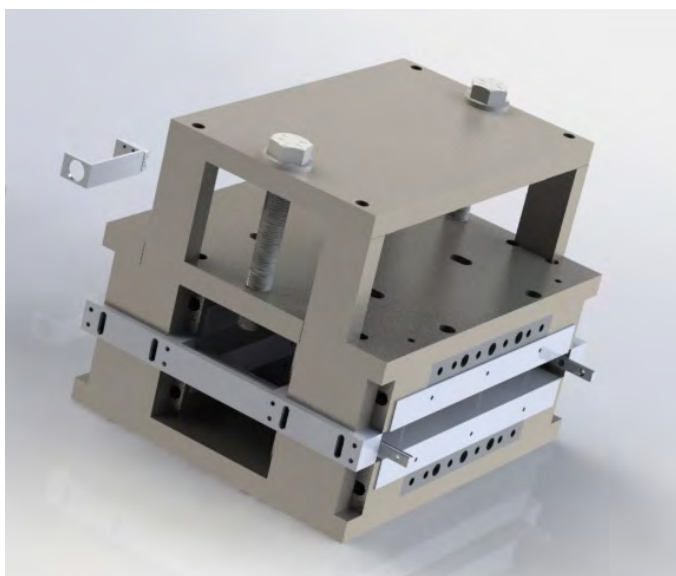
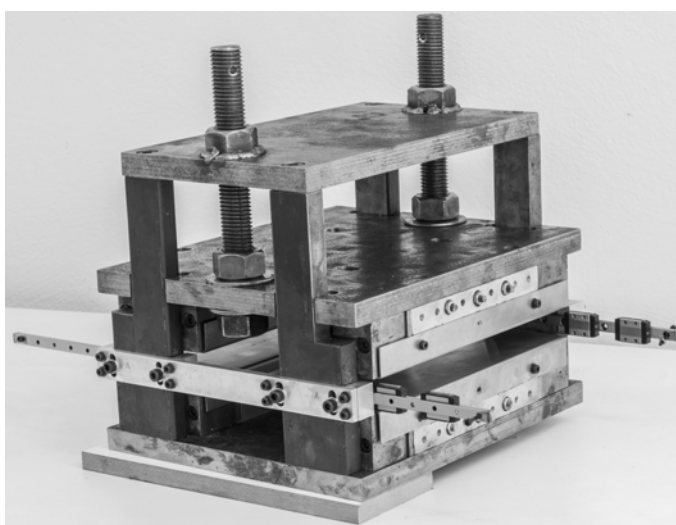


Figura 4.6 – Circuito magnético construído



4.4 Caracterização Experimental do Campo Magnético

Após a construção do circuito magnético, foi feita a caracterização experimental do campo gerado, conforme descrito na Seção 3.8. As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam a comparação dos resultados experimentais (símbolos vermelhos) com os da simulação tridimensional (linha preta) nos eixos XY0 e 88.9YZ, respectivamente. A incerteza expandida associada ao campo magnético foi estimada em $\pm 0,03T$.

Analisando as Figuras 4.7 e 4.8, pode-se fazer a seguinte avaliação:

- Pode-se observar uma excelente concordância entre os resultados numéricos e experimentais, especialmente em termos do comportamento das curvas, ocorrendo valores de pico e pontos de transição/inflexão na mesma posição.
- Os dois polos magnéticos apresentaram uma pequena diferença em termos do valor máximo, mas possuem o mesmo comportamento.
- Os valores de pico apresentados nos dados experimentais, por outro lado, foram menores do que o obtido no projeto. O pico em ≈ -90 mm possui 0,84 T, enquanto o pico a $\approx +90$ mm possui 0,82 T, o que representa uma redução de 5,8% e 8,4%, respectivamente, em relação aos resultados do COMSOL.
- As diferenças na intensidade dos valores de máximo campo podem ser explicadas por uma série de fatores observados durante o projeto e montagem do circuito magnético. Esses fatores podem atuar individualmente ou combinados, de modo a reduzir o campo do circuito após a sua montagem. Dentre eles, destacam-se: (a) a incerteza quanto ao valor correto da remanência dos blocos de NdFeB (Tabela 3.2), pois cada tipo de classe de ímã possui uma faixa de possíveis valores de remanência; (b) tolerâncias envolvidas no processo de fabricação das peças; (c) procedimento de montagem.

Assim sendo, considera-se que em relação ao projeto e montagem do circuito magnético, o procedimento proposto foi executado com sucesso.

As Figuras 4.9 e 4.10 ilustram a densidade de fluxo medida e simulada na sua respectiva região de medição.

Por fim, apresenta-se na Figura 4.11 a distribuição da densidade de fluxo magnético ao longo do plano X0Z, enquanto a Figura 4.12 ilustra o corte do plano X0Z e a distribuição da densidade de fluxo magnético na região onde foi medida. Este mapa é um resultado essencial para o projeto do motor termomagnético, fornecendo a intensidade do campo em diversas posições, o que possibilita: o cálculo da força magnética; determinar a posição mais adequada para posicionar o TCM na região de campo residual (baixo); e como

Figura 4.7 – Densidade de fluxo magnética x posição no eixo x no plano XY0, simulado em preto e medido em vermelho

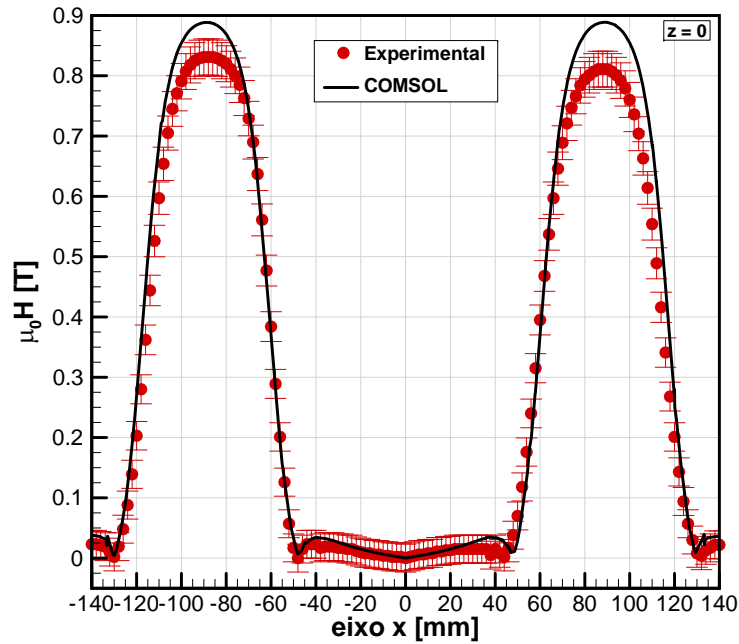
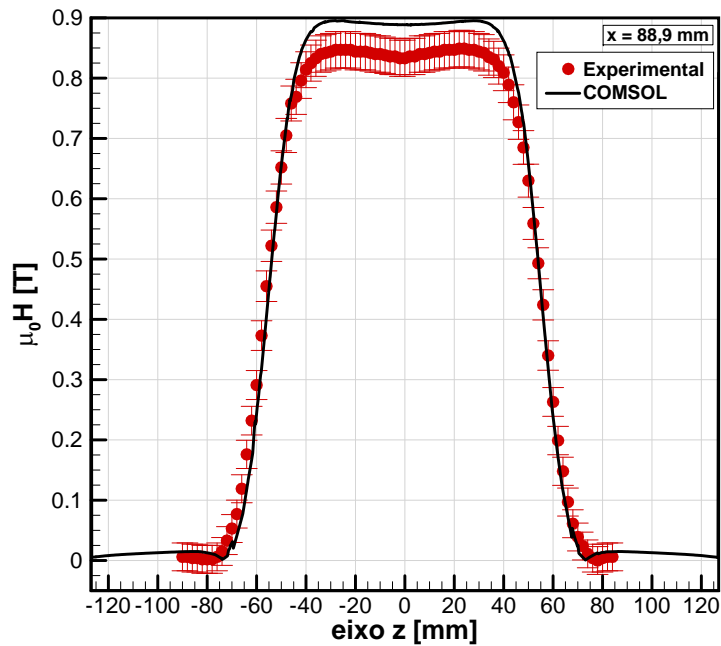


Figura 4.8 – Densidade de Fluxo magnético x posição no eixo z no plano 88.9YZ, simulado em preto e medido em vermelho



parâmetro de entrada no desenvolvimento de modelos matemáticos para simular o motor desenvolvido.

Figura 4.9 – Corte do plano XY0 e densidade de fluxo magnético simulado em vermelho e medido em amarelo, destacando a região medida.

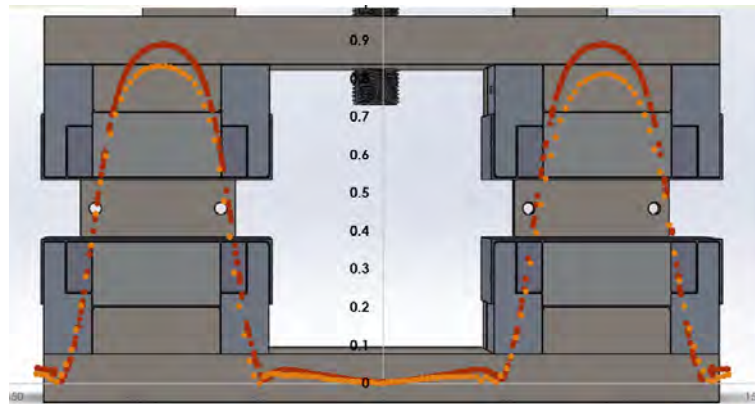
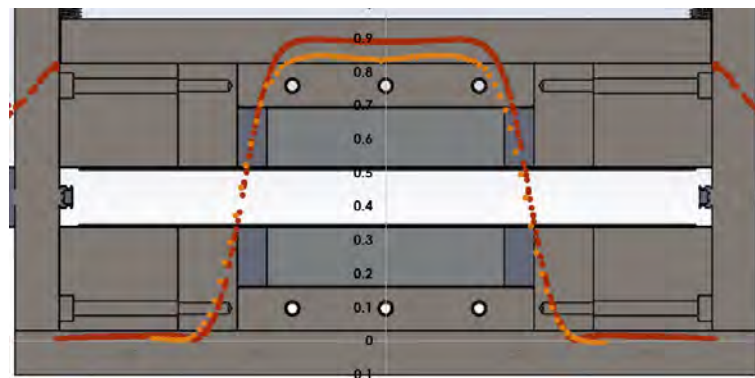


Figura 4.10 – Corte no plano ZY88.9 e densidade de fluxo magnético simulado em vermelho e medido em amarelo, destacando a região medida.



