

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCOS JOSÉ SUSIN

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM ATUADOR
PLANAR DE ARMADURA SEM NÚCLEO
FERROMAGNÉTICO**

Porto Alegre

2016

MARCOS JOSÉ SUSIN

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM ATUADOR
PLANAR DE ARMADURA SEM NÚCLEO
FERROMAGNÉTICO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: ENERGIA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho

Porto Alegre

2016

MARCOS JOSÉ SUSIN

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM ATUADOR
PLANAR DE ARMADURA SEM NÚCLEO
FERROMAGNÉTICO**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

Doutor em Engenharia Elétrica, Cardiff University, Cardiff,
País de Gales, Reino Unido.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marília Amaral da Silveira, ULBRA

Doutora em Engenharia Elétrica, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

Prof. Dr. Luis Alberto Pereira, UFRGS

Doutor em Engenharia Elétrica, Universität Kaiserslautern, Alemanha.

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor em Engenharia Elétrica, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

Coordenador do PPGE: _____

Prof. Dr. Valner João Brusamarello

Porto Alegre, setembro, 2016.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação. O meu muito obrigado.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa. Em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, pelos conhecimentos proporcionados, pelo incentivo, paciência e orientação de maneira sábia e dedicada durante a realização deste trabalho.

Também gostaria de agradecer a todos os colegas do programa de pós-graduação e do LMEAE pela troca de experiências, apoio e amizade. Em especial à Prof. Marília Amaral da Silveira pelas considerações feitas ao trabalho realizado, além de auxiliar de forma prestativa quando solicitada.

RESUMO

Este trabalho apresenta a proposta de topologia para um atuador planar sem núcleo ferromagnético na armadura, sua análise teórica em termos de forças de tração que nele atuam, seu desenvolvimento e resultados teóricos e experimentais obtidos como base em um protótipo construído. O atuador planar tem características inovadoras: uma armadura estacionária sem ferro com enrolamentos ortogonais e dois carros acoplados magneticamente um ao outro com quatro ímãs permanentes de NdFeB de alto produto energético. A armadura desse estator é composta por enrolamentos planares multifases colocados de tal maneira que dois enrolamentos ortogonais independentes são produzidos e assim definem duas forças de propulsão ortogonais. Cada carro possui uma culatra de aço que suporta os ímãs permanentes e que está ligada a uma estrutura de suspensão mecânica para permitir o movimento bidirecional sobre a área definida pela armadura. Esse tipo de atuador pode ser usado em aplicações que requerem o movimento em qualquer direção ao longo de um plano. O protótipo desenvolvido neste trabalho foi testado com a finalidade de validar suas características estáticas de operação com relação à análise numérica e o modelo analítico. Os valores de densidade de fluxo magnético no entreferro e de força planar de propulsão, obtidos através de ensaios, apresentaram uma boa aproximação em relação aos valores obtidos através da simulação numérica e do modelo analítico. Para os ensaios de força normal este trabalho preocupou-se em analisar numérica e experimentalmente os resultados, que também apresentaram valores convergentes e satisfatórios para os itens propostos. Para os ensaios do atuador planar com regulagem de entreferro de 12 mm e 24 mm foram encontradas sensibilidades médias da força planar de propulsão de 7,19 N/A e 4,13 N/A respectivamente.

Palavras-chave: Atuador Planar, Forças Eletromagnéticas em Atuador Planar, Simulação Numérica, Modelo Analítico.

ABSTRACT

This work presents a proposal of topology of a planar actuator with an ironless armature core, its theoretical analysis in terms of the driving forces that acting on the actuator, its development, the theoretical and experimental results obtained for an implemented prototype. Such planar actuator has innovative features: a stationary and ironless armature core with orthogonal planar windings and two cars magnetically coupled to each other by means of four high energy-product NdFeB permanent magnets. The stator of the actuator comprehends an ironless core with two sets of multiphase windings placed in such a way that two independent orthogonal windings form the armature in a way that allows the yielding of two orthogonal propulsion forces. Each car has a back iron which supports two permanent magnets and is supported by a suspension structure to allow bidirectional movement of the coupled cars. This type of actuator can be used in applications that require the movement in any direction over a plane. The prototype of this study was tested in order to validate their static characteristics of operation with respect to the numerical analysis and the analytical model. The values of magnetic flux density in the air gap and the planar propulsion force obtained through testing, showed a good agreement with the values obtained by numerical simulation and analytical model. The normal force tests showed good agreement with the results of the numerical analysis. The tests of planar actuator with air gaps of 12 mm and 24 mm were found to produce an average sensitivity of the planar propulsion force of 7.19 N/A and 4.13 N/A respectively.

Keywords: Planar Actuator, Electromagnetic forces in Planar Actuator, Numerical Simulation, Analytic Simulation.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 PROPOSTA E OBJETIVOS DO PROJETO.....	23
1.2 APRENDIZADO COM O PROJETO.....	24
2 ATUADORES LINEARES E PLANARES	27
2.1 CONCEITOS DE ATUADORES PLANARES E TOPOLOGIAS	27
2.2 ESTRUTURA BÁSICA E CONCEITUAL DE ATUADORES PLANARES COM NÚCLEO DA ARMADURA DE MATERIAL FERROMAGNÉTICO	34
3 ATUADOR PLANAR SEM NÚCLEO FERROMAGNÉTICO NA ARMADURA	38
3.1 O ATUADOR PLANAR	41
3.2 DESCRIÇÃO DO ATUADOR PLANAR	42
3.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ATUADOR.....	47
3.4 DESCRIÇÃO DE OPERAÇÃO DO ATUADOR	56
3.5 ANÁLISE DO CIRCUITO MAGNÉTICO DO ATUADOR PLANAR CONTENTO ÍMÃS PERMANENTE.....	59
3.6 EQUIVALENTE ELÉTRICO DO CIRCUITO MAGNÉTICO DO ATUADOR PLANAR	64
4 MODELO ANALÍTICO DO ATUADOR PLANAR.....	68
4.1 CAMPO MAGNÉTICO NO ATUADOR PLANAR.....	68
4.2 ANÁLISE DAS FORÇAS DE PROPULSÃO DO ATUADOR PLANAR	75
5 MODELO NUMÉRICO DO ATUADOR PLANAR	81
5.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	81
5.2 ELABORAÇÃO DO MODELO PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .	84
5.3 ANÁLISE NUMÉRICA DO ATUADOR PLANAR	86
5.4 RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA DO ATUADOR PLANAR.....	87
5.4.1 SIMULAÇÕES DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO	89
5.4.2 SIMULAÇÕES DA FORÇA DE PROPULSÃO E DA FORÇA NORMAL.....	96
6 ENSAIOS DO ATUADOR PLANAR	100
6.1 MEDIÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO.....	100

6.1.1 MEDIÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO NO ENTREFERRO	102
6.2 MEDIÇÃO DAS FORÇAS NO ATUADOR PLANAR	107
6.2.1 MEDIÇÃO DA FORÇA PLANAR DE PROPULSÃO	107
6.2.2 MEDIÇÃO DA FORÇA NORMAL.....	119
6.2.3 MEDIÇÃO DA FORÇA DE DESACOPLAMENTO	124
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	129
7.1 RECOMENDAÇÕES	133
REFERÊNCIAS	134
Apêndice A: Curva de magnetização do ímã permanente NdFeB a 26°C.	137
Apêndice B: Curva de magnetização do ímã permanente NdFeB a50°C.	138
Apêndice C: Comparativos de Curvas de magnetização ímã permanente NdFeB à 26°C e a 50°C.....	139
Apêndice D : Curva de magnetização do aço SAE 1045.	140
Apêndice E: Desenho de Culatra de Aço SAE 1045.....	141
Apêndice F: Desenho de Ímã Permanente - NdFeB.	142
Apêndice G: Desenho Suporte Central de Mancais.	143
Apêndice H: Desenho de Apoio para Culatras	144
Apêndice I: Desenho de apoio culatra -peça lateral	145
Apêndice J: Desenho de mesa para suporte de bobinas	146
Apêndice K : Desenho de apoio mancais central	147
Apêndice L : Desenho de apoio para suporte de bobinas	148
Apêndice M: Desenho de suporte mancais	149
Apêndice N: Desenho de gabarito para medidas com gaussímetro.....	150
Apêndice O: Desenho de dimensional bobina padrão.....	151
Apêndice P: Desenho chanfrona para confecção bobina	152
Apêndice Q: Desenho da estrutura de suporte geral do atuador	153
Apêndice R: Gráfico da curva normal do ímã permanente e reta de carga com ponto de operação do ímã permanente para entreferos de 12 mm e 24 mm.	154
Apêndice S: Fluxograma das etapas do processo de prototipagem do atuador planar.....	155

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fases de desenvolvimento do atuador planar.....	26
Figura 2: Desenho esquemático de atuador planar com dupla camada.....	28
Figura 3: (a) Desenho esquemático com detalhes do estator e parte móvel. (b) Fotografia do experimento	31
Figura 4: Desenho esquemático de topologias de atuadores aplanares, (a) atuador planar com topologia do tipo espinha de peixe, (b) atuador planar com topologia do tipo eletrodinâmico.	32
Figura 5: Ilustração de atuador planar com topologia do tipo espinha de peixe. (a) Desenho esquemático com vista de topo do atuador planar (b) Ilustração do experimento	33
Figura 6: Ilustração do atuador planar com núcleo da armadura de material ferromagnético (a) Visão geral do atuador e detalha das bobinas envolventes (b)Exemplo de operação com excitação das fases 9 e 11	35
Figura 7: Ilustração de atuador planar com bobinas planificadas (a) Desenho esquemático do atuador planar com núcleo ferromagnético compósito (b) Exemplo de movimento ao longo do eixo x	37
Figura 8: Topologia do Atuador Planar.	39
Figura 9: Enrolamentos polifásicos ao longo do eixo x e eixo y	39
Figura 10: Duplo carro posicionado sobre fases	40
Figura 11: Fotografias com visão geral e detalhes do Atuador Planar.	41
Figura 12: Fotografia dos enrolamentos planificados do atuador, com detalhes do sistema de impregnação por resina epóxi e distribuição das fases sobre o apoio da mesa de acrílico.	44
Figura 13: Desenhos dos principais componentes do carro do atuador com vista detalhadas da culatra de aço SAE 1045 e do ímã permanente de NdFeB.....	46
Figura 14: Ilustração do atuador planar com detalhes: estrutura de sustentação do atuador planar, guias e rolamentos lineares, mesa de apoio dos enrolamentos e visão geral dos carros do atuador planar.	47

Figura 15: Vista frontal com detalhes dos componentes ativos do atuador planar, indicando localização das culatras, ímãs e enrolamentos.....	49
Figura 16: Vista frontal do carro do atuador com posição relativa à fase do enrolamento x da bobina planar que está sendo excitada por corrente e imersa no campo.	52
Figura 17: Vista em perspectiva do atuador planar, com destaque para uma fase do enrolamento x , mostrando os vetores responsáveis pela produção de força no eixo x	54
Figura 18: Vista em perspectiva do atuador planar, com destaque para uma fase do enrolamento y , mostrando os vetores responsáveis pela produção de força no eixo y	55
Figura 19: Descrição de operação do atuador planar na produção de movimento bidirecional: (a) carros em repouso; (b) carros em movimento ao longo do eixo x ; (c) carros em movimento ao longo do eixo y ; (d) carros em movimento diagonal devido a excitação simultânea das fases dos enrolamentos x e y ; (e) Vista tridimensional da descrição de operação com detalhes de carros e enrolamentos.	58
Figura 20: Curva de desmagnetização de um ímã permanente	60
Figura 21: Circuito magnético com ímã permanente, núcleo de ferro e entreferro	62
Figura 22: Circuitos equivalentes simplificados: (a) circuito magnético do atuador planar (b)análogo elétrico do circuito magnético do atuador planar	65
Figura 23: Desenho da geometria do Atuador planar: vista lateral.	70
Figura 24: Desenho da geometria do Atuador planar: (a) vista superior e (b) vista frontal....	71
Figura 25: Representação gráfica bidimensional da magnetização em função do eixo x	73
Figura 26: Representação da densidade de corrente no atuador planar: (a) fase do enrolamento x com vetor densidade de corrente no eixo y (b) gráfico bidimensional da densidade de corrente no enrolamento x	77
Figura 27: Estator do atuador planar com representação de apenas uma fase do enrolamento y . O vetor densidade de corrente possui apenas componente em x	78
Figura 28: Fluxo geral do Método dos Elementos Finitos	82
Figura 29: Etapas da análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF).	83
Figura 30: Tetraedro unidade fundamento no Maxwell 3D	84
Figura 31: Detalha da vista frontal da malha do modelo virtual.	85
Figura 32: Detalhe da malha em vista 3D do modelo virtual.	86
Figura 33: Detalhes gerais da geométrica para análise numérica.....	89

Figura 34: Gráfico da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro de 12 mm para regiões sem condução de corrente.	90
Figura 35: Distribuição da densidade de fluxo magnético para Simulação 1, quando não existe regiões condutoras de corrente elétrica e o entreferro é de 12 mm: (a) vista esquemática do atuador em análise; (b) detalhe do mapeamento 3D dos carros do atuador planar com módulo da densidade de fluxo.	91
Figura 36: Distribuição da densidade de fluxo magnético para Simulação 1 e 4 quando não existe regiões condutoras de corrente elétrica para entreferros de 12 mm e 24 mm.	92
Figura 37: Gráfico da densidade de fluxo magnético para Simulação 1 na diagonal dos ímãs permanentes, na posição central dos ímãs no plano $z = 10\text{mm}$ do centro do entreferro.	93
Figura 38: Gráfico 3D da densidade de fluxo magnético para Simulação 1 na diagonal dos ímãs permanentes, na posição central do entreferro de 12 mm.	93
Figura 39: Distribuição da densidade de fluxo magnético para Simulação 3 e 6 com regiões condutoras de corrente elétrica, $I = 6\text{ A}$, na posição central dos entreferros de 12 mm e 24 mm.	94
Figura 40: Distribuição da densidade de fluxo magnético para Simulação 3, quando existe regiões condutoras de corrente elétrica $I = 6\text{ A}$ e o entreferro é de 12 mm: (a) vista esquemática do atuador em análise; (b) detalhe do mapeamento 3D dos carros do atuador planar com módulo da densidade de fluxo magnético.	95
Figura 41: Gráfico da força planar de propulsão em função das correntes na fase do enrolamento x localizado sob os ímãs permanentes, para as simulações 1, 2, 3, 4, 5 e 6.	97
Figura 42: Gráfico da força normal em função das correntes na fase do enrolamento x localizado sob os ímãs permanentes, para as simulações 1, 2, 3, 4, 5, e 6.	97
Figura 43: Gráfico da força planar de propulsão resultante da excitação por correntes das fases do enrolamento x e y localizado sob os ímãs permanentes, para as simulações 7.	99
Figura 44: Fotografia parcial do atuador planar com detalhes do posicionamento do gabarito e da ponteira de efeito Hall para medição da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no centro do entreferro.	101
Figura 45: Desenho esquemático do atuador planar com detalhes do posicionamento do gabarito e da ponteira de efeito Hall para medição da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no centro do entreferro.	102

Figura 46: Gráfico com valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético medido no centro do entreferro de 12 mm, através da diagonal dos carros superior e inferior, com corrente nula para simulação numérica, analítica e ensaio experimental.	103
Figura 47: Gráfico com valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético medida no centro do entreferro de 24 mm, através da diagonal dos carros superior e inferior, com corrente nula para simulação numérica analítica e ensaio experimental.	104
Figura 48: Gráfico tridimensional com valores pontuais interpolados da componente z do vetor densidade de fluxo magnético medido no centro do entreferro de 12 mm, através da diagonal dos carros superior e inferior, com corrente nula para ensaio experimental.	106
Figura 49: Gráfico tridimensional com valores pontuais interpolados da componente z do vetor densidade de fluxo magnético medido no centro do entreferro de 24 mm, através da diagonal dos carros superior e inferior, com corrente nula para ensaio experimental.	106
Figura 50: Esquema para determinação da força plana de propulsão F_x quando o enrolamento da fase x é energizado.	108
Figura 51: Fotográfica com disposição da instrumentação utilizada no experimento.	109
Figura 52: Desenho esquemático com disposição da instrumentação utilizada no experimento.	110
Figura 53: Esquema para determinação da força plana de propulsão F_y quando o enrolamento da fase y é energizado.	111
Figura 54: Gráfico da componente x da força planar de propulsão em função da corrente elétrica aplicada ao enrolamento x , para entreferro de 12 mm.	112
Figura 55: Gráfico da componente y da força planar de propulsão em função da corrente elétrica aplicada ao enrolamento y , para entreferro de 12 mm.	113
Figura 56: Gráfico da componente x da força planar de propulsão em função da corrente elétrica aplicada ao enrolamento x , para entreferro de 24 mm.	113
Figura 57: Gráfico da componente y da força planar de propulsão em função da corrente elétrica aplicada ao enrolamento y , para entreferro de 24 mm.	114
Figura 58: Esquema para determinação da força plana de propulsão resultante quando os enrolamentos da fase x e y foram energizados.	115

Figura 59: Desenho esquemático com disposição da instrumentação utilizada no experimento para medição da força planar de propulsão resultante.....	116
Figura 60: Gráfico da força planar de propulsão resultante em função da corrente elétrica aplicada nos enrolamentos x e y , para entreferro de 12 mm.....	117
Figura 61: Gráfico da força planar de propulsão resultante em função da corrente elétrica aplicada nos enrolamentos x e y , para entreferro de 24 mm.....	117
Figura 62: Gráfico da componente x da força planar de propulsão em função do deslocamento dos carros a partir da posição de origem, para ensaios com entreferro de 12 mm e 24 mm com corrente elétrica de 3 A aplicada a uma fase do enrolamento x	119
Figura 63: Fotografia do mecanismo de medida da força normal, para determinação da força plana da F_z quando o enrolamento da fase x é energizado.....	121
Figura 64: Desenho esquemático do mecanismo de medida da força normal, para determinação da força plana da F_z quando um enrolamento da fase x é energizado.	121
Figura 65: Gráfico da força normal que atua sobre os carros em função da corrente elétrica aplicada ao enrolamento x da bobina planar, quando o entreferro é de 12 mm.	122
Figura 66: Gráfico da força normal que atua sobre os carros em função da corrente elétrica aplicada ao enrolamento x da bobina planar, quando o entreferro é de 24 mm.	123
Figura 67: Fotografia com detalhe do mecanismo para medida da força de desacoplamento, na direção do eixo x quando ambos os carros estão alinhados ao o enrolamento da fase x	126
Figura 68: Desenho esquemático com detalhe do mecanismo para medida da força de desacoplamento, na direção do eixo x quando ambos os carros estão alinhados ao o enrolamento da fase x	126
Figura 69: Gráfico da força de desacoplamento dos carros a partir da posição alinhamento com uma fase do enrolamento x , com simulações de entreferro de 12 mm e 24 mm.	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características construtivas do atuador planar	43
Tabela 2: Características de projeto do atuador planar.....	67
Tabela 3: Detalhamento das análises numéricas em protótipo virtual	87
Tabela 4: Valores da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro para valores obtidos por medidas experimentais, pela análise numérica e pelo método analítico.	105
Tabela 5: Dados de sensibilidade média da força planar de propulsão, através dos ensaios do experimento, da simulação numérica e analítica para entreferros de 12 mm e 24 mm.....	114
Tabela 6: Dados de sensibilidade média da força planar de propulsão resultante, através dos ensaios do experimento, da simulação numérica e analítica para entreferros de 12 mm e 24 mm.....	118
Tabela 7: Dados da força normal nos ensaios do experimento e da simulação numérica para entreferros de 12 mm e 24 mm, quando os carros dos ímãs permanente são posicionados em alinhamento com o uma fase do enrolamento x	124
Tabela 8: Dados da força de desacoplamento nos ensaios do experimento para entreferros de 12 mm, 24 mm, quando os carros dos ímãs permanente são posicionados em alinhamento com uma fase do enrolamento x	127

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{A} : Potencial vetor magnético [Wb/m]

\vec{B} : Vetor densidade de fluxo magnético [T]

B_{Anl} : Densidade de fluxo magnético do modelo analítico [T]

B_{b_z} : Componente z do vetor densidade de fluxo magnético total na região dos enrolamentos, produzida pelas correntes nos enrolamentos da armadura [T]

\vec{B}_g : Vetor densidade de fluxo magnético no entreferro [T]

\vec{B}_{g_N} : Vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o ímã permanente N, produzida pelos ímãs permanentes [T]

$B_{g_{Tz}}$: Componente z do vetor densidade de fluxo magnético total no entreferro [T]

B_{g_z} : Componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro produzida pelos ímãs permanentes [T]

$B_{g_{zN}}$: Componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro produzida pelos ímãs permanentes, medida sob o ímã permanente N [T]

$(BH)_{máx}$: Máximo produto energético de um ímã permanente [J/m³]

$B_{n,m}$: Conjunto dos coeficientes de uma série dupla de Fourier

B_m : Densidade de fluxo no ímã permanente [T]

B_{Med} : Densidade de fluxo magnético medida [T]

B_{Num} : Densidade de fluxo magnético da simulação numérica [T]

\vec{B}_r : Vetor densidade de fluxo remanente ou remanência [T]

C_f : Coeficiente de espraçamento do fluxo magnético no entreferro

\vec{D} : Vetor densidade de fluxo elétrico ou indução elétrica [C/m²]

\vec{E} : Vetor intensidade de campo elétrico [V/m]

\vec{F} : Vetor força eletromagnética planar total, ou força planar total que age sobre o carro do atuador planar (vetor força de Laplace) [N]

F_{A_z} : Força magnética de atração normal ou força normal [N]

\vec{F}_N : Vetor força planar de propulsão produzida pelo ímã permanente N [N]

F_{xN} : Componente x da força planar de propulsão produzida por uma fase do enrolamento x, sob a ação do ímã permanente N [N]

F_{yN} : Componente y da força planar de propulsão produzida por uma fase do enrolamento y, sob a ação do ímã permanente N [N]

\vec{H} : Vetor intensidade de campo magnético [A/m]

H_{bx_y} : Componente y do vetor intensidade de campo magnético na região das fases do enrolamento y produzida por J_x [A/m]

H_{by_x} : Componente x do vetor intensidade de campo magnético na região das fases do enrolamento x produzida por J_y [A/m]

H_c : Força coercitiva [A/m]

H_{ci} : Coercitividade intrínseca [A/m]

H_{Fe} : Intensidade de campo magnético no ferro [A/m]

H_g : Intensidade de campo magnético no entreferro [A/m]

H_{g_z} : Componente z do vetor intensidade de campo magnético no entreferro, produzida pelos ímãs permanentes [A/m]

H_m : Intensidade de campo magnético dos ímãs permanentes [A/m]

H_{pm_z} : Componente z da intensidade de campo magnético na região dos ímãs permanentes, produzida por esses mesmos ímãs permanentes [A/m]

I : Corrente elétrica [A]

\vec{J} : Vetor densidade de corrente [A/m²]

\vec{J}_N : Vetor densidade de corrente nas fases dos enrolamentos da armadura, localizadas sob o ímã permanente N [A/m²]

J_x : Componente x do vetor densidade de corrente em uma fase do enrolamento y [A/m²]

J_{xN} : Componente x do vetor densidade de corrente em uma fase do enrolamento y, localizado sob o ímã permanente N [A/m²]

J_y : Componente y do vetor densidade de corrente em uma fase do enrolamento x [A/m²]

J_{yN} : Componente y do vetor densidade de corrente em uma fase do enrolamento x, localizado sob o ímã permanente N [A/m²]

J_o : Valor de pico das componentes x e y do vetor densidade de corrente nos enrolamentos da armadura [A/m²]

L_f : Fator de dispersão do fluxo magnético

\vec{M} : Vetor intensidade de magnetização [A/m]

\vec{M}_r : Vetor magnetização residual ou remanente [A/m]

M_z : Componente z do vetor intensidade de magnetização [A/m]

M_o : Modulo do vetor magnetização residual [A/m]

N : Índice relacionado com o par de ímãs permanentes dos carros, com $N=1$ para IP1 e IP3 e $N=2$ para IP2 e IP4

N_b : Número de espiras do enrolamento

T : Período da série de Fourier

V_N : Volume de integração que envolve as fases ativas do enrolamento da armadura, ou seja, corresponde ao volume dos condutores percorridos por corrente, que estão imersos no fluxo magnético produzido pelo ímã permanente N [m³]

i : Corrente elétrica em um condutor [A]

l : Comprimento total de um circuito magnético. Comprimento de um condutor metálico [m]

\vec{l} : Vetor cujo módulo é o comprimento ativo do condutor e cujos sentido e direção são paralelos a $q\vec{v}$ [m]

l_a : Profundidade ativa de uma fase do enrolamento x [m]

l_b : Altura ocupada pelos enrolamentos no entreferro do atuador planar [m]

l_d : Grandeza definida pela figura 19, corresponde à distância entre a fronteira do modelo e um ímã permanente, tanto através do eixo x , como do eixo y . Também está relacionada à área da superfície polar de cada ímã permanente, através da expressão $(2l_d)^2$ [m]

l_{Fe} : Comprimento da região em ferro [m]

l_g : Comprimento do entreferro [m]

l_{g1} : Comprimento do entreferro entre os ímãs permanentes IP1 e IP3 [m]

l_{g2} : Comprimento do entreferro entre os ímãs permanentes IP2 e IP4 [m]

l_m : Comprimento axial do ímã permanente [m]

l_t : Grandeza definida pela figura 19, correspondendo ao comprimento, tanto em x , quanto em y , do modelo em estudo [m]

s_a : Área da seção transversal ao fluxo de corrente no enrolamento da armadura [m²]

s_{af} : Área da seção de um condutor [m²]

s_g : Área da superfície transversal ao fluxo magnético em cada um dos entreferros [m²]

s_m : Área da superfície do ímã permanente [m²]

α : Variável definida por $\alpha = j \frac{2\pi n}{l_t}$ [rd/m]

β : Variável definida por $\beta = j \frac{2\pi m}{l_t}$ [rd/m]

δ : Variável definida por $\delta = \sqrt{-\beta^2}$ [rd/m]

γ : Variável definida pela equação $\gamma = \frac{\pi}{(l_t/2)} \sqrt{n^2 + m^2}$, onde n e m são números inteiros e reais [rd/m]

λ : Variável definida por $\lambda = \sqrt{-\alpha^2}$ [rd/m]

μ_o : Permeabilidade magnética do vácuo [H/m]

ϕ : Fluxo magnético [Wb]

ϕ_d : Fluxo magnético disperso [Wb]

ϕ_{Fe} : Fluxo magnético no ferro do circuito magnético [Wb]

ϕ_g : Fluxo magnético no entreferro [Wb]

ϕ_m : Fluxo magnético produzido pelo ímã permanente [Wb]

ψ : Potencial escalar magnético [A]

ψ_g : Potencial escalar magnético no entreferro [A]

ψ_{pm} : Potencial escalar magnético na região dos ímãs permanentes [A]

\mathfrak{R}_{fe1} : Relutância da culatra superior do atuador planar [Ae/Wb]

\mathfrak{R}_{fe2} : Relutância da culatra superior do atuador planar [Ae/Wb]

\mathfrak{R}_{g1} : Relutância do entreferro localizado entre os ímãs permanentes IP1 e IP3 [Ae/Wb]

\mathfrak{R}_{g2} : Relutância do entreferro localizado entre os ímãs permanentes IP2 e IP4 [Ae/Wb]

\mathfrak{T}_m : Força magnetomotriz total pela soma de \mathfrak{T}_{m1} , \mathfrak{T}_{m2} , \mathfrak{T}_{m3} e \mathfrak{T}_{m4} , respectivamente a f.m.m. produzida pelos ímãs permanentes IP1, IP2, IP3 e IP4 [Ae]

∇ : Operador nábla, que em coordenadas retangulares é igual $\frac{\partial}{\partial x} \bar{i} + \frac{\partial}{\partial y} \bar{j} + \frac{\partial}{\partial z} \bar{k}$

LISTA DE ABREVIATURAS

CC: Corrente Contínua

LMEAE: Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia

MEF: Método dos Elementos Finitos

NdFeB: Neodímio Ferro Borro

PCI: Placa de Circuito Impresso

PMA: Permanent Magnets Arrays

PPGEE: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

SAE 1045: Society of Automotive Engineers - Classificação Normativa de Aço tipo 1045

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1 INTRODUÇÃO

Em mecanismos de movimentação lineares ou planares que necessitem alta precisão comumente são aplicados atuadores planares de ímã permanente com múltiplos graus de liberdade, que podem ser usados devido a sua linearidade e baixa rigidez de movimentação. Para se obter uma posição precisa durante o movimento é necessária uma boa previsibilidade de força e isso se torna um pré-requisito para o correto dimensionamento do dispositivo.

Este trabalho apresenta as características básicas de um atuador planar sem núcleo ferromagnético na armadura com ímãs permanentes com algumas características que o tornam inovador: duplo carro de ímãs permanentes em antiparalelo no plano xy , que possibilita o uso de uma armadura sem núcleo ferromagnético; essa topologia permite o movimento do carro no plano xy de trabalho do atuador com uma densidade de fluxo magnético de excitação uniforme através dos condutores ativos da armadura em diferentes camadas de enrolamento ao longo da direção normal àquele plano.

O atuador assim concebido foi construído e testado no Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamento e Energia da Escola de Engenharia da UFRGS.

O trabalho apresenta o desenvolvimento do atuador, suas modelagens analítica e numérica para avaliação do comportamento estático do atuador planar. Foram realizados ensaios no protótipo com a finalidade de validação da densidade de fluxo magnético no entreferro e da força planar de propulsão. Para a força normal o trabalho propõe uma análise numérica e experimental com diversas posições de entreferro.

É apresentada uma comparação entre os resultados obtidos através do modelo analítico e os resultados obtidos por simulação numérica. São apresentados também resultados comparativos de valores experimentais que apresentaram uma boa aproximação em relação aos valores obtidos através dos modelos teóricos.

1.1 PROPOSTA E OBJETIVOS DO PROJETO

A proposta de topologia do atuador planar em estudo tem origem em conceitos de outros atuadores planares já desenvolvidos pelo grupo do Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia da Escola de Engenharia da UFRGS. Sua concepção é baseada na adaptação do conceito de enrolamentos planejados para um dispositivo com ausência de armadura com núcleo ferromagnético no estator. Assim, surge a ideia de utilizar uma nova topologia para o sistema de movimentação, que utiliza dois carros de tração acoplados magneticamente entre si.

A movimentação sobre o plano de trabalho com duplo carro é obtida através de dois sistemas de tração simétricos, alinhados por mecanismos de guias e rolamentos lineares fixos a uma estrutura de suporte estacionária. A proposta conceitual do projeto do atuador planar sem armadura ferromagnética e com duplo carro de tração trouxe desafios e restrições para a construção do dispositivo. Assim, algumas partes do projeto foram evoluindo à medida que resultados da montagem do dispositivo permitissem a viabilidade da topologia proposta. Obviamente, algumas partes integrantes do dispositivo foram se adequando e se acomodando de forma evolutiva, sempre observando o conceito original do projeto, os recursos disponíveis, os dispositivos de fabricação, os processos necessários para a prototipagem e, por fim, a execução do protótipo e de seus testes.

O trabalho teve os seguintes objetivos:

- estudar e propor um atuador planar sem núcleo ferromagnético de armadura no estator e com duplo carro de movimentação;
- projetar e desenvolver o atuador planar proposto, com definição de sua nova topologia e de suas características de projeto;

- modelar analítica e numericamente o comportamento estático do novo atuador planar, com análise da distribuição da densidade de fluxo magnético, da força planar de propulsão;
- através das equações do modelo analítico, verificar o comportamento do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro e das forças que atuam sobre os carros do atuador planar;
- desenvolver um conceito construtivo do atuador planar em estudo, a partir de modelagem de dispositivos e componentes necessários à prototipagem;
- construir um protótipo do atuador planar em estudo;
- verificar o comportamento em modo estático do atuador planar em estudo através de ensaios que caracterizem o comportamento do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro e das forças que atuam sobre os carros do atuador planar;
- validar os resultados obtidos com o modelo analítico e as simulações numéricas mediante a comparação dos resultados obtidos nos ensaios do protótipo do atuador planar em estudo.

1.2 APRENDIZADO COM O PROJETO

O desenvolvimento deste atuador planar trouxe uma série de desafios. O projeto tem caráter inovador por apresentar uma topologia com duplo carro de tração e não empregar material ferromagnético no seu estator. Por se tratar de um projeto variante e da inexistência de experiências anteriores no sentido de usar duplo carro e não utilizar armadura ferromagnética, trouxe ao estudo uma oportunidade de experimentação de materiais, formas e dimensões geométricas, bem como da análise dos parâmetros básicos para definição do projeto conceito do atuador planar em estudo.

O projeto preliminar foi realizado com o objetivo de prever o comportamento do atuador planar. Nesta etapa, foi efetuado um refinamento dos parâmetros de projeto, com análise numérica através de simulação pelo Métodos dos Elementos Finitos. Convém salientar que nesta etapa de projeto foram previstos valores de tolerância e condições de contorno para o projeto preliminar ser viável em seu modo operacional.

No detalhamento do atuador planar em estudo foi utilizado novamente o *software* Maxwell que emprega o Método dos Elementos Finitos. Assim, foi possível verificar o comportamento dos parâmetros de projeto e verificar o comportamento estático do dispositivo eletromagnético. Também nesta etapa foram utilizados os recursos disponíveis no Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia para caracterização de materiais magnéticos macios e duros.

Os modelos analíticos empregados na simulação estática do atuador planar constituem uma ferramenta importante para a previsão e determinação do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro e da força planar de propulsão do atuador planar em estudo. Esta ferramenta de análise em conjunto com os resultados numéricos permite validar teoricamente o atuador e assim promover o desenvolvimento do protótipo.

Finalmente, foi realizada a prototipagem do atuador planar. Nesta etapa, o projeto do atuador planar de armadura sem núcleo ferromagnético e com duplo carro de tração é testado, na forma de protótipo, visando avaliar tanto o atendimento aos requisitos de projeto como a exequibilidade de produção da amostra. Nesta etapa de prototipagem foi admitida a necessidade de serem efetuadas correções no projeto, retornando-se a etapas anteriores, de acordo com as falhas detectadas no projeto conceitual. Na figura 1 são apresentadas as fases do desenvolvimento do atuador planar.

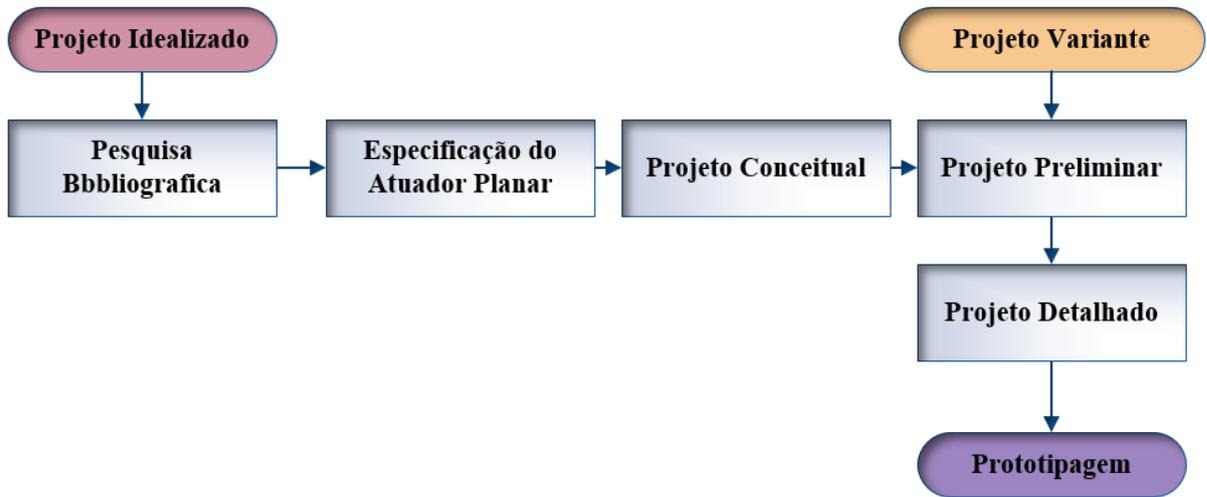


Figura 1: Fases de desenvolvimento do atuador planar.