4.5 Força Magnética

4.5.1 Força Magnética Teórica

A força magnética é calculada a partir da Equação (3.5), em que deve-se conhecer inicialmente o volume (V) do TCM, a variação do fluxo magnético com a distância (dB/dx) e a magnetização (M). Para a avaliação da força magnética teórica, define-se:

- O volume foi determinado considerando a porosidade de 37%, o diâmetro interno do tubo de 19,05 mm (0,75 in) e comprimento de 82 mm.
- Para determinar (dB/dx) foi obtido, primeiramente, o comportamento de B (médio no volume do trocador) em função de x (para $y = z = 0$) por meio de simulações 3D no COMSOL. De posse desses dados, foi encontrada uma curva ajustada, conforme consta na Figura 4.13. A equação ajustada apresentou uma excelente concordância com os resultados do COMSOL, sendo o erro máximo de 1,85%. Na sequência, basta

Figura 4.11 – Densidade de Fluxo Magnético Distribuída ao longo do plano X0Z

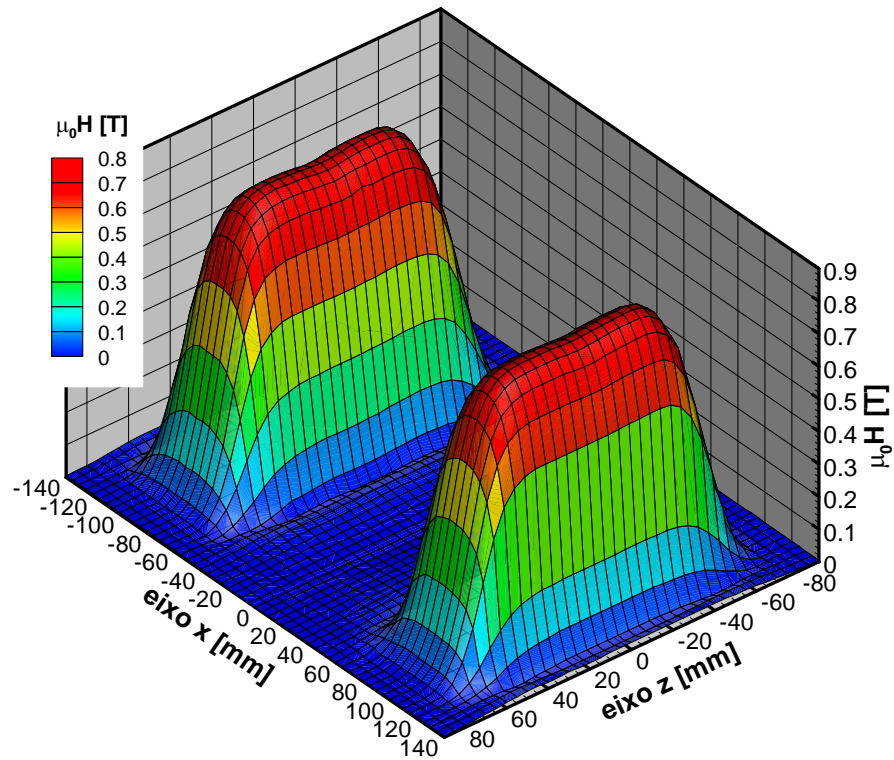
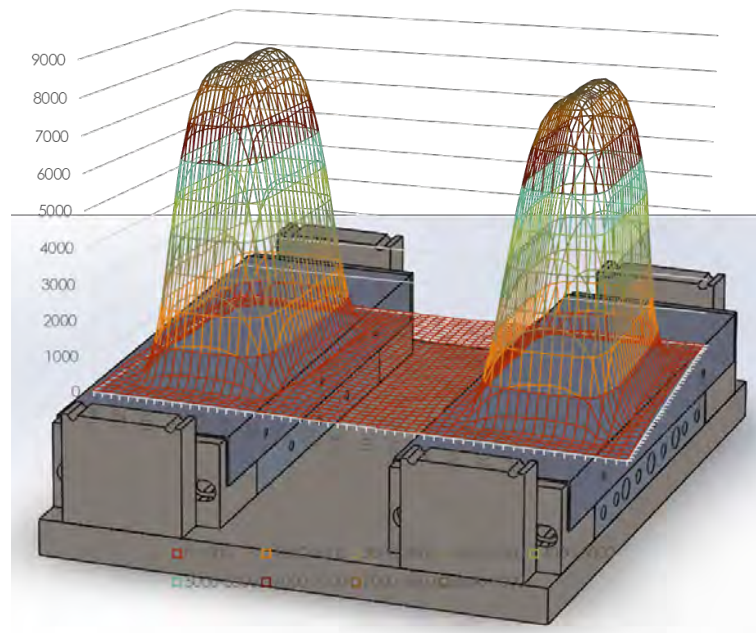


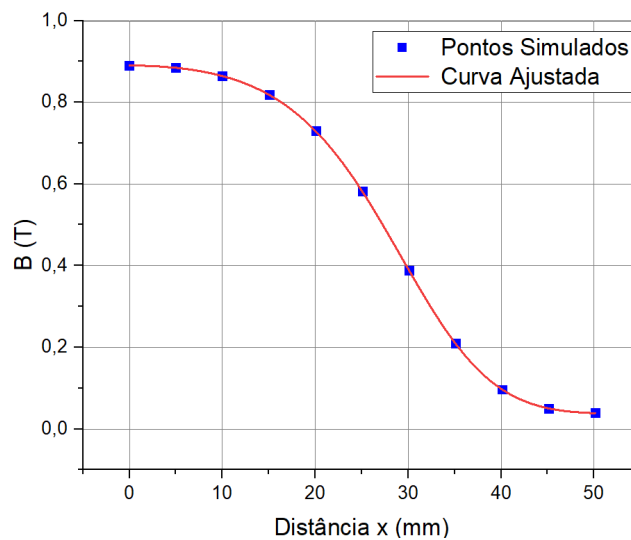
Figura 4.12 – Densidade de Fluxo Magnético distribuída ao longo do plano X0Z; destacando a região da medida



derivar a equação da curva para encontrar (dB/dx) . A Figura 4.14 apresenta a curva para (dB/dx) utilizada no estudo teórico.

- A magnetização foi calculada via MFT, seguindo dois critérios diferentes: (i) desconsiderando o campo desmagnetizante interno, utilizando portanto o campo aplicado; e (ii) considerando os efeitos de desmagnetização. Em ambos os casos, a temperatura do Gd foi fixada em 0°C . Logo, encontrou-se os resultados apresentados na Figura 4.15.

Figura 4.13 – Densidade de fluxo magnético médio no volume em função da distância x , onde $x = 0$ seria o centro do polo magnético, região onde o campo magnético é máximo.



A Figura 4.16 traz os resultados para a força magnética teórica, para os casos (i) e (ii). Conforme o esperado, a força magnética resultante quando os efeitos de desmagnetização são considerados é menor. Por outro lado, as diferenças não foram significativas. O pico de força ficou próximo de 450 N.

4.5.2 Força Magnética Experimental

Após a montagem dos trocadores de calor, foi efetuada a medição experimental da força conforme a seção 3.9. A Figura 4.17 apresenta os resultados para a temperatura de 0°C , na posição central do polo magnético. Os resultados experimentais são comparados, primeiramente, com a curva teórica (explicada na subseção anterior) utilizando os resultados do campo em função de x obtidos no COMSOL. Outra comparação realizada, a qual também pode ser chamada de curva teórica, considerou o comportamento de B em função de x medido experimentalmente (Figura 4.7). Nesta última, dB/dx foi obtido por um procedimento semelhante ao já explicado. Nas duas curvas teóricas, a magnetização

Figura 4.14 – Curva para $\frac{dB}{dx}$ característica para o circuito magnético projetado em função da distância x .

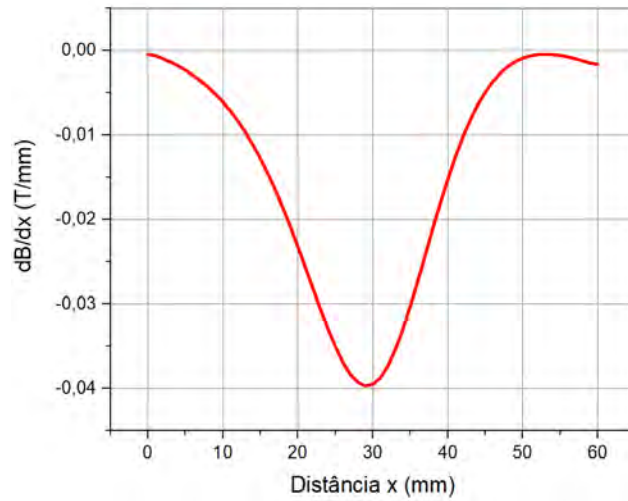
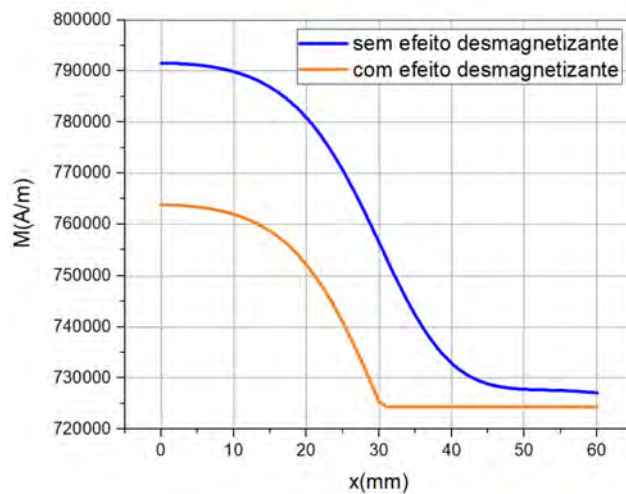


Figura 4.15 – Curva de magnetização em função da distância x , considerando o campo aplicado (curva azul) e considerando o campo resultante (curva alaranjada).



foi avaliada com via MFT, além de levar em conta os efeitos de desmagnetização. Os resultados apontam que tanto a força teórica - COMSOL, como a teórica - B experimental, apresentam uma concordância satisfatória com os resultados experimentais, em especial quando o campo magnético experimental é utilizado (linha azul).

4.6 Diagrama de Forças Estáticas

As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam os diagramas de forças estáticas caracterizado experimentalmente, ou seja, o comportamento da força magnética em função sua posição

Figura 4.16 – Força (F) em função da distância x , considerando o campo aplicado (curva azul) e considerando o campo resultante (curva alaranjada).