2 ATUADORES LINEARES E PLANARES

Atuadores lineares ou planares com ímãs permanentes são comumente aplicados em sistema de movimentação de vários graus de liberdade por causa de sua linearidade e Capacidade de movimentação suave. Para obter um posicionamento preciso durante o movimento, faz-se necessária uma previsibilidade da força de propulsão ou também descrita como força de deslocamento, isto é, um pré-requisito para dimensionamento desses atuadores.

Além disso, o desenvolvimento de sistema de movimentação com atuadores planares com relação de baixo peso permite uma melhor resposta na aceleração e integração de funcionalidade; também se identifica uma menor deformação mecânica nesse tipo de atuador planar, o que facilita o controle desses sistemas (JANSEN, J.W; J.P.C. et al.,2014).

Atuadores planares ou atuadores lineares são capazes de fornecer movimento num plano. Vários tipos de atuadores podem ser distinguidos com base nos seus graus de liberdade e na amplitude de movimentos destes graus de liberdade. Para aplicações de alta precisão com vários graus de liberdade, atuadores planares com longo curso de atuação podem tanto fornecer levitação magnética como propulsão num plano. Estas aplicações têm sido estudadas nas últimas décadas. Estes atuadores podem ser construídos com ímãs permanentes fixos e bobinas móveis, ou o contrário: com ímãs permanentes em movimento e bobinas estacionárias.

2.1 CONCEITOS DE ATUADORES PLANARES E TOPOLOGIAS

Um exemplo de atuador planar com múltiplo grau de liberdade pode ser visualizado na figura 2. O carro de tração contém 281 ímãs permanentes em uma magnetização tipo quase Halbach. A matriz de bobinas possui 160 bobinas em uma distribuição de dupla camada. A camada superior com orientação horizontal pode produzir uma força de levitação e outra força na direção y , ao passo que a camada inferior com orientação vertical pode produzir uma força de levitação e uma força na direção x .

Uma característica interessante neste projeto é que os enrolamentos x e y possuem diferentes espessuras, com o intuito de promover dissipação de potência de maneira homogênea sobre as bobinas do atuador. Cada bobina do enrolamento do atuador planar é controlada independentemente por uma fonte de potência.

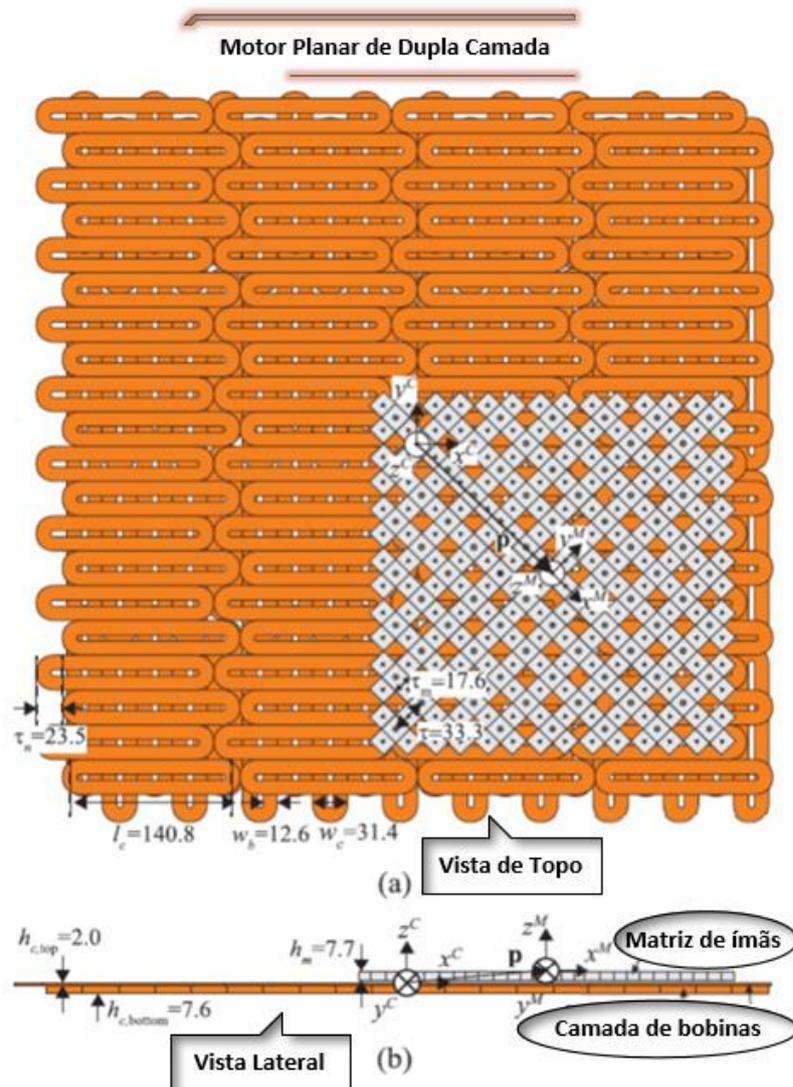


Figura 2: Desenho esquemático de atuador planar com dupla camada

Fonte: JANSEN, J.W; J.P.C. et al., (2014).

Um atuador planar pode ser descrito como um dispositivo que produz o movimento num plano e proporciona um movimento com, no mínimo dois graus de liberdade, dentro de uma área de movimento ao longo do plano (FLORES FILHO, A.F. ,2006).

Nos últimos anos, a miniaturização das máquinas e a manipulação de microcomponentes tiveram um grande crescimento. Por consequência, a procura por dispositivos de posicionamento de precisão também cresceu, com uma vasta gama de microaplicações em diversos segmentos da indústria, tais como microscopia de varredura, fabricação de microcomponentes e montagem, biomedicina, etc. Desta forma, a movimentação e posicionamento planar tornaram-se importantes parâmetros na escolha de dispositivos para suprir a necessidade de precisão e repetitividade das aplicações.

Pela literatura, observa-se que vários dispositivos eletromagnéticos de posicionamento têm sido estudados. Dependendo da aplicação, diferentes configurações de ímãs permanentes e bobinas são empregados em diferentes estágios de posicionamento. Assim, podemos verificar a existência de uma grande diversidade de topologias a fim de suprir as necessidades das aplicações.

Na figura 3 é apresentado um compacto e leve atuador planar com peculiar topologia. O diminuto atuador planar desenvolvido tem o objetivo de realizar precisos deslocamentos planares com baixo consumo de energia. O estator do atuador planar é constituído por dois pares de enrolamentos segmentado em bobinas. O estator foi concebido e fabricado com placas de circuito impresso (PCI). Cada camada é individualizada em camada do enrolamento do eixo x , camada do enrolamento do eixo y e camada de terminais de alimentação.

As bobinas dos enrolamentos são feitas de cobre e possuem espessura individual de 0,035mm. O conjunto de camadas das placas de circuito impresso é impregnada e tem a

finalidade de proporcionar rigidez estrutura e isolamento elétrico. Os ímãs permanentes de NdFeB do atuador são integrados ao carro a fim de proporcionar o movimento simétrico durante o funcionamento do atuador planar, conforme figura 3.

O princípio de funcionamento do microatuador planar é feito com o posicionamento dos arranjos de ímãs permanentes sobre a bobinas fixas. Quando duas bobinas são alimentadas por corrente elétrica, proporcionam o movimento do carro com os ímãs permanentes ao longo da área de trabalho do atuador. O movimento ocorre devido à interação da densidade fluxo magnético dos ímãs permanentes dos carros com as correntes dos enrolamentos.

Três arranjos de ímãs permanentes são montados em conjunto sobre um suporte mecânico. Os dois arranjos de ímãs permanentes na cor laranja são montados nas extremidades do suporte mecânico e são dispostos na mesma orientação. O arranjo de ímãs permanentes na cor azul é colocado no centro e está disposto ortogonalmente em relação aos outros dois arranjos de ímãs permanentes. Quando um par de bobinas da camada laranja é energizado, os dois conjuntos de ímãs permanentes na cor laranja proporcionam o deslocamento do carro ao longo do eixo x .

Do mesmo modo, quando são injetadas correntes nas bobinas da camada azul, o conjunto de ímãs permanentes na cor azul move o carro ao longo do eixo y . Deste modo, a atuação em dois eixos é realizada com o uso dos enrolamentos x ou y do projeto. O movimento planar também pode ser conseguido com a aplicação de corrente elétrica em ambos os enrolamentos ao mesmo tempo (ARORA, N. et al,2014).

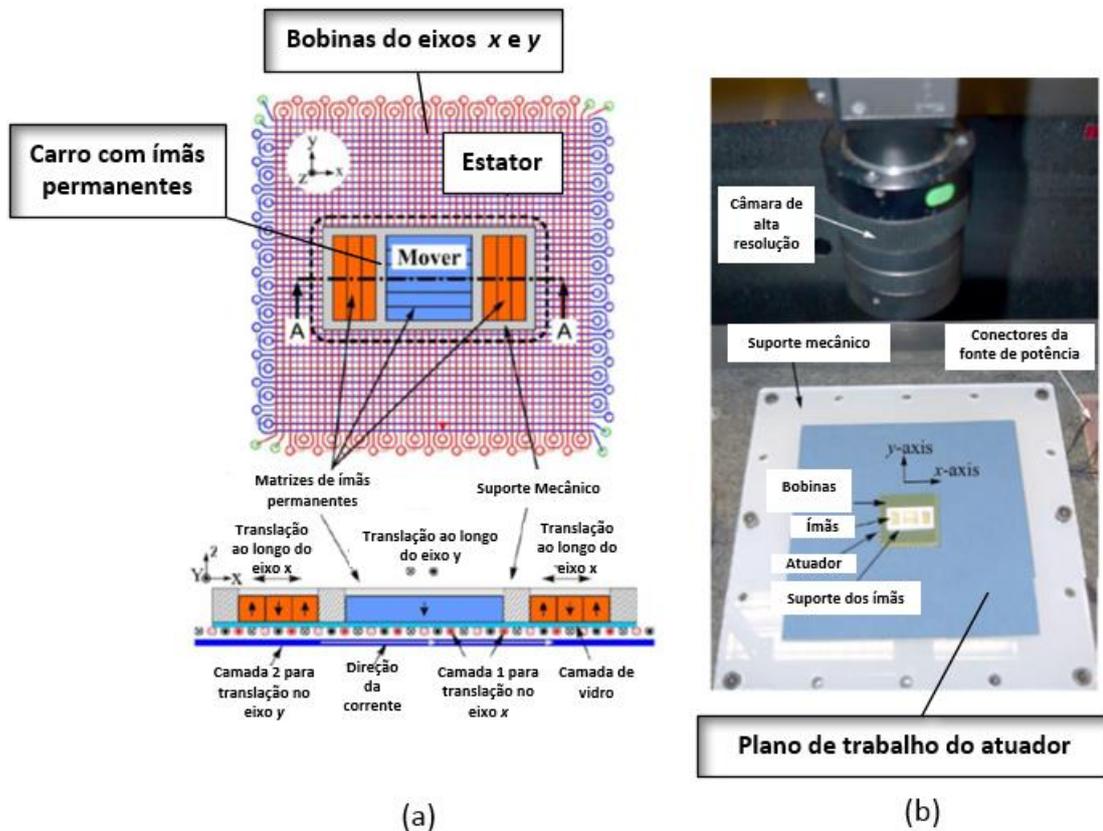


Figura 3: (a) Desenho esquemático com detalhes do estator e parte móvel. (b) Fotografia do experimento
Fonte: ARORA, N. et al, (2014).

As topologias de atuadores planares requerem uma análise multidisciplinar com aspectos relacionados ao modelo do comportamento eletromagnético, modelo mecânico e modelo térmico. Estes comportamentos são avaliados em função das diversas configurações de topologias possíveis, com critérios relacionados à trajetória e desempenho que são representativos para a aplicação (ROVERS; JANSEN; LOMONOVA,2013).

Um objetivo da análise de topologias de atuadores planares é conseguir uma maior precisão de movimentação. Determinadas topologias de atuadores planares possuem configurações de enrolamento que proporcionam uma melhor movimentação por não possuírem cabos de alimentação ou mangueiras de arrefecimento na parte móvel. Dois

exemplos de topologias são apresentados na figura 4, onde podemos verificar os modelos de atuadores planares com topologia de enrolamento do tipo espinha de peixe e topologia denominada por eletrodinâmica.

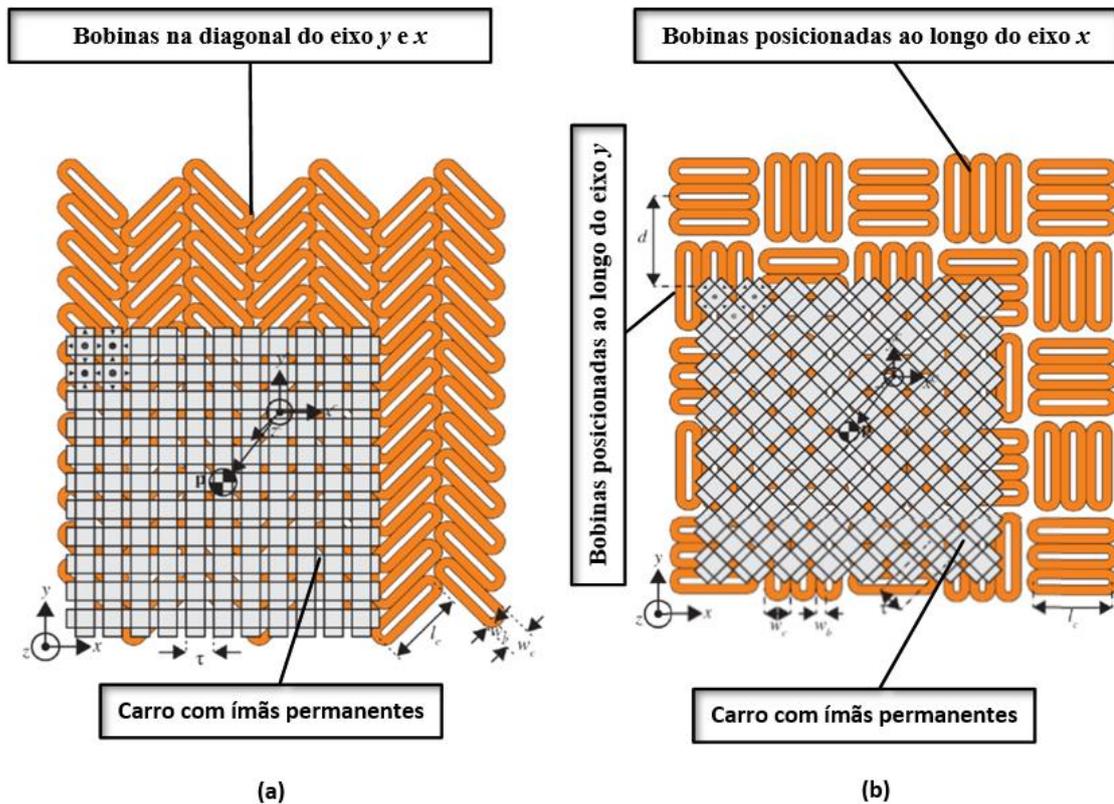


Figura 4: Desenho esquemático de topologias de atuadores aplanares: (a) atuador planar com topologia do tipo espinha de peixe, (b) atuador planar com topologia do tipo eletrodinâmico
Fonte: ROVERS; JANSEN; LOMONOVA (2013).

Na figura 4 (a) é mostrada a topologia espinha de peixe. Quando as bobinas estão alinhadas com a diagonal do eixo y ou x , será produzida uma força ao longo da diagonal, e vice-versa. Ao longo da direção de y , as bobinas são posicionadas em fases de acionamento; enquanto ao longo da direção do eixo x , as orientações das bobinas mudam de direção com a diagonal de alinhamento dos eixos x e y .

Na topologia de atuador planar do tipo eletrodinâmico, figura 4(b), as bobinas com orientação com o eixo y irão produzir força com direção ao eixo x e vice-versa. As bobinas estão alinhadas em grupos com os eixos x e y ; cada grupo é acionado de maneira independente.

Detalhes de um protótipo de atuador planar com levitação são mostrados na figura 5, evidenciando as bobinas do estator, carro de motivação do atuador e os sensores de medição do experimento. Este atuador tem uma matriz de bobinas estacionária acima do qual um carro de propulsão com matriz de ímã permanente é levantado e movimentado sobre o plano xy . O carro contém uma matriz de ímãs permanentes com arranjo de magnetização tipo quase Halbach. As bobinas estão dispostas em enrolamento concentrados com topologia de ziguezague. Cada enrolamento é acionado individualmente por uma fonte de potência.

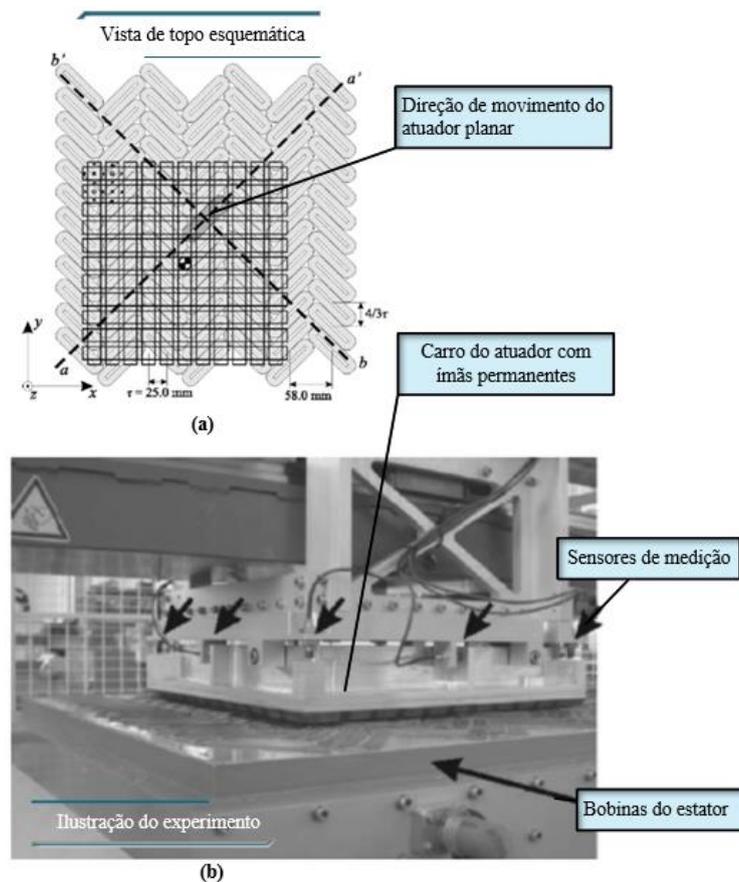


Figura 5: Ilustração de atuador planar com topologia do tipo espinha de peixe. (a) Desenho esquemático com vista de topo do atuador planar (b) Ilustração do experimento
 Fonte: JANSEN, J. W. et al. (2008).

2.2 ESTRUTURA BÁSICA E CONCEITUAL DE ATUADORES PLANARES COM NÚCLEO DA ARMADURA DE MATERIAL FERROMAGNÉTICO

Os atuadores planares com núcleo de material ferromagnético serviram como referência no desenvolvimento do projeto apresentado neste trabalho. Como alternativa à movimentação no plano xy , a configuração desses atuadores planares com núcleo ferromagnético apresentam uma movimentação sobre o plano a partir de apenas um dispositivo de tração.

A figura 6 (a) apresenta um desenho ilustrativo desse atuador, o enrolamento multifásico do tipo envolvente está localizado no estator, de material ferromagnético, assim o enrolamento da armadura está montado de maneira que dois enrolamentos x e y ortogonais entre si, sejam montados da seguinte maneira: um enrolamento é colocado em torno do eixo x , formando as fases do enrolamento x , conseqüentemente o outro é colocado em torno do eixo y , formando as fases do enrolamento y . Na configuração do atuador planar com núcleo envolvido pelo enrolamento multifásico, cada enrolamento possui 12 fases ou conjunto de bobinas que são eletricamente independente e isoladas entre si. Os enrolamentos ortogonais são montados em camadas intercaladas, isto é, entre duas camadas do enrolamento x é montada uma camada do enrolamento y , e assim consecutivamente (SILVEIRA, Marília Amaral, 2003).

O funcionamento deste atuador planar está associado ao princípio da Força de Laplace, no que tange a força planar de propulsão. Quando um ímã permanente estiver sobre uma fase do enrolamento e essa fase for excitada com corrente, será desenvolvida uma força planar de propulsão sobre o carro que poderá movimentá-lo. Esta força será ortogonal à direção da corrente e da densidade de fluxo magnético de excitação; uma vez que essas duas direções também são ortogonais entre si, esta força de propulsão terá uma direção paralela ao

plano de trabalho do atuador planar. A intensidade e o sentido da força planar de propulsão dependem dos valores e das polaridades da força magnetomotriz das fases ativas e da densidade de fluxo magnético estabelecida no entreferro pelos ímãs permanentes (SILVEIRA, Marília Amaral, 2003).

O emprego de enrolamento envolvente faz com que apenas um lado da bobina, a que está junto ao entreferro, seja responsável pela produção da força de propulsão, a figura 6(b) ilustra parcialmente um movimento do atuador planar associado aos enrolamentos energizados, para o exemplo as bobinas envoltivas das fases independentes 9 e 11 foram energizadas simultaneamente para promover o movimento do atuador no plano de trabalho.

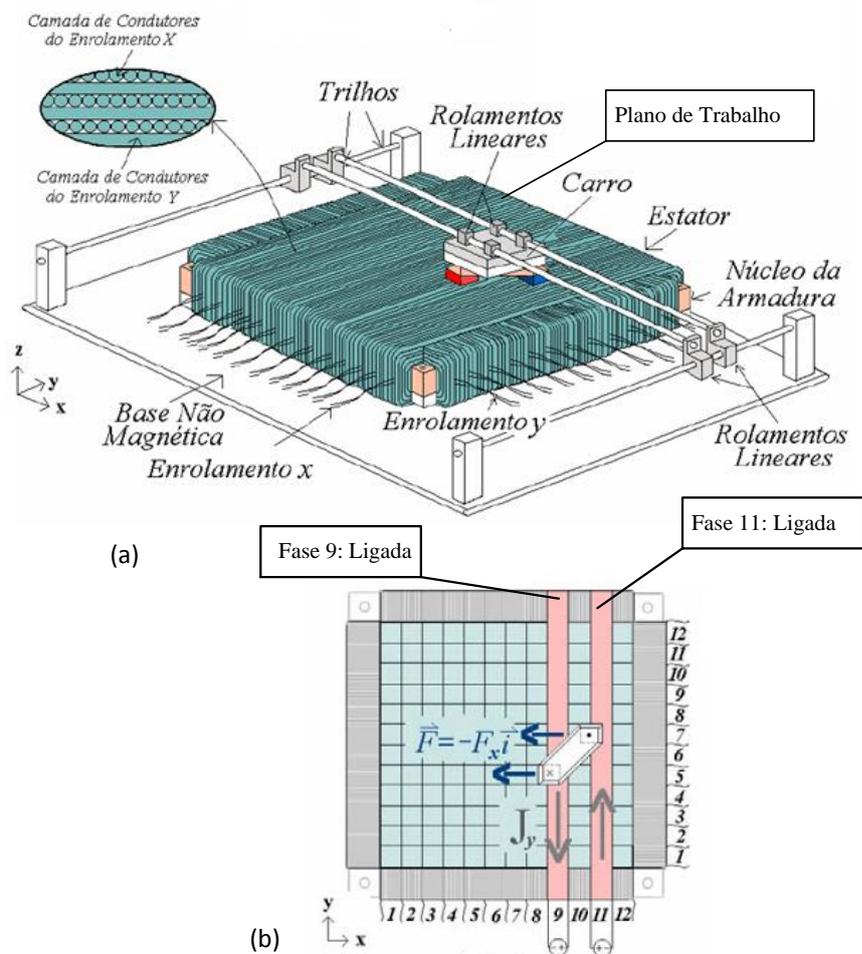


Figura 6: Ilustração do atuador planar com núcleo da armadura de material ferromagnético (a) Visão geral do atuador e detalha das bobinas envoltivas (b) Exemplo de operação com excitação das fases 9 e 11

Fonte: SILVEIRA, Marília Amaral, (2003).

A figura 7(a) apresenta uma visão geral do atuador planar com bobinas planificadas e núcleo de material ferromagnético compósito, o atuador possui um carro que desenvolve movimento com dois graus de liberdade a partir de um único sistema de tração. A forma construtiva desse atuador aplica a montagem de bobinas planares inteiramente montadas no plano de trabalho e junto ao entreferro. Essa forma de montagem possui um aspecto importante a ser destacado que é o aproveitamento dos dois lados ativos da bobina para a produção de força.

O enrolamento multifásico é composto por dois enrolamentos ortogonais entre si, o enrolamento x , disposto ao longo do eixo x , e o enrolamento y , disposto sobre o eixo y . Cada conjunto de enrolamento possui 4 fases independentes e isoladas eletricamente uma da outra. Conforme descrito anteriormente, os enrolamentos são montados sem envolver o núcleo do atuador; deste modo os enrolamentos ortogonais são montados em camadas intercaladas e de forma planificada, isto é, entre uma camada do enrolamento x é montada uma camada do enrolamento y , e assim sucessivamente, conforme podemos visualizar no desenho esquemático da figura 7(a).

O carro do atuador planar possui dois ímãs permanentes montados em antiparalelo através de suas faces polares superiores, por uma culatra de material ferromagnético, sendo que cada ímã permanente possui largura igual a largura das fases do enrolamento x e y . Para mobilidade do carro sobre o plano de trabalho são utilizados guias lineares que possibilitam deslocamento planar com dois graus de liberdade. De maneira análoga à descrita para o atuador com bobinas envolventes, a força de propulsão para o atuador com bobinas planares ocorrerá quando um ímã permanente estiver sobre uma fase do enrolamento e essa fase for excitada com corrente. Então será desenvolvida uma força planar de propulsão sobre o carro que poderá movimentá-lo (BAGGIO FILHO, N.F.,2003).

A figura 7(b) mostra um exemplo de operação quando uma bobina do enrolamento x é excitada com corrente contínua. A interação do fluxo de excitação produzido pelos ímãs permanentes e a densidade de corrente elétrica produz uma força planar, conforme sentido e modulo da corrente elétrica aplicada à fase do enrolamento.

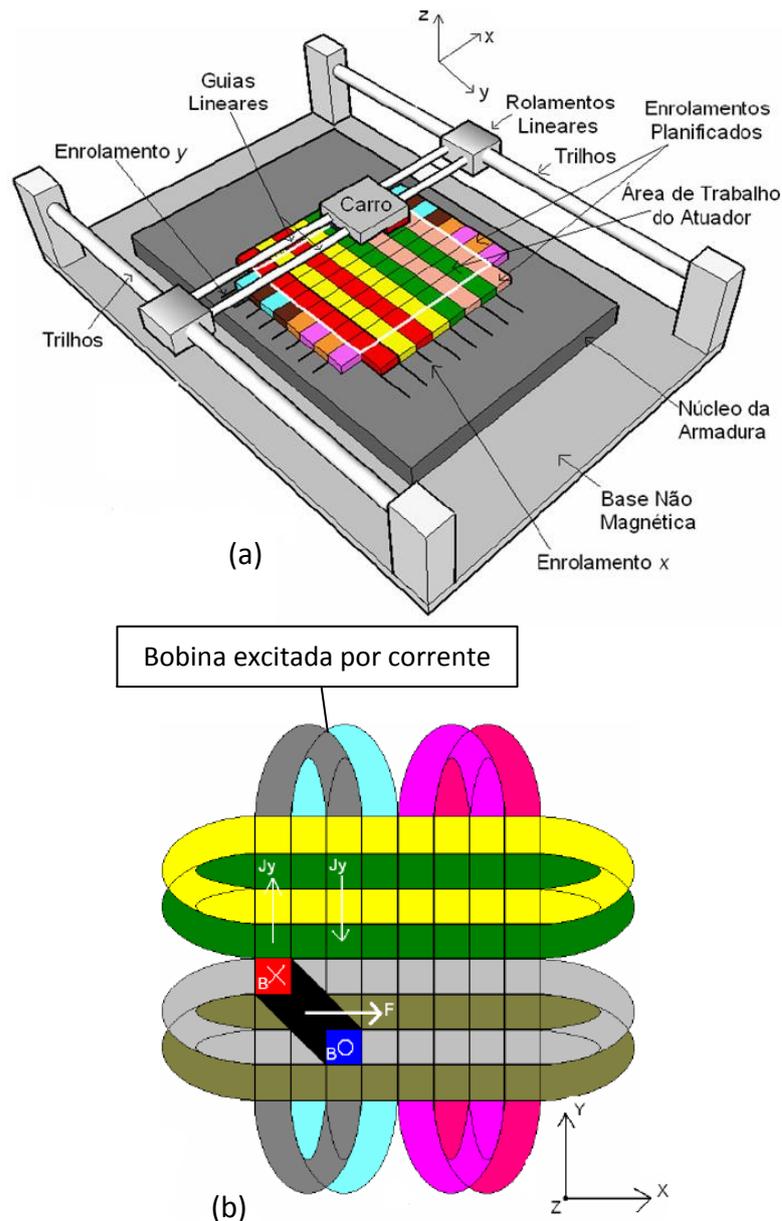


Figura 7: Ilustração de atuador planar com bobinas planificadas (a) Desenho esquemático do atuador planar com núcleo ferromagnético composto (b) Exemplo de movimento ao longo do eixo x
Fonte: BAGGIO FILHO, N.F. (2003).

3 ATUADOR PLANAR SEM NÚCLEO FERROMAGNÉTICO NA ARMADURA

O conceito de um atuador planar com armadura sem material ferromagnético é explorado nesse trabalho e sua topologia pode ser descrita com a ajuda da Figura 8. Ele se baseia no arranjo que é feito por ímãs permanentes colocados nos carros que produzem o fluxo magnético de excitação, o qual, por sua vez, interage com os enrolamentos de armadura quando excitados por corrente contínua.

O dispositivo proposto e objeto deste estudo baseia-se também em um duplo carro com dois ímãs permanentes de NdFeB em antiparalelo unidos por culatra ferromagnética, em cada face da armadura no plano de movimento. Para completar o circuito magnético dos ímãs, os dois carros estão acoplados magneticamente entre si de forma simétrica e assim formam um carro duplo.

A armadura é constituída por enrolamentos polifásicos que são dispostos para formar dois conjuntos de enrolamentos ortogonais entre si, ou seja, um grupo de bobinas montadas ao longo do eixo x que formam o enrolamento multifásico do eixo x , e um grupo de bobinas montadas no eixo y que formam o enrolamento multifásico do eixo y . Cada camada desses enrolamentos multifásicos é eletricamente isolada da outra e dividida em um número de bobinas independentes chamadas de fases.

Como suporte estrutural, o atuador planar emprega um conjunto de guias lineares que proporcionam apoio mecânico para o duplo carro, a fim de permitir o movimento bidirecional ao longo do eixo x e do eixo y . Essa configuração permite a utilização de uma armadura sem material ferromagnético, uma vez que o caminho para a distribuição de densidade de fluxo magnético de excitação se estabelece no entreferro entre os carros onde os enrolamentos de armadura como descritos estão dispostos.

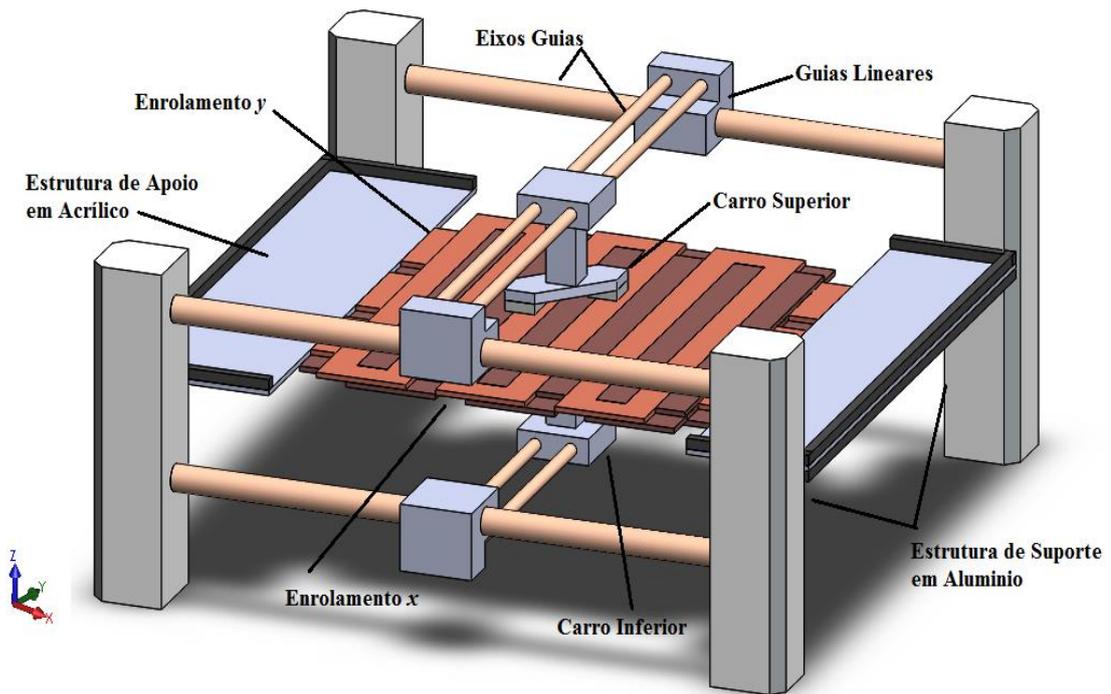


Figura 8: Topologia do Atuador Planar.

Na figura 9 é apresentado um desenho com vista em perspectiva dos enrolamentos multifásicos do atuador planar, destacando a região superior do atuador, onde está posicionado o carro superior. Na armadura estão localizados os dois enrolamentos ortogonais entre si denominados de enrolamento multifásico do eixo x e do eixo y .

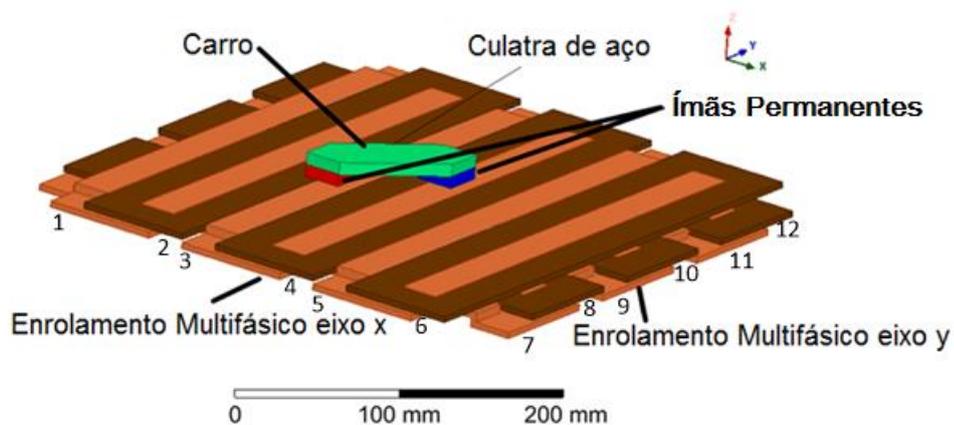


Figura 9: Enrolamentos polifásicos ao longo do eixo x e eixo y .

Os carros do atuador planar podem ser visualizados no desenho de estudo da figura 10. Cada carro possui dois ímãs permanentes de NdFeB de alto produto energético e responsáveis pela produção de fluxo magnético de excitação. Cada conjunto de ímãs permanentes é unido por uma culatra de aço SAE 1045, que possibilita o acoplamento mecânico a um sistema de guias e um caminho magnético de baixa relutância magnética entre os dois ímãs permanentes de um mesmo lado. A interação entre a densidade de fluxo magnético produzida pelos ímãs permanentes no entreferro e a corrente aplicada aos enrolamentos x e y possibilita a movimentação dos carros sobre o plano. O movimento do carro sobre o plano de trabalho e a mudança de posição é causado pela adequada excitação das fases planares dos enrolamentos x e y .