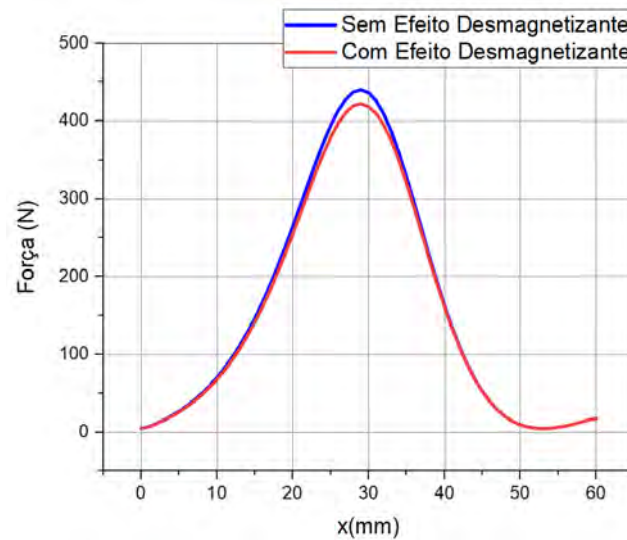
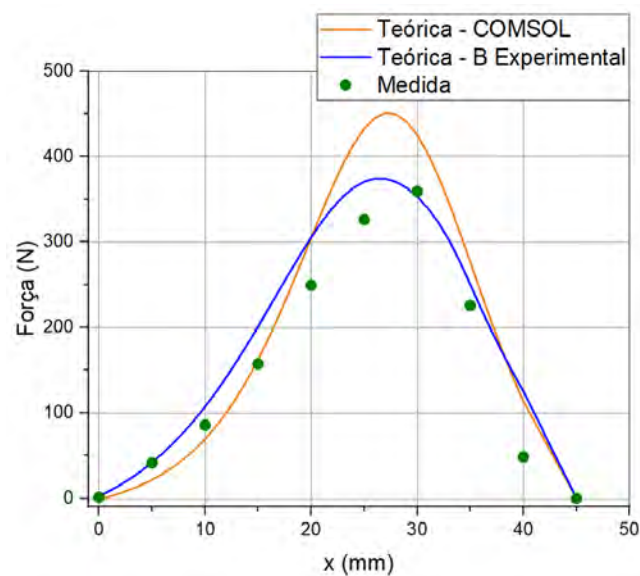


Figura 4.17 – Comparação resultados Reais (medido) x Simulados



e da temperatura. A posição do TCM variou do centro do polo magnético (posição 0 mm) até a posição de 45 mm, enquanto a temperatura foi de 0°C até 50°C. As Figuras 4.18 (a) e (b) apresentam as medições relacionadas ao polo magnético que possui o maior campo máximo, e as Figuras 4.19 (a) e (b) para o polo oposto.

Pode-se notar uma acentuada redução na intensidade da da força conforme a temperatura aumenta partir de 0 °C. Além disso, a força magnética é mais intensa na região em que dB/dx é maior (ao redor de 30 mm), sendo consideravelmente reduzida

Figura 4.18 – Força em função da posição para diferentes temperaturas (lado A)

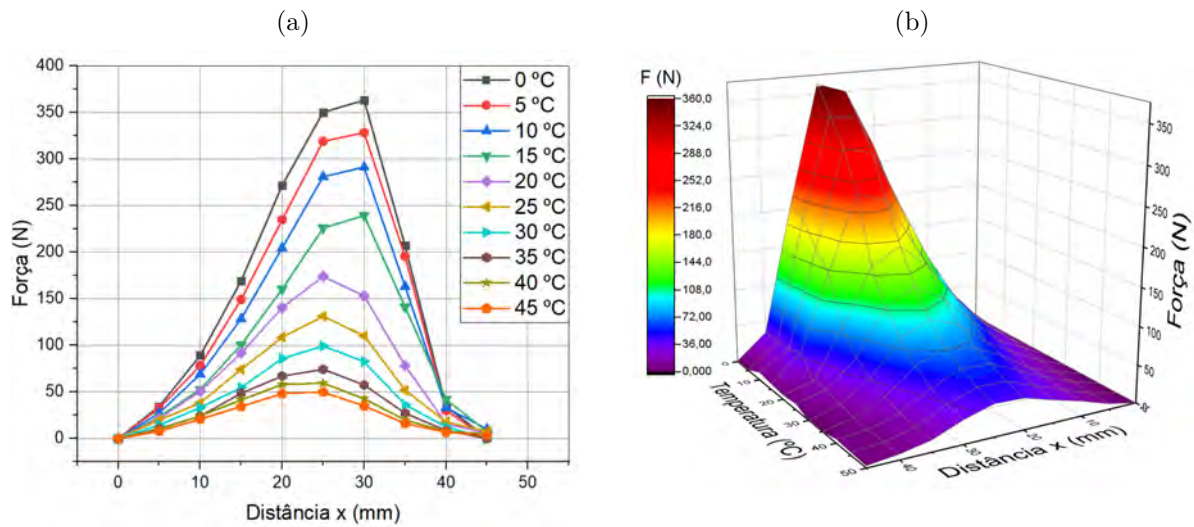
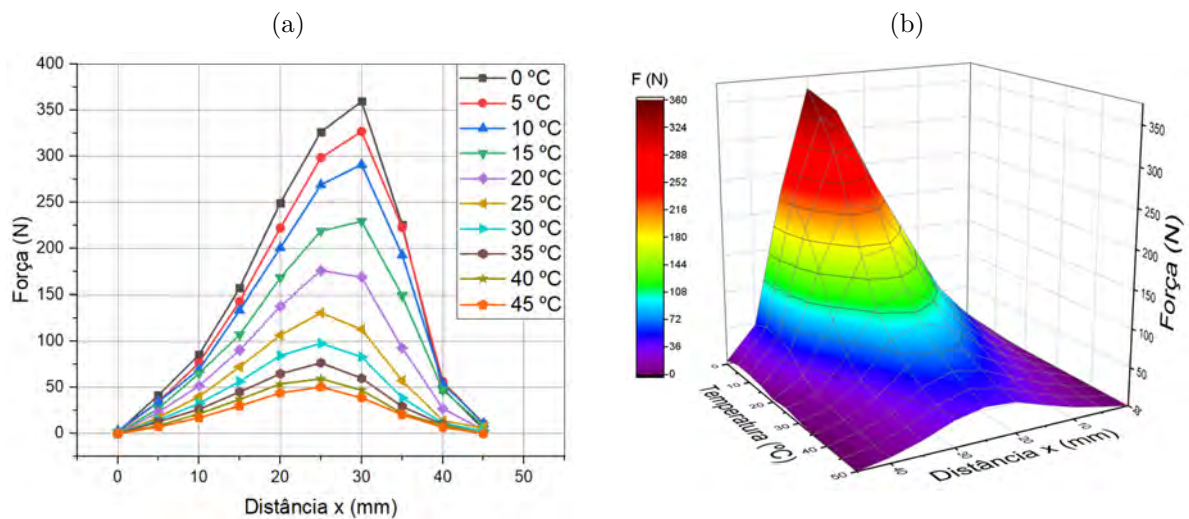


Figura 4.19 – Força em função da posição para diferentes temperaturas (lado B)



a medida que afasta-se de $x = 30$ mm. Tomando a temperatura à 0 °C: (i) para uma variação de x de $+10$ mm, a força é reduzida de ≈ 350 N para ≈ 50 N; (ii) para uma variação de x de -10 mm, a força é reduzida de ≈ 350 N para ≈ 250 N.

A partir desse diagrama de força, pode-se definir: (i) a distância entre os trocadores, a qual terá influência direta sobre a força e o torque líquido do motor; (ii) as temperaturas das fontes quente e fria, as quais tem influência sobre a força/torque, frequência de operação do motor e perdas de carga.

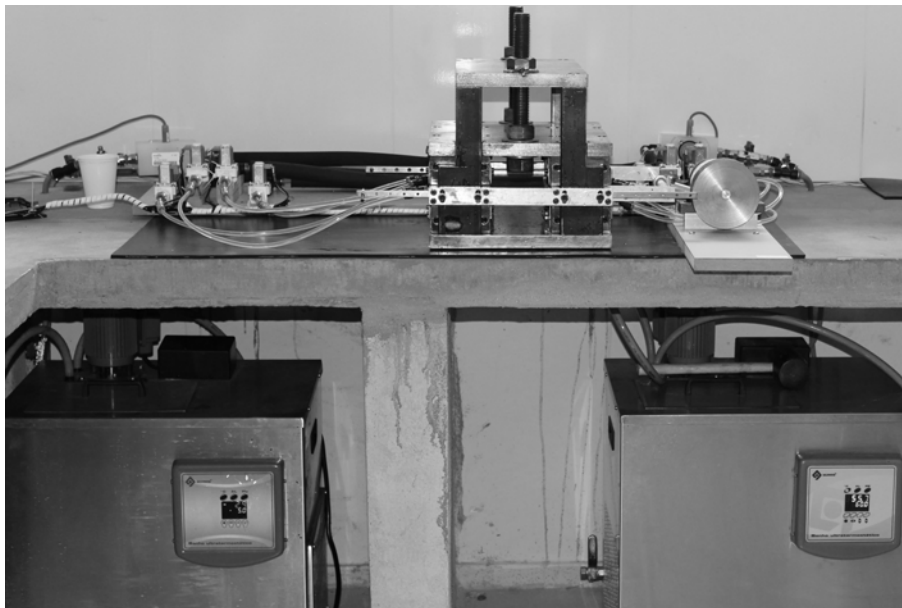
Para a primeira versão do motor, cujo objetivo é entender o seu funcionamento dinâmico e obter resultados preliminares, definiu-se a distância entre os TCMs de 40 mm, ou seja, um TCM no centro do polo magnético, enquanto o oposto fica à 40 mm do centro do seu respectivo polo. Esta distância foi determinada após o estudo do diagrama de forças,

e avaliada como a distância máxima permitida para o funcionamento do motor. Para uma distância maior que 40 mm, a força de atração para mover o TCM de volta para a região de campo máximo se torna muito baixa, além de ser independente da temperatura do TCM, para a faixa avaliada, 0 °C a 50 °C.

4.7 Montagem Final do Motor

A Figura 4.20 mostra o motor termomagnético após a sua montagem, onde constam os banhos térmicos, sistema de tubulações e válvulas (apresentados em detalhes na Figura 4.21), TCM (apresentado em detalhes na Figura 4.22) e mecanismo de biela-manivela (apresentado em detalhes na Figura 4.23).

Figura 4.20 – Montagem do motor, Banhos termostáticos



Primeiramente, destaca-se que o motor de Tesla proposto, puramente magnético, operou conforme o seu projeto conceitual. Isso significa que, por meio dos sensores de posição e do banco de válvulas solenoides, os processos de aquecimento e resfriamento ocorreram de maneira satisfatória, e os TCMs deslocaram-se entre as regiões de baixo e alto campo magnético, operando de forma ininterrupta sem a necessidade de um segundo mecanismo de força, como mola ou força gravitacional. Os deslocamentos ocorrem quando o equilíbrio das forças magnéticas entre os dois TCMs (mais as perdas) é desrespeitado.