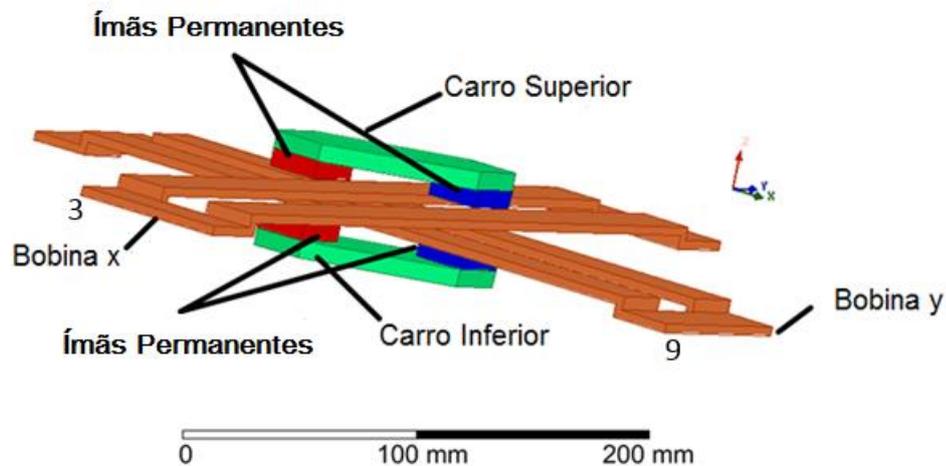


Figura 10: Duplo carro posicionado sobre fases.

Quando o duplo carro é posicionado sobre uma fase excitada, devido à ortogonalidade entre o vetor densidade de fluxo de excitação e a direção da corrente, a força de Laplace de direção paralela ao plano xy do atuador se estabelece e é responsável pela propulsão do carro.

3.1 O ATUADOR PLANAR

A figura 11 ilustra o projeto do Atuador Planar desenvolvido no Laboratório de Máquinas Elétrica, Acionamentos e Energia – LMEAE, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Ele é montado em uma estrutura de alumínio para suporte estrutural dos guias lineares de movimentação dos carros e dos enrolamentos ortogonais dos eixos x e y .



Figura 11: Fotografias com visão geral e detalhes do Atuador Planar.

O conceito da topologia do atuador planar apresentado neste trabalho representa uma possibilidade de movimentação de cargas no eixo x e eixo y sem a necessidade

de utilização de motores rotativos normalmente utilizados em mesas xy . Podemos destacar como diferencial seu movimento em ambas as faces do plano no eixo x e y , como também o conceito de não utilizar núcleo ferromagnético na armadura que reduz o tamanho do dispositivo.

3.2 DESCRIÇÃO DO ATUADOR PLANAR

A ideia de desenvolvimento do atuador planar foi fundamentada em trabalhos já desenvolvidos anteriormente e descritos no capítulo 2.2, como atuadores planares com núcleo da armadura de material ferromagnético. Desta forma a origem do trabalho partiu do projeto base onde o conceito do enrolamento da armadura estática está montado em torno de uma placa de material ferromagnético e a parte móvel é formada de um único estágio, composta por dois ímãs permanentes unidos por uma culatra também de material ferromagnético (SILVEIRA, Marilia Amaral, 2003). Este conceito foi adequado ao modelo do trabalho proposto. Assim o núcleo ferromagnético da armadura foi retirado do enrolamento estático e adequado ao conceito do atuador planar sem núcleo ferromagnético, onde o número de espiras e bitola de fio de cobre esmaltado foram mantidas conforme projeto base, porém adaptadas a forma de enrolamentos planejado. A parte móvel foi duplicada em dois carros simétricos e magneticamente acoplados, sendo que os ímãs permanentes de cada carro estão unidos através de suas superfícies superiores por uma culatra de material ferromagnético, onde a distância entre cada face polar dos ímãs permanentes do carro superior e inferior, separados da armadura, é denominada de entreferro. Os ímãs permanentes e a culatra são idênticos aos do projeto base em suas dimensões e característica magnéticas e estão montados nos carros superior e inferior de forma simétrica.

As principais características construtivas dos componentes do atuador planar estão descritas na tabela 1. Os dois enrolamentos multifásicos planejados dos eixos x e y são

ortogonais entre si. O primeiro enrolamento do eixo x é composto por 6 fases dispostas de forma simétrica e intercaladas ao longo do eixo x . O segundo enrolamento do eixo y é composto por 6 fases dispostas ao longo do eixo y de forma simétrica e intercaladas. Cada uma das fases dos enrolamentos é eletricamente independente e isolada uma da outra.

Cada lado de bobina do atuador possui largura de 25 mm. Quando totalizadas todas as bobinas do eixo x e eixo y , a área útil disponível no plano para deslocamento dos carros é de $300 \times 300 \text{ mm}^2$.

Tabela 1: Características construtivas do atuador planar.

Dados	Características	
Número de enrolamentos	2	
Número de fases (bobinas) por enrolamento	6	
Número de espiras por bobina	280	
Passo polar dos ímãs	50mm	
Bitola do fio	24 AWG	
Resistência de uma fase	26,6 Ω	
Material da culatra	Aço SAE 1045	
Sistema mecânico de guias lineares	16 rolamentos lineares e 8 eixos guias	
Material dos ímãs permanentes	NdFeB sintetizado anisotrópico	
Número de ímãs permanentes	4	
Produto de máxima energia (BH)máx	264 kJ/m ³	
Remanência B_r	1,19 T	
Coercitividade Normal H_c	883 kA/m	
Coercitividade Intrínseca H_{ci}	1018 kA/m	
Área da superfície polar dos ímãs permanentes	25,4 x 25,4 mm ²	
Comprimento dos ímãs permanentes	8 mm	
Entreferro analisados	Análise 1	Análise 2
Entreferro	12 mm	24 mm
Espaço livre em ar	4 mm	16 mm
Altura ocupada pelos enrolamentos no entreferro	8 mm	8 mm

A figura 12 mostra a ilustração com vista superior dos enrolamentos do atuador planar, onde verificamos a distribuição das fases dos enrolamentos planejados sobre os eixos x e y . Cada enrolamento planejado é composto por 6 fases intercaladas uma das outras, sendo que o conjunto de bobinas de cada enrolamento são paralelos e alinhado entre si,

proporcionando assim comprimentos ativos retos para cada bobinado do enrolamento. As fases de cada enrolamento são isoladas eletricamente por verniz de impregnação e resina epóxi. Assim os enrolamentos ortogonais são montados em duas camadas independentes de forma planificada, isto é, as fases do enrolamento x são sobrepostas às fases do enrolamento y . Para a fixação e estruturação dos enrolamentos do atuador planar foi utilizado um molde de resina epóxi, que mantém ambos os enrolamentos fixos em suas posições no centro de uma placa de acrílicos, que serve de mesa de apoio dos conjuntos de bobinas do atuador.

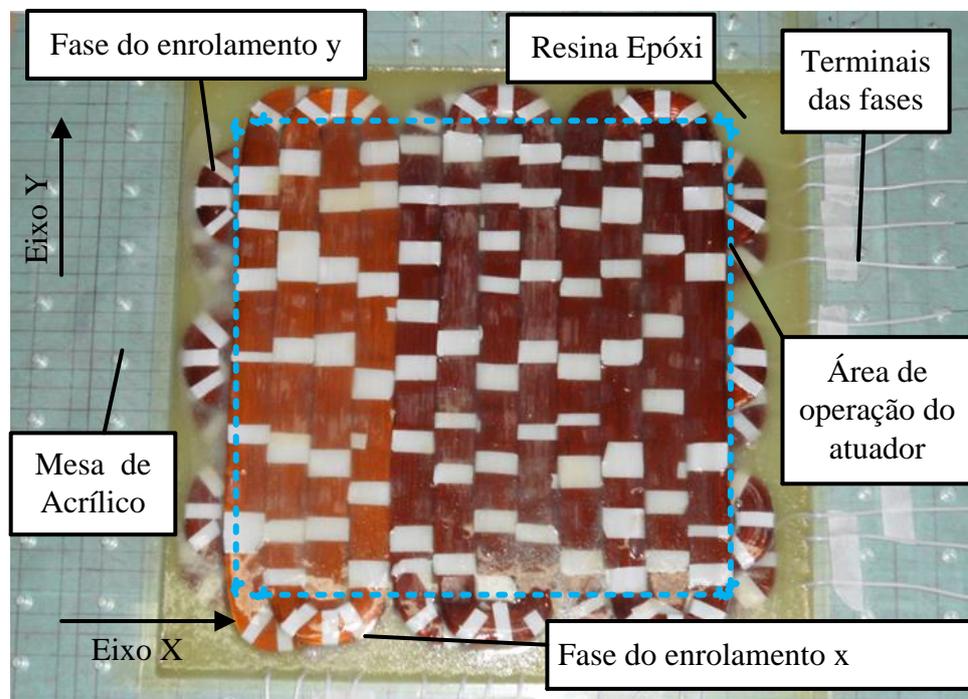


Figura 12: Fotografia dos enrolamentos planificados do atuador, com detalhes do sistema de impregnação por resina epóxi e distribuição das fases sobre o apoio da mesa de acrílico.

Os carros superior e inferior do atuador planar são compostos cada um por dois ímãs permanentes sintetizados de NdFeB, com características de curva BH disponibilizadas nos Apêndices A, B e C. Cada conjunto de pares de ímãs é montado em antiparalelo através de suas faces polares com uma culatra de aço SAE 1045, que oferece um caminho de baixa

relutância magnética para o fluxo magnético, a densidade de fluxo magnético de saturação é igual a 1,8 T. A curva de magnetização BH do aço SAE 1045 encontra-se no Apêndice D.

A figura 13 apresenta individualmente os componentes ativos dos carros do atuador planar, a culatra de aço SAE 1045 e uma peça de ímã permanente de NdFeB. A largura do ímã permanente é de 25 mm e possui tolerância de $\pm 0,4$ mm, devido à variação no processo de sinterização e da camada de proteção contra oxidação. A largura individual de cada fase dos enrolamentos planejados é de 25 mm e possui tolerância de $\pm 0,4$ mm, devido à variação no processo de bobinagem e acomodação das bobinas na sua formação geométrica.

Os enrolamentos da armadura do atuador planar são compostos por 6 conjuntos de bobinas dispostos em grupos de bobinas do enrolamento x e y respectivamente. No Apêndice O está descrito a forma geométrica projetada para as bobinas do atuador planar. Para o processo de manufatura das bobinas foi desenvolvido um modelo, chanfrona, que está descrito no Apêndice P, suas dimensões proporcionam a padronização do processo de confecção das bobinas do atuador planar, conforme comentado anteriormente o processo de bobinagem dos enrolamentos possui tolerâncias inerentes a metodologia de fabricação disponível para a prototipagem.

Na região onde os ensaios foram realizados o enrolamento apresenta espessura média de 3,3 mm para cada fase, sendo que a espessura dos dois enrolamentos média é de 6,6 mm com tolerância de $\pm 0,4$ mm. Esta tolerância é devido às variações do enchimento dos enrolamentos e da resina de impregnação feita para o enlaçamento dos enrolamentos no plano xy do atuador planar.

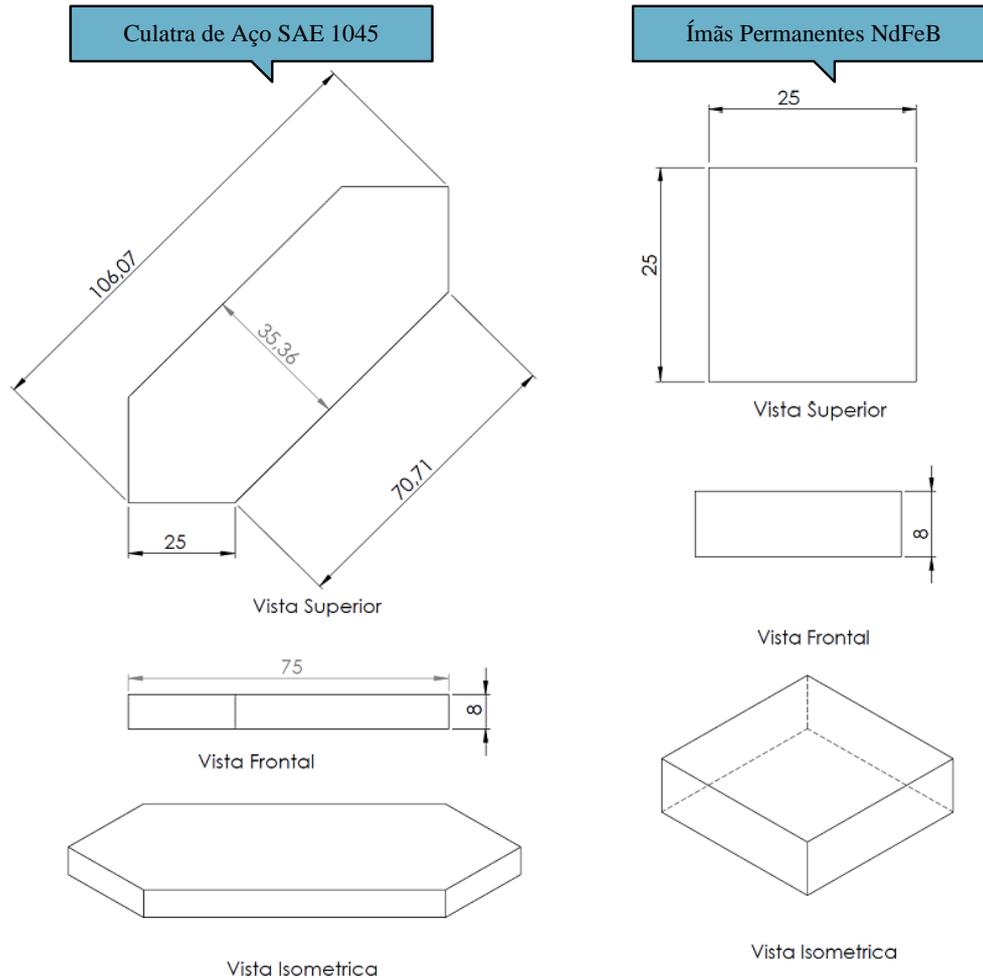


Figura 13: Desenhos dos principais componentes do carro do atuador com vista detalhada da culatra de aço SAE 1045 e do ímã permanente de NdFeB.

A figura 14 apresenta detalhes do protótipo desenvolvido com destaques para o sistema de movimentação dos carros, feito por guias e rolamentos lineares para os eixos do plano xy . É conveniente ressaltar que o sistema de movimentação dos carros superior e inferior é simétrico e possui movimentação total sobre a parte ativa do atuador planar. A estrutura que suporta as guias de movimentação do carro superior e inferior possui um mecanismo que permite a regulagem completa dos carros no eixo z , podendo, assim, promover a regulagem de entreferro entre as faces polares dos dois conjuntos de carros de tração do atuador planar. O apêndice S disponibiliza as etapas do processo de prototipagem do atuador planar com descrição das fases de cada processo.

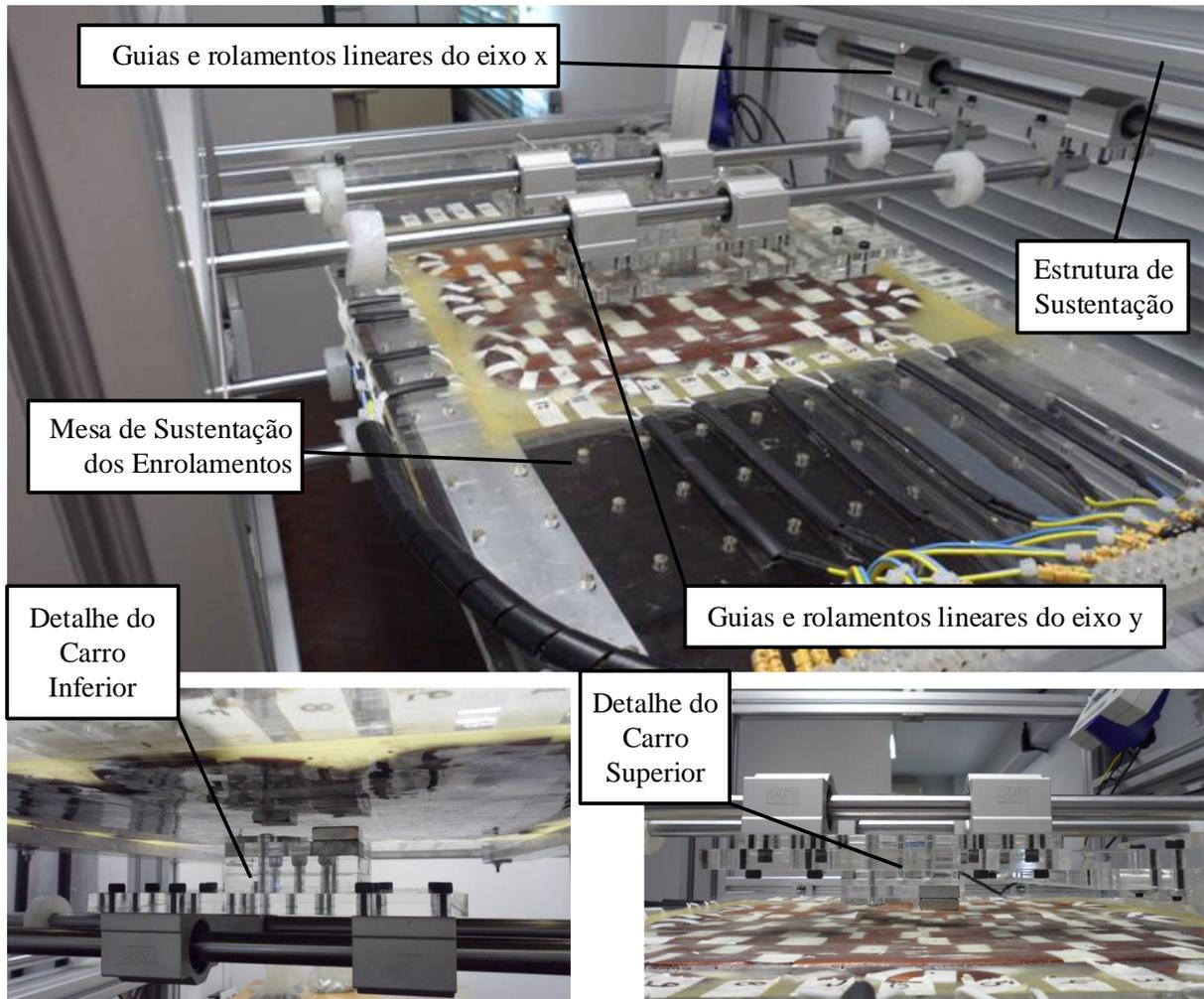


Figura 14: Ilustração do atuador planar com detalhes: estrutura de sustentação do atuador planar, guias e rolamentos lineares, mesa de apoio dos enrolamentos e visão geral dos carros do atuador planar.

3.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO ATUADOR

O atuador planar possui um conjunto de enrolamentos no eixo x e y construídos com condutores de cobre, sendo posicionados centralmente sobre dois conjuntos de carros constituídos por ímãs permanentes e culatra ferromagnética. Segundo o princípio da Força de Laplace, quando um condutor elétrico, imerso em um campo magnético, é percorrido por corrente elétrica, sobre o condutor atuará uma força de origem eletromagnética proporcional à intensidade do campo magnético, à corrente elétrica que passa pelo condutor e ao comprimento ativo total do condutor que está imerso neste campo magnético.

Conforme descrito anteriormente, os ímãs permanentes dos carros promovem a produção do fluxo magnético de excitação. Quando um ímã permanente está localizado sobre uma das fases do enrolamento excitado por corrente elétrica, desenvolverá uma força planar de propulsão pela interação entre o fluxo magnético de excitação e a corrente elétrica. O efeito de força planar de propulsão resultará no deslocamento dos carros magneticamente acoplados em sentido paralelo à superfície plana dos enrolamentos do atuador.

Na figura 15 está representada, em vista frontal, uma seção do atuador em corte, com detalhes das culatras de aço superior e inferior, dos enrolamentos dos eixos x e y , dos ímãs permanentes, do entreferro delimitado pelas faces polares dos ímãs e do caminho principal através do qual se estabelece o fluxo magnético concatenado produzido pelos ímãs permanentes.

Cada par de ímãs permanentes com a mesma orientação de magnetização na direção z é colocado como na figura 15 de tal forma que criam um par de ímãs permanentes acoplados através do fluxo magnético no entreferro. Isto garante um acoplamento mecânico entre eles com base neste acoplamento magnético. Assim, os dois pares definem em conjunto, pois fazem parte do mesmo circuito magnético, o ponto de operação dos quatro ímãs permanentes e a distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro entre os ímãs do mesmo par.

Na figura 15 é mostrado uma vista frontal simplificada do atuador planar, enfatizando cada um dos componentes ativos do atuador, iniciando pela culatra superior de aço SAE 1045, passando pelos ímãs permanentes de NdFeB do carro superior, entreferro, enrolamentos x e y , ímãs permanentes do carro inferior e chegando finalmente a culatra de aço SAE 1045 do carro inferior. No detalhe da figura 15 é mostrado o caminho preferencial do fluxo magnético de excitação produzido pelos ímãs permanentes dos carros superior e inferior do atuador planar.

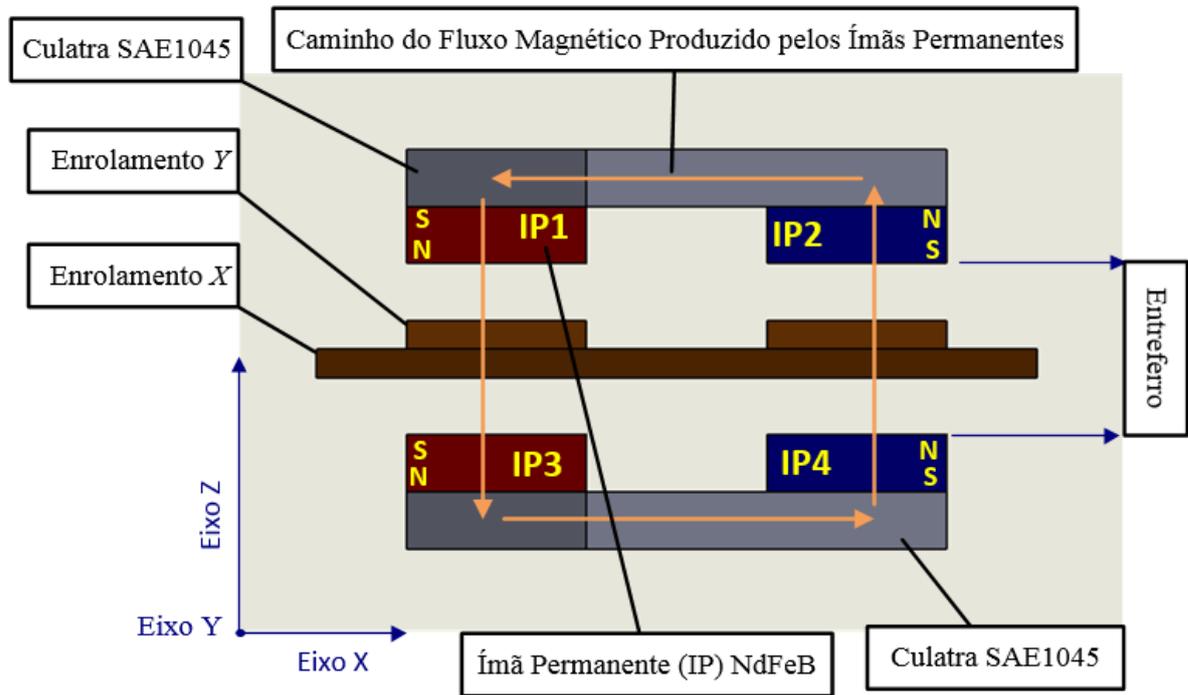


Figura 15: Vista frontal com detalhes dos componentes ativos do atuador planar, indicando localização das culatras, ímãs e enrolamentos.

A equação (1) considera que os condutores dos enrolamentos sejam retilíneos e que a densidade de fluxo magnético seja constante em todo o comprimento dos mesmos. Mas considerando que haja uma distribuição de \vec{B} no espaço, considera-se a equação (2).

$$\vec{F} = i\vec{l} \times \vec{B} \quad (1)$$

$$d\vec{F} = id\vec{l} \times \vec{B} \quad (2)$$

Também se pode utilizar um segmento de volume $dV = s_{af}dl$, considerando-se que $\vec{J}dV = id\vec{l}$, onde \vec{J} é o vetor densidade de corrente elétrica no condutor e s_{af} representa a área da seção transversal de um condutor (MARTINS, N.,1975). Assim, a força planar de propulsão que atua sobre os condutores dos enrolamentos planejados das fases percorridas

por corrente elétrica e situados junto às faces polares dos pares de ímãs permanentes N acoplados magneticamente através do entreferro, pode ser obtida pela equação (3), considerada a expressão geral para a Força de Laplace (FLORES FILHO; SUZIM; SILVEIRA,2000).

$$\vec{F}_N = \int_{V_N} \vec{J}_N \times \vec{B}_{gN} dV_N \quad (3)$$

Na equação (3), a densidade de fluxo magnético produzida no entreferro pelo par de ímã permanentes N , com $N=1$ para o par de ímãs permanentes IP1 e IP3 e $N=2$ para o par de ímãs permanentes IP2 e IP4, está representada por B_{gN} . O vetor densidade de corrente elétrica na fase do enrolamento planificado localizado entre os pares de ímãs permanentes N é representado por \vec{J}_N . O volume do condutor com corrente elétrica que está imerso no fluxo magnético dos ímãs permanentes N é representado por V_N e a força eletromagnética planar de propulsão relacionada com os ímãs permanentes N é representada por \vec{F}_N .

A equação (3) permite determinar o módulo e o sentido da força que age sobre os condutores percorridos por corrente elétrica que estão imersos no campo magnético produzido entre os ímãs permanentes acoplados magneticamente através do entreferro e armadura. Como no atuador planar os enrolamentos são estacionários, a força produzida sobre os condutores será aplicada sob forma de reação nos carros que possuem grau de liberdade para movimentação. Desta forma, provocará deslocamento dos carros e, por conseguinte, provocará o deslocamento do fluxo magnético de excitação. A equação (3) é modificada para a equação (4) para determinar o módulo e o sentido da força que atua sobre o carro para cada par de ímãs permanentes acoplados magneticamente através do entreferro e armadura.

$$\vec{F}_N = - \int_{V_N} (\vec{J}_N \times \vec{B}_{gN}) dV_N = \int_{V_N} (\vec{B}_{gN} \times \vec{J}_N) dV_N \quad (4)$$

Na figura 16 está representada a vista frontal do atuador, onde se pode visualizar o sentido do vetor força mecânica de origem eletromagnética que atua sobre o carro do atuador. A figura 16 projeta uma posição relativa do carro do atuador planar com a fase dos enrolamentos que estão excitados por corrente. Esta força é resultante da interação entre os vetores densidade de corrente nos condutores na fase do enrolamento e da densidade de fluxo magnético no entreferro. Também para a posição específica da figura 16, pode-se visualizar o sentido do fluxo magnético dos ímãs permanentes e do vetor densidade de corrente. Na figura 16 verifica-se o perfeito alinhamento dos ímãs permanentes do carro superior e inferior com as fases do enrolamentos, assim os condutores dos enrolamentos percorridos por corrente elétrica ficam completamente imersos sobre o campo magnético produzido pelos ímãs permanentes IP1, IP3 e IP2, IP4.

Na produção de forças sobre o plano dos eixos x e y , somente a componente normal do vetor densidade de fluxo magnético produzido no entreferro pelos ímãs permanentes é considerada. Assim, na equação (4) para o cálculo da força de propulsão no plano $\vec{B}_{gN} = B_{gN} \vec{k}$. Com base na disposição dos pares de ímãs permanentes apresentados nas figuras 15 e 16, $N=1$ (IP1 e IP3) e $N=2$ (IP2 e IP4), obtém-se a equação (5).

$$\vec{B}_g |_{1,3} = B_g |_{1,3} \vec{k} = -\vec{B}_g |_{2,4} = -B_g |_{2,4} \vec{k} \quad (5)$$

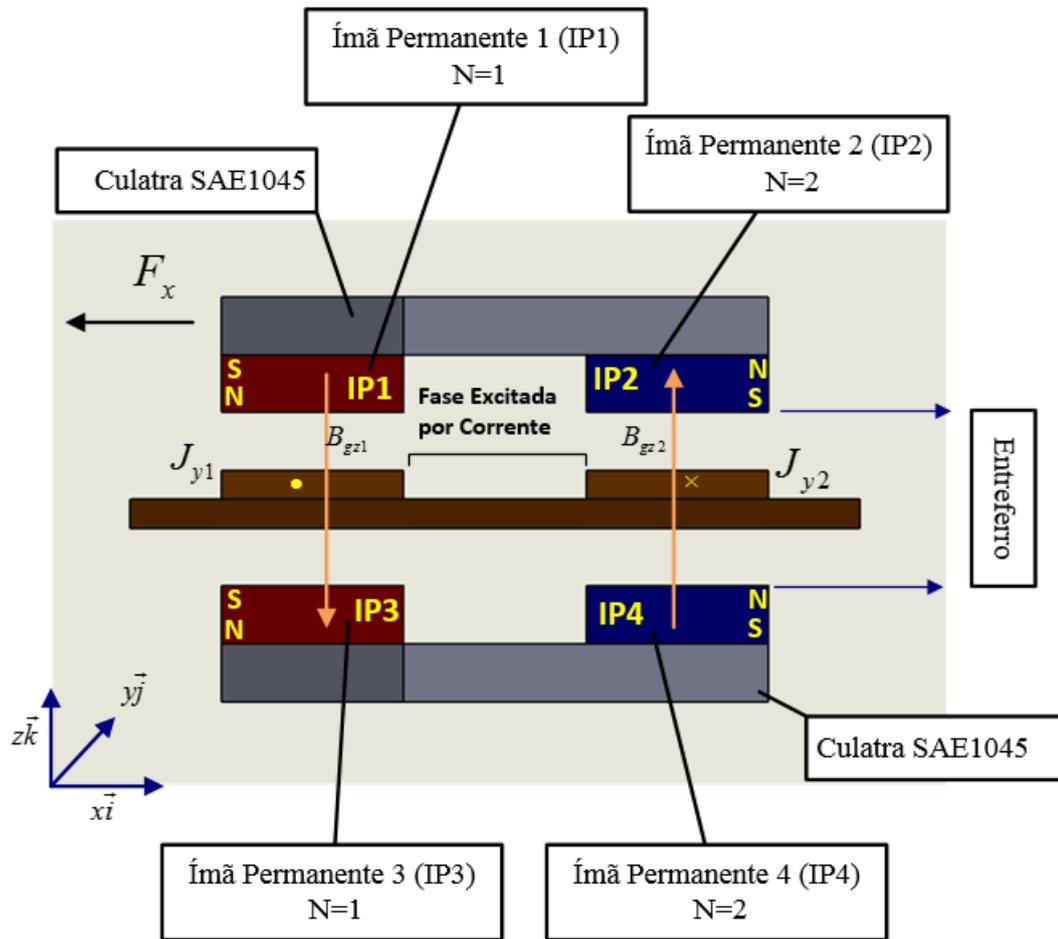


Figura 16: Vista frontal do carro do atuador com posição relativa à fase do enrolamento x da bobina planar que está sendo excitada por corrente e imersa no campo.

Para o vetor densidade de corrente elétrica, pode-se considerar suas duas componentes, a saber: J_{xN} e J_{yN} . A primeira é a componente x do vetor densidade de corrente elétrica através da fase do enrolamento y . A segunda é a componente y do vetor densidade de corrente elétrica através da fase do enrolamento x . A equação (6) define o vetor \vec{J}_N .

$$\vec{J}_N = J_{xN}\vec{i} + J_{yN}\vec{j} \quad (6)$$

Empregando as equações (5) e (6) à equação (4), o resultado é a equação (7) (SILVEIRA, Marília Amaral, 2003).

$$\begin{aligned}\vec{F}_N &= \int_{V_N} (B_{gN} \times \vec{J}_N) dV_N = \int_{V_N} B_{gN} \vec{k} \times (\vec{J}_{xN} \vec{i} + \vec{J}_{yN} \vec{j}) dV_N \\ \vec{F}_N &= \int_{V_N} B_{gN} (-\vec{J}_{yN} \vec{i} + \vec{J}_{xN} \vec{j}) dV_N = -F_{xN} \vec{i} + F_{yN} \vec{j}\end{aligned}\quad (7)$$

Na equação (7), F_{xN} é o componente x da força eletromagnética produzida pela fase do enrolamento x que possui uma densidade de corrente J_{yN} (componente y do vetor densidade de corrente \vec{J}_N). Por conseguinte F_{yN} é o componente y da mesma força produzida pela fase do enrolamento y que possui uma densidade de corrente elétrica J_{xN} (componente x do vetor densidade de corrente \vec{J}_N), sob a ação do par de ímãs permanentes N.

Assim que a ação dos ímãs permanentes é considerada, surge uma força eletromagnética planar de propulsão total, \vec{F} . O sentido da força \vec{F} depende do módulo e do sentido da corrente elétrica de fase que está sendo excitada. Também depende do sentido da densidade de fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes no entreferro. Então, a força planar de propulsão total é obtida da equação (8).

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = -(F_{x1} + F_{x2}) \vec{i} + (F_{y1} + F_{y2}) \vec{j}\quad (8)$$

As bobinas planificadas, com destaque para a uma fase do enrolamento x representado na figura 17, permitem identificar os vetores responsáveis pelo desenvolvimento da força eletromagnética de propulsão planar. Essa força, manifestada na forma de uma força mecânica produzida sobre os carros, será perpendicular ao plano formado pelos vetores

densidade de fluxo magnético e densidade de corrente elétrica (SILVEIRA, Marília Amaral, 2003).

Na região de atuação do carro como representado na figura 17, o vetor densidade de corrente elétrica no enrolamento x possui componentes y . A corrente elétrica circulante pela fase do enrolamento x está entre os ímãs permanentes dos carros superior e inferior, proporcionando o maior módulo de força quando consideramos apenas um enrolamento.

O vetor densidade de corrente elétrica na direção do eixo y é resultado da excitação de corrente contínua apenas em uma fase do enrolamento x , e a interação do campo magnético produzidos pelos ímãs permanentes resultarão em um movimento dos carros na direção do eixo x .

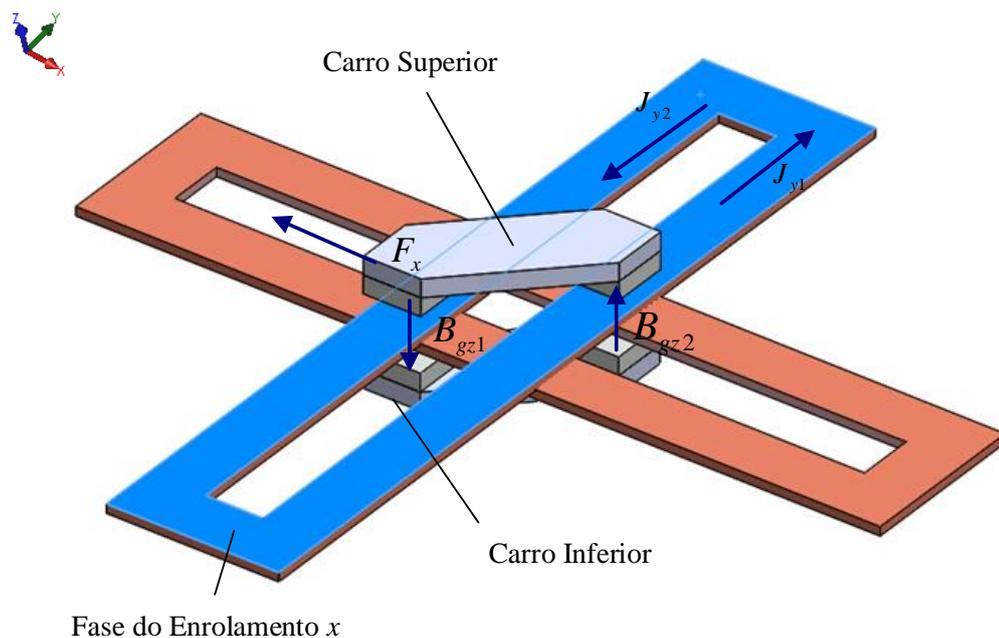


Figura 17: Vista em perspectiva do atuador planar, com destaque para uma fase do enrolamento x , mostrando os vetores responsáveis pela produção de força no eixo x .

Para a figura 18, o vetor densidade de corrente no enrolamento y possui apenas componente x na região de atuação dos carros. A corrente elétrica circulante pela fase do

enrolamento y está entre os ímãs permanentes dos carros superior e inferior, produzindo força sobre o carro que terá componente apenas em y .

De maneira análoga ao caso anterior, o vetor densidade de corrente elétrica na direção do eixo x é resultado da excitação de corrente contínua apenas em uma fase do enrolamento y , e a interação do campo magnético produzido pelos ímãs permanentes resultarão em um movimento dos carros na direção do eixo y .

Os carros de tração superior e inferior são simétricos e estão posicionados a 45 graus em relação aos enrolamentos planificados ortogonais. Esta posição proporciona que ambas as faces dos pares de ímãs permanentes estejam posicionadas sobre o comprimento ativo dos enrolamentos planificados do eixo x e y , deste modo a força planar de propulsão será possível em ambos os enrolamentos do atuador planar.

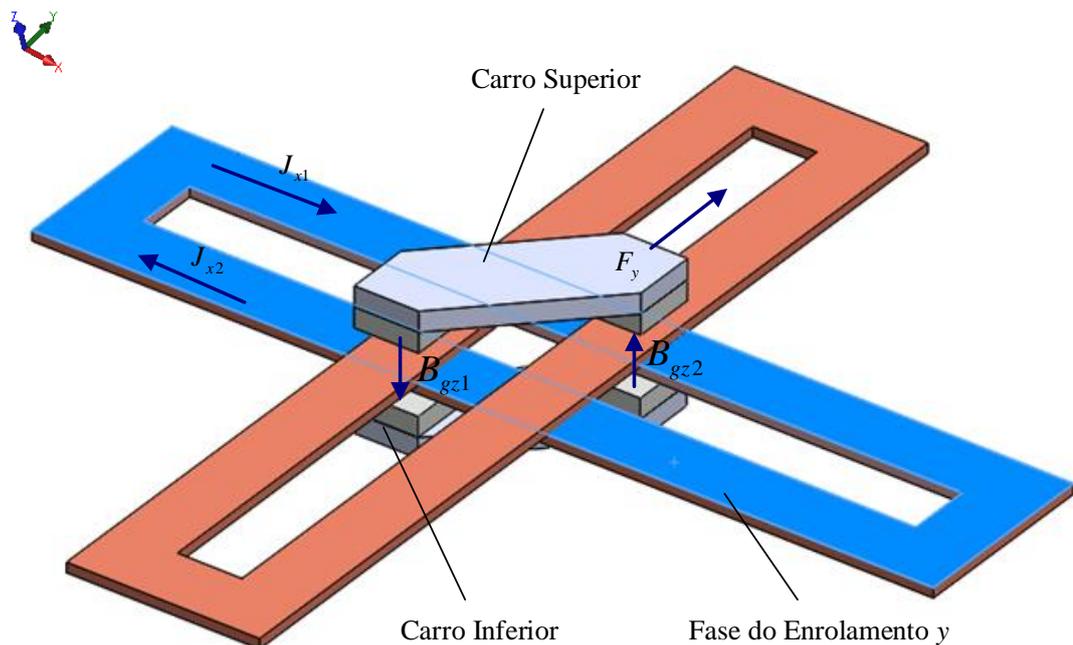


Figura 18: Vista em perspectiva do atuador planar, com destaque para uma fase do enrolamento y , mostrando os vetores responsáveis pela produção de força no eixo y .

Existe uma força perpendicular ao plano da área de trabalho do atuador designada de força normal. A força normal é resultado da atração entre os ímãs permanentes de um mesmo

par do atuador planar. Esta força mantém acoplado o mecanismo de movimentação linear composto pelas guias e rolamento dos eixos x e y . A força normal aumenta o atrito no sistema de movimentação dos carros, sendo 2 que quando o entreferro é reduzido o atrito, tende a ficar maior.

Na equação (9) F_{Az} é a força magnética de atração normal, sendo s_g a área da superfície transversal ao fluxo magnético no entreferro sob o cada ímã permanente. $B_{gT_{z1}}$ e $B_{gT_{z2}}$ correspondem aos componentes z do vetor densidade de fluxo magnético total estabelecida no entreferro, proporcionada pelos pares de ímãs permanentes e o fluxo magnético dos enrolamentos; μ_o representa a permeabilidade magnética do vácuo (SILVEIRA, Marília Amaral, 2003).

$$F_{Az} = \frac{s_g}{2\mu_o} (B_{gT_{z1}}^2 + B_{gT_{z2}}^2) \quad (9)$$

3.4 DESCRIÇÃO DE OPERAÇÃO DO ATUADOR

Um exemplo de operação do atuador planar pode ser observado na figura 19, onde as vistas de topo mostram as fases dos enrolamentos x e y com o carro superior que está magneticamente acoplado ao carro inferior do atuador planar. A figura 19 (a) apresenta os carros em repouso. Neste momento, as fases dos enrolamentos x e y não estão energizadas; os ímãs permanentes dos carros estão em alinhamento com uma fase dos enrolamentos x e y .

Quando os ímãs permanentes do carro superior e inferior estão alinhados sobre uma bobina do enrolamento x e somente esta fase é energizada, é criada uma densidade de corrente y no condutor energizado, fazendo com que desta interação seja produzida uma força

mecânica na direção do eixo x . A figura 19(b) exemplifica esta situação quando a bobina 3 do enrolamento x é excitada por corrente elétrica contínua.

Para a situação em que os ímãs permanentes dos carros estiverem alinhados sobre uma bobina do enrolamento y e somente esta fase é energizada, no condutor do eixo x é criada uma densidade de corrente, e da interação do fluxo magnético de excitação dos ímãs permanentes e da densidade de corrente elétrica é produzida uma força mecânica na direção do eixo y . A figura 19(c) mostra esta situação quando a bobina 9 do enrolamento y é excitada por corrente elétrica contínua.

O movimento do atuador planar também poderá ocorrer com a interação de movimentos ao longo do eixo x e y , em qualquer direção paralela ao longo do plano de trabalho. Tal situação ocorre quando forem excitadas simultaneamente uma fase do enrolamento x e uma fase do enrolamento y , e os ímãs permanentes dos carros estiverem alinhados as mesmas.

Na figura 19(d), a bobina 3 do eixo x e a bobina 9 do eixo y estão excitadas simultaneamente por corrente elétrica contínua. Os carros encontram-se em posição de alinhamento com as bobinas excitadas. A interação das densidades de corrente elétrica com o fluxo magnético de excitação dos ímãs permanentes produz uma força mecânica que provoca o deslocamento dos carros na diagonal.

A figura 19(e) mostra a vista tridimensional do atuador planar com detalhes de toda a superfície do plano de trabalho. Os carros podem se deslocar conforme as bobinas dos eixos x e y forem excitadas. Para isso, deve-se estabelecer uma lógica de acionamento que proporcione módulo e direção de corrente compatíveis aos movimentos desejados.

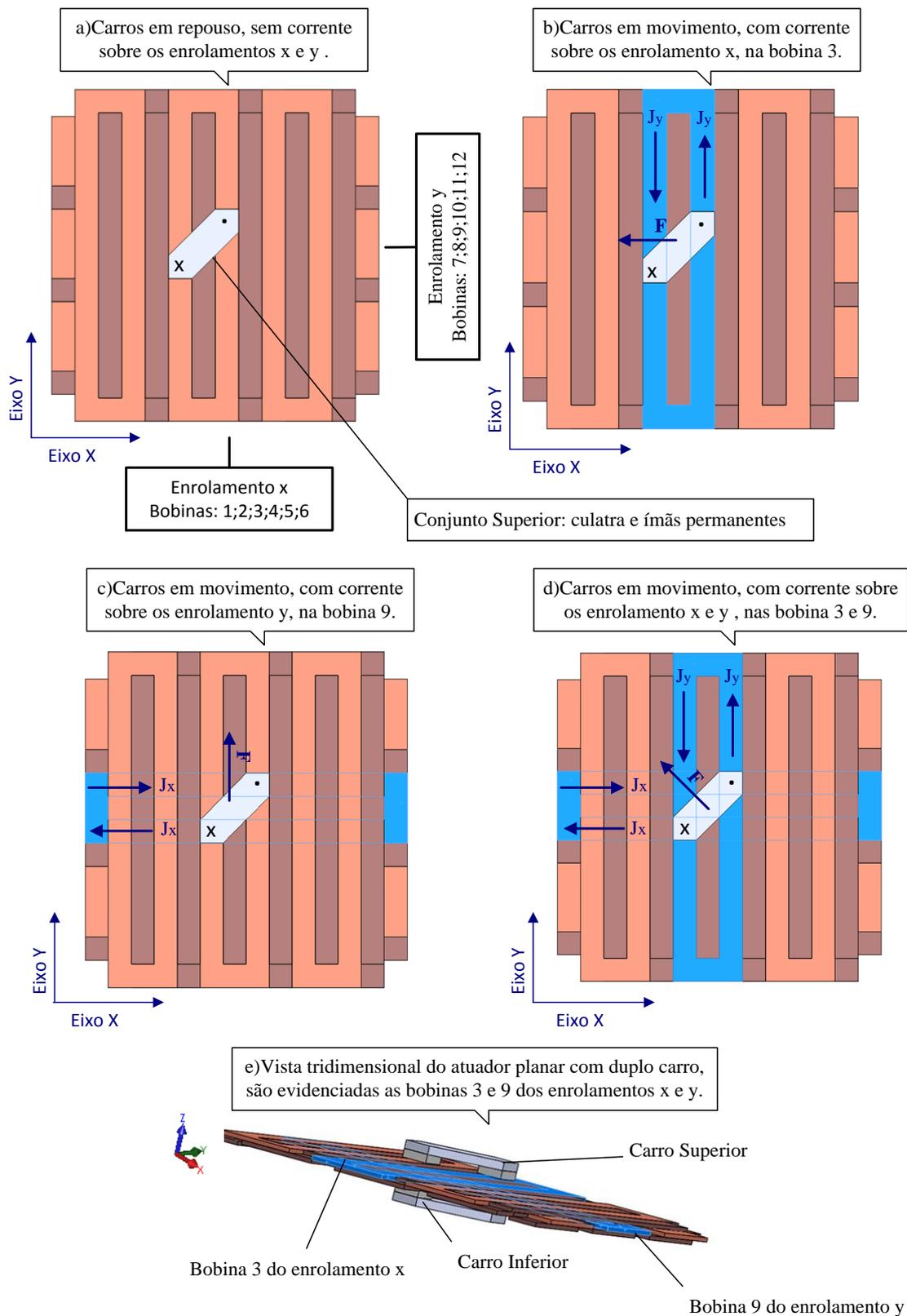


Figura 19: Descrição de operação do atuador planar na produção de movimento bidirecional: (a) carros em repouso; (b) carros em movimento ao longo do eixo x; (c) carros em movimento ao longo do eixo y; (d) carros em movimento diagonal devido a excitação simultânea das fases dos enrolamentos x e y; (e) Vista tridimensional da descrição de operação com detalhes de carros e enrolamentos.

A característica construtiva do atuador planar em estudo permite, pela disposição geométrica de seus carros, sobre os enrolamentos planejados, a movimentação simultânea ao longo do plano de trabalho. Como o atuador possui dois mecanismos simétricos de tração acoplados magneticamente entre si, compostos por um carro superior e um carro inferior, a produção de movimento ocorre simultaneamente em ambas as faces do plano de trabalho.

A planificação dos enrolamentos do atuador em fases independentes permite o aproveitamento de ambos os lados de bobinas. Assim, quando uma bobina é ativa, a densidade de corrente elétrica pode interagir com o campo magnético de excitação dos ímãs permanentes, resultando em força mecânica de deslocamento nos carros de tração do atuador. Esta característica possibilita uma diversidade de movimentação ao longo das faces do plano, contanto que um controle de posicionamento do carro seja estabelecido com as corretas bobinas de excitação.

As características diferenciais de ausência de armadura ferromagnética e de duplo carro de tração possibilitam a distribuição e compactação dos enrolamentos planejados ao longo da área de trabalho, bem como a redução de componentes e peso efetivo do atuador planar, quando compararmos com mecanismos de movimentação linear típicos como o exemplo descrito na figura 6, a redução do material ativo do atuador planar proposto fica na faixa de 75 %. Esta redução de peso é devido em primeira ordem de grandeza a ausência de material ferromagnético na armadura, e em segunda ordem a não utilização de bobinas envolvente que possuem um lado de bobina não aproveitado.

3.5 ANÁLISE DO CIRCUITO MAGNÉTICO DO ATUADOR PLANAR CONTENDO ÍMÃS PERMANENTE

Para análise do circuito magnético do atuador planar contendo ímãs permanentes foi utilizada a curva de desmagnetização normal apresentada na figura 20. Nela existe um par de

coordenadas entre a remanência, B_r , e a coercitividade, H_c , cujo produto entre B e H será máximo, possuindo a dimensão de Joule por metro cúbico. O par de coordenadas $(BH)_{máx}$, é denominado de ponto de máximo produto energético. O produto máximo fornece uma indicação da qualidade do ímã permanente.

O ponto de operação de um ímã permanente inserido em um circuito magnético estará localizado no segundo quadrante do ciclo de histerese entre a retentividade e a coercitividade, sendo representado pelo ponto P na reta que une os pontos de coordenadas $(0,0)$ e (B, H) no gráfico da figura 20. (SILVEIRA, Marília Amaral, 2003)

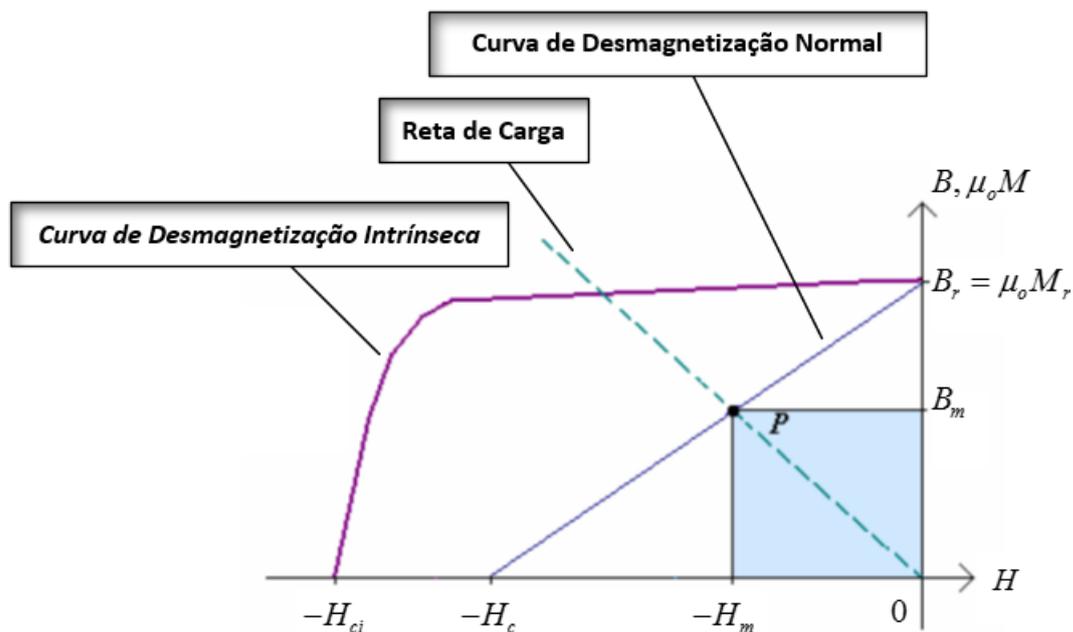


Figura 20: Curva de desmagnetização de um ímã permanente
Fonte: SILVEIRA, Marília Amaral, (2003).

A figura 21 representa um circuito que contém um ímã permanente, um núcleo de ferro e um entreferro. Como o circuito não possui bobinas com corrente, a integral de linha \bar{H} ao longo da linha que corresponde ao caminho médio do fluxo magnético através do circuito magnético de comprimento l , corresponde a (SILVEIRA, Marília Amaral, 2003):

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = N_b \cdot I = 0 \quad (10)$$

Onde N_b corresponde ao número de espiras de uma determinada bobina e I , a corrente elétrica nessa bobina hipotética. O fluxo produzido pelo ímã permanente, ϕ_m , é calculado pela soma do fluxo magnético no entreferro e o fluxo magnético disperso, ou seja, $\phi_m = \phi_g + \phi_d$. Se a contribuição de cada uma das regiões for considerada, a saber, as regiões do ímã permanente, do entreferro e do ferro, a equação (10) pode ser desenvolvida em sua forma escalar como:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int H_m dl_m + \int H_{Fe} dl_{Fe} + \int H_g dl_g = 0 \quad (11)$$

onde l_{Fe} é o comprimento médio da região em ferro e l_g e l_m estão definidos pela figura 21.

Considerando o ferro ideal com alta permeabilidade, a equação anterior resulta em:

$$\int_{l_m} H_m dl_m + \int_{l_g} H_g dl_g = 0 \quad (12)$$

Quando a intensidade de campo for considerada constante em cada região do circuito, a equação (12) pode ser resolvida, de forma que sua solução seja igual a (SILVEIRA, Marília Amaral, 2003):

$$H_m l_m + H_g l_g = 0 \quad (13)$$

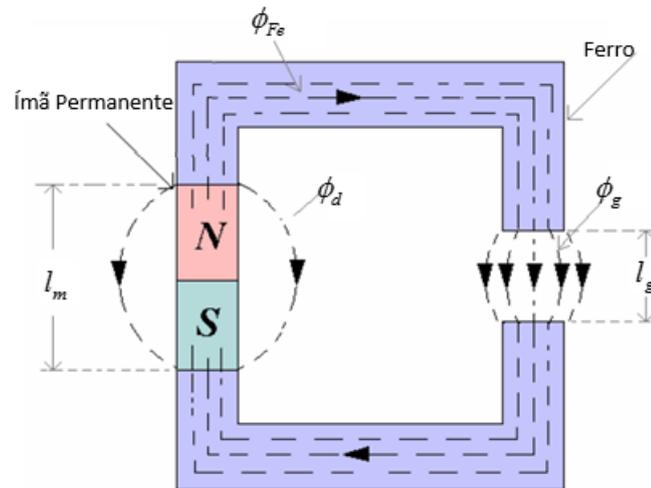


Figura 21: Circuito magnético com ímã permanente, núcleo de ferro e entreferro
Fonte: SILVEIRA, Marília Amaral, (2003).

Verifica-se que H_m e H_g possuem sinais opostos, e o campo H_g tem ação desmagnetizante sobre o ímã permanente. Para o entreferro, a intensidade de campo magnético é calculada conforme:

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_o} \quad (14)$$

Logo,

$$\frac{B_g}{H_m} = -\mu_o \left(\frac{l_m}{l_g} \right) \quad (15)$$

Caso o fluxo disperso seja desprezado, ou seja, se o valor do fluxo magnético no entreferro, ϕ_g , é igual ao valor do fluxo magnético no ímã permanente, ϕ_m , tem-se que

$B_m \cdot s_m = B_g \cdot s_g$. Desta forma, a equação (15) se modifica para:

$$\frac{B_g}{H_m} = -\mu_o \begin{pmatrix} l_m \\ l_g \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_g \\ s_m \end{pmatrix} \quad (16)$$

A equação descrita acima é a equação da reta de carga do ímã permanente. O ponto de operação do ímã permanente, P , é o ponto onde a reta de carga corta a curva normal, sendo designado pelas coordenadas $(-H_m, B_m)$ do gráfico da figura 20. A partir do ponto de operação é possível obter-se o valor da densidade de fluxo no entreferro. Até o momento o circuito magnético foi considerado ideal, os fatores de fluxo disperso e espriamento de fluxo no entreferro não foram considerados.

O fluxo disperso pode ser considerado através de um fator aplicado ao fluxo que atravessa o entreferro. A área do entreferro é estimada em função do coeficiente de espriamento do fluxo no entreferro, $C_f = \frac{s_g}{s_m}$. O coeficiente de espriamento, C_f , e o fator de dispersão, L_f , são de difícil determinação. O fator de dispersão do fluxo relaciona o fluxo total com o fluxo que cruza o entreferro (SILVEIRA, Marília Amaral, 2003):

$$L_f = \frac{\phi_g + \phi_d}{\phi_g} = \frac{\phi_m}{\phi_g} = \frac{s_m B_m}{s_g B_g} \quad (17)$$

Substituindo a equação (17) na equação (16), obtém-se:

$$\frac{B_g}{H_m} = - \begin{pmatrix} l_m \\ l_g \end{pmatrix} \mu_o = \frac{B_m}{L_f H_m} \begin{pmatrix} s_m \\ s_g \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} l_m \\ l_g \end{pmatrix} \mu_o \quad (18)$$

ou

$$\frac{B_m}{H_m} = -\left(\frac{l_m}{l_g}\right)\left(\frac{s_g}{s_m}\right)\mu_o L_f = -\left(\frac{l_m}{l_g}\right)\mu_o L_f C_f \quad (19)$$

3.6 EQUIVALENTE ELÉTRICO DO CIRCUITO MAGNÉTICO DO ATUADOR PLANAR

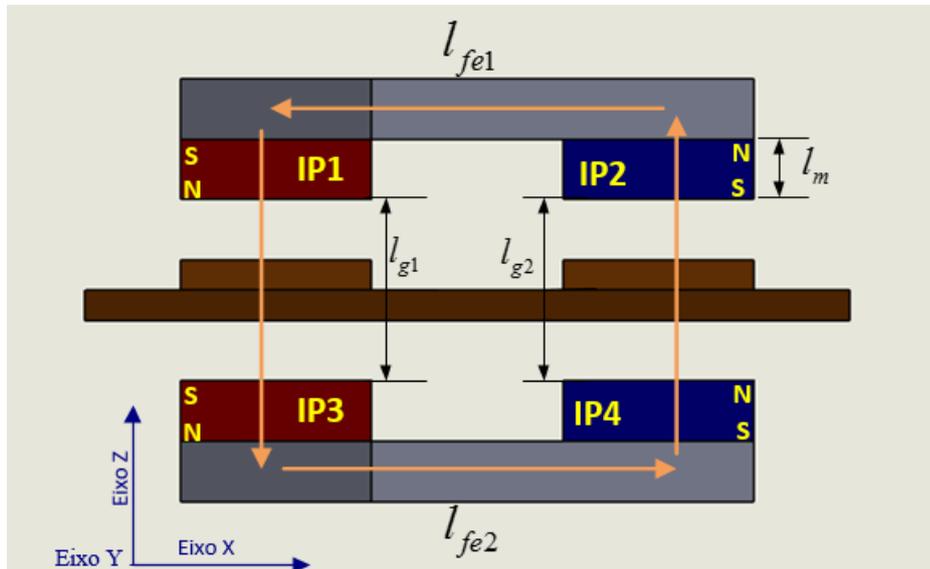
A representação de um circuito magnético que contém ímãs permanentes é feita por analogia entre este e um circuito elétrico. Os ímãs permanentes são representados como se fossem fontes de tensão e as relutâncias do material ferromagnético e do entreferro como se fossem resistores. Para o análogo elétrico, a tensão entre os terminais da fonte corresponde à força magnetomotriz do ímã permanente e o fluxo magnético é representado pela corrente. No circuito magnético simplificado do atuador planar, representado na figura 22 (a), o fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes percorre seu caminho através das culatras de material ferromagnético e dos entreferros l_{g1} e l_{g2} . A figura 22 (b) representa o análogo elétrico deste circuito. Desprezando-se a relutância relacionada ao fluxo disperso, a relutância do circuito equivalente será:

$$\mathfrak{R}_{eq} = \mathfrak{R}_{fe1} + \mathfrak{R}_{fe2} + \mathfrak{R}_{g1} + \mathfrak{R}_{g2} \quad (20)$$

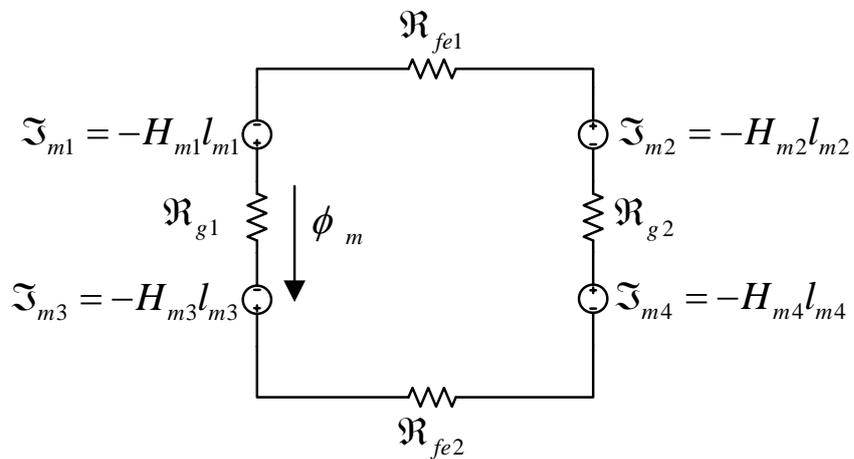
onde \mathfrak{R}_{eq} é a relutância equivalente do circuito magnético do atuador planar, \mathfrak{R}_{fe1} , a relutância da culatra superior, \mathfrak{R}_{fe2} , a relutância da culatra inferior, \mathfrak{R}_{g1} , a relutância do entreferro sob os ímãs permanentes IP1 e IP3 e \mathfrak{R}_{g2} , a relutância do entreferro localizada sob os ímãs permanentes IP2 e IP4. Caso a permeabilidade magnética do material ferromagnético for considerada infinita, então:

$$\mathfrak{F}_m = \phi_m \cdot (\mathfrak{R}_{g1} + \mathfrak{R}_{g2}) \quad (21)$$

onde \mathfrak{T}_m é a força magnetomotriz total produzida pela soma de \mathfrak{T}_{m1} , \mathfrak{T}_{m2} , \mathfrak{T}_{m3} e \mathfrak{T}_{m4} , onde cada força magnetomotriz é produzida pelo respectivo ímãs permanente IP1, IP2, IP3 e IP4.



(a)



(b)

Figura 22: Circuitos equivalentes simplificados: (a) circuito magnético do atuador planar (b) análogo elétrico do circuito magnético do atuador planar.

As características construtivas básicas do atuador planar podem ser definidas utilizando-se o circuito equivalente elétrico. Na análise do circuito equivalente, foram

consideradas as seguintes condições: a permeabilidade das culatras de material ferromagnéticas é considerada infinita, os quatro ímãs permanentes foram considerados magneticamente idênticos e o efeito de reação da armadura não influencia o ponto de operação dos ímãs permanentes devido a característica de alta força coercitiva dos ímãs permanentes e do elevado comprimento do entreferro.

As determinações de algumas características construtivas do atuador em estudo podem ser obtidas através da determinação do ponto de operação dos ímãs permanentes, conforme a equação (19). Nesse tipo de análise são definidas algumas dimensões do circuito magnético do atuador planar e, a partir dessas dimensões, obtém-se o ponto de operação dos ímãs permanentes. Através do valor da densidade de fluxo magnético nos ímãs permanentes, determinado a partir do ponto de operação, é obtida a densidade de fluxo magnético no entreferro, e então, procede-se ao cálculo da força de propulsão. Se o valor de força calculado não corresponder àquele definido para o projeto, as características construtivas são redefinidas e um novo ponto de operação dos ímãs permanentes é obtido. Esse é um processo iterativo, ou seja, pode ser necessário calcular vários pontos de operação do circuito magnético cada um deles com um valor diferente para a relação l_m/l_g , até que se obtenha o valor de força adequado.

Para cálculo da força normal e da força planar de propulsão foram utilizadas as equações (8) e (9) respectivamente, como função do ponto de operação dos ímãs permanentes e da densidade de corrente nas fases localizadas sob os ímãs permanentes.

A tabela 2 apresenta características de projeto que definem as principais características construtivas do atuador planar. Para os mesmos ímãs permanentes de 8 mm de comprimento axial, foram considerados três comprimentos diferentes de entreferro. Para cada relação l_m/l_g , foi gerado um gráfico que contém a curva normal do segundo quadrante do

ímã permanente, a reta de carga do ímãs permanente e o ponto de interseção das duas curvas que corresponde ao ponto de operação do ímãs permanente , conforme apêndice R.

O protótipo foi construído com ímãs permanentes de comprimento axial de 8 mm e adotou-se inicialmente uma faixa de corrente entre zero e 6 Amperes por cada fase dos enrolamentos x e y . Devido ao tempo necessário para realização dos ensaios foi necessário o monitoramento das temperaturas dos enrolamentos para não ultrapassar o limite térmico de operação dos condutores do atuador planar, assim para mitigar o efeito de temperatura foi adotada em ensaios a faixa de corrente entre zero e 3 amperes por cada fase dos enrolamentos x e y do atuador planar.

Tabela 2: Características de projeto do atuador planar.

Dados	Características de projeto	
Comprimento do ímã permanente	8 mm	
Passo Polar dos ímãs	50 mm	
Área da superfície polar dos ímãs permanentes	25 x 25 mm ²	
Comprimento do entreferro	12 mm	24 mm
Ponto de operação $\frac{B_m}{H_m}$	0,562 T -465,926 kA/m	0,368 T -609,986 kA/m
Densidade de fluxo magnético no entreferro	$B_g = 0,390$ T	$B_g = 0,256$ T
Força normal	90,94 N	38,97N
Força planar de propulsão, considerando duas fases excitadas	65,66 N	42,98 N
Volume ativo ocupado pelos condutores	2856 mm ³	
Densidade de corrente em cada fase	29,41 A/mm ²	
Faixa de operação em Amperes por fase	0 a 6 A/fase	

4 MODELO ANALÍTICO DO ATUADOR PLANAR

Um modelo analítico para prever a distribuição tridimensional de densidade de fluxo magnético no entreferro e as forças envolvidas foi adaptado com um método de análise que está baseado em um modelo tridimensional, desenvolvido em coordenadas retangulares (SILVEIRA, 2003). As forças que atuam no carro do atuador planar dependem da distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro. O comportamento da distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro é determinado pelo ponto de operação dos ímãs permanentes e pela reação da armadura produzida pelos condutores percorridos por corrente.

4.1 CAMPO MAGNÉTICO NO ATUADOR PLANAR

O campo magnético produzido pelos ímãs permanentes do atuador planar é analisado separadamente do campo magnético produzido pelas correntes nos enrolamentos da armadura do atuador em estudo. Portanto, a análise do campo magnético produzido pelos ímãs permanentes do atuador planar, nas regiões em estudo, foi considerada livre de corrente elétrica, e o campo magnético, \vec{H} , pode ser obtido através da utilização do gradiente do potencial escalar magnético, ψ , de acordo com a expressão:

$$\vec{H} = -\nabla \psi \quad (22)$$

A equação $\vec{B} = \mu_o(\vec{M} + \vec{H})$ define a relação existente entre os vetores \vec{B} , \vec{H} e \vec{M} , onde \vec{M} representa o vetor intensidade de magnetização, ou magnetização, e é definido como o momento magnético por unidade de volume do material ferromagnético. O vetor

magnetização caracteriza um material em função de seu estado de magnetização. Enquanto \vec{H} pode existir em qualquer lugar. O vetor \vec{M} não existe no espaço vazio, apenas em meios materiais (KRAUS; CARVER,1978). Em uma região onde exista apenas ar, como o entreferro do atuador planar, o vetor \vec{M} é nulo e a aplicação das equações $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ e $\vec{H} = -\nabla \psi$ à equação $\vec{B} = \mu_o \vec{H}$ resultará em:

$$\nabla \cdot \vec{B} = \mu_o \nabla \cdot \vec{H} = \mu_o \nabla \cdot (-\nabla \psi_g) = 0 \quad (23)$$

onde ψ_g representa o potencial escalar magnético no entreferro. Em coordenadas retangulares, a equação (23) assume a forma

$$\frac{\partial^2 \psi_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi_g}{\partial z^2} = 0 \quad (24)$$

que é a equação de Laplace em termos do potencial escalar magnético no entreferro do atuador planar. O modelo analítico, que descreve o comportamento do potencial escalar magnético no entreferro, será obtido a partir de uma solução para a equação (24) que satisfaça as condições de fronteira impostas para o problema (SCHWARTZ, M.,1987) (KRAUS; CARVER.,1978). Supondo que ψ_g possa ser expresso como o produto de três funções $X(x)$, $Y(y)$ e $Z(z)$, obtém-se:

$$\psi_g(x, y, z) = X(x)Y(y)Z(z) \quad (25)$$

Aplicando-se a equação (25) na equação (24) e utilizando-se o método de solução por separação de variáveis, obtém-se o seguinte conjunto de equações:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} = \alpha^2 X, \frac{d^2 Y}{dy^2} = \beta^2 Y, \frac{d^2 Z}{dz^2} = \gamma^2 Z \quad (26)$$

sendo $\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 0$. A solução para o conjunto de equações apresentado em (26) é igual a

$$\begin{aligned} X(x) &= A_1 e^{\alpha x} + B_1 e^{-\alpha x} \\ Y(y) &= A_2 e^{\beta y} + B_2 e^{-\beta y} \\ Z(z) &= A_3 e^{\gamma z} + B_3 e^{-\gamma z} \end{aligned} \quad (27)$$

Substituindo as três equações anteriores em (25), obtém-se a solução geral da equação de Laplace:

$$\psi_g(x, y, z) = (A_1 e^{\alpha x} + B_1 e^{-\alpha x})(A_2 e^{\beta y} + B_2 e^{-\beta y})(A_3 e^{\gamma z} + B_3 e^{-\gamma z}) \quad (28)$$

Na equação (28) A_1 , A_2 , A_3 e B_1 , B_2 , B_3 devem ser determinadas. A determinação dessas constantes terá como base as condições de fronteira do campo magnético nas regiões envolvidas, a saber, o material ferromagnético das culatras, os ímãs permanentes e o entreferro (espaço livre em ar mais as regiões das bobinas).

A figura 23 apresenta a vista lateral do atuador planar. Nela destaca-se a porção utilizada para calcular analiticamente o campo magnético delimitado pela linha tracejada, composta pelos ímãs permanentes e pelo entreferro.

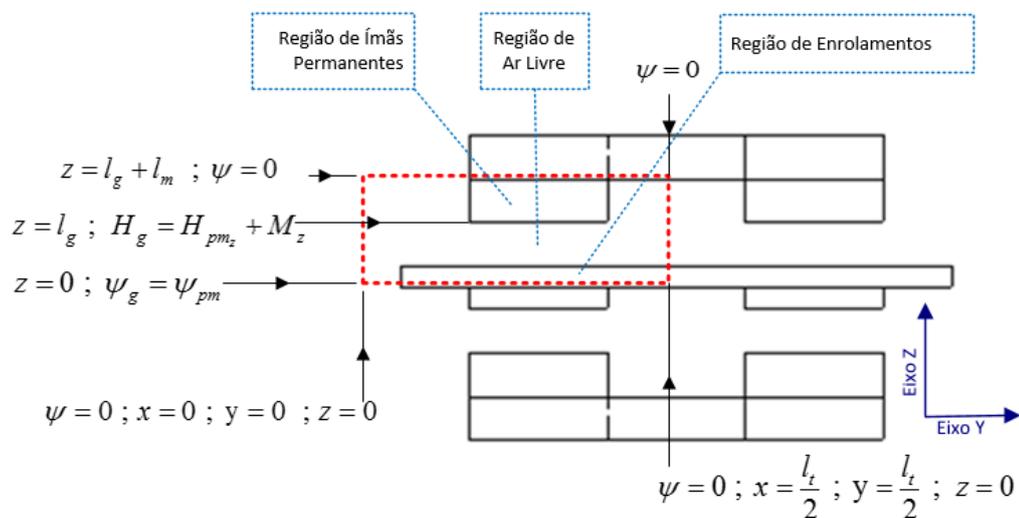


Figura 23: Desenho da geometria do atuador planar: vista lateral.

A figura 24 (a) e (b) apresentam as dimensões consideradas no modelo analítico utilizado para o cálculo do campo magnético produzido pelos ímãs permanentes.