Durante a realização de ensaios preliminares, avaliou-se o período do ciclo. Primeiramente, o motor operou utilizando os sensores de posição, e o período do foi medido por meio da contagem dos frames do vídeo de operação do motor. Neste caso, o período foi da ordem de 3,7 ~ 4,7 s, o que garantiria uma rotação de 16 ~ 12 rpm. Na sequência,

Figura 4.21 – Vista superior da bancada, à esquerda tubulações e válvulas do sistema de aquecimento e resfriamento

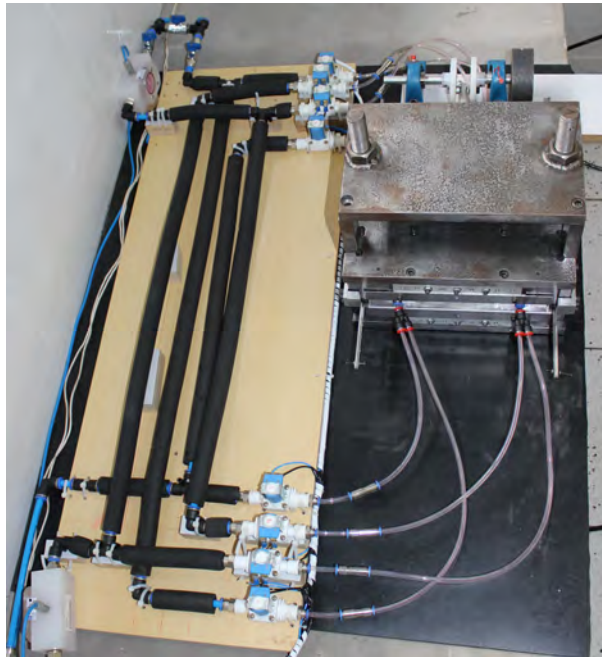
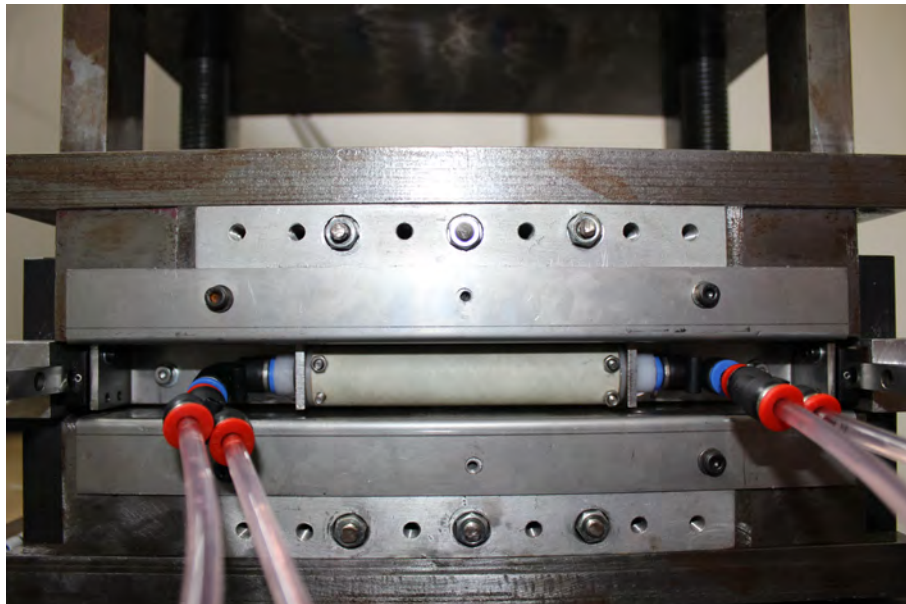
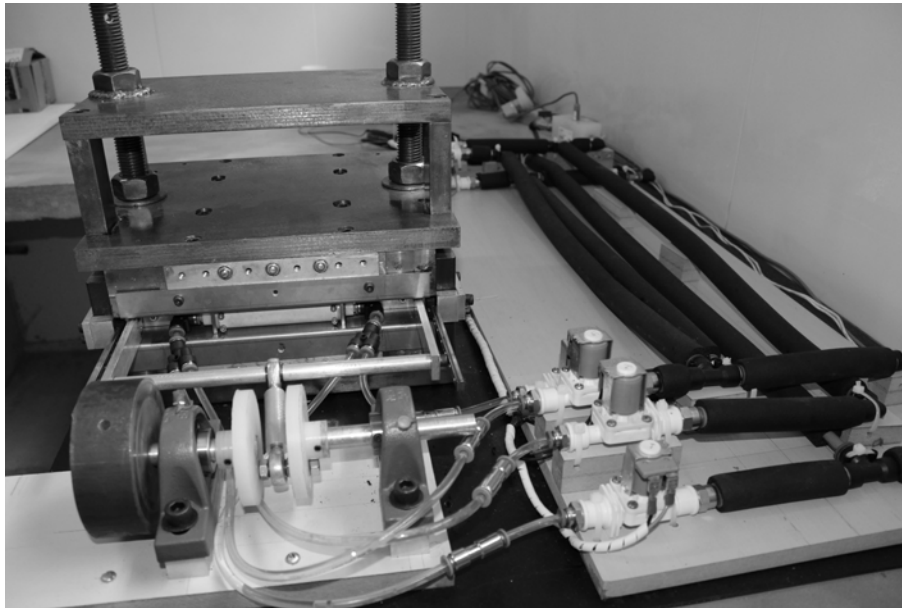


Figura 4.22 – Detalhe do TCM no interior do polo magnético, com suas respectivas válvulas, mangueiras, acopladores, adaptadores em U e guias lineares



substituiu-se os sensores de posição pela programação com tempos fixos para a alternância dos fluxos quente e frio nos TCMs. Neste segundo caso, o período de ciclo foi de 3,1 s, ou seja, uma rotação de ≈ 20 rpm. Comparativamente, observa-se que o uso dos sensores de posição impossibilitou o melhor funcionamento do motor.

Figura 4.23 – Montagem do Motor: Sistema de aquecimento e resfriamento, Mecanismo de Biela Manivela, Circuito magnético



Entretanto, conforme explicado anteriormente, o uso da programação foi satisfatório pois utilizou-se vazão e temperaturas de operação fixos. Para a sequência da pesquisa, serão realizados ensaios variando-se as condições de operação. Logo, o uso de um sistema de controle de posição será fundamental para a plena caracterização experimental do motor e, portanto, um sistema com melhores propriedades que o utilizado atualmente deverá ser implementado no aparato para pesquisas futuras.

Na sequência, foram realizados ensaios preliminares para a caracterização experimental do torque do motor. Nesses testes, o sistema biela-manivela construído foi conectado à estrutura dos TCMs, conforme mostra a Figura 4.23. Contudo, ao operar o motor, uma série de dificuldades foram verificadas, as quais são listadas na seção de trabalhos futuros, com destaque especial para o mecanismo biela-manivela projetado. Este apresentou alguns problemas quanto ao seu projeto conceitual, e durante a operação do motor esse mecanismo eventualmente trava ao atingir o ponto morto, o que impossibilitou a medição do torque.

5 Conclusão

A presente dissertação de mestrado apresentou em detalhes o projeto e construção de um motor termomagnético de Tesla, puramente magnético. Este tipo de motor não utiliza nenhum meio auxiliar para garantir a operação do motor, como uma mola ou a força gravitacional. Para atingir o requisito de puramente magnético, foi projetado e construído um circuito magnético capaz de fornecer dois polos magnéticos, com intensidades de campo na ordem de 1 T. Assim, utiliza-se dois trocadores de calor magnético, defasados em 180°, cada qual interagindo com o seu respectivo polo magnético, e produzindo o movimento linear característico de um motor de Tesla.

O circuito magnético é o componente mais complexo e caro do sistema. A solução encontrada para garantir o quesito puramente magnético, foi o projeto de um duplo-C, o qual orienta as linhas de campo de tal forma que gera-se dois polos magnéticos idênticos. O ímã projetado foi construído utilizando materiais comprados de fornecedores locais. Além disso, todos os processos de usinagem necessários para produzir as diversas peças e ferramentas para a montagem do circuito, foram realizadas pelo mestrando e colaboradores. Da mesma forma, a montagem do circuito também foi toda realizada pelo mestrando e colaboradores. O circuito construído apresentou resultados com excelente concordância, tanto nas tendências como nos valores de campo obtidos, com os dados de projeto obtidos via simulações 2D e 3D. Para um gap de 25,4 mm, obteve-se fluxos magnéticos na ordem de 0,82 T - 0,84 T, o que comparado ao valor de 0,89 T obtido das simulações, representa um decréscimo de cerca de 7,9 - 5,6 %. O valor de 0,84 T ficou próximo a 1 T, o qual foi definido como objetivo para o projeto do circuito. Mais que isso, o volume de campo magnético gerado foi satisfatório, e permitiu projetar os TCMs com massa maior que 100 g, atingindo os requisitos pré-estabelecidos no projeto do motor.

Após a caracterização do campo magnético, o motor foi finalmente montado. Os primeiros testes realizados foram quanto ao diagrama de forças estáticas, em que mediu-se a força em função da temperatura (na faixa de 0 °C a 50 °C) e da posição do TCM. A posição do TCM, na realidade, representa a intensidade do campo aplicado em uma dada posição. Os resultados experimentais apresentaram excelente concordância com resultados teóricos, e são fundamentais para a seleção dos parâmetros finais do motor, como o deslocamento máximo do TCM (entre as regiões de campos alto e baixo), e as temperaturas na fonte e sumidouro de calor. O pico de intensidade de força magnética, para uma temperatura de 0 °C e na região onde dB/dx é máximo (≈ 30 mm), medida experimentalmente foi de ≈ 350 N.

Para a realização dos ensaios dinâmicos, foram selecionados inicialmente um des-

locamento do TCM de 40 mm, enquanto as temperaturas da fonte e sumidouro de calor foram, respectivamente, 0 °C a 50 °C. As variáveis que deveriam ser caracterizadas experimentalmente nos ensaios dinâmicos são o torque produzido pelo motor e a frequência de operação. No entanto, devido a complicações encontradas durante a realização do experimento, especialmente quanto ao mecanismo biela-manivela, responsável por converter o movimento linear em rotativo, os resultados para o torque não foram obtidos. Conduto, ao realizar estes ensaios uma série de modificações e melhorias foram identificadas e são propostas na seção de sugestões de trabalhos futuros.

Por fim, conclui-se que os objetivos propostos no presente trabalho foram alcançados com sucesso: (i) o circuito magnético proposto foi projetado e construído com sucesso; (ii) o motor de Tesla puramente magnético, operou conforme proposto, ou seja, os TCMs deslocaram-se entre as regiões de baixo e alto campo magnético, operando de forma ininterrupta sem a necessidade de um segundo mecanismo de força, como mola ou força gravitacional, utilizando apenas o desequilíbrio das forças magnéticas entre os dois TCMs. Os resultados preliminares apresentaram que o motor projetado tem potencial para operar em rotações da ordem de 20 rpm, a qual é relativamente maior do que os valores obtidos em recentes trabalhos publicados na literatura.

5.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

Após a construção do aparato experimental do motor termomagnético, e realização de ensaios preliminares, foram identificadas uma série de melhorias e sugestões para trabalhos futuros apresentadas a seguir.

- Melhorar o sistema de automação das trocas térmicas, fazendo-se a implementação de um sistema PID para o melhor controle dos fluxos quente e frio, de forma a melhorar a frequência de operação do motor;
- Substituir o sensor de posição por outro sistema de controle de posição com maior precisão;
- Reprojetar o mecanismo para conversão do movimento linear em rotativo, para permitir a correta medição do torque gerado pelo motor, bem como da sua frequência de operação;
- Realizar uma série de ensaios experimentais, variando os diferentes parâmetros de operação como diferença de temperaturas entre fonte e sumidouro e vazão de operação;
- Desenvolver um modelo matemático para simular o motor projetado, e realizar simulações para validar tal modelo com os resultados obtidos;
- Com o modelo validado, utilizá-lo para otimizar o funcionamento do motor, por meio de algum método de otimização conhecido, como a minimização da entropia gerada.
- Propor outras formas de arranjos do motor, utilizando mais que dois TCMs, de modo a obter, especialmente, o seu funcionamento de maneira contínua.
- Utilizar materiais com transição de primeira ordem nos TCMs, e avaliar o seu potencial para ser aplicado em motores termomagnéticos.