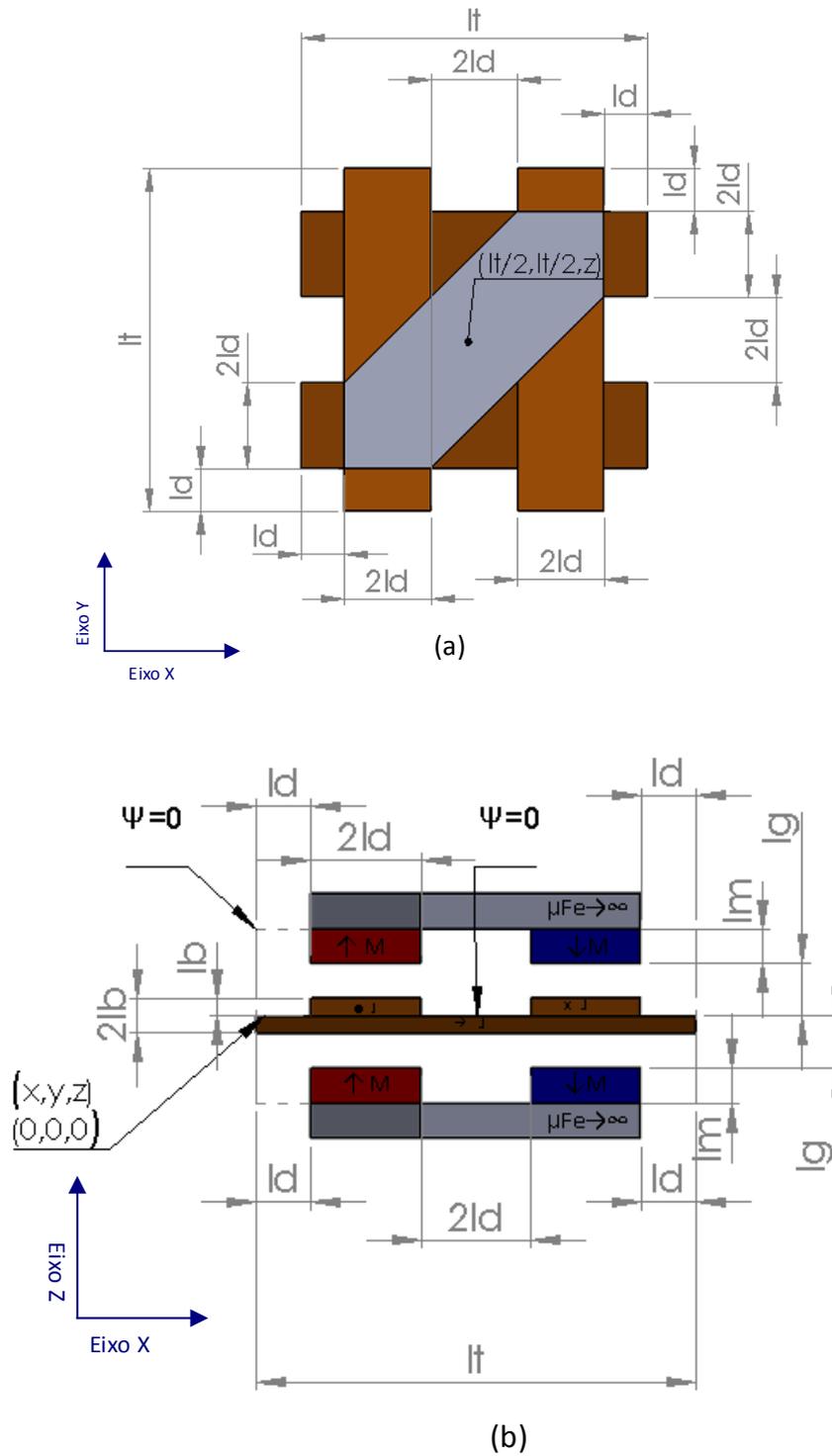


Figura 24: Desenho da geometria do atuador planar: (a) vista superior e (b) vista frontal.

As constantes A_1, A_2, A_3 e B_1, B_2, B_3 são constantes arbitrárias. Um método para solução das equações dos potenciais magnéticos envolve a determinação de uma função que satisfaz a equação de Laplace, as condições de fronteira impostas para o modelo e as condições do campo magnético na região dos ímãs permanentes (MELCHER, J. R., 1981). As condições de contornos são as seguintes (SILVEIRA, Marília Amaral., 2003):

Conforme pode ser verificado pela figura 23 e 24, os potenciais magnéticos foram considerados iguais a zero nos planos $x=0$, $y=0$. Isto implica que $A_1 = -B_1$ e $A_2 = -B_2$. Em $x = l_t / 2$, $y = l_t / 2$, $x = l_t$ e $y = l_t$ os potenciais também foram considerados nulos isto faz com que $\alpha = j \frac{2\pi n}{l_t}$, $\beta = j \frac{2\pi m}{l_t}$ e $\gamma = \frac{2\pi}{l_t} \sqrt{n^2 + m^2}$. Aplicando os resultados anteriores a equação (28), o potencial escalar magnético no entreferro, ψ_g , pode ser representado por uma série dupla de Fourier, de acordo com a seguinte expressão:

$$\psi_g(x, y, z) = \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \left(j2A_1 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi n}{l_t} x \right) \right) \left(2A_2 \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi m}{l_t} y \right) \right) (A_3 e^{\gamma z} + B_3 e^{-\gamma z}) \quad (29)$$

Á última equação pode ser modificada para:

$$\psi_g(x, y, z) = \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} (k_1 e^{\gamma z} + k_2 e^{-\gamma z}) \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi n}{l_t} x \right) \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi m}{l_t} y \right) \quad (30)$$

A determinação das constantes k_1 e k_2 depende das condições impostas na fronteira entre o entreferro e os ímãs permanentes e essas condições dependem do vetor densidade de fluxo magnético na região dos ímãs permanentes, cujo comportamento é expresso por:

$$\vec{B} = \mu_o (\vec{H} + \vec{M}) \quad (31)$$

Em cada um dos ímãs permanentes do carro, o vetor magnetização, \vec{M} , dado em A/m, tem somente um componente através do eixo z . Desta forma, \vec{M} pode ser representado por $M_z \vec{k}$. A figura 25 representa o gráfico bidimensional da magnetização. No gráfico M_o representa o valor de pico de magnetização, sendo igual ao módulo de \vec{M}_r , que representa o vetor magnetização residual nos ímãs permanentes.

A magnetização pode também ser representada por uma série de Fourier. Assim, o componente z da magnetização é representada por (SILVEIRA, Marilia Amaral, 2003):

$$M_z = \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \left(\frac{16M_o}{\pi^2} \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{nm} \right) \text{sen} \left(\frac{2\pi n}{l_t} x \right) \text{sen} \left(\frac{2\pi m}{l_t} y \right) \quad (32)$$

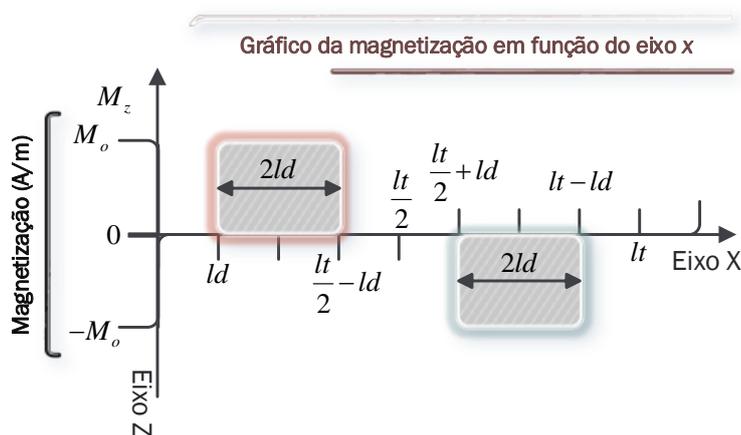


Figura 25: Representação gráfica bidimensional da magnetização em função do eixo x
Fonte: SILVEIRA, Marilia Amaral, (2003).

Nas regiões dos ímãs permanentes, o potencial escalar magnético, ψ_{pm} , tem que satisfazer a equação de Poisson:

$$\nabla^2 \psi_{pm} = \nabla \cdot \vec{M} \quad (33)$$

O potencial magnético escalar deve satisfazer a equação de Poisson, de modo que o potencial escalar magnético é representado por

$$\psi_{pm} = \psi_h + \psi_p \quad (34)$$

onde ψ_h é a solução homogênea que deve satisfazer a equação de Laplace e ψ_p é a solução particular obtida através da equação de Poisson (MELCHER, J. R.,1981). Através da equação (32) verifica-se que a divergência do vetor magnetização, \vec{M} , representado por $M_z \vec{k}$, é igual a zero. Assim, a expressão para o potencial escalar magnético na região dos ímãs permanentes assume a forma da equação de Laplace, $\nabla^2 \psi = 0$.

Aplicando os mesmos procedimentos utilizados para a solução da expressão de potencial escalar magnético no entreferro, obtém-se a seguinte expressão para o potencial na região dos ímãs permanentes (SILVEIRA, Marília Amaral.,2003):

$$\psi_{pm}(x, y, z) = \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} (k_3 e^{\gamma z} + k_4 e^{-\gamma z}) \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \quad (35)$$

As constantes k_1 , k_2 , k_3 e k_4 das equações (30) e (35) são obtidas a partir condições descritas a seguir.

Os componentes tangenciais do vetor de densidade de fluxo magnético no entreferro são iguais a zero na linha de simetria, onde $z=0$. Os componentes tangenciais do

vetor de densidade de fluxo magnético nos ímãs permanentes são iguais a zero onde $z = (l_g + l_m)$. Em $z = l_g$, os componentes z do vetor intensidade de campo magnético no entreferro e nos ímãs permanentes são relacionados por $H_{g_z} = H_{pm_z} + M_z$ e os respectivos potenciais escalares magnéticos são relacionados por $\psi_g = \psi_{pm}$.

A determinação das constantes k_1, k_2, k_3 e k_4 possibilitou obter as expressões dos potenciais escalares magnéticos no entreferro e nos ímãs permanentes. Sabendo que $\vec{B}_g = \mu_o (-\nabla \psi_g)$, a componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, B_{g_z} , é dada por (FLORES FILHO, A. F.;1999) (SILVEIRA, Marília Amaral,2003):

$$B_{g_z} = \mu_o \frac{16M_o}{\pi^2} \sum_{\substack{n=1,3,\dots \\ m=1,3,\dots}}^{\infty} \cosh(\gamma z) \frac{\left(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)} \right)}{\left(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1 \right)} \times \frac{\cos(knl_d) \cos(kml_d)}{nm} \sin(knx) \sin(kmy) \quad (36)$$

4.2 ANÁLISE DAS FORÇAS DE PROPULSÃO DO ATUADOR PLANAR

A força que produz o movimento ao longo do plano depende do vetor densidade de corrente nas fases do enrolamento da armadura e do componente z do vetor densidade de fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes, B_{g_z} , e do comportamento do vetor densidade de corrente nos enrolamentos. A força de propulsão que atua sobre um ímã permanente é obtida a partir de (SILVEIRA, Marília Amaral,2003):

$$\begin{aligned} \vec{F}_N &= \int_{V_N} -(\vec{J}_N \times \vec{B}_{g_N}) dV_N \\ \vec{F}_N &= \int_{V_N} B_{g_z N} (J_{yN} \vec{i} - J_{xN} \vec{j}) dV_N \\ \vec{F}_N &= F_{xN} \vec{i} - F_{yN} \vec{j} \end{aligned} \quad (37)$$

onde F_N é a força de propulsão produzida sobre o ímã permanente N , J_{xN} e J_{yN} são as densidades de corrente nas fases das bobinas nas direções x e y , respectivamente, e V_N é o volume de integração que envolve as fases das bobinas ativas.

Na região dos enrolamentos, a densidade de corrente no enrolamento x é constante através de y e varia periodicamente com x , podemos visualizar os enrolamentos conforme mostra a figuras 26(a) e (b). Os enrolamentos planificados do atuador planar estão totalmente representados na figura 26(a), sendo evidenciada apenas uma fase do enrolamento x e seu vetor densidade de corrente no eixo y . Na figura 26(b) o gráfico, J_o é igual ao valor de pico de J_y . O gráfico bidimensional de J_y sobre o eixo x assume a forma apresentada, pois no estudo apenas a fase localizada sob os ímãs permanentes é excitada por corrente contínua. Conforme gráfico da figura 26(b) a densidade de corrente nas fases do enrolamento x é constante através de y e é uma função dependente de x . A função que descreve o comportamento da densidade de fluxo no enrolamento x poderá ser representada através de uma série de Fourier. Os coeficientes desta série, representados por $J_{n,m}$, são obtidos por (SILVEIRA, 2003):

$$J_{n,m} = \left(\frac{4}{l_t}\right) J_o \left[\int_{l_d}^{\frac{l_t}{2}-l_d} \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) dx \right] \quad (38)$$

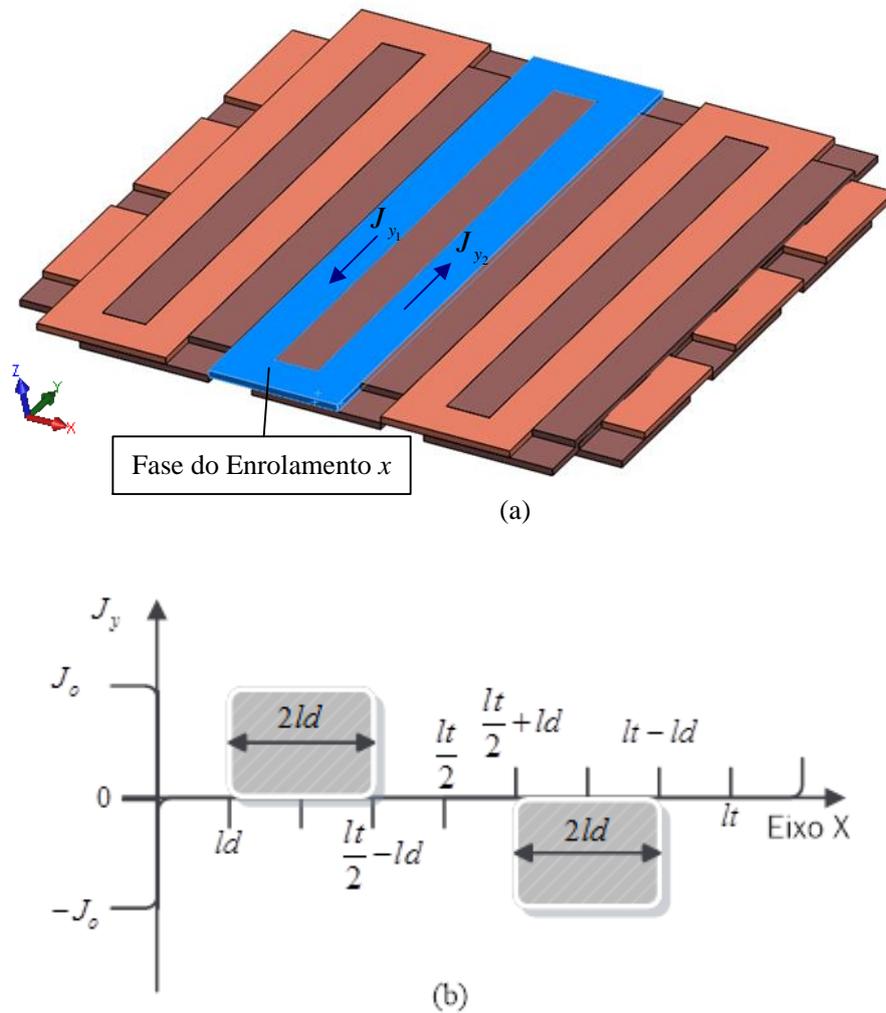


Figura 26: Representação da densidade de corrente no atuador planar: (a) fase do enrolamento x com vetor densidade de corrente no eixo y (b) gráfico bidimensional da densidade de corrente no enrolamento x . Fonte: SILVEIRA, Marília Amaral, (2003).

Assim, a componente y do vetor densidade de corrente no enrolamento x é representada por:

$$J_y = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4J_o}{\pi} \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t)}{n} \text{sen} \frac{2\pi n}{l_t} x \quad (39)$$

Por analogia, se apenas uma fase do enrolamento y do estator do atuador planar for considerada, J_x é a componente x do vetor de densidade de corrente no enrolamento y . A

figura 27 mostra o estator do atuador planar , representando apenas uma fase do enrolamento y . Conforme pose ser verificado, o vetor densidade de corrente possui apenas componente em x . Assim, por equivalência a densidade de corrente nas fases do enrolamento y poderá ser representada através de uma série de Fourier, de acordo com a expressão:

$$J_x = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4J_o}{\pi} \cdot \frac{\cos(2\pi m l_d / l_t)}{m} \text{sen} \frac{2\pi m}{l_t} y \quad (40)$$

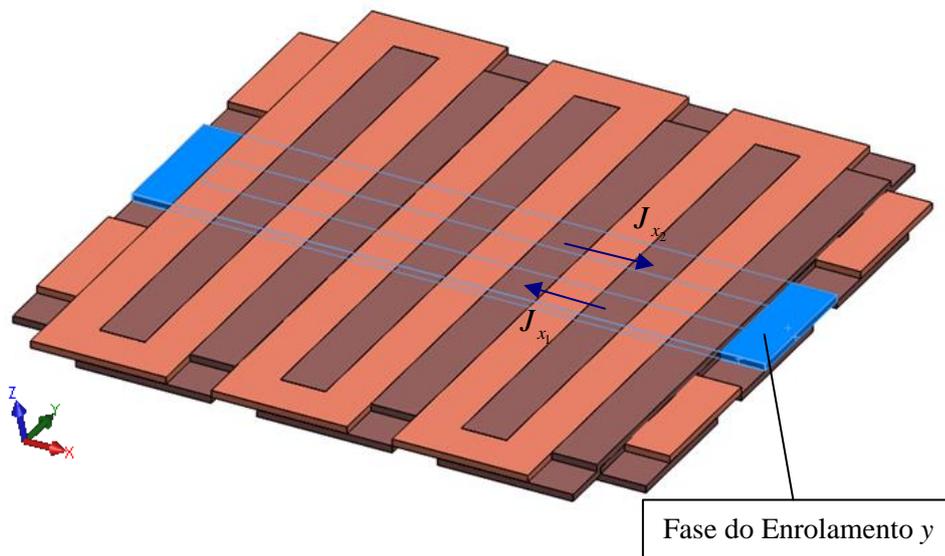


Figura 27: Estator do atuador planar com representação de apenas uma fase do enrolamento y . O vetor densidade de corrente possui apenas componente em x .

Introduzindo-se a equação (36) na equação (37), obtém-se:

$$F_N = \int_{V_N} \mu_o \frac{8M_o}{\pi^2} \left[\sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} (e^{\gamma z} + e^{-\gamma z}) \frac{(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{nm} \text{sen} \left(\frac{2\pi n}{l_t} x \right) \text{sen} \left(\frac{2\pi m}{l_t} y \right) \right] \cdot (-J_{yN} \bar{i} + J_{xN} \bar{j}) dV_N \quad (41)$$

Introduzindo-se as equações (39) e (40) na equação (41) tem-se (SILVEIRA, 2003):

$$\begin{aligned} \vec{F}_N = \mu_o \frac{32M_o J_o}{\pi^3} \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\left(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)} \right)}{\left(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1 \right)} \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{nm} \\ \left[- \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t)}{n} \int_0^{l_b} \int_0^{\frac{l_t}{2}} \int_0^{\frac{l_t}{2}} \text{sen}^2 \left(\frac{2\pi n}{l_t} x \right) \text{sen} \left(\frac{2\pi m}{l_t} y \right) (e^{\gamma z} + e^{-\gamma z}) \bar{i} dx dy dz \right. \\ \left. + \frac{\cos(2\pi m l_d / l_t)}{m} \int_0^{l_b} \int_0^{\frac{l_t}{2}} \int_0^{\frac{l_t}{2}} \text{sen} \left(\frac{2\pi n}{l_t} x \right) \text{sen}^2 \left(\frac{2\pi m}{l_t} y \right) (e^{\gamma z} + e^{-\gamma z}) \bar{j} dx dy dz \right] \end{aligned} \quad (42)$$

Efetuada a integração, obtém-se:

$$\begin{aligned} \vec{F}_N = \mu_o 8l_t^3 M_o J_o \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\text{senh}(\gamma l_b)}{\pi^5 n^2 m^2 \sqrt{n^2 + m^2}} \frac{\left(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)} \right)}{\left(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1 \right)} \\ \cdot \cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t) \left(\cos(2\pi n l_d / l_t) \bar{i} - \cos(2\pi m l_d / l_t) \bar{j} \right) \\ = -F_{xN} \bar{i} + F_{yN} \bar{j} \end{aligned} \quad (43)$$

A força planar total é obtida através da equação (44):

$$\begin{aligned} \vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = -(F_{x_1} + F_{x_2}) \bar{i} + (F_{y_1} + F_{y_2}) \bar{j} \\ = \mu_o 16l_t^3 M_o J_o \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\text{senh}(\gamma l_b)}{\pi^5 n^2 m^2 \sqrt{n^2 + m^2}} \frac{\left(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)} \right)}{\left(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1 \right)} \\ \cdot \cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t) \left(\cos(2\pi n l_d / l_t) \bar{i} - \cos(2\pi m l_d / l_t) \bar{j} \right) \end{aligned} \quad (44)$$

Se forem considerados valores diferentes de densidade de corrente nos enrolamentos x e y , então a equação pode ser reescrita como:

$$\vec{F} = \mu_o 16l_t^3 M_o \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\sinh(\gamma l_b)}{\pi^5 n^2 m^2 \sqrt{n^2 + m^2}} \frac{\left(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m + l_g)} \right)}{\left(e^{2\gamma(l_m + l_g)} - 1 \right)} \cdot \cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t) \left(J_{o_y} \cos(2\pi n l_d / l_t) \vec{i} - J_{o_x} \cos(2\pi m l_d / l_t) \vec{j} \right) \quad (45)$$

onde n e m são números inteiros, k é definida por $k = 2\pi / l_t$, $\gamma = \left(\frac{2\pi}{l_t} \right) \sqrt{n^2 + m^2}$ e M_o é a magnetização residual dos ímãs permanentes.

Com a equação (44) se pode determinar a componente x da força planar total de propulsão, igual a $F_{x1} + F_{x2}$ para um par de ímã permanente, com duas vezes esse produto podemos representar os gráficos da componente x da força planar total em função da corrente que percorre a fase do enrolamento x localizado sob os ímãs permanentes. Assim, é determinada a força que promove o movimento dos carros através do eixo x . A força planar total que atua diagonalmente sobre os carros do atuador planar é determinada de maneira análoga, em função da corrente através das fases do enrolamento x e do enrolamento y localizados sob os ímãs permanentes.

5 MODELO NUMÉRICO DO ATUADOR PLANAR

A análise numérica utilizando o método numérico dos elementos finitos, MEF, começou seu desenvolvimento na década de 1950 com o objetivo de solucionar problemas ligados à engenharia mecânica. Na década de 1970 foi proposta a utilização deste método em problemas de eletromagnetismo (BASTOS, J. P. A. ,1989). Nos últimos anos, a popularização da utilização do método de elementos finitos na análise do comportamento eletromecânico de dispositivos eletromagnéticos tornou-se uma ferramenta de análise importante e complementar no refinamento de projetos com topologias mais complexas ou não convencionais para o cálculo de potencial, de fluxo magnético, da distribuição da densidade de fluxo, energia e força e outras grandezas de interesse (FLORES FILHO, A.F. ,2003).

O método dos elementos finitos disponibiliza a montagem e simulação de um modelo virtual, considerando as propriedades físicas reais do modelo tais como a linearidade ou não da permeabilidade magnética relativa, as condições de fronteira, a magnetização de peças geradoras de campo magnético, condutividade térmica e elétrica, velocidade, entre outras. O principal objetivo de uma simulação numérica é explorar o comportamento global do dispositivo em estudo incluindo todos os efeitos físicos simultaneamente.

5.1 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O pacote computacional para cálculo pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) ANSYS-MAXWELL é um *software* interativo de alta performance que utiliza o MEF para resolver problemas elétricos e magnéticos. O software resolve os problemas do campo magnético pelo uso das equações de Maxwell em regiões do espaço finito com condições de contorno apropriadas e inicialmente especificadas, a fim de obter uma solução com singularidade garantida.

O método numérico feito por elementos finitos tem provado ser um método muito preciso para avaliação e análise de problemas eletromagnéticos em geral. Na figura 28 pode-se visualizar o fluxo geral do método dos elementos finitos utilizado no desenvolvimento do atuador planar.

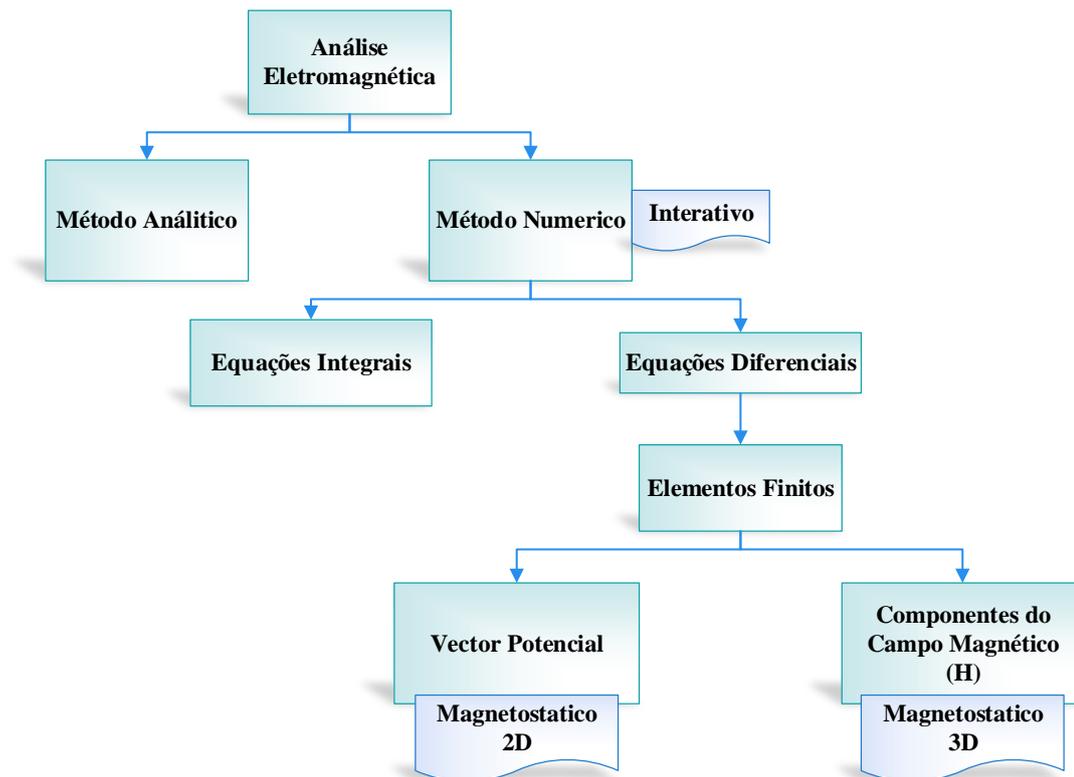


Figura 28: Fluxo geral do Método dos Elementos Finitos
 Fonte: ANSYS. (2015).

A representação matemática de um sistema físico feita pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) é constituída pela propriedade dos materiais envolvidos, geometria, malha e condições de contorno previamente atribuídas. Assim definimos a etapa denominada de pré-processamento. A solução matemática e o estudo dos resultados da solução são apresentados na etapa de pós-processamento.

Os resultados obtidos são funções da coerência das características definidas no modelo físico real. Assim, devemos representar o modelo numérico o mais próximo possível do

modelo físico, de modo a gerar um resultado comparável a valores medidos no modelo físico. Essas etapas são fundamentais para o refinamento do modelo físico com a análise numérica.

As etapas do Método dos Elementos Finitos são representadas com a sequência de blocos lógicos representados pela figura 29.

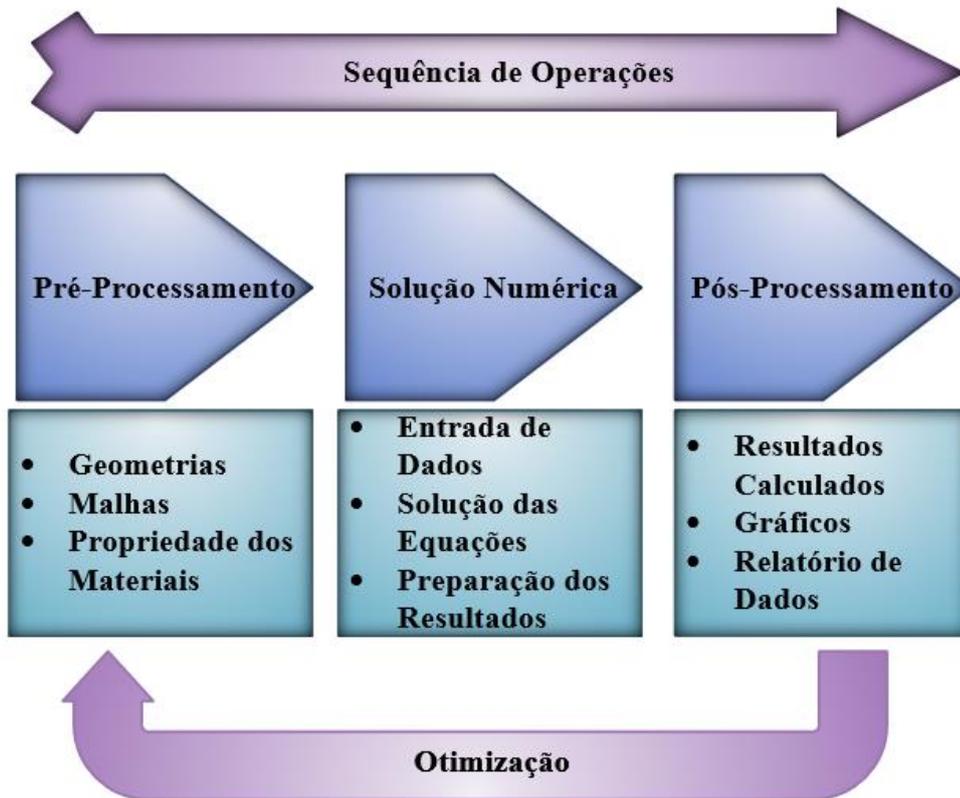


Figura 29: Etapas da análise pelo Método dos Elementos Finitos (MEF).

Na etapa de pré-processamento representamos o desenho dos componentes do atuador e estes são desmembrados em pequenas peças chamadas elementos, vide figura 30. O método dos elementos finitos refere-se a um método em que a solução numérica é obtida a partir de uma geometria que é composta dos chamados de elementos finitos. Para a ferramenta Maxwell, a unidade fundamental do elemento finito é um tetraedro. Essa etapa é identificada com a construção de malhas, onde o número de elementos irá definir a qualidade da malha que será representada matematicamente pelo modelo numérico.

O modelo numérico está associado a um sistema de equações para modelamento do problema que tende a convergir a uma solução desejada. A solução numérica depende do tamanho da malha e da disposição da malha sobre o elemento de interesse no dispositivo analisado.

O pós-processamento fornece uma quantidade significativa de dados que precisam ser interpretados e analisados. Nessa etapa, o pacote numérico fornece ferramentas diversas para gerar gráficos e equacionamento matemático de dados que permitem ao usuário validar e verificar a veracidade dos resultados obtidos.

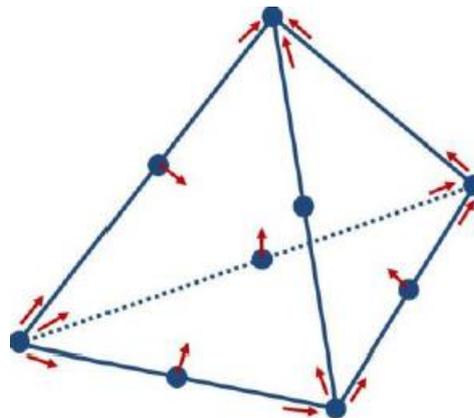


Figura 30: Tetraedro unidade fundamento no Maxwell 3D
Fonte: ANSYS (2015).

5.2 ELABORAÇÃO DO MODELO PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Foi adotada uma análise tridimensional para verificação do comportamento das forças que agem sobre os carros superior e inferior que está diretamente relacionado com a densidade de fluxo magnético entre ambos os carros. Assim, pode-se prever o comportamento e desempenho das forças do atuador planar devido às forças de propulsão e normal, dependentes da variação de entreferro entre o carro superior e inferior. A análise numérica permite verificar com detalhes a distribuição da densidade de fluxo magnético nos

componentes do atuador planar, tornando possível adequar e redimensionar o nível de saturação da culatra de aço elétrico do carro.

As culatras ferromagnéticas foram definidas como regiões não lineares e foi adotada uma curva de magnetização apresentada no trabalho no Apêndice D. As culatras foram usinadas em material ferromagnético do tipo SAE 1045 e a curva BH deste material que define o comportamento da magnetização deve ser considerada pelo método numérico, bem como a geometria das primeiras.

Os quatro ímãs permanentes adotados na análise são assumidos como idênticos, sendo considerado o valor da permeabilidade relativa e fluxo remanente. A densidade de fluxo remanente foi definida tendo apenas a componente normal z . A figura 31 representa a vista frontal bidimensional com os detalhes da geometria do atuador em análise considerando as regiões das culatras ferromagnéticas, os ímãs permanentes e as bobinas correspondentes aos eixos x e y . A linha de central do entreferro está localizada no meio das bobinas do eixo x e y .

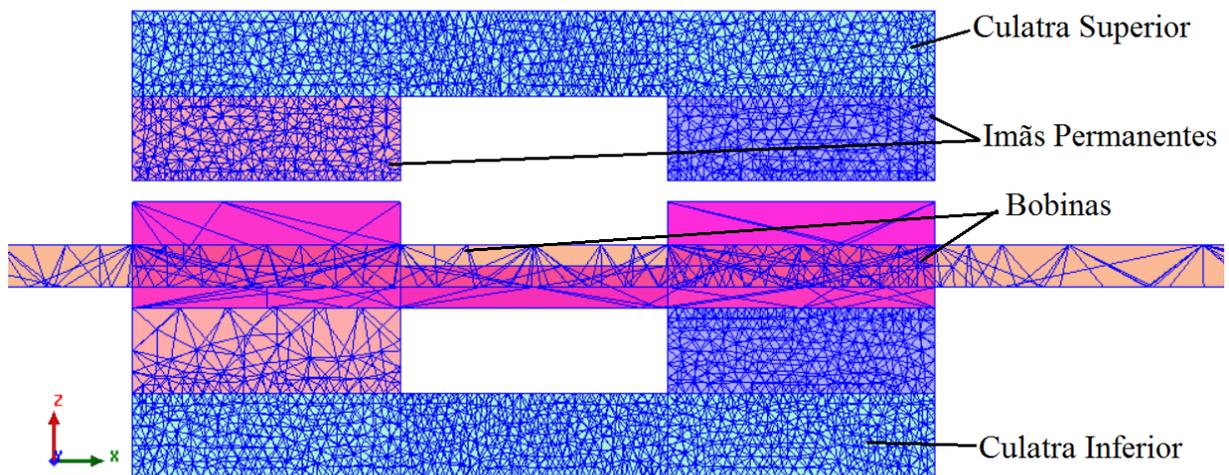


Figura 31: Detalhe da vista frontal da malha do modelo virtual.

A figura 32 do atuador planar mostra sua forma em 3D com representação de apenas duas fases do enrolamento dos eixos x e y . Os ímãs permanentes de cada carro estão posicionados sobre um par de bobinas de cada eixo. Cada bobina está caracterizada conforme

o modelo real de projeto, com especificações de posição e área ocupada, número de espiras, densidade e sentido de corrente para cada modelo numérico a ser analisado. Os elementos de malha gerados próximo às fontes de campo magnético onde os carros estão posicionados possuem maior quantidade de elementos. Assim, podemos verificar que nessas regiões a densidade de elementos é maior que em regiões afastadas das fontes de campo magnético. Na figura 32, foi gerado elementos de malha nos ímãs permanentes na ordem de 74100 tetraedros, nas bobinas 12716 tetraedros, nas culatras 89263 tetraedros e na região de ar 138801 tetraedros.

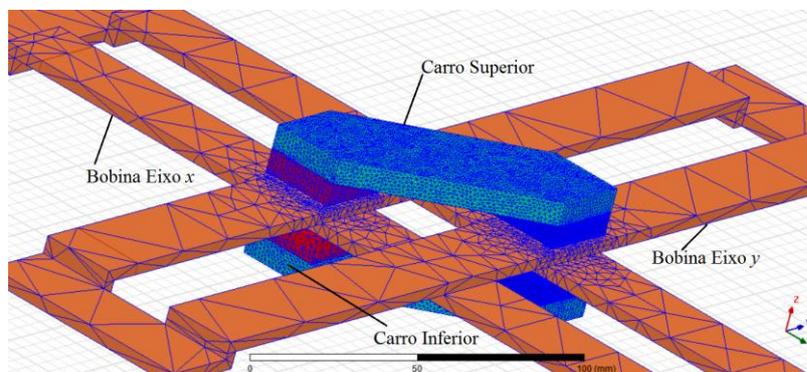


Figura 32: Detalhe da malha em vista 3D do modelo virtual.