Referências

- ALVES, C. et al. Simulation of solar curie wheel using nife alloy and gd. *International Journal of Refrigeration*, v. 37, p. 215–222, 2014. Citado na página 28.
- J.A. Barclay e W.A. Steyert. *Active magnetic regeerator*. 1982. US Patent 4332135. Citado na página 28.
- BJØRK, R. et al. Review and comparison of magnet designs for magnetic refrigeration. *International Journal of Refrigeration*, v. 33, p. 437–448, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 30.
- BOHIGAS, X. et al. Room temperature magnetic refrigerator using permanent magnets. *IEE Transactions on Magnetics*, v. 36, p. 538–544, 2000. Citado na página 30.
- CHRISTIAANSE, T.; BRÜCK, E. Proof of concept static thermomagnetic generator experimental device. *Metallurgical and Materials Transactions E*, v. 1E, p. 36–40, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 41.
- CHRISTIAANSE, T. et al. A concise approach for building the s-t diagram for mn-fe-p-si hysteretic magnetocaloric material. *Journal of Physics D. Applied Physics*, v. 50, n. 365001, 2017. Citado na página 29.
- COEY, J. M. D. *Magnetism and Magnetic Materials*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 55.
- CULLITY, B.; GRAHAM, C. *Introduction to Magnetic Materials*. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2008. ISBN 978-0471477419. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 36.
- DINESEN, A. *Magnetocaloric and Magnetoresistive Properties of $La_{0.67}Ca_{0.33}Sr_xMnO_3$* . Tese (Doutorado) — Thechnical University of Denmark, Roskilde, Denmark, 2004. Citado na página 56.
- T. Edison. 1888. US Patent 380100. Citado na página 28.
- ELLIOTT, J. Thermomagnetic generator. *Journal of applied Physics*, v. 30, n. 11, p. 1774–1777, 1959. Citado na página 38.
- EVARISTO, E. H. G. *Modelagem e Projeto de um motor de Tesla Gravitacional*. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Junho 2016. Citado na página 40.
- FARIA, R.; LIMA, L. *Introdução ao Magnetismo dos Materiais*. [S.l.]: Editora Livraria da Física, 2005. ISBN 9788588325371. Citado na página 34.
- FIELD PRECISION LLC. *Propriedades Magnéticas*. 2017. Disponível em: <<http://www.fieldp.com/magneticproperties.html>>. Acesso em: Setembro de 2017. Citado na página 50.
- FOLEISS, G. L.; VIEIRA, G. T. F.; SZPAK, W. *Modelagem e Simulação de um motor termomagnético*. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Junho 2012. Citado na página 40.

- FURLANI, E. *Permanent Magnet and Electromechanical Devices*. [S.l.]: Academic Press, 2001. ISBN 9780122699511. Citado na página 55.
- GAMA, S. et al. Analytic and experimental analysis of magnetic force equations. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 52, n. 7, 2016. Citado na página 54.
- GARGARO, B. M. *Modelagem e Simulação de um motor termomagnético com retorno por mola*. Trabalho de Conclusão de Curso — Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Julho 2018. Citado na página 40.
- GEDDES, M. *Manual de Projetos do Arduino: 25 projetos práticos para começar*. [S.l.]: Editora Novatec, 2017. ISBN 978-8575225523. Citado na página 45.
- GUTFLEISCH, O. et al. Mastering hysteresis in magnetocaloric materials. *Philosophical Transaction of the Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, v. 13, n. 374, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 29.
- HALBACH, K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material. *Nuclear Instruments and Methods*, v. 169, n. 1, p. 1–10, 1980. Citado na página 30.
- HOLMAN, J. *Experimental Methods for Engineers*. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2012. ISBN 978-0073529301. Citado na página 58.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *International Energy Outlook*. 2018. Disponível em: <www.eia.gov/ieo>. Acesso em: Agosto de 2018. Citado na página 27.
- IPCC. *Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2018. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>>. Acesso em: Agosto de 2018. Citado na página 27.
- KARLE, A. The thermomagnetic curie-motor for the conversion of heat into mechanical energy. *Int. J. Therm. Sci.*, v. 40, p. 834–842, 2001. Citado 5 vezes nas páginas 28, 29, 37, 39 e 40.
- KISHORE, R.; PRIYA, S. A review on design and performance of thermomagnetic devices. *Renewable and Sustainable Energy Review*, v. 81, p. 22–44, 2018. Citado na página 38.
- MORRISH, A. *The Physical Principles of Magnetism*. [S.l.]: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2001. ISBN 9780470546581. Citado na página 56.
- MURAKAMI, K.; NEMOTO., M. Some experiments and considerations on the behavior of thermomagnetic motors. *IEEE trans mag*, v. 8, p. 387–398, 1972. Citado na página 39.
- PRECHARSKY, V.; GSCHNEIDNER, J. K. Thermodynamics of the magnetocaloric effect. *Physical Review Letters*, v. 78, n. 23, p. 4494–4497, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 39.
- PRECHARSKY, V. et al. Thermodynamics of the magnetocaloric effect. *Physical Review B*, v. 64, n. 144406, 2001. Citado na página 28.
- SATO, M.; ISHII, Y. Simple and approximate expressions of demagnetizing factors of uniformly magnetized rectangular rod and cylinder. *Journal of Applied Physics*, v. 66, n. 2, p. 983–985, 1989. Citado na página 56.

- SCHAFFER, B. *Development of a magnetocaloric test apparatus*. Dissertação (Mestrado) — Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, Agosto 2016. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 48.
- SMITH, A. et al. Materials challenges for high performance magnetocaloric refrigeration devices. *Adv. Energy Mat.*, v. 2, n. 11, 2012. Citado na página 28.
- SOUZA, A. C. de. *Modelagem e Simulação de um motor termomagnético de movimento alternado*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Agosto 2017. Citado na página 40.
- STAUSS, H. Efficiency of thermomagnetic generator. *Journal of applied Physics*, v. 30, n. 10, 1959. Citado na página 38.
- TAKAHASHI, Y.; YAMAMOTO, K.; NISHIKAWA, M. Fundamental performance of triple magnetic circuit type cylindrical thermomagnetic engine. *Electrical Engineering in Japan*, v. 154, n. 4, p. 360–365, 2006. Citado na página 39.
- N. Tesla. 1889. US Patent 396121. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 30.
- TREVIZOLI, P. et al. Magnetic heat pumps: An overview of design principles and challenges. *Science and Technology for the Built Environment*, v. 22, p. 507–519, 2016. Citado na página 28.
- TREVIZOLI, P. et al. Design of nested halbach cylinder arrays for magnetic refrigeration applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 395, p. 109–122, 2015. Citado na página 30.
- TREVIZOLI, P. V. *Development of thermal regenerators for magnetic cooling applications*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Agosto 2015. Citado 4 vezes nas páginas 40, 45, 46 e 47.
- UJIHARA, M.; CARMAN, G.; LEE, D. Magnetic heat pumps: An overview of design principles and challenges. *Applied Physics Letters*, v. 91, n. 093508, 2007. Citado na página 39.
- WORLD ENERGY COUNCIL. *World Energy Scenarios*. 2016. Disponível em: <www.worldenergy.org/>. Acesso em: 2016. Citado na página 27.

Apêndices

APÊNDICE A – Montagem do Circuito Magnético

O presente capítulo apresenta os detalhes da etapa de montagem do circuito magnético, com o objetivo de possibilitar um melhor entendimento do processo de montagem e auxiliar em trabalhos futuros.

A.1 Preparação

Devido à grande força magnética, de atração e repulsão, entre os blocos de ímãs permanentes, é importante que todos os procedimentos sejam feitos com extremo cuidado e atenção. Qualquer descuido pode ocasionar acidentes graves, além de acarretar problemas na montagem, os quais podem inviabilizar tanto a montagem final do circuito como não reproduzir o campo magnético esperado a partir do projetado.

Logo, é importante selecionar e utilizar equipamentos de proteção adequados. Além disso, antes de iniciar qualquer um dos processos de montagem/colagem descritos abaixo, sempre deve-se identificar com caneta permanente da orientação de polaridade dos ímãs, a fim de evitar problemas relacionados com montagem errada do circuito.

A.1.1 Equipamentos de Proteção

Dentre os equipamentos de proteção, utilizam-se luvas de látex, Figura A.1a para evitar contato da pele com cola epóxi e outros produtos químicos utilizados durante a preparação e colagem; luvas de proteção, Figura A.1b, utilizadas para o manuseio dos ímãs; espátula de plástico, Figura A.1c, para distribuir a cola epóxi, formando uma película homogênea de cola sobre a superfície a ser colada; papel toalha, Figura A.1d, acetona e álcool, para a limpeza entre as etapas de montagem, mantendo o ambiente, ferramentas e peças sempre limpos e organizados.

Para maior segurança e organização, foram confeccionadas estações de trabalho de madeira, conforme ilustra a Figura A.2, para realizar os processos de colagem, bem como armazenar as peças pós-colagem. Desta forma, mantem-se os ímãs isolados durante os processos, evitando o contato com outros materiais magnéticos, o que poderia resultar em acidentes ou danificar as peças durante o processo de secagem da cola.

Figura A.1 – Equipamentos de proteção individual (a) Luvas de Látex; (b) Luvas de proteção; (c) Espátula de Plástico; (d) Papel toalha



Figura A.2 – Estação de trabalho para manuseio dos ímãs e armazenamento e acetona para a limpeza



A.1.2 Preparação inicial para a colagem dos ímãs

Antes de iniciar o processo de colagem, faz-se a identificação das polaridades de todos os blocos de ímãs permanentes que serão utilizados por meio de um identificador de polos magnéticos. Em seguida, utilizando a máquina de jateamento com esferas de vidro, todas as superfícies que serão coladas, incluindo os blocos de ímãs, as partes de alumínio e aço 1020, são impostas a um tratamento superficial. Este tratamento é importante para aumentar a rugosidade superficial, aumentando assim a área de contato entre as superfícies coladas, garantindo uma melhor aderência. Após o jateamento, as peças são limpas utilizando acetona e papel toalha, e reservadas adequadamente.

Para facilitar a montagem e evitar erros, os polos dos ímãs foram identificados conforme a Figura A.3 abaixo. Dessa forma, identificou-se todas as peças que faziam parte da montagem com o correspondente número. Nas peças dos polos 1 e 4, o polo norte do ímã foi colado, enquanto nas peças dos polos 2 e 3 colou-se o polo sul, conforme ilustra a Figura A.4.

Figura A.3 – Identificação dos Polos

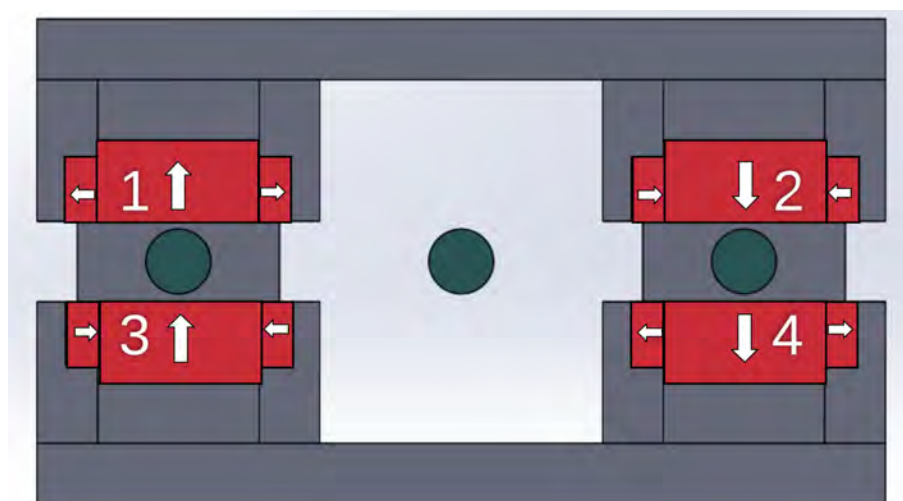
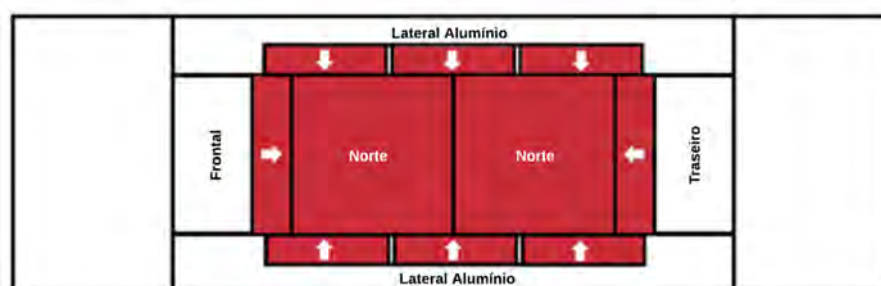


Figura A.4 – Ex Polo 2/3 visto de cima



A.2 Colagem

Para a colagem dos blocos de ímãs em suas respectivas peças foi utilizada cola epóxi bi componente, modelo DP460 da 3M. Antes da aplicação da cola epóxi, todas as superfícies (a ser coladas ou não), bem como as ferramentas, eram limpas novamente. As ferramentas eram tratadas com um desmoldante PVA para evitar estas ficassem coladas permanentemente após a cura da cola epóxi. Na sequência, a cola epóxi era aplicada nas superfícies utilizando a pistola aplicadora e bico misturador, e distribuída com o uso da espátula. Após os procedimentos de colagem mantinham-se as peças por 24h armazenados para a cura completa da cola.

A.2.1 Colagem dos ímãs frontais na peça de aço

Inicialmente foi feita a colagem dos concentradores frontais, conforme a Tabela 3.2. Esse processo não exigiu o uso de ferramentas especiais. Os blocos de ímãs permanentes foram jateados na face de 50,8 x 25,4 mm, sendo quatro na face norte (para os polos 1 e

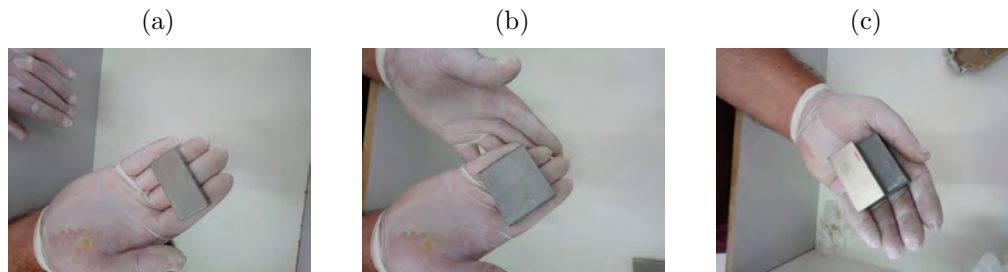
Figura A.5 – Cola epóxi SP460



4) e quatro na face sul (para os polos 2 e 3), conforme ilustra a Figura A.6a.

Na sequência, aplica-se cola epóxi que é espalhada na face do ímã, a cola, tomando o devido cuidado com a força de atração magnética, na face jateada do bloco de aço 1020, apresentado na Figura A.6b Após a colagem, as peças foram armazenados separadamente numa caixa até a cura da cola. O resultado final da colagem dos ímãs frontais pode ser visto na Figura A.6c.

Figura A.6 – (a) Bloco de ímã permanente jateado e limpo; (b) peça de aço 1020 usinada, face jateada para cima; (c) resultado final da colagem dos ímãs frontais



A.2.2 Colagem dos ímãs laterais no alumínio

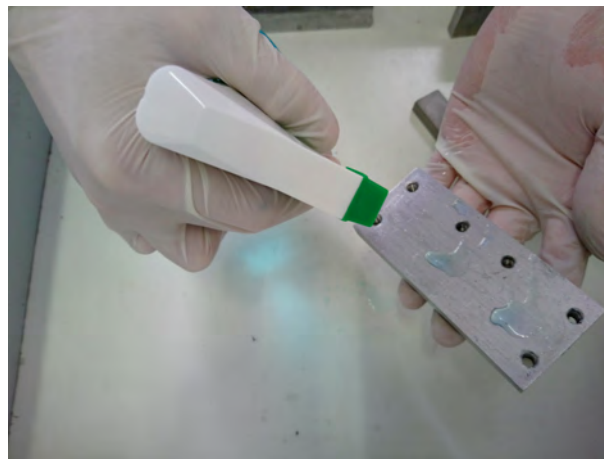
Os concentradores laterais são compostos por 3 ímãs permanentes na medida de 40x20x10 mm, (Tabela 3.2), colados em uma peça de alumínio, apresentada na Figura A.7. Para a colagem desta peça uma ferramenta específica, feita em alumínio, foi desenvolvida especificamente para facilitar este processo. A ferramenta também possui uma chapa de aço 1020, que ajuda a posicionar os blocos de ímã permanente durante o processo de colagem.

Inicialmente aplica-se o desmoldante em todas as partes da ferramenta, conforme ilustra a Figura A.8 e espalha-se para criar uma película que protegerá a ferramenta da cola epóxi. Assim, evita-se que a peça final fique aderida na ferramenta, e facilita, posteriormente, desmontagem da ferramenta após a cura da cola.

Figura A.7 – Peça Lateral de Alumínio

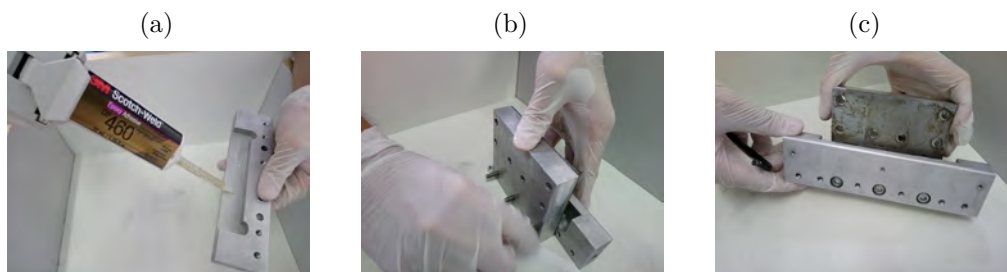


Figura A.8 – Aplicação de desmoldante na ferramenta



Na sequência, aplica-se a cola na região jateada aonde o ímã será colado, sendo a cola espalhada com a espátula (Figura A.9a). Logo após, monta-se o conjunto peça de alumínio e ferramenta por meio do uso de parafusos e porcas, conforme ilustra a Figura A.9b, resultando no conjunto fixo apresentado na Figura A.9c.

Figura A.9 – (a) Bloco de ímã permanente jateado e limpo; (b) peça de aço 1020 usinada, face jateada para cima; (c) resultado final da colagem dos ímãs frontais



Em seguida, aplica-se mais cola nas superfícies do ímã a serem coladas, especialmente na face 40x20. Tomando-se o devido cuidado, aproxima-se o bloco da placa principal guia em aço 1020 (Figura A.10a), e depois posiciona-se devidamente o bloco de ímã na peça de alumínio, conforme ilustra, sequencialmente, as Figura A.10(b), (c) e (d).

Após posicionar corretamente o bloco de ímã, o mesmo é fixado utilizando a peça

Figura A.10 – Posicionamento do ímã (a) aproximação do ímã na placa principal da ferramenta; (b) Ímã na placa da ferramenta (c) Posicionamento do ímã (d) Ímã em sua posição final

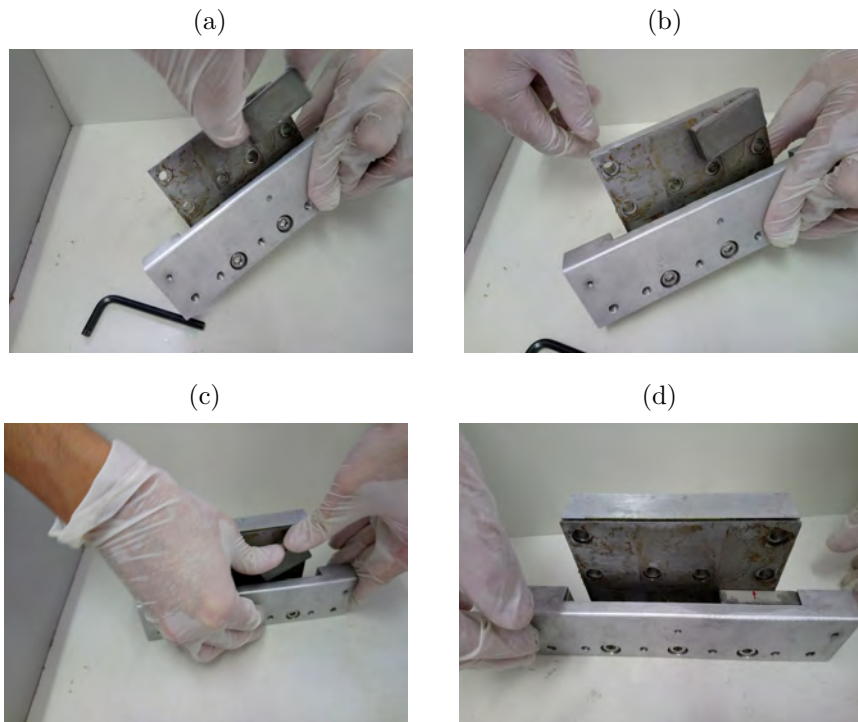
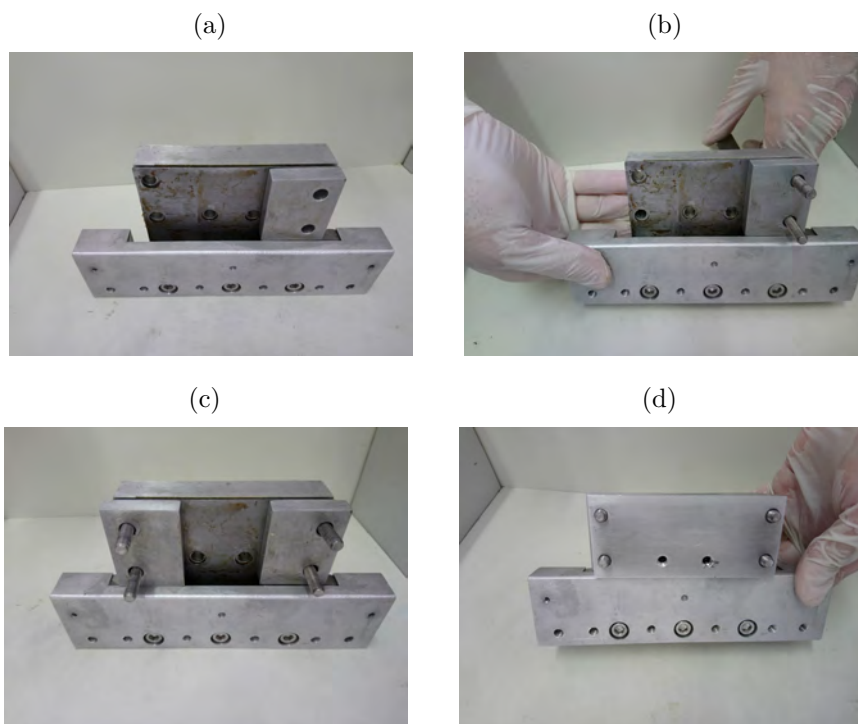