5.3 ANÁLISE NUMÉRICA DO ATUADOR PLANAR

Várias simulações numéricas estáticas foram realizadas para o estudo do atuador planar, sendo que os principais objetivos são prever o comportamento das forças de propulsão, força normal e o comportamento da densidade de fluxo magnético do atuador. As simulações foram desenvolvidas com variações de entreferro dos carros e da corrente elétrica dos enrolamentos x e y .

Os resultados dessas simulações com protótipos virtuais do atuador planar foram usados para validação de valores obtidos analiticamente num primeiro momento.

Uma malha grande ou muito densa pode produzir um resultado mais acurado, mas demandaria mais tempo de processamento do que seria conveniente e usaria maior quantidade de memória. Sendo assim, o equilíbrio na escolha da malha deve ser previamente estudado.

Foram produzidas e avaliadas malhas com 315.000 elementos pelo módulo de estatísticas disponibilizado pelo Maxwell 3D, onde podemos quantificar e avaliar a qualidade dos resultados nos diversos modelos numéricos analisados.

A tabela 3 descreve as simulações que foram realizadas com variações de entreferro e corrente no enrolamento com o objetivo de caracterizar estaticamente o atuador planar.

Tabela 3: Detalhamento das análises numéricas em protótipo virtual

	Entreferro	Corrente Elétrica	Enrolamento x Enrolamento y
Simulação 1	12 mm	0 A	01 Fase x
Simulação 2	12 mm	3 A	01 Fase x
Simulação 3	12 mm	6 A	01 Fase x
Simulação 4	24 mm	0 A	01 Fase x
Simulação 5	24 mm	3 A	01 Fase x
Simulação 6	24 mm	6 A	01 Fase x
Simulação 7	12 e 24 mm	0 , 3 e 6 A	01 Fase x 01 Fase y

5.4 RESULTADOS DA ANÁLISE NUMÉRICA DO ATUADOR PLANAR

As simulações para análise de densidade de fluxo magnético no atuador planar consideram a possibilidade de se usar diferentes entreferros, variável fundamental para o

dimensionamento do mesmo. Sua relutância é componente dominante no circuito magnético mesmo quando comparamos com a permeabilidade da culatra do aço SAE 1045. Sendo assim, o ajuste e dimensionamento do entreferro são fundamentais para os resultados das densidades de fluxo magnético do atuador planar e compatibilização do mesmo com a armadura a ser empregada.

As simulações numéricas foram adotadas com o objetivo de verificar primeiramente o comportamento da densidade de fluxo magnético no atuador planar. Inicialmente, foi adotada uma determinada combinação de entreferros considerando regiões sem condução de corrente, em seguida foi adotada análise com regiões com condução de corrente conforme composição de simulações já descritas na tabela 3.

A modelagem do protótipo virtual para a simulação do atuador planar com duplo carro considera os quatro ímãs permanentes idênticos montados dois a dois com magnetização em antiparalelo quando montados na mesma culatra de aço de dimensões: espessura de 8 mm, largura de 35,36 mm e comprimento de 106,07 mm (Apêndice E). Cada ímã permanente possui face polar quadrada de dimensão 25 x 25 mm e com espessura de 8 mm no sentido da magnetização (Apêndice F) e propriedades magnéticas definidas pela curva BH (Apêndice A, B e C). Cada conjunto de dois ímãs está montado em uma culatra de aço SAE1045 que possui propriedades magnéticas não lineares definidas pela sua curva de magnetização (Apêndice A, B, C, D). As regiões de ar entre os carros superior e inferior designadas de entreferro no eixo z possuem simulações com comprimentos de 12 mm e 24 mm identificados pela distância da face polar dos ímãs permanentes de mesma orientação entre dos correspondentes carros superior e inferior.

5.4.1 SIMULAÇÕES DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO

Com o objetivo de analisar a densidade de fluxo magnético por diversas regiões do atuador planar, foi feita primeiramente uma análise considerando-se os enrolamentos das fases do atuador sem condução de corrente. A figura 33 mostra em detalhes a região geométrica onde foi feita essa análise para demonstração do mapeamento 3D do módulo da dessa grandeza nos carros do atuador planar e os valores pontuais da sua componente z sobre a linha de amostragem na posição central do atuador conforme proposta de entreferro.

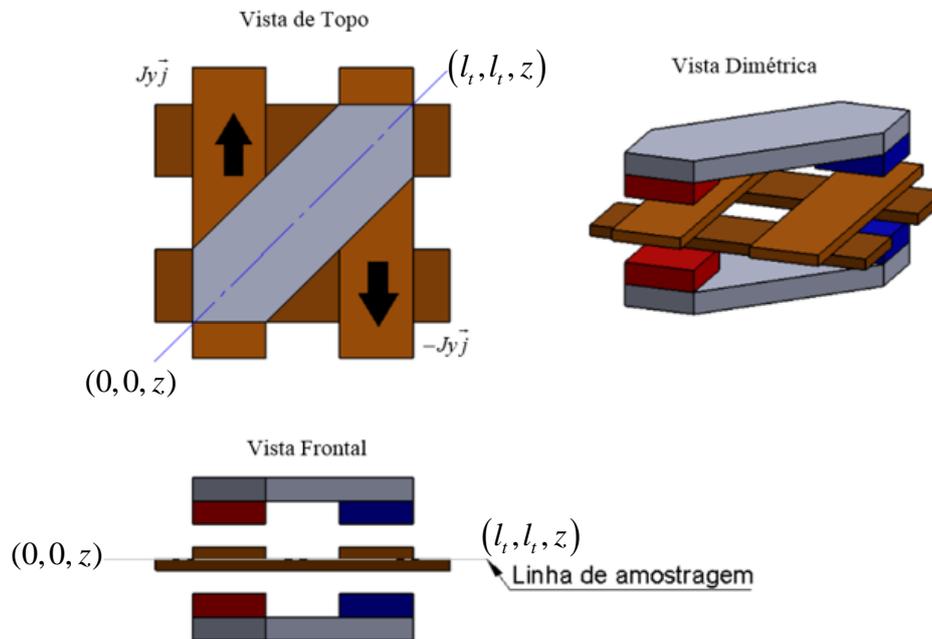


Figura 33: Detalhes gerais da geométrica para análise numérica.

A densidade de fluxo magnético na região central do entreferro, isto é, no meio das fases dos enrolamentos x e y , a 6 mm de uma das faces polares dos ímãs permanentes na direção z é investigada e mostrada na figura 34, onde podemos visualizar a sua distribuição em toda a extensão transversal compreendida pela diagonal no centro de ambos os carros. Estas análises são de grande importância para compararmos os valores de vetor densidade de

fluxo magnético com variações da posição dos carros, isto é, com várias análises de entreferro.

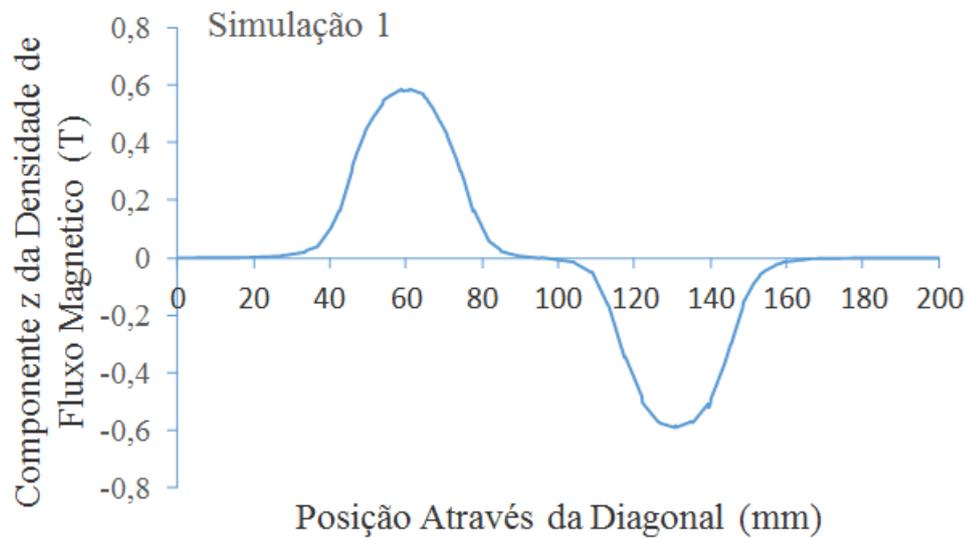


Figura 34: Gráfico da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro de 12 mm para regiões sem condução de corrente.

A distribuição da densidade de fluxo magnético em 3D do atuador planar pode ser verificada na figura 35, onde, pela simulação 1, temos um entreferro de 12 mm e ausência de corrente nos enrolamentos. Através dessa análise, podemos verificar diferentes níveis de densidade de fluxo magnético na culatra de material ferromagnético e assim promover seu dimensionamento geométrico a partir do nível de saturação aceitável para os carros do atuador planar. Essa é uma das principais ferramentas que a análise numérica permite para validação das condições de projeto.

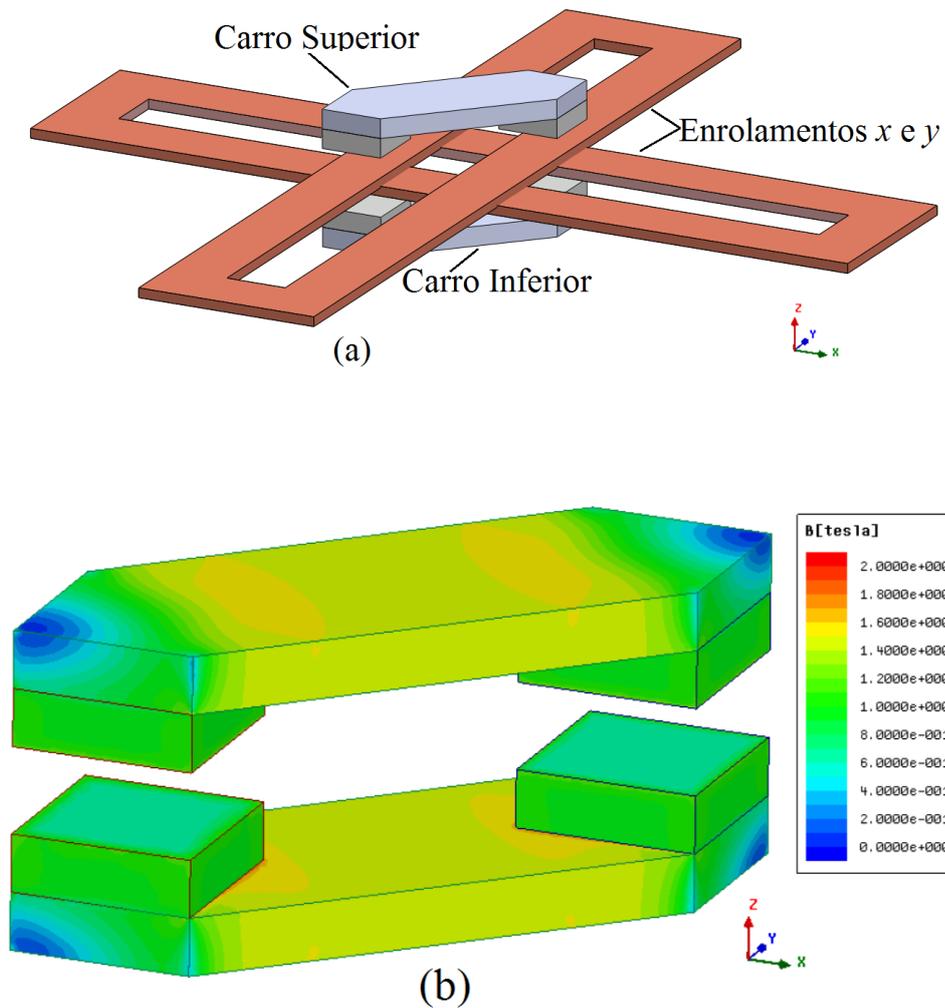


Figura 35: Distribuição da densidade de fluxo magnético para Simulação 1, quando não existe regiões condutoras de corrente elétrica e o entreferro é de 12 mm: (a) vista esquemática do atuador em análise; (b) detalhe do mapeamento 3D dos carros do atuador planar com módulo da densidade de fluxo.

O gráfico da figura 36 está relacionado com as variações de entreferro do modelo numérico para as simulações 1, 4 e 7, conforme tabela 3. Quando os enrolamentos estão desprovidos de corrente, o valor pontual da densidade de fluxo magnético é mostrado pela linha diagonal distante da face dos ímãs permanentes de 6 mm e 12 mm, onde podemos verificar a intensidade e a importância da componente z da densidade de fluxo magnético para as variações de entreferro no modelo.

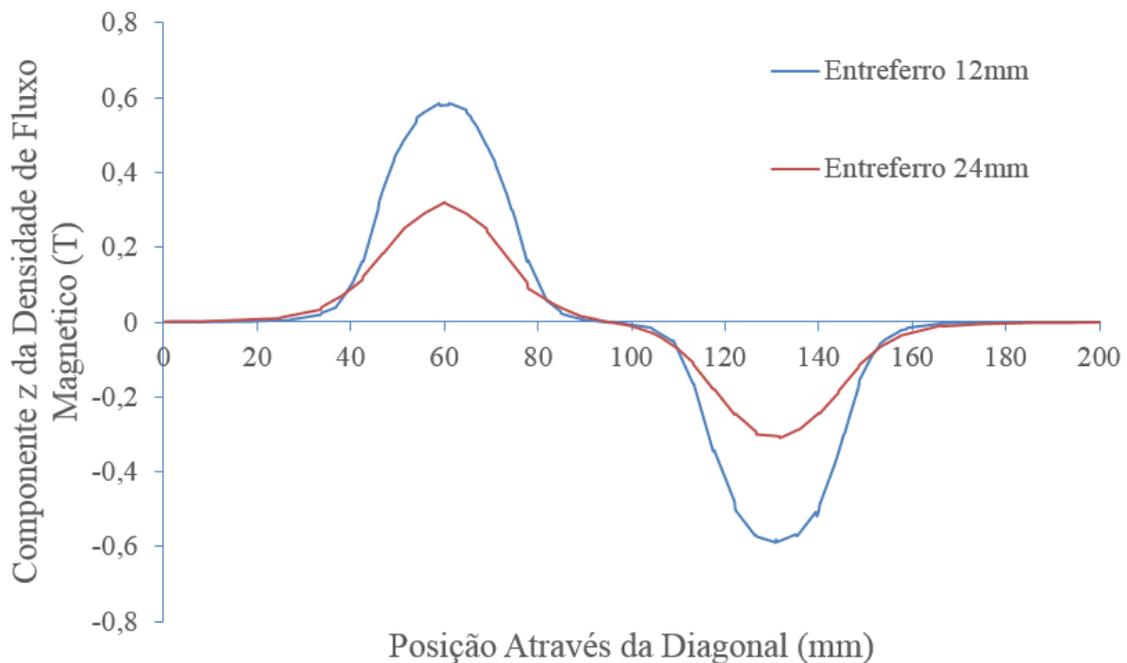


Figura 36: Distribuição da densidade de fluxo magnético para Simulação 1 e 4 quando não existe regiões condutoras de corrente elétrica para entreferos de 12 mm e 24 mm.

Nas simulações de densidade de fluxo magnético realizadas no atuador planar, sempre foi considerado dois entreferos de análise, um de 12mm e outro de 24mm, isto proporciona uma melhor investigação do comportamento da distribuição da densidade de fluxo magnético através da geometria do atuador planar, devido a variação do comprimento do entreferro.

O gráfico 37 representa o comportamento da componente z da densidade de fluxo magnético na posição central dos ímãs, para o carro superior, em função da linha de amostragem diagonal. Os pontos foram tomados no plano $z = 10$ mm acima do centro do entreferro da simulação 1, com entreferro de 12mm e sem corrente de excitação nos enrolamentos.

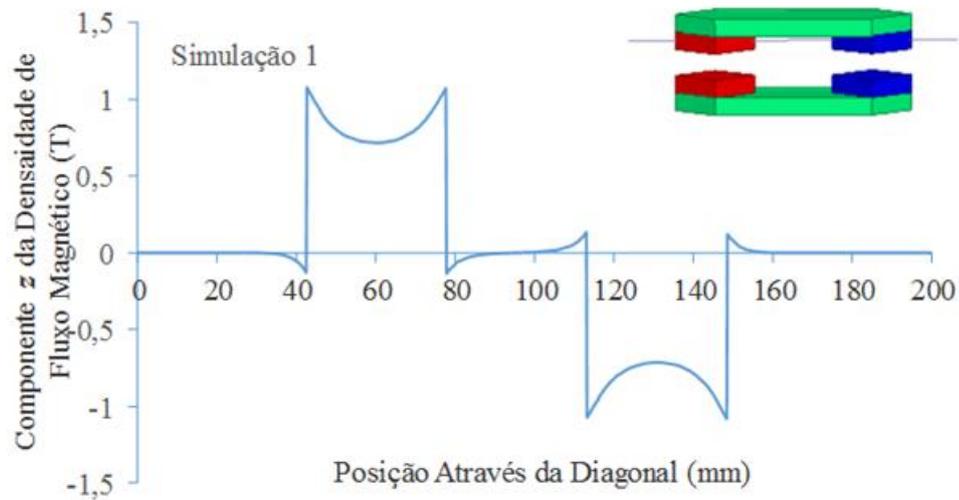


Figura 37: Gráfico da densidade de fluxo magnético para Simulação 1 na diagonal dos ímãs permanentes, na posição central dos ímãs no plano $z = 10\text{mm}$ do centro do entreferro.

O gráfico tridimensional apresentado na figura 38 apresenta o formato característico do componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob a diagonal dos dois ímãs permanentes na posição central do entreferro da simulação 1 quando os enrolamentos estão sem corrente elétrica e o entreferro é de 12 mm.

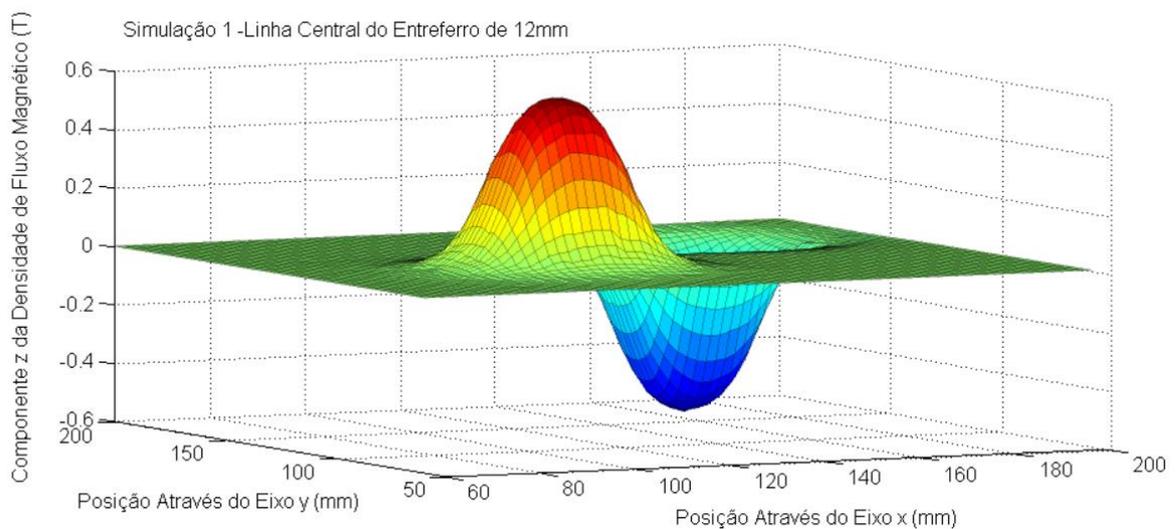


Figura 38: Gráfico 3D da densidade de fluxo magnético para Simulação 1 na diagonal dos ímãs permanentes, na posição central do entreferro de 12 mm.

As simulações 3, 6 e 9, conforme tabela 3, foram realizadas com corrente no enrolamento x localizado sob os ímãs permanentes. Foram excitados com $I = 6\text{ A}$. Quando os

enrolamentos são excitados com corrente elétrica contínua, há o aparecimento do efeito de reação da armadura sobre a distribuição do fluxo magnético. A figura 39 apresenta a forma não simétrica do comportamento da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro para as diversas simulações, no ponto central dos respectivos entreferros. A escolha do valor de $I = 6 \text{ A}$ representa uma densidade de corrente extrema para o funcionamento do atuador, como será verificado em ensaios experimentais com os enrolamentos do atuador.

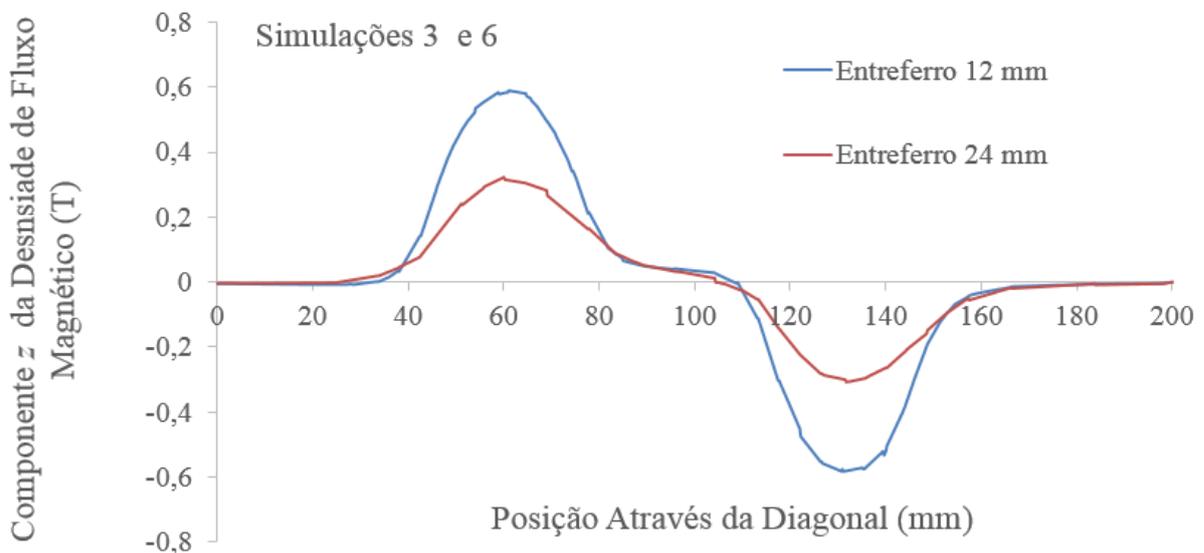


Figura 39: Distribuição da densidade de fluxo magnético para Simulação 3 e 6 com regiões condutoras de corrente elétrica, $I = 6 \text{ A}$, na posição central dos entreferros de 12 mm e 24 mm.

A análise e interpretação dos resultados das figuras 39 e 40 são indicativos importantes da influência do entreferro com relação à densidade de fluxo magnético no atuador planar. Consequentemente, podemos prever que combinações de valores de entreferro e densidade de corrente na armadura resultaram em diferentes valores de força de propulsão.

O mapeamento 3D do módulo da densidade de fluxo magnético para a simulação 3, quando o enrolamento x localizado sob os ímãs permanentes foram excitados com $I = 6 \text{ A}$, tem o objetivo de avaliar a distribuição do fluxo magnético na condição mais extrema de

operação, isto é, máxima corrente de dimensionamento e menor entreferro possível de execução na prática. A figura 40 apresenta a geometria analisada e a vista tridimensional do mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético dos carros do atuador planar, sendo destacadas as culatras de aço SAE1045 e os ímãs permanentes dos respectivos carros.

O modelo virtual utilizado para analisar numericamente no atuador planar, figura 40, possui suas culatras com cantos vivos sem presença de chanfros em suas extremidades. Podemos verificar que o valor do módulo do vetor densidade de fluxo magnético da culatra de aço SAE1045 em suas extremidades apresenta valores de densidade de fluxo magnético entre zero e 0,060 T, que são considerados extremamente baixos. Assim, podemos considerar em projetos futuros a eliminação dos cantos vivos por um *design* com chanfros para maximizar a distribuição do fluxo magnético pela culatra do atuador e reduzir peso sobre os carros.

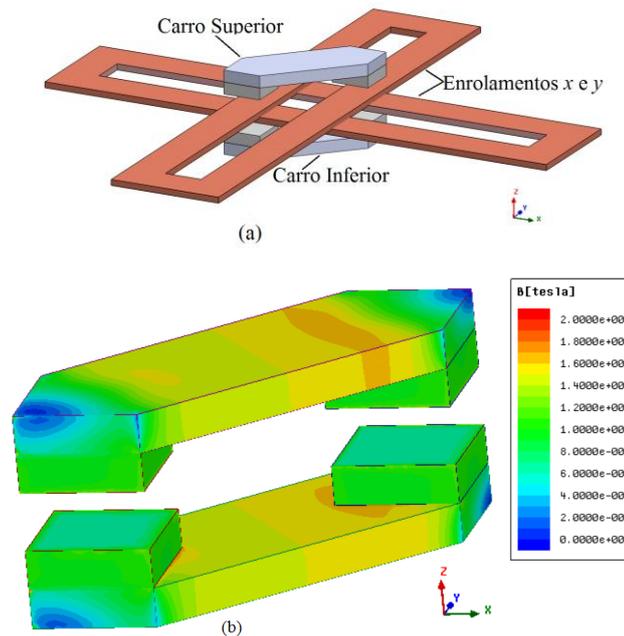


Figura 40: Distribuição da densidade de fluxo magnético para Simulação 3, quando existe regiões condutoras de corrente elétrica $I = 6$ A e o entreferro é de 12 mm: (a) vista esquemática do atuador em análise; (b) detalhe do mapeamento 3D dos carros do atuador planar com módulo da densidade de fluxo magnético.

5.4.2 SIMULAÇÕES DA FORÇA DE PROPULSÃO E DA FORÇA NORMAL

As simulações numéricas de força planar de propulsão propostas no estudo do atuador planar foram direcionadas com o objetivo de quantificar, qualificar e validar os resultados obtidos com os resultados experimentais e numéricos. A análise numérica das forças propõe variações de entreferro e correntes de excitação para a geometria proposta quando os carros estão estáticos e os ímãs permanentes estão alinhados com as bobinas excitadas por corrente.

As simulações numéricas foram feitas num regime de operação em termos de corrente elétrica que varia de 0 a 6 A. Também foram feitas variações de entreferro com valores de 12 mm e 24 mm. A força planar de propulsão está relacionada com a interação do fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes com a corrente elétrica concentrada nos enrolamentos do atuador planar.

A simulação numérica feita pelo *software* Maxwell também prevê a investigação dos valores da força normal que atuam sobre os carros quando os mesmos estiverem simetricamente alinhados. A força planar de propulsão e força normal são simuladas pelo *software* através do Tensor de Maxwell.

Os gráficos das figuras 41 e 42 representam respectivamente as forças planar de propulsão e normal em função da corrente no enrolamento x da bobina disposta na condição em que os ímãs permanentes dos carros estão perfeitamente alinhados com as fases ativas do enrolamento descrito.

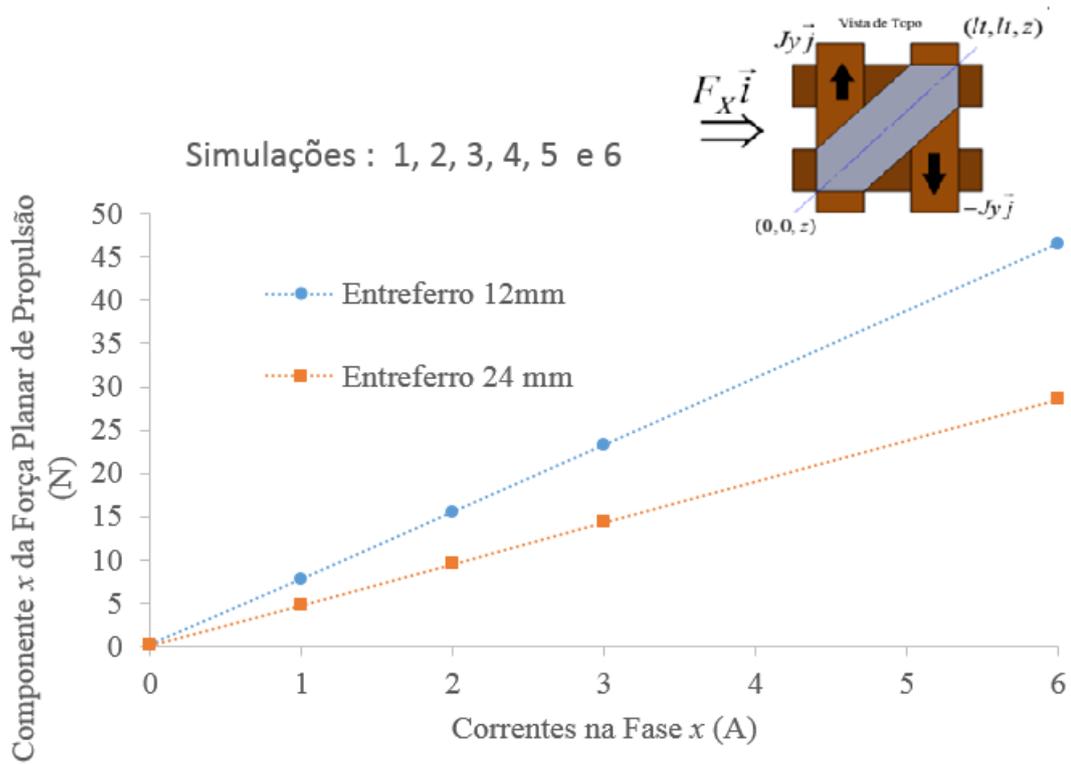


Figura 41: Gráfico da força planar de propulsão em função das correntes na fase do enrolamento x localizado sob os ímãs permanentes, para as simulações 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

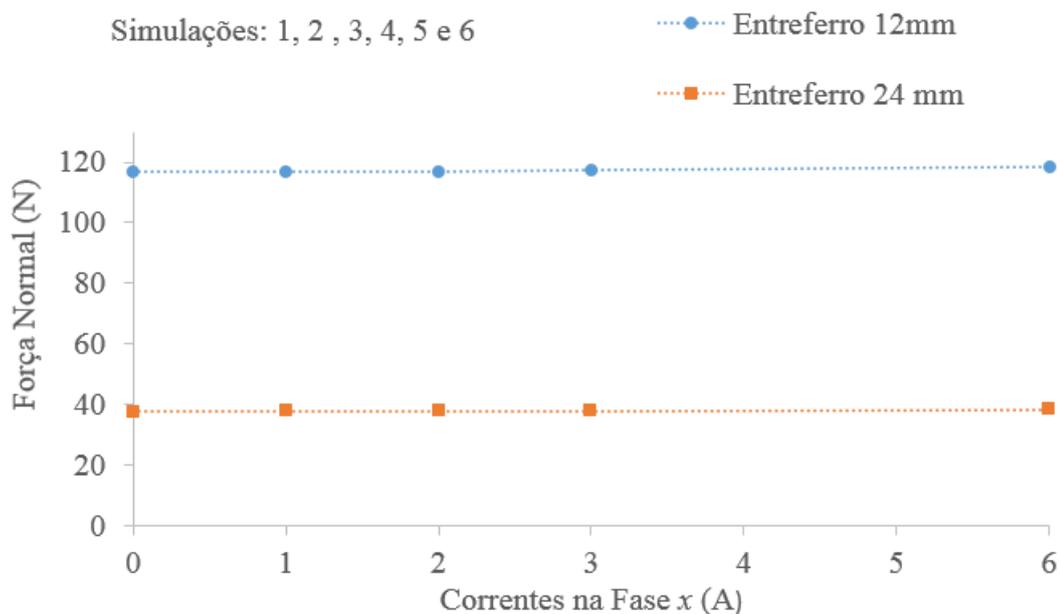


Figura 42: Gráfico da força normal em função das correntes na fase do enrolamento x localizado sob os ímãs permanentes, para as simulações 1, 2, 3, 4, 5, e 6.

A variação de corrente elétrica na fase do enrolamento causa pouca alteração na força normal do atuador conforme demonstrado na figura 42. A interação do campo magnético produzido pela corrente da bobina com o campo magnético produzido pelos conjuntos de ímãs permanentes provoca uma maior atração entre os carros. Sendo assim, justifica a pequena mudança da força normal devido ao incremento de corrente elétrica na bobina. Por outro lado, a influência do entreferro sobre a força normal tem papel de extrema importância, conforme podemos verificar nos gráficos com variações de entreferro na figura 42. Verifica-se o aumento da força normal à medida que o entreferro diminui; fato este justificado pela menor dispersão do fluxo magnético dos carros quando em posição de menor entreferro.

Com relação à força planar de propulsão, verifica-se que as simulações com entreferros de 12 mm e 24 mm produzem forças lineares; porém, com amplitudes diferenciadas conforme observado nos gráficos da figura 41. Deste modo, a sensibilidade da força planar de propulsão para os carros em regime estático para os diferentes entreferros é de 7,764 N/A para o entreferro de 12mm e 4,791 N/A para o entreferro de 24 mm.

O gráfico da figura 43 apresenta os valores das simulações numéricas da força total que atua diagonalmente sobre os carros do atuador planar, como resultado da excitação por corrente das fases dos enrolamentos x e y , localizados sob os ímãs permanentes que estão perfeitamente alinhados com as fases ativas dos enrolamentos descritos. A força planar de propulsão resultante que as simulações com entreferros de 12 mm e 24 mm são lineares e sua amplitude é inversamente proporcional ao entreferro, a sensibilidade da força planar de propulsão para os carros em regime estático para os diferentes entreferros é de 11,009 N/A para o entreferro de 12mm e 6,722 N/A para o entreferro de 24 mm.

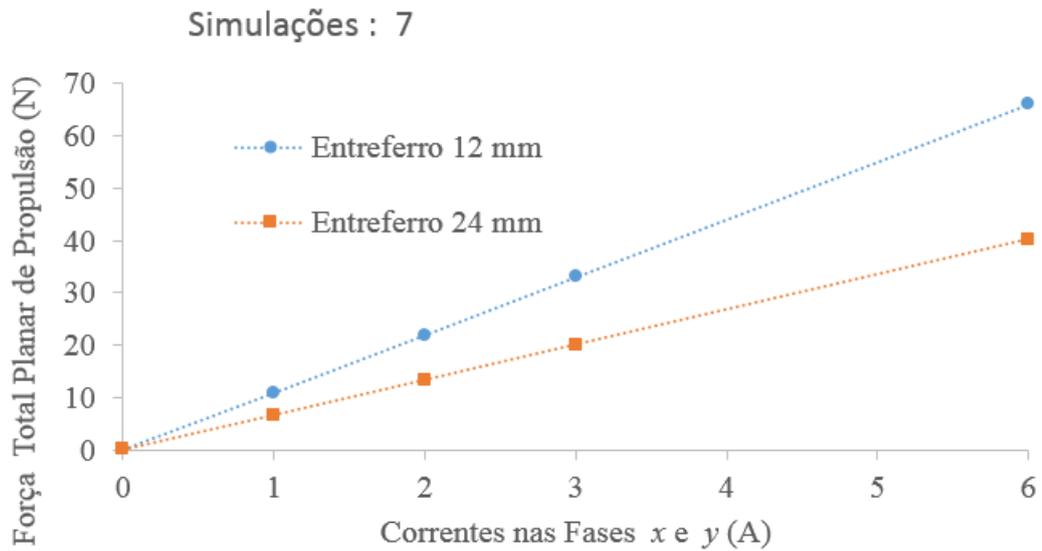


Figura 43: Gráfico da força planar de propulsão resultante da excitação por correntes das fases do enrolamento x e y localizado sob os ímãs permanentes, para as simulações 7.

A ferramenta de análise numérica proposta nesse trabalho tem a finalidade de auxiliar a determinação de características importantes do projeto, tais como: dimensionais da geometria das matérias, variação das características dos componentes e análise de resultados esperados pelo experimento. Desta forma, podemos aperfeiçoar o projeto do atuador planar com o estudo das diferentes análises numéricas executadas e compará-las com resultados do modelo analítico. Assim, podemos propor experimentos práticos para validação do atuador planar.