Figura A.11 – Fixação do primeiro e segundo ímãs (a) Posicionamento do bloco de fixação do primeiro ímã (b) Fixação do bloco de fixação na placa principal (c) Fixação do segundo ímã (d) Fixação da placa frontal da ferramenta



de fixação da ferramenta, conforme mostram as Figura A.11(a) e (b). O procedimento descrito é repetido para o bloco da outra extremidade (Figura A.11c). Após os dois blocos das extremidades estarem devidamente fixos, a placa frontal da ferramenta (Figura A.11d) é colocada para evitar que os dois ímãs já posicionados se desloquem.

Por fim, cola-se o ímã central (Figura A.12a). Neste processo, os blocos já montados tenderão a expulsar o ímã central da sua posição de montagem. Logo, por meio do auxílio de uma peça de fixação da ferramenta, empurra-se o ímã central até sua posição final (Figura A.12b), e então parafusa-se a peça de fixação de forma a manter o ímã em sua posição (Figura A.12c).

Figura A.12 – Término da montagem do concentrador lateral (a) Posicionamento do ímã central; (b) e (c) Utilização do bloco de fixação para empurrar o ímã para sua posição final; (d) Ímã na posição final com bloco de fixação fixado no bloco frontal

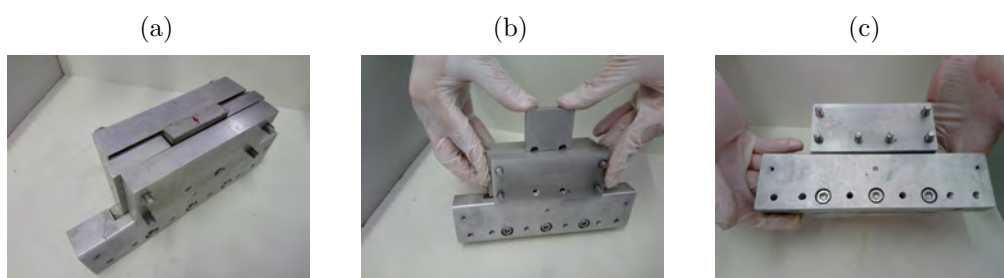


Figura A.13 – Concentrador lateral finalizado



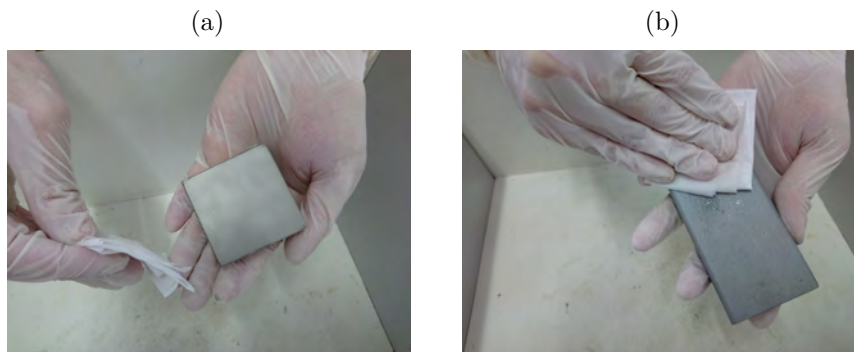
O conjunto final montado é armazenado por 24h para a cura completa da cola epóxi. Após esse período, desmonta-se a ferramenta e, na sequência, é feita a avaliação da colagem e confere-se novamente os polos do ímã utilizando o identificador de polos magnético. Por fim, lixam-se os excessos de cola e limpa-se a peça, que é posteriormente embalada com papelão e armazenada. A Figura A.13 mostra o resultado final da colagem dos concentradores laterais.

A.2.3 Colagem dos Ímãs Centrais

Os ímãs centrais são compostos por dois ímãs permanentes de 50,8x50,8x25,4 mm, (Tabela 3.2), colados sobre uma peça de aço 1020, conforme apresenta a Figura A.14a.

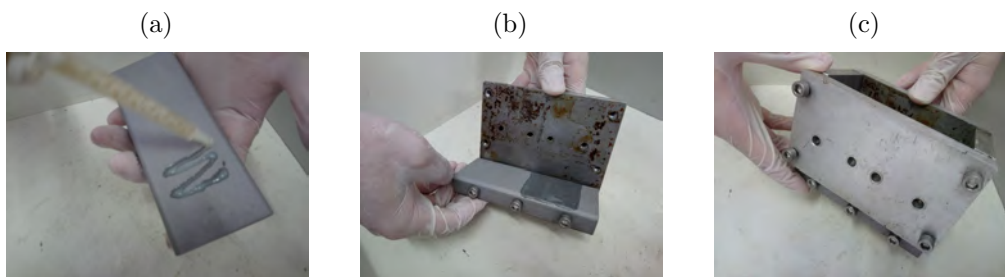
Para a colagem desta peça também foi necessário desenvolver uma ferramenta específica, feita em alumínio, para facilitar a montagem. Esta ferramenta também possui uma chapa de aço 1020, que ajuda a posicionar os blocos de ímã permanente durante o processo de colagem.

Figura A.14 – (a) bloco de ímã permanentes; e (b) peça em aço 1020, devidamente limpos, os quais compõem a peça central do circuito magnético.



Da mesma forma que foi feita com os concentradores laterais, inicialmente faz-se a limpeza dos ímãs e da peça em aço 1020, e aplica-se o desmoldante em todas as partes da ferramenta. Em seguida, aplica-se a cola epóxi na região da peça onde será colado o ímã permanente (Figura A.15a), espalha-se a cola com a espátula (Figura A.15b) e monta-se a ferramenta ao redor da peça (Figura A.15c).

Figura A.15 – Aplicação de cola e montagem da ferramenta (a) aplicação de cola; (b) Montagem da placa principal da ferramenta; (c) Placa principal fixada; (d) Montagem final da ferramenta



Em seguida, aplica-se mais cola na superfície do ímã que será colada, face 50,8x50,8 mm (Figura A.16a). Tomando o devido cuidado, aproxima-se o bloco da placa principal guia em aço 1020 (Figura A.16b). Com o auxílio de uma peça de fixação da ferramenta, empurra-se o bloco de ímã até sua posição final (Figura A.16c), e então parafusa-se a peça de fixação de forma a manter o ímã em sua posição (Figura A.16d). Neste ponto, desmonta-se o conjunto ímã e ferramenta (Figura A.16e) e remove-se o excesso de epóxi, resultando na montagem parcial apresentada na Figura A.16f, a qual é reservada e aguarda-se 24h.

Após a cura, prepara-se novamente a mesma peça, fazendo a limpeza, a aplicação do desmoldante em todas as partes da ferramenta e a aplicação da cola nas superfícies a se-

rem coladas, (Figura A.17a). Em seguida monta-se novamente o conjunto peça-ferramenta (Figura A.17b), e repete-se o procedimento de colagem para o segundo bloco de ímã (Figura A.17(c)-(e)). Após o posicionamento do segundo bloco de ímã permanente, o mesmo é travado com parafusos finalizando a montagem do conjunto da ferramenta (Figura A.17f). Por fim, este conjunto é devidamente armazenado até a cura completa da cola.

Figura A.16 – (a) aplicação de cola; (b) aproximação com a placa principal da ferramenta; (c) utilização peça de fixação da ferramenta para empurrar o ímã até sua posição final; (d) bloco de ímã em sua posição final; (e) desmontagem da ferramenta; (f) montagem parcial da peça após a cura da cola epóxi.

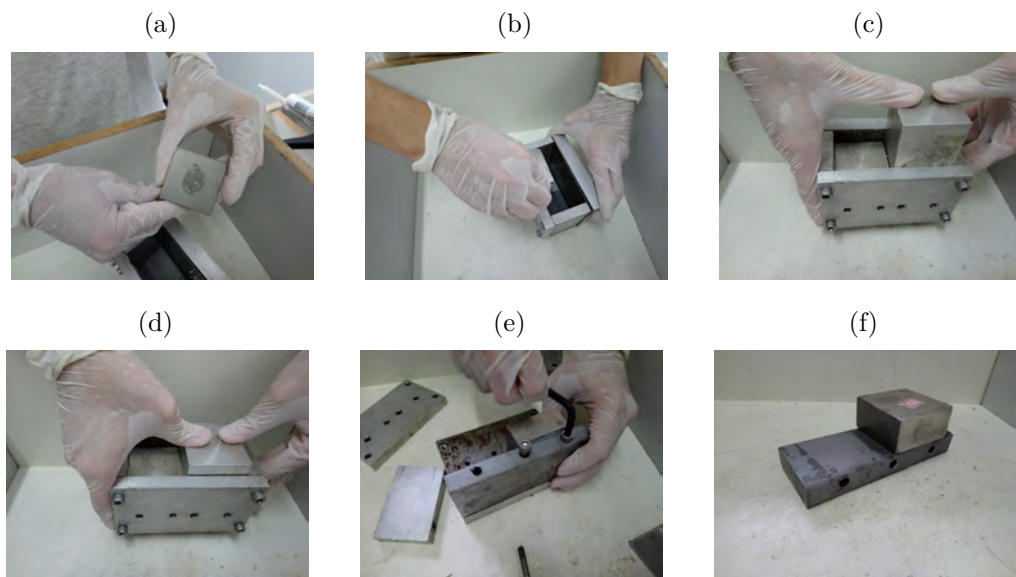
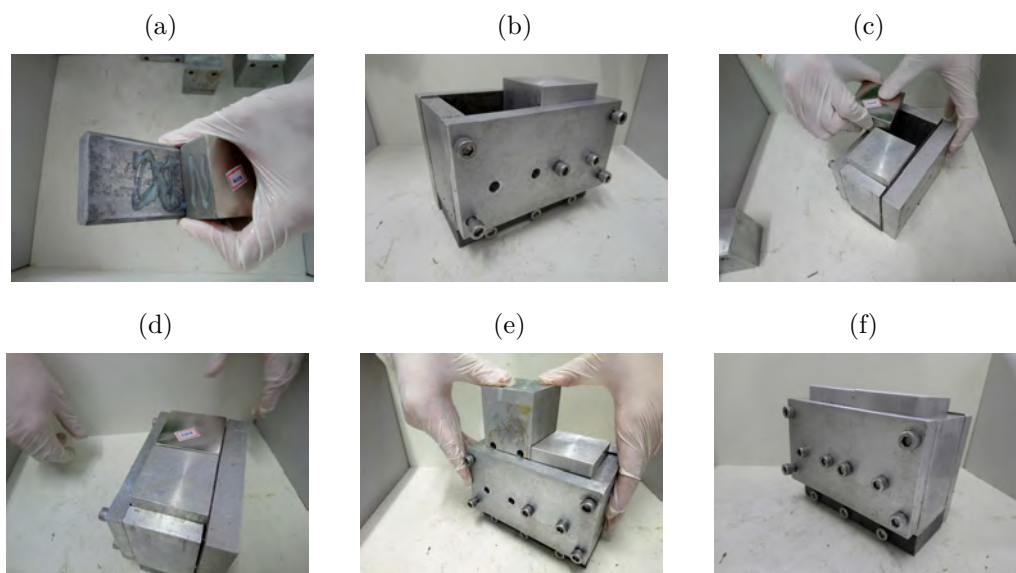
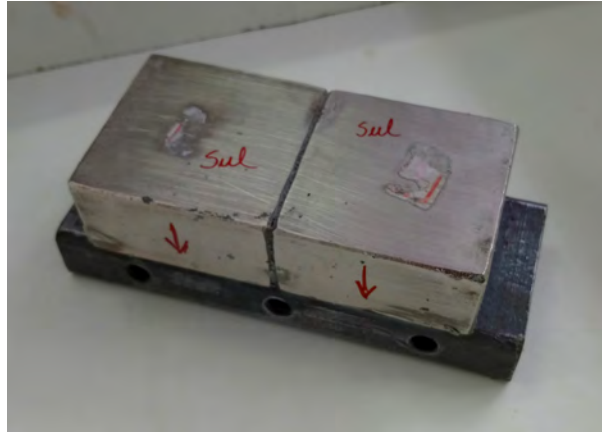


Figura A.17 – Aplicação de cola e montagem da ferramenta (a) aplicação de cola; (b) Montagem da placa principal da ferramenta; (c) Placa principal fixada; (d) Montagem final da ferramenta



Por fim, após a cura, desmonta-se a ferramenta e, na sequência, é feita a avaliação da colagem e confere-se novamente os polos do ímã utilizando o identificador de polos magnético. Lixam-se os excessos de cola e limpa-se a peça, que é posteriormente embalada com papelão e armazenada. A Figura A.18 mostra o resultado final da colagem dos ímãs principais.

Figura A.18 – Ímã principal montado

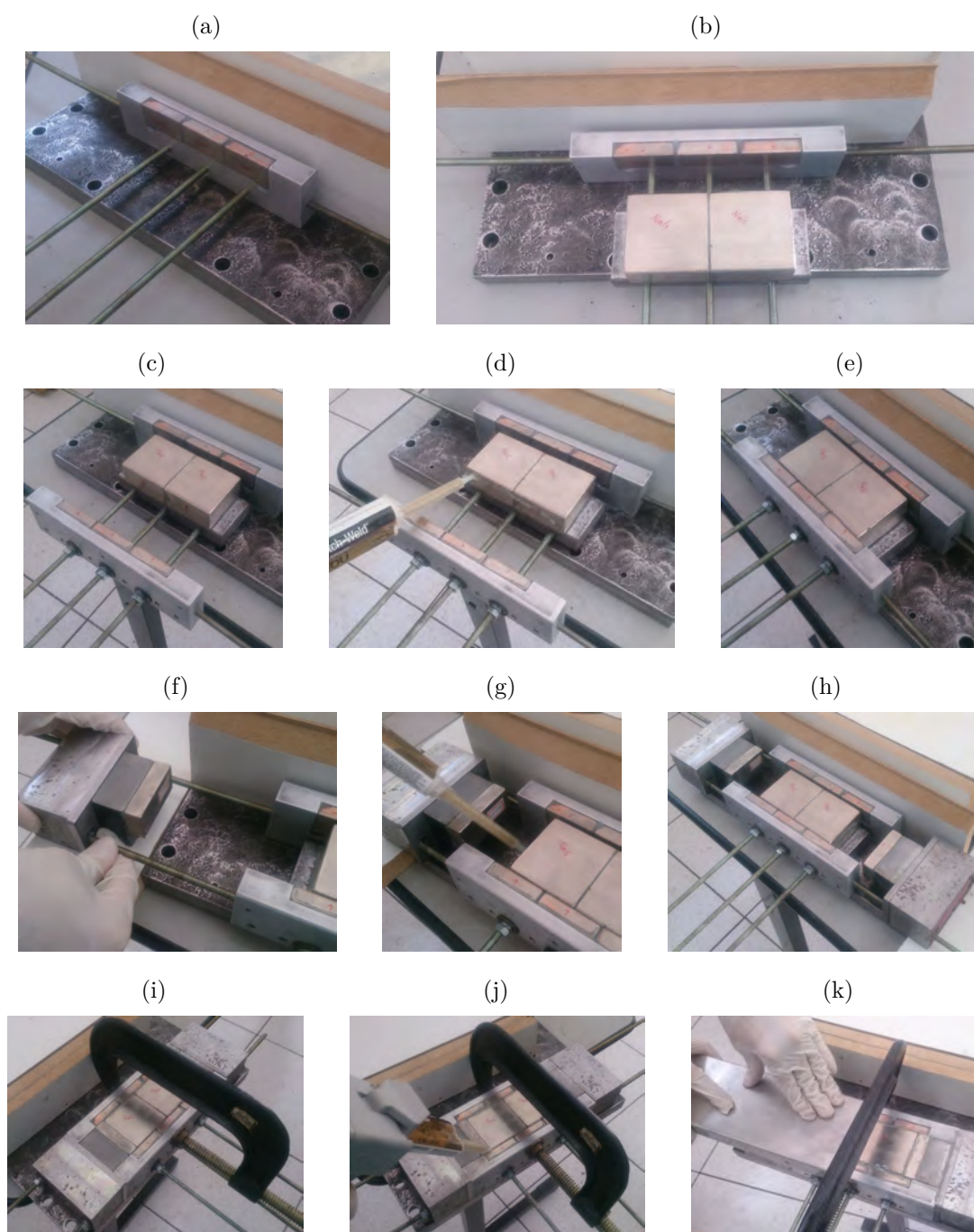


A.3 Montagem

Nesta etapa serão detalhados os procedimentos de montagem dos polos magnéticos do circuito, bem como a montagem final do circuito magnético. Inicialmente, fixa-se o concentrador lateral interno na placa base com parafusos, e coloca-se as barras rosca-das que servirão como guias para a aproximação das outras peças (Figura A.19a). Em seguida, coloca-se o ímã central nas barras rosca-das, e o posiciona o mais próximo possível do concentrador lateral fixo na placa base (Figura A.19b). Posteriormente, coloca-se o segundo concentrador lateral, com as barras rosca-das já fixadas nas laterais (Figura A.19c), e aplica-se cola no ímã conjunto central na região onde será fixada a peça lateral, conforme ilustra a Figura A.19d. Como todos os ímãs do polo tendem a se repelir, após certo ponto a aproximação dos conjuntos só será possível forçando as peças móveis com o auxílio de porcas nas barras rosca-das, até as peças ficarem quase encostadas (Figura A.19e).

Em seguida, coloca-se os concentradores frontais (Figura A.19f), aplica-se cola nas superfícies corretas (Figura A.19g), e faz-se a aproximação utilizando porcas nas barras rosca-das (Figura A.19h), assim como foi feito com os concentradores laterais, até chegar ao posicionamento final apresentado na Figura A.19i. Neste ponto, utilizou-se um grampo tipo C para forçar todos os conjuntos no lugar correto, alinhou-se todas os conjuntos móveis em relação a suas furações, e colocou-se todos os parafusos que mantém o polo em

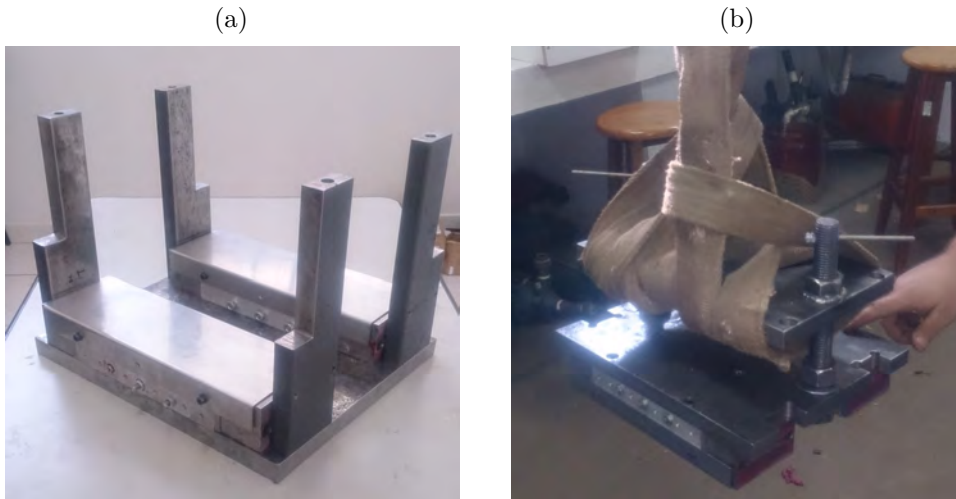
Figura A.19 – (a) fixação do concentrador lateral interno na base e instalação de barras roscadas guias; (b) aproximação do conjunto central utilizando as barras roscadas guias; (c) aproximação do concentrador lateral utilizando as guias; (d) aplicação de cola; (e) posição parcial para montagem dos concentradores frontais; (f) aproximação do concentrador frontal; (g) aplicação de cola; (h) posicionamento parcial dos concentradores frontais; (i) montagem final de todos os conjuntos; (j) Aplicação de cola para colagem da placa de proteção; (k) instalação da placa de proteção.



contato com a placa base. Por fim, aplicou-se cola na superfície, especialmente nas junções dos ímãs (Figura A.19j), e colocou-se uma placa protetora em inox (Figura A.19k), para

proteção da superfície dos ímãs bem como dar maior estabilidade ao polo.

Figura A.20 – Aplicação de cola e montagem da ferramenta (a) aplicação de cola; (b) Montagem da placa principal da ferramenta; (c) Placa principal fixada; (d) Montagem final da ferramenta



O mesmo procedimento é repetido para a montagem dos demais polos magnéticos, sendo montada completamente as bases inferior e superior do circuito. Destaca-se que foram colocadas algumas partes em madeira para garantir maior segurança durante do segundo polo magnético de uma mesma base. A Figura A.10a mostra a base inferior finalizada, onde destaca-se as barras guias parafusadas na base inferior. Para a montagem final, instalam-se o sistema de ajuste de altura do gap magnético. Finalmente, içou-se a parte superior com a ajuda de um guincho hidráulico, e posicionou-a sobre a base inferior, conforme na Figura A.10b, sendo, na sequência, parafusada a base superior nas barras guias.