6 ENSAIOS DO ATUADOR PLANAR

Os ensaios experimentais realizados em regime estático no protótipo do atuador planar tiveram o objetivo de explorar as possibilidades de operação do atuador com diferentes configurações de entreferro e correntes de excitação, tornado possível a verificação de seu desempenho funcional, a validação das simulações numérica e do modelo analítico. Testes da análise da distribuição de densidade fluxo magnético no entreferro e da força planar de propulsão estão dispostos em gráficos comparativos com resultados obtidos com as simulações numéricas e com o modelo analítico, para a força normal os resultados estão dispostos com as simulações numéricas.

Os ensaios realizados no protótipo deram-se para dois casos de variação de entreferro conforme já mencionados: entreferro de 12 mm e 24 mm. Nessas situações, os testes buscaram determinar a força estática de propulsão quando os carros estão perfeitamente alinhados com as bobinas excitadas por corrente elétrica, bem como a força normal e a densidade de fluxo magnético nos entreferros.

6.1 MEDIÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO

A medição da densidade de fluxo magnético da componente z foi realizada com coleta de valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, \vec{B}_{g_z} , sobre o plano localizado na região central do entreferro, quando não há circulação de corrente elétricas nas bobinas do atuador planar. Para coleta de dados foi empregado um gaussímetro com ponteira de efeito Hall. Esta última foi posicionada sistematicamente, para aquisição de dados, sobre um gabarito com matriz de 625 pontos com distância entre pontos de 4,17mm distribuídos simetricamente no plano xy , conforme podemos observar nas figuras 44 e 45.

A figura 44 mostra a montagem para a medição da componente z do vetor densidade de fluxo magnético em pontos pré-definidos do entreferro do atuador planar. Verifica-se na figura 44 que os ensaios foram feitos sem a presença dos enrolamentos x e y , assim todos os pontos foram medidos na região central dos entreferros de 12 mm e 24 mm. O desenho esquemático dos instrumentos empregados para a aquisição da componente z do vetor densidade de fluxo magnético estão representados na figura 45.

Com estes ensaios podemos avaliar a importância e o significado da variação de entreferro na distribuição da densidade de fluxo magnético ao longo da geometria do atuador planar.

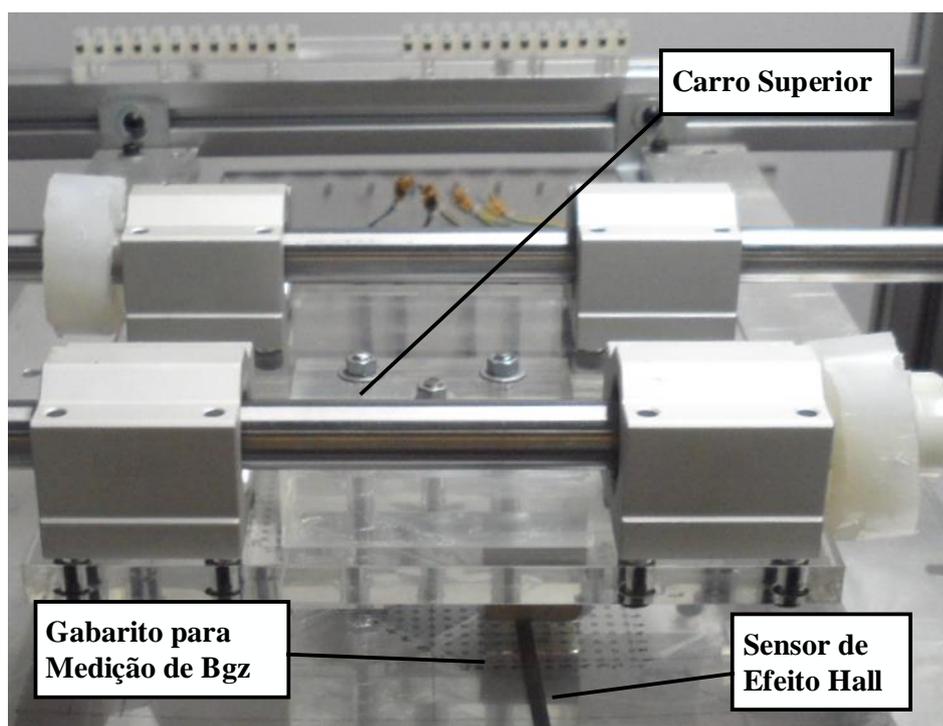


Figura 44: Fotografia parcial do atuador planar com detalhes do posicionamento do gabarito e da ponteira de efeito Hall para medição da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no centro do entreferro.

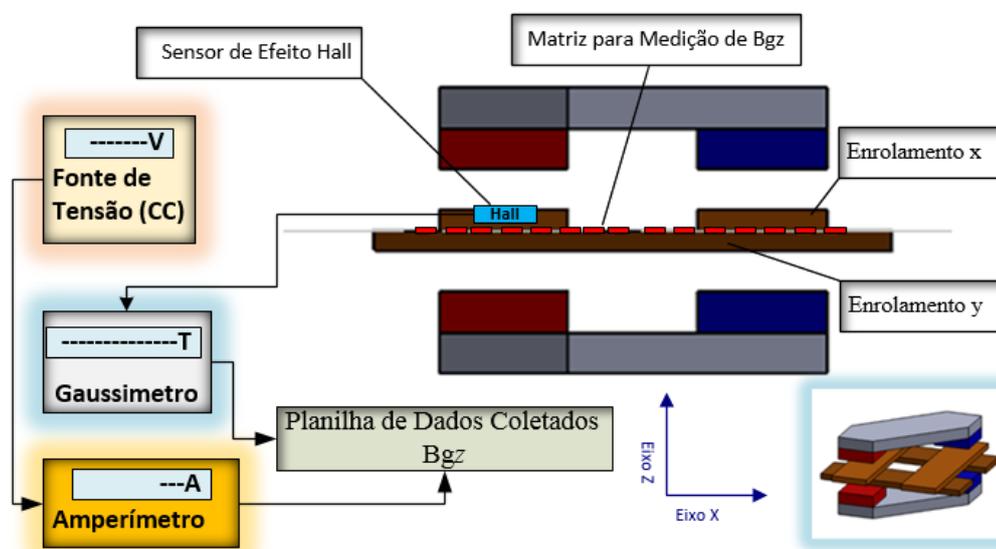


Figura 45: Desenho esquemático do atuador planar com detalhes do posicionamento do gabarito e da ponteira de efeito Hall para medição da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no centro do entreferro.

6.1.1 MEDIÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO NO ENTREFERRO

A medida da densidade de fluxo magnético foi realizada com particularidade de não circulação de corrente elétrica nas bobinas planares, sendo que os valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, \vec{B}_{g_z} , foram medidos com o auxílio do gabarito de medição, localizado no centro do entreferro da face polar dos ímãs permanentes entre o que seria a posição de uma camada de enrolamento x e outra de enrolamento y. O sensor de efeito Hall, utilizado para a medida, foi posicionado sobre a marcação existente no gabarito, e, com o auxílio do gaussímetro, foi executada a medição e coleta individual dos valores de densidade de fluxo magnético.

A densidade de fluxo magnético coletada com os entreferros de 12 mm e 24 mm torna evidente a importância da escolha do entreferro na proposta de projeto do atuador planar, devido à grande variação no entreferro e à baixa permeabilidade magnética do ar que circunda

os carros de tração. Verifica-se uma significativa alteração na distribuição da densidade de fluxo magnético nos respectivos entreferros analisados.

Nas figuras 46 e 47 os gráficos com valores pontuais representam o módulo do vetor densidade de fluxo magnético na diagonal do entreferro para a simulação numérica, analítica e para o ensaio experimental, medida no plano z de uma das faces polares, no centro do entreferro de 12 mm para a figura 46. Para a figura 47, a medida foi realizada no plano z de uma das faces polares, no centro do entreferro de 24 mm. Nesta simulação, verifica-se a simetria de ambas as faces polares do atuador devido à sua geometria particular.

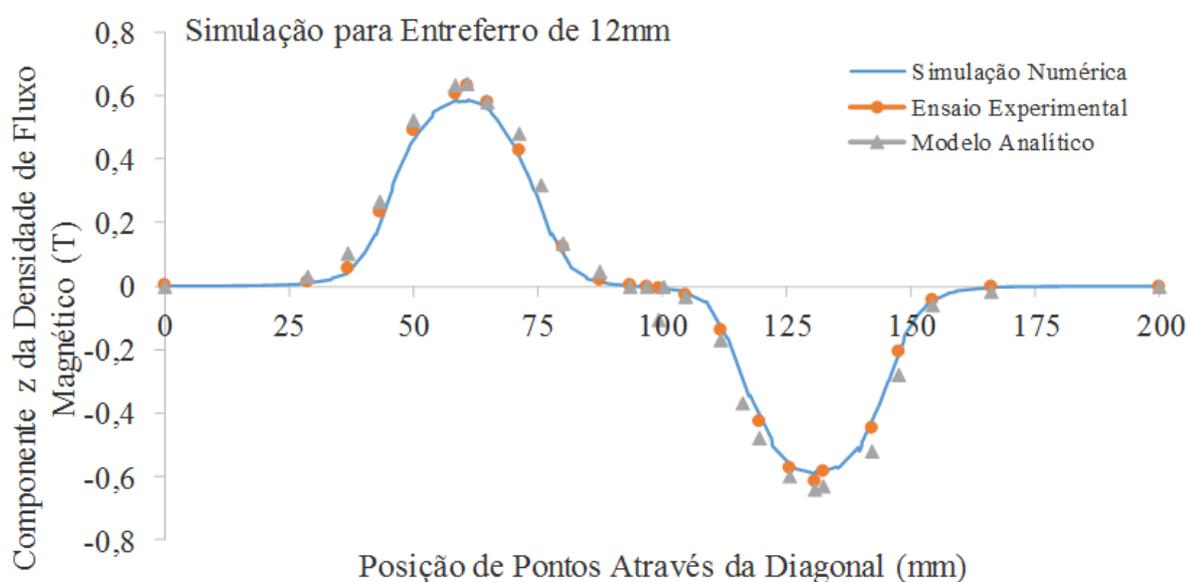


Figura 46: Gráfico com valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético medido no centro do entreferro de 12 mm, através da diagonal dos carros superior e inferior, com corrente nula para simulação numérica, analítica e ensaio experimental.

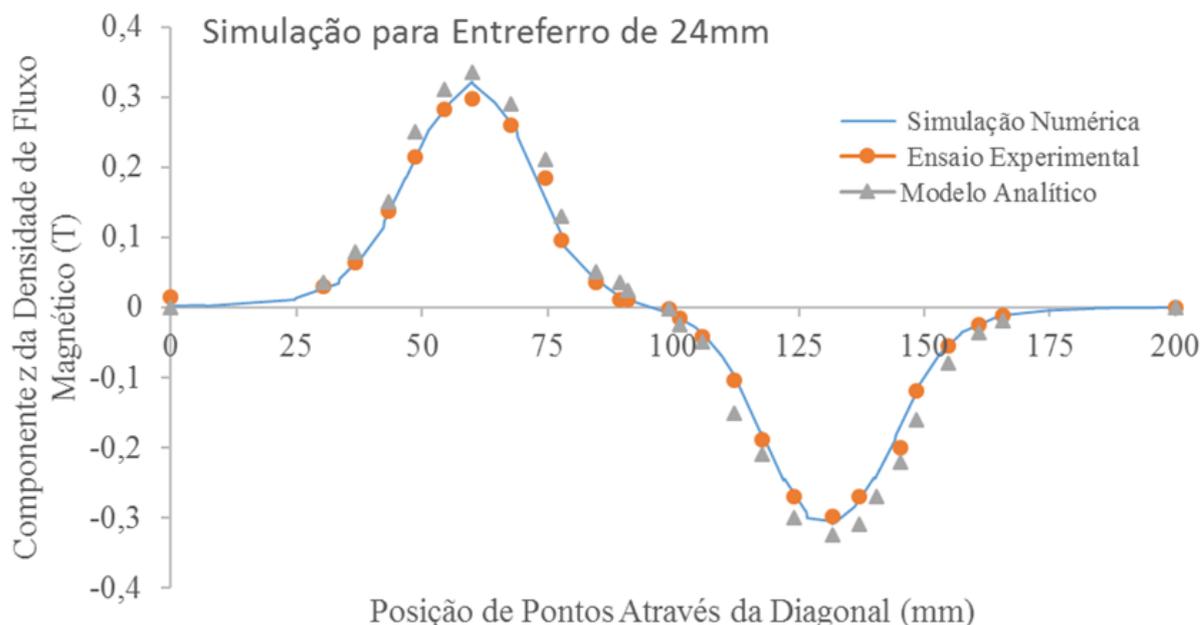


Figura 47: Gráfico com valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético medida no centro do entreferro de 24 mm, através da diagonal dos carros superior e inferior, com corrente nula para simulação numérica analítica e ensaio experimental.

Podemos avaliar com os gráficos 2D exibidos pelas figuras 46 e 47 que o entreferro possui fator determinante no valor do componente z densidade de fluxo magnético sob a diagonal do atuador planar. Além disso, podemos verificar que os valores da simulação numérica, analítica e do ensaio experimental apresentam resultados muito próximos entre si, tornando essa análise um parâmetro para validação de resultados no atuador.

Os valores do componente z da densidade de fluxo magnético feito pelas simulações numérica, analítica e pelos ensaios experimentais apresentam valores convergentes e bastante próximos nos dois casos analisados, sendo que a diferença percentual máxima entre os valores medidos quando comparado com os valores numéricos e analíticos, analisados na região central das faces polares, apresentaram os respectivos valores percentuais de 8,59% e -1,25% para a análise com entreferro de 12 mm. Para o entreferro de 24 mm a diferença

percentual máxima entre os valores medidos quando comparado com os valores numéricos e analíticos, analisados na região central das faces polares, apresentaram os respectivos valores percentuais de -7,16% e -11,04%.

A tabela 4 apresenta os valores da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro obtidos através dos ensaios experimentais, pela análise numérica e pelo método analítico. São apresentados para os casos de entreferro de 12 mm e 24 mm, os valores obtidos na linha central das faces polares dos ímãs permanentes. Também são apresentados o comparativo da diferença percentual da componente z da densidade de fluxo magnético para cada caso com referência aos valores medidos no ensaio experimental.

Tabela 4: Valores da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro para valores obtidos por medidas experimentais, pela análise numérica e pelo método analítico.

Componente z do Vetor Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro						
Valor Medido na Linha Central dos Ímãs Permanentes (T)				Diferença %		
Dados	Medido	Numérico	Analítico	Medido	Numérico	Analítico
Entreferro 12 mm Figura 46	0,632	0,582	0,64	0	8,59	-1,25
Entreferro 24 mm Figura 47	0,298	0,321	0,335	0	-7,16	-11,04

Nota: 1) Valores coletados do semiciclo positivo dos gráficos das figuras 46 e 47; 2) Diferença %: $(B_{Med} / B_{Med} - 1) \times 100$, $((B_{Med} / B_{Num} - 1) \times 100$, $(B_{Med} / B_{Anl} - 1) \times 100$; 3) Medidas experimentais são valores médios.

Foi realizada a medição da densidade de fluxo magnético no entreferro com o auxílio da matriz de coleta de dados que gerou 416 pontos de medição sobre o plano xy , localizado no centro do entreferro para os ensaios experimentais de entreferro de 12 mm e 24 mm. A interpolação da matriz de pontos gerou um gráfico tridimensional (3D), conforme mostram as figuras 48 e 49. Os ensaios foram realizados sem a presença de corrente no enrolamento e os

pontos medidos são representados pela componente z da densidade de fluxo magnético produzida pelos ímãs permanentes dos carros inferior e superior. Os gráficos das figuras 48 e 49 permitem visualizar a distribuição do fluxo magnético no entreferro de forma simétrica e uniforme.

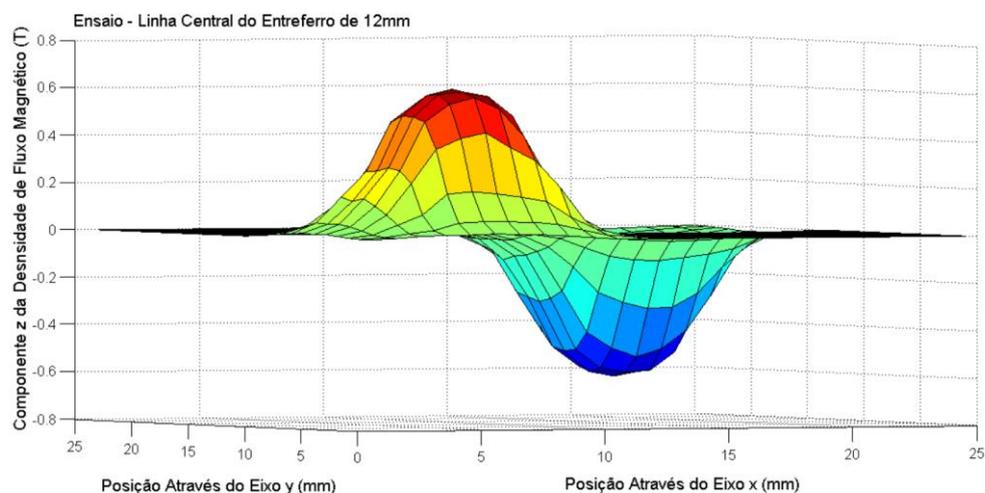


Figura 48: Gráfico tridimensional com valores pontuais interpolados da componente z do vetor densidade de fluxo magnético medido no centro do entreferro de 12 mm, através da diagonal dos carros superior e inferior, com corrente nula para ensaio experimental.

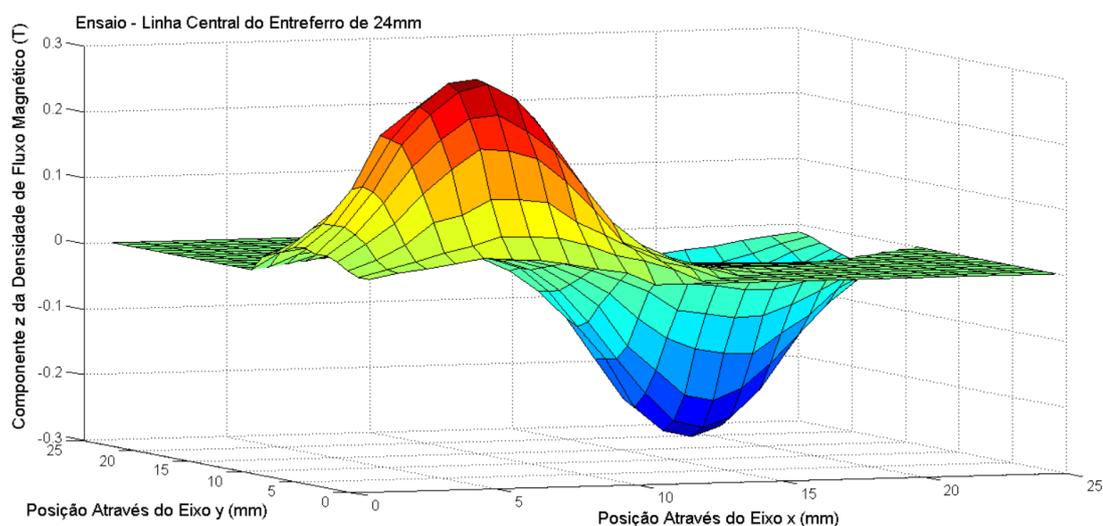


Figura 49: Gráfico tridimensional com valores pontuais interpolados da componente z do vetor densidade de fluxo magnético medido no centro do entreferro de 24 mm, através da diagonal dos carros superior e inferior, com corrente nula para ensaio experimental.

6.2 MEDIÇÃO DAS FORÇAS NO ATUADOR PLANAR

A determinação da força planar de propulsão, força normal e força de desacoplamento que atuam sobre o atuador planar é o objetivo destes ensaios. A análise das forças é feita em regime estático e os ímãs permanentes encontram-se em posição de alinhamento perante as bobinas dos enrolamentos de corrente. Foram realizados ensaios para determinação de força de propulsão no enrolamento x e no enrolamento y de forma individual. A força resultante será determinada pelos vetores de forças x e y . As medições das forças planar de propulsão, força normal e força de desacoplamento foram realizadas com e sem corrente aplicada às bobinas. Foram utilizadas células de carga acopladas a um condicionador de sinal para aquisição de resultados medidos.

6.2.1 MEDIÇÃO DA FORÇA PLANAR DE PROPULSÃO

Para realização do ensaio de medição da força planar de propulsão foram realizados dois mecanismos para coleta de forças. Primeiro foi energizada a bobina do enrolamento x para determinação da força no eixo x . Posteriormente, foi energizada uma bobina do enrolamento y para determinação da força no eixo y . Os testes foram realizados com os carros de propulsão em modo estático e alinhados com as bobinas a serem energizadas. Foram obtidos resultados individuais de forças para os eixos x e y e de maneira independente.

Conforme podemos visualizar na figura 50, a montagem da célula de carga foi disposta de modo a fazer a medição de força de propulsão F_x , quando os ímãs permanentes dos carros superior e inferior estiverem alinhados com o enrolamento da fase x . A célula de carga está acoplada em uma extremidade a flange de apoio que permite posicionar e alinhar os ímãs permanentes com a bobina do eixo x . A este ponto de fixação da célula de carga existe

um tirante regulador de posição. A outra extremidade da célula de carga está ligada ao carro superior de maneira fixa, permitindo a perfeita fixação da célula de carga no atuador.

Quando a bobina do atuador planar é excitada por corrente elétrica, o carro é deslocado no plano em função da interação da corrente elétrica e o fluxo magnético de excitação. Desta forma, a célula de carga irá perceber o deslocamento do carro e promover uma deformação linear de acordo com a força de deslocamento. O arranjo para medição de força feito na célula de carga poderá medir a força por tração ou compressão conforme for a orientação da corrente de excitação da bobina planar do atuador.

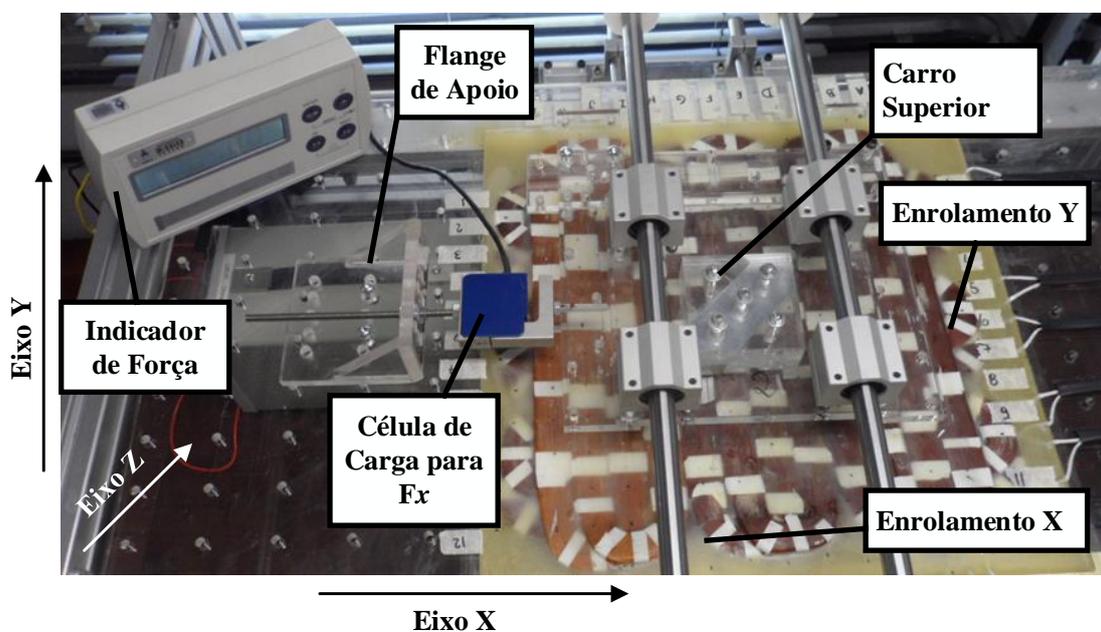


Figura 50: Esquema para determinação da força plana de propulsão F_x quando o enrolamento da fase x é energizado.

Para fornecimento e controle da corrente elétrica aos enrolamentos do atuador planar foi instalada uma fonte de tensão CC com capacidade de suprir até 10 A. A medida dos valores de tensão e corrente elétrica contínua aplicados ao experimento é feita pelos instrumentos previamente instalados, conforme podemos observar na figura 51 e 52.

Foi definido para o experimento uma faixa de operação de zero a 6 A, sendo que a densidade máxima de corrente por fase de cada enrolamento é de 29,41 ampère por mm², para os ensaios com densidade máxima de corrente foram tomadas precauções quando ao tempo de ensaio para não sobreaquecer os enrolamentos do atuador planar. O grau de regularidade de serviço que o atuador planar opera pode ser classificado como um regime intermitente periódico, onde sequencias de ciclos idênticos, cada qual incluindo um período de funcionamento e um período de repouso. Neste regime o tempo entre um acionamento e outro deve ser suficiente grande para que o calor gerado nos enrolamentos do atuador planar não afete o ciclo seguinte de operação. A intensidade da força de propulsão depende da intensidade de corrente elétrica aplicada no enrolamento, sendo assim aplicados valores pontuais e graduais de corrente para a aquisição dos respectivos valores de força. Também é importante salientar que ambos os carros estão acoplados magneticamente pelos seus conjuntos de ímãs permanentes e a força de propulsão resultante será promovida pela ação de ambos os carros do atuador.

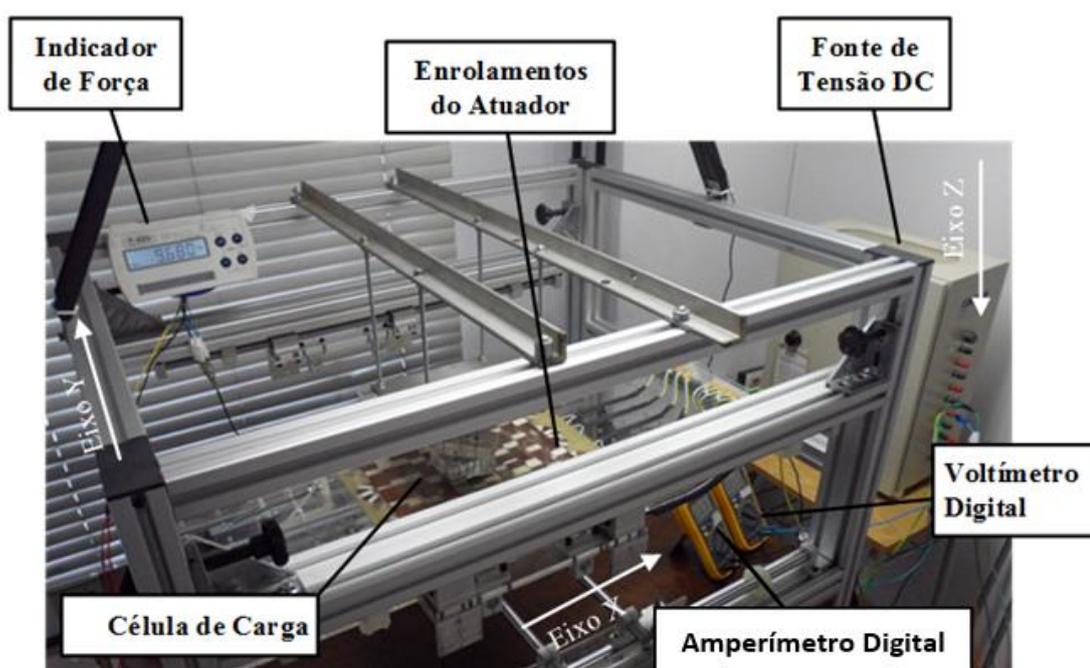


Figura 51: Fotográfica com disposição da instrumentação utilizada no experimento.

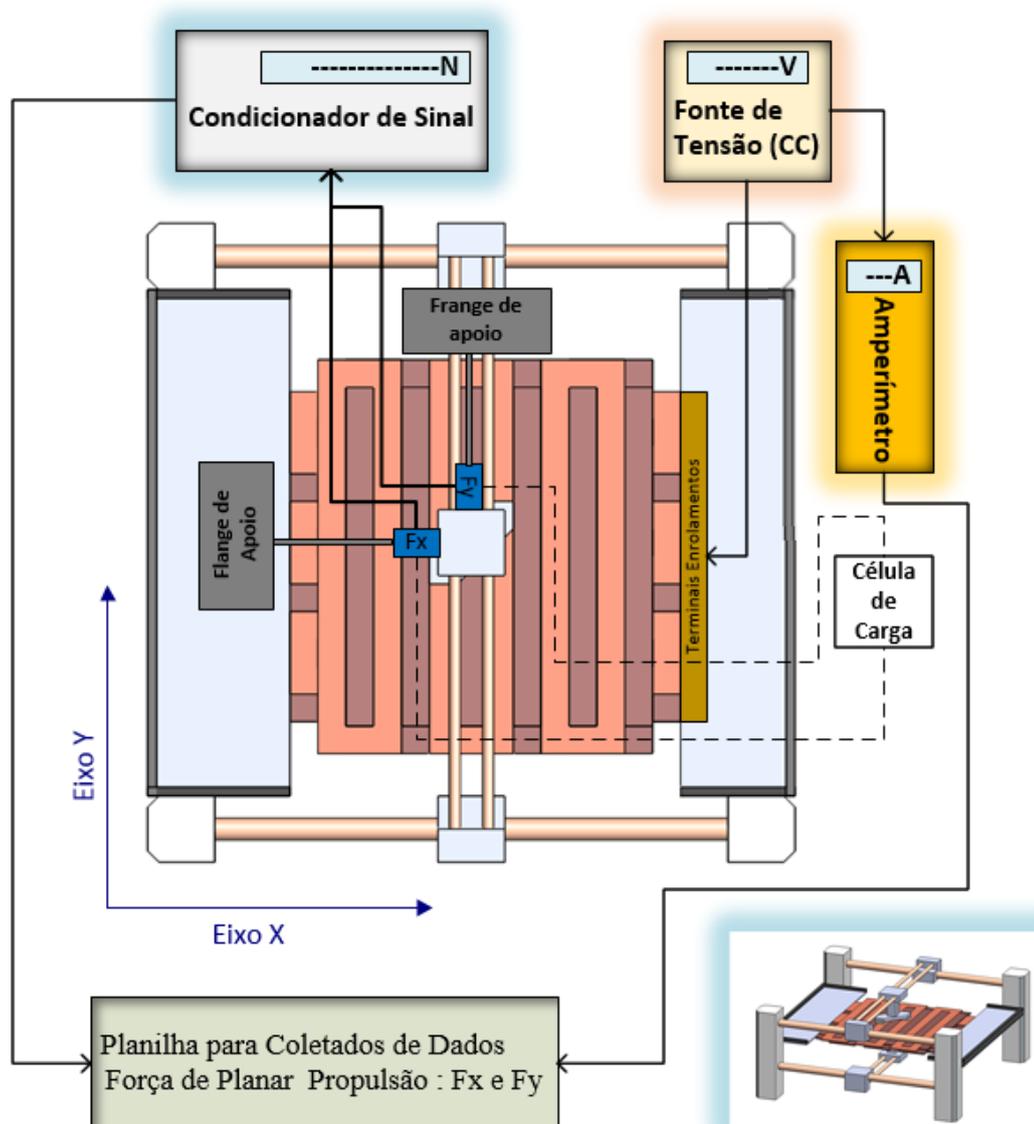


Figura 52: Desenho esquemático com disposição da instrumentação utilizada no experimento.

Na figura 53 está representada a disposição da célula de carga para medida da força de propulsão F_y , quando os ímãs permanentes dos carros superior e inferior estiverem alinhados com o enrolamento da fase y . Também neste caso a célula de carga é acoplada a flange de apoio fixa a estrutura do atuador, um tirante de ajuste permite regular a posição da célula de carga junto ao carro superior, deste modo pode-se realizar a medida da força planar.

Com a ajuda do condicionador de sinal, podemos fazer a leitura da força que deforma a célula devido à interação da corrente elétrica e ao fluxo magnético de excitação de ambos os conjuntos de ímãs permanentes.

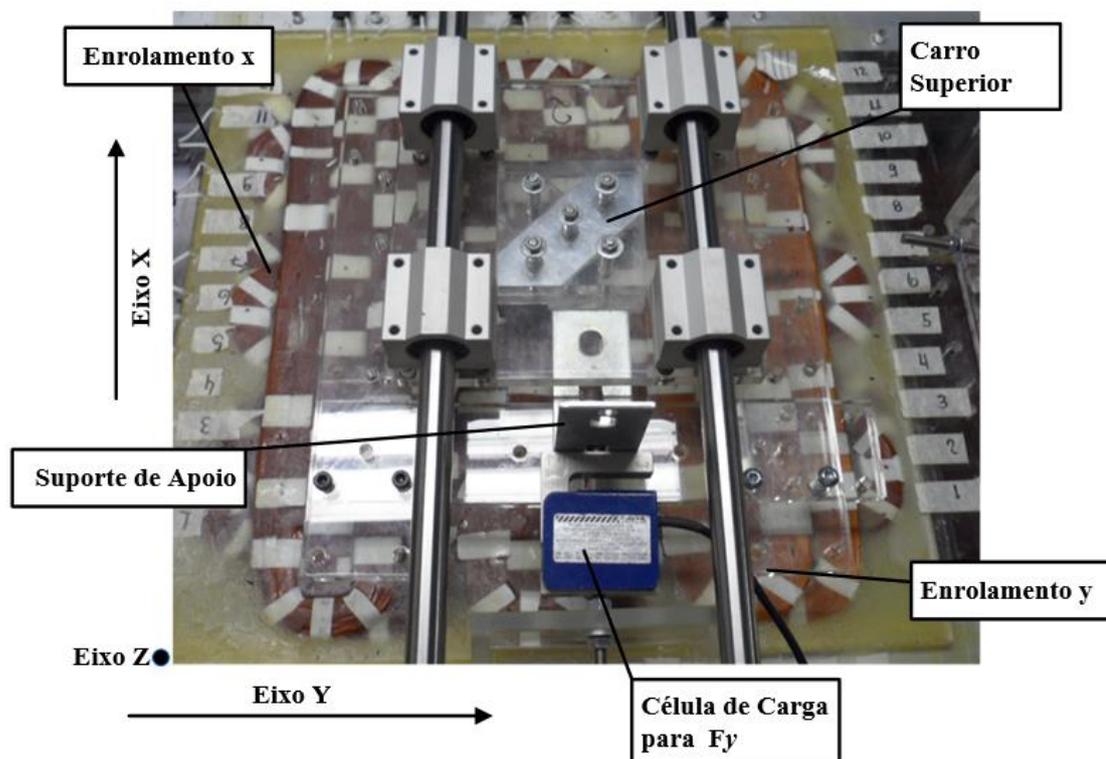


Figura 53: Esquema para determinação da força plana de propulsão F_y quando o enrolamento da fase y é energizado.

Os gráficos com simulação numérica, analítica e ensaio experimental com entreferros de 12 mm e 24 mm apresentados nas figuras 54 e 56, respectivamente, representam a força planar de propulsão, F_x , versus a corrente aplicada a uma das fases do enrolamento x , localizado entre os ímãs permanentes dos carros superior e inferior. A força de propulsão depende do valor da corrente elétrica aplicada à fase do enrolamento x . Se verificar que a cada valor de corrente elétrica e respectivo entreferro de simulação obtemos valores de intensidade de força planar de propulsão característicos.

Também foram realizados ensaios da força planar de propulsão para o enrolamento do eixo y com variação de entreferros de 12 mm e 24 mm. Os gráficos da força planar de propulsão de F_y versus a corrente da fase do enrolamento y estão representados nos gráficos das figuras 55 e 57, respectivamente.

Verificamos que a força planar de propulsão apresentadas nos gráficos das figuras 54, 55, 56 e 57, apresentam redução na força de planar de propulsão a medida que o entreferro é aumentado, conforme visto anteriormente são indicativos importantes a influência do entreferro com relação à densidade de fluxo magnético no atuador planar, assim podemos prever que combinações de valores de entreferro e densidade de corrente na armadura resultam em diferentes valores de força planar de propulsão sobre os carros do atuador planar.

Ensaio de força planar de propulsão com corrente de excitação na faixa de 6 amperes foram inviabilizados de serem feitos em todos os experimentos, devido ao sobreaquecimento das bobinas do atuador planar.

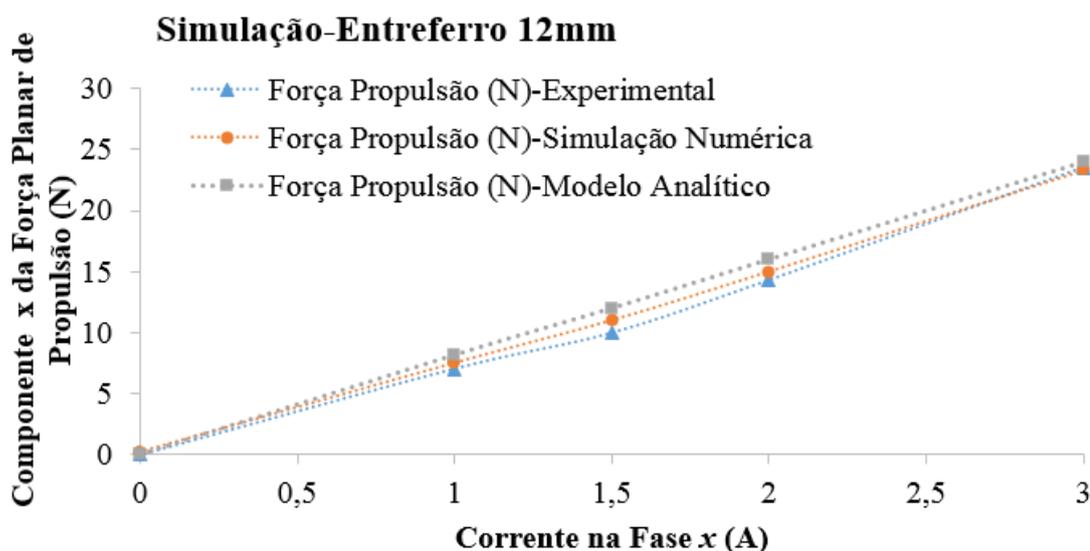


Figura 54: Gráfico da componente x da força planar de propulsão em função da corrente elétrica aplicada ao enrolamento x, para entreferro de 12 mm.

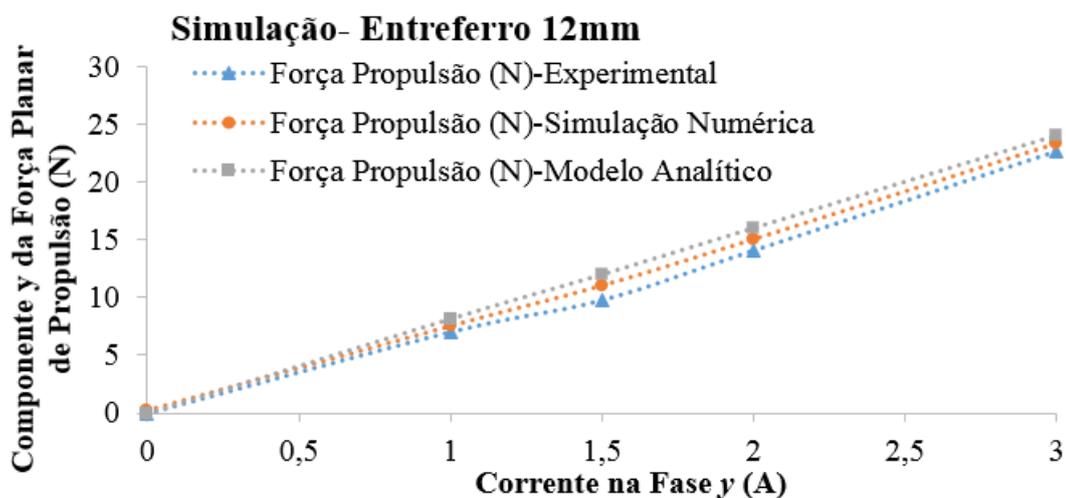


Figura 55: Gráfico da componente y da força planar de propulsão em função da corrente elétrica aplicada ao enrolamento y, para entreferro de 12 mm.

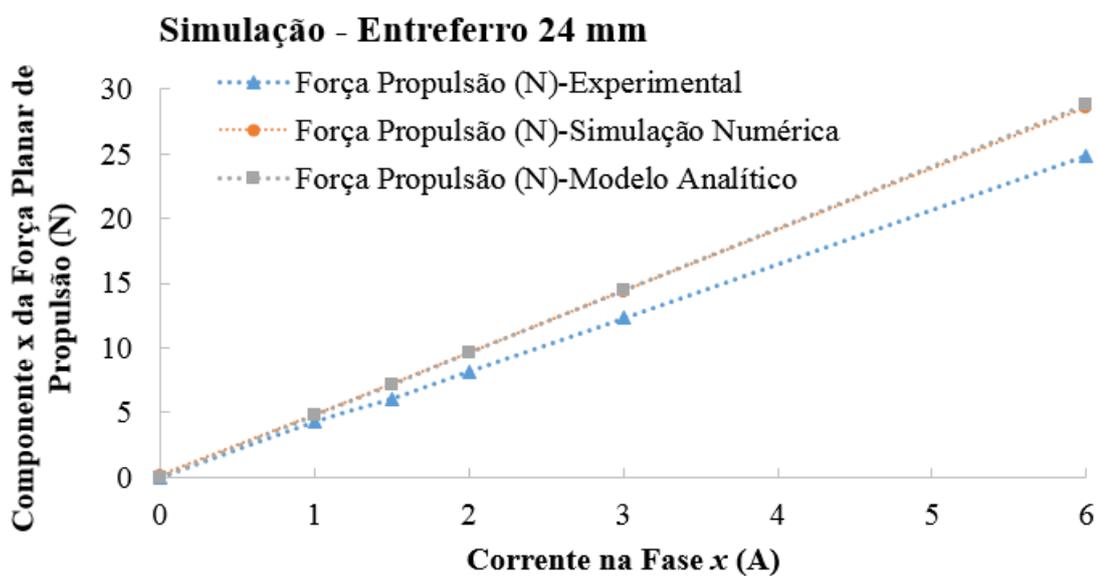


Figura 56: Gráfico da componente x da força planar de propulsão em função da corrente elétrica aplicada ao enrolamento x, para entreferro de 24 mm.

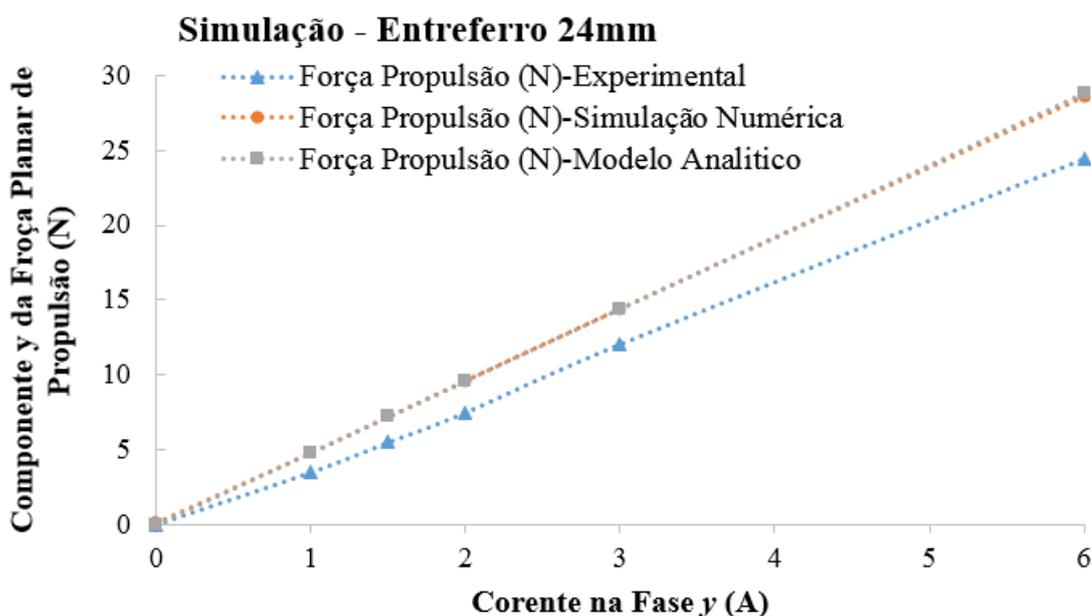


Figura 57: Gráfico da componente y da força planar de propulsão em função da corrente elétrica aplicada ao enrolamento y, para entreferro de 24 mm.

A sensibilidade (Newton/A) do atuador planar é representada pela força planar de propulsão nas medições do experimento, na simulação numérica e na simulação analítica quando individualmente uma bobina do enrolamento x for excitada por corrente (está apresentada na tabela 5). Os dados de sensibilidade obtidos com entreferro de 12mm apresentam diferenças pequena entre dados de valores medidos e dados de simulação numérica e analítica. Por outro lado, verifica-se que os maiores entreferros apresentam maior diferença de sensibilidade, quando comparamos o resultado medido com a simulação numérica e analítica.

Tabela 5: Dados de sensibilidade média da força planar de propulsão, através dos ensaios do experimento, da simulação numérica e analítica para entreferros de 12 mm e 24 mm.

Dados	Entreferro	Fase	Sensibilidade Média (N/A)			Diferença (%)			Vide:
			Medido	Numérico	Analítico	Medido	Numérico	Analítico	
	12 mm	x	7,19	7,53	8,01	0	-4,55	-10,22	Fig.54
	24 mm	x	4,13	4,78	4,81	0	-13,69	-14,16	Fig.56
	12 mm	y	7,05	7,53	8,01	0	-6,41	-11,97	Fig.55
	24 mm	y	4,05	4,78	4,81	0	-15,19	-15,65	Fig.57

De modo semelhante ao método de ensaio utilizado para determinação da força planar de propulsão dos enrolamentos x e y , foi realizado o ensaio de medição da força planar de propulsão resultante do acionamento simultâneo dos enrolamentos x e y . Assim, uma célula de carga para medição da força resultante foi posicionado a 45 graus com relação aos enrolamentos ortogonais, conforme podemos visualizar nas figuras 58 e 59. Para determinação da força resultante um par de enrolamento foi energizada simultaneamente, sendo que as bobinas do enrolamento x e y foram posicionadas sobre as superfícies polares dos ímãs permanentes dos carros superior e inferior. Os testes foram realizados com os carros de propulsão em modo estático e alinhados com as bobinas a serem energizadas. Deste modo foram obtidos resultados de forças planar de propulsão resultante do acionamento simultâneo dos eixos x e y .

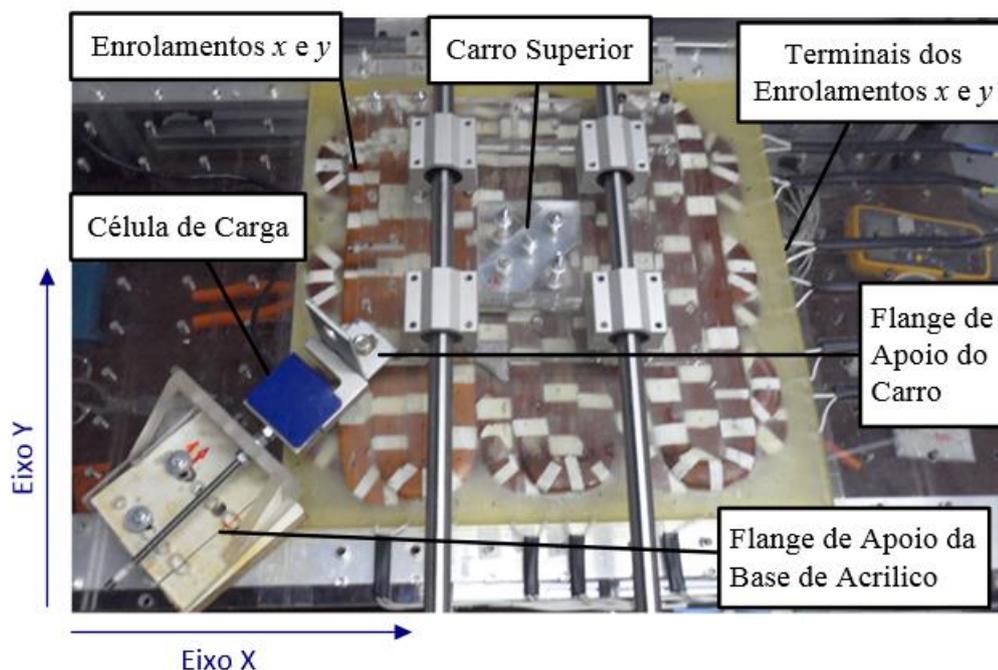


Figura 58: Esquema para determinação da força plana de propulsão resultante quando os enrolamentos da fase x e y foram energizados.

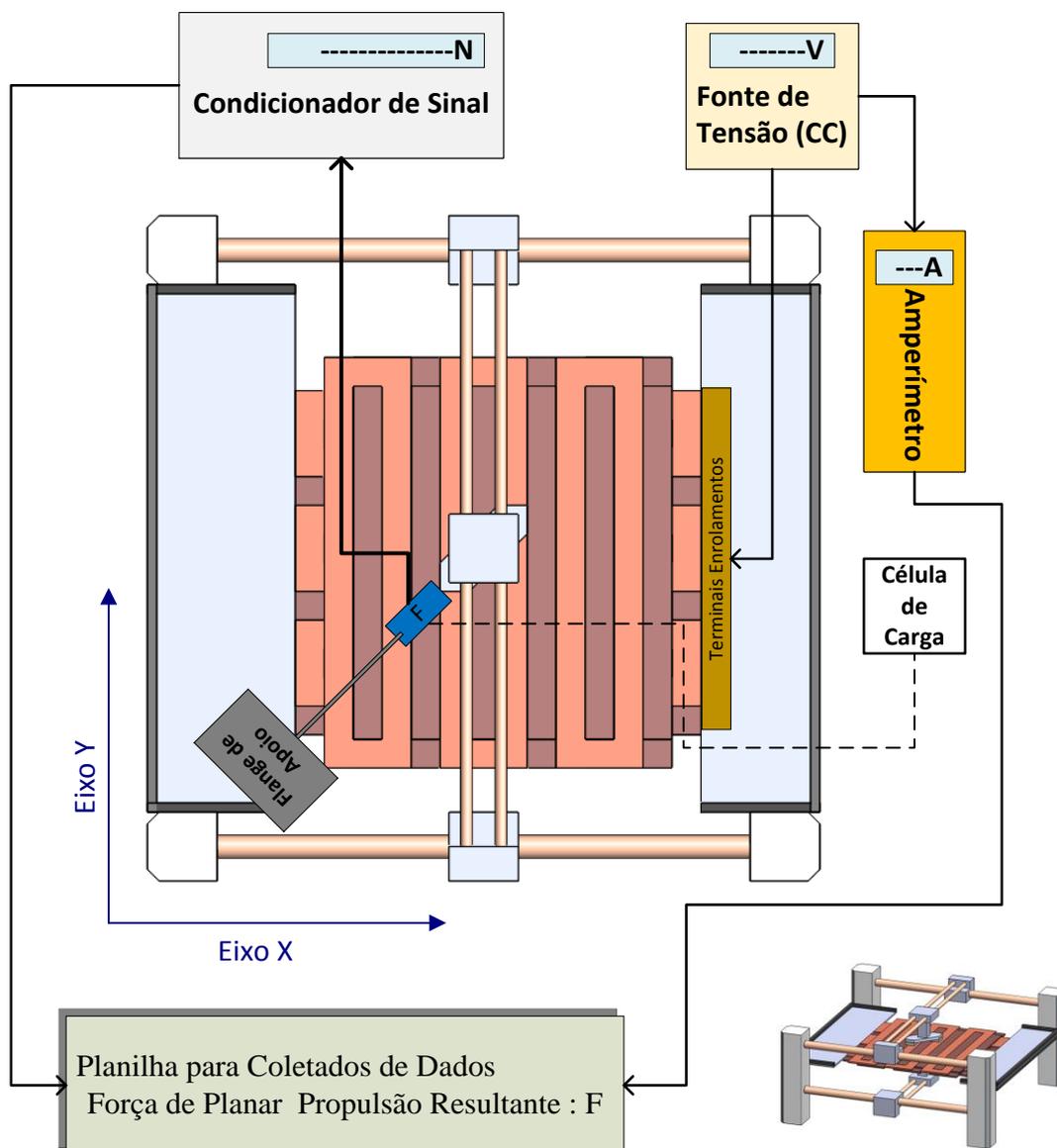


Figura 59: Desenho esquemático com disposição da instrumentação utilizada no experimento para medição da força planar de propulsão resultante.

Os gráficos com simulação numérica, analítica e ensaio experimental com entreferros de 12 mm e 24 mm apresentados nas figuras 60 e 61 respectivamente, representam a força planar de propulsão resultante para simulação de quando ambos os enrolamentos estiverem excitados por corrente elétrica. A força planar de propulsão resultante depende do valor da corrente elétrica aplicada as fases dos enrolamentos x e y . Nos gráficos verifica-se que a cada

valor de corrente elétrica e respectivo entreferro de simulação obtemos valores de intensidade de força planar de propulsão característicos.

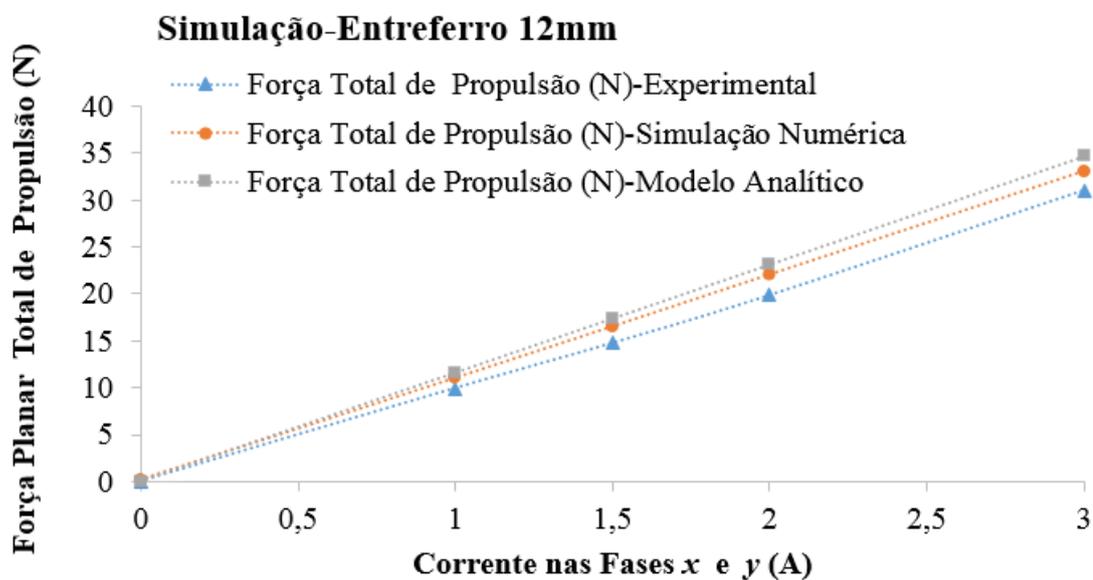


Figura 60: Gráfico da força planar de propulsão resultante em função da corrente elétrica aplicada nos enrolamentos x e y, para entreferro de 12 mm.

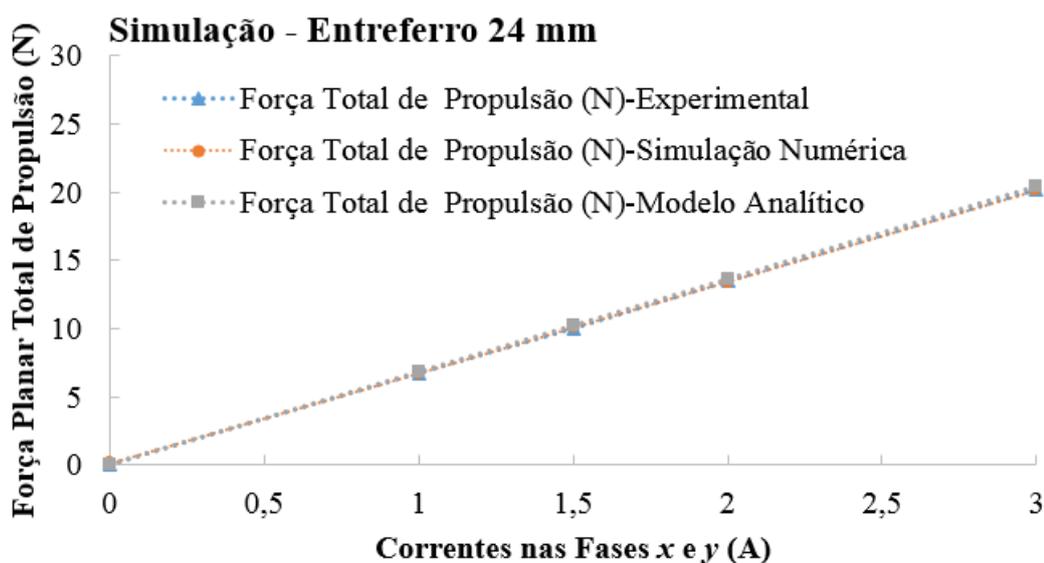


Figura 61: Gráfico da força planar de propulsão resultante em função da corrente elétrica aplicada nos enrolamentos x e y, para entreferro de 24 mm.

Para as figuras 60 e 61 a sensibilidade (Newton/A) do atuador planar é representada pela força planar de propulsão resultante nas medições do experimento, na simulação numérica e na simulação analítica quando simultaneamente as bobinas dos enrolamentos x e y forem excitadas por corrente, vide a tabela 6. Os dados de sensibilidade obtidos com entreferro de 12mm e 24mm apresentam diferenças pequenas entre os dados dos valores medidos e dados da simulação numérica e analítica. Diferenças nos valores experimentais para o menor entreferro pode ser parcialmente esclarecida pela dificuldade de ajuste preciso do entreferro. Convém salientar também que o efeito da razão da armadura pode levar a uma distorção do fluxo total e assim reduzir a força planar total de propulsão.

Tabela 6: Dados de sensibilidade média da força planar de propulsão resultante, através dos ensaios do experimento, da simulação numérica e analítica para entreferros de 12 mm e 24 mm.

Dados		Sensibilidade Média (N/A)			Diferença (%)			
Entreferro	Fases	Medido	Numérico	Analítico	Medido	Numérico	Analítico	Vide:
12 mm	x e y	10,02	11,01	11,55	0	-9,01	-13,23	Fig.60
24 mm	x e y	6,71	6,73	6,80	0	-0,32	-1,32	Fig.61

Os resultados anteriores da força planar de propulsão foram realizados com o alinhamento dos ímãs permanentes dos carros com a bobina de excitação de um dos eixos do atuador. Essa posição podemos denominar de origem. Com o objetivo de verificar o efeito na força planar de propulsão com o deslocamento dos carros sobre uma bobina de excitação, foi realizado o experimento com mecanismo para o ajuste da célula de carga conforme a posição de deslocamento desejada.

Os gráficos da figura 62 apresentam o comportamento da componente x força planar de propulsão para diversas posições de deslocamento dos carros a partir da origem. Para este ensaio, uma fase do enrolamento x foi excitada com corrente elétrica de 3 A. As posições de deslocamento do carro são representadas por 0 mm para a posição de origem, 5 mm para o primeiro deslocamento do carro em relação à bobina de excitação, 10 mm para o segundo deslocamento do carro em relação à bobina de excitação, 15 mm para o terceiro deslocamento

do carro em relação à bobina de excitação, 20 mm para o quarto deslocamento do carro em relação à bobina de excitação e 25 mm para o quinto deslocamento do carro em relação à bobina de excitação, posição terminal.

Na quinta posição, em 25 mm, os ímãs permanentes estão completamente desalinhados com a bobina de excitação. Destacam-se nos resultados dos gráficos comparativos da figura 62 os efeitos da variação do entreferro e da dispersão do fluxo magnético provocados pelo desalinhamento dos ímãs permanentes perante os resultados da componente x da força planar de propulsão.

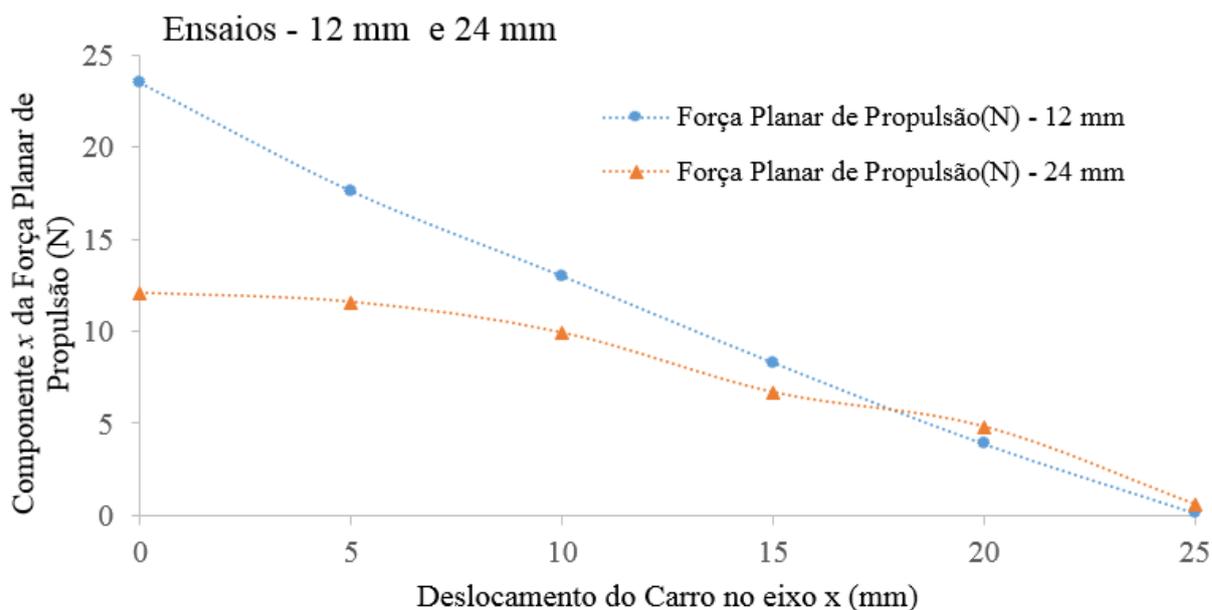


Figura 62: Gráfico da componente x da força planar de propulsão em função do deslocamento dos carros a partir da posição de origem, para ensaios com entreferro de 12 mm e 24 mm com corrente elétrica de 3 A aplicada a uma fase do enrolamento x .

6.2.2 MEDIÇÃO DA FORÇA NORMAL

O objetivo desta medição é comparar os valores da força normal do ensaio experimental com os valores da simulação numérica, sendo que os valores medidos da força normal são resultados da força de tração que agem sobre a célula de carga F_z .

A montagem do mecanismo para medição da força normal, conforme figuras 63 e 64, é composta por uma célula de carga fixada entre o carro superior e a mesa de apoio que está ancorada por tirantes reguláveis na estrutura do atuador planar. A célula de carga do tipo *s* está disposta na vertical e sofrerá tração devido à força de atração existente entre os ímãs permanentes dos carros superior e inferior. O condicionador de sinal para medida da célula de carga é zerado para cada ensaio a ser realizado, primeiramente o carro móvel inferior é desacoplado do carro superior e o condicionador de sinal é zerado, posteriormente o carro inferior é acoplado e assim é inicializada a medição de força normal do atuador planar.

Os enrolamentos *x* e *y* estão dispostos entre os carros superior e inferior. Quando submetidos à passagem de corrente elétrica, provocaram interação do fluxo magnético dos enrolamentos com o fluxo magnético dos ímãs permanentes, causando um aumento na força normal. A grandeza força é medida por um transdutor extensométrico que utiliza o extensômetro de resistência elétrica para registro indireto da grandeza força, sendo este adquirido pelo condicionador de sinal em forma de dados numéricos.

Os ensaios foram realizados com os carros dos ímãs permanentes posicionados em alinhamento com uma fase do enrolamento *x*. Neste momento, foram feitas medições de força normal que agem sobre os carros em função da corrente aplicada à fase do enrolamento *x*.

Nestes ensaios, foram medidos os valores de força que atuam sobre os carros em função da corrente elétrica que varia de 0 até 3 Amperes, mantendo-se o mesmo entreferro regulado inicialmente, ou seja, 12 mm. Posteriormente, foi realizada variação do entreferro de 24 mm com mesma variação de corrente elétrica para registro das forças em função da corrente de excitação com entreferros distintos.

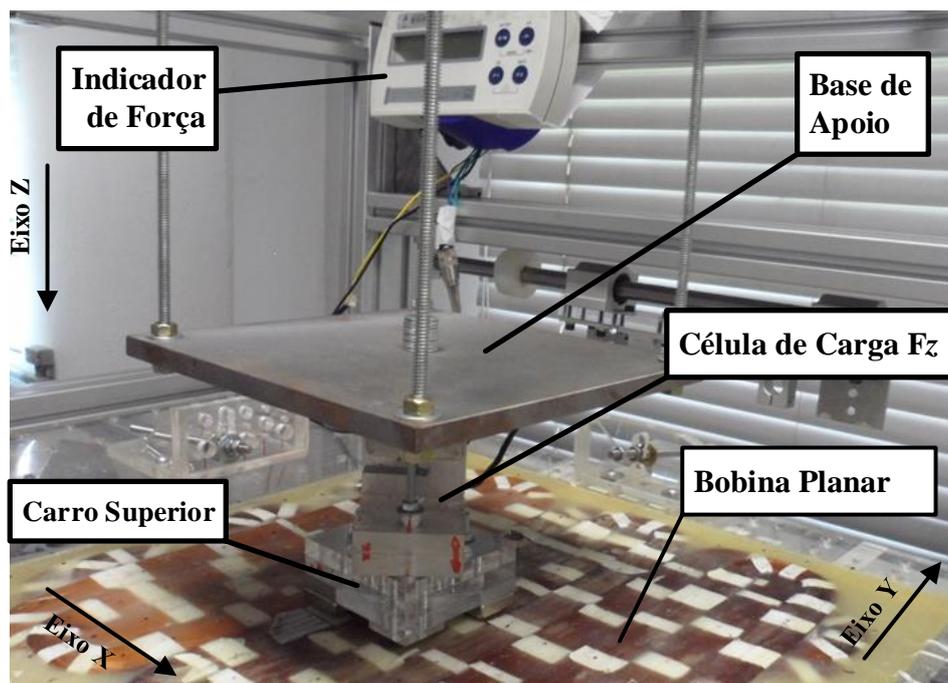


Figura 63: Fotografia do mecanismo de medida da força normal, para determinação da força plana da F_z quando o enrolamento da fase x é energizado.

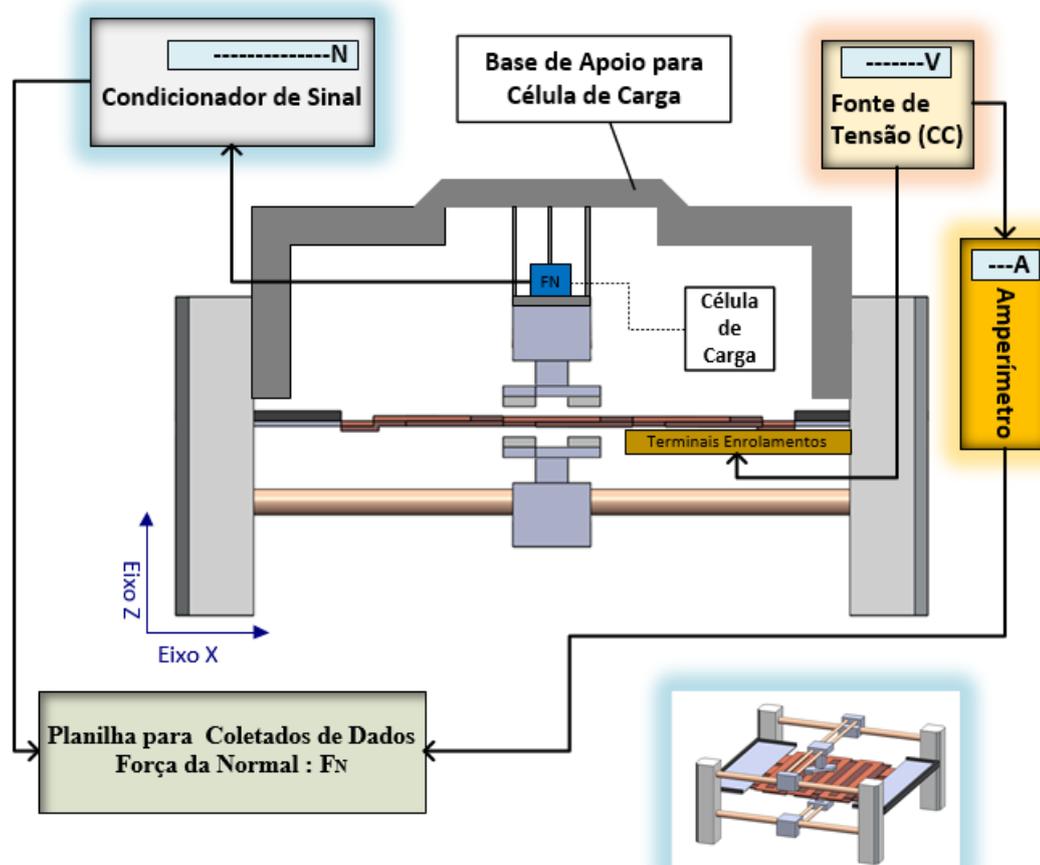


Figura 64: Desenho esquemático do mecanismo de medida da força normal, para determinação da força plana da F_z quando um enrolamento da fase x é energizado.

Na figura 65 é apresentado o gráfico da força normal em função da corrente elétrica aplicada na bobina do enrolamento x , quando o entreferro entre os ímãs permanentes dos carros superior e inferior é de 12 mm. A força normal, obtida de modo experimental, que atua sobre os carros em função da atração, é de 96,0 N quando a corrente elétrica aplicada ao enrolamento do eixo x é nula, e de 103,2 N quando a corrente elétrica aplicada à bobina do enrolamento x é de 3 A.

Para a medida do experimento com entreferro de 24 mm representado pela figura 66, a força normal medida é de 34,94 N quando a corrente é nula, e de 37,90 N quando a corrente elétrica aplicada à bobina do enrolamento do eixo x é de 3 A. Podemos verificar um pequeno aumento na força normal em função da corrente elétrica aplicada quando analisamos os gráficos individualmente. Isso pode ser explicado pelo aumento da densidade de fluxo magnético no entreferro devido à interação do campo magnético da bobina e dos ímãs permanentes dos carros superior e inferior. Por outro lado, o aumento do entreferro faz com que haja uma dispersão do fluxo magnético das bobinas e dos ímãs permanentes, resultando em uma evidente redução da força normal.

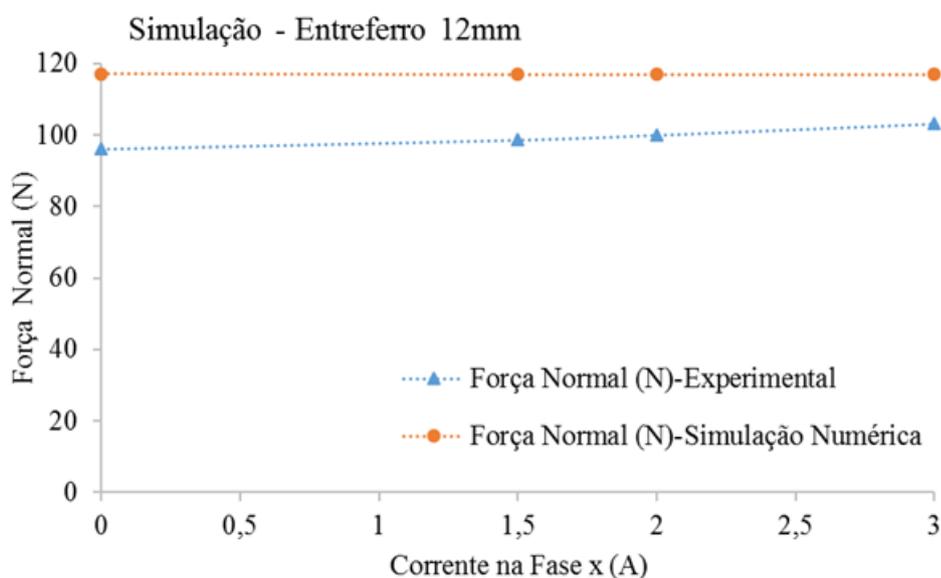


Figura 65: Gráfico da força normal que atua sobre os carros em função da corrente elétrica aplicada ao enrolamento x da bobina planar, quando o entreferro é de 12 mm.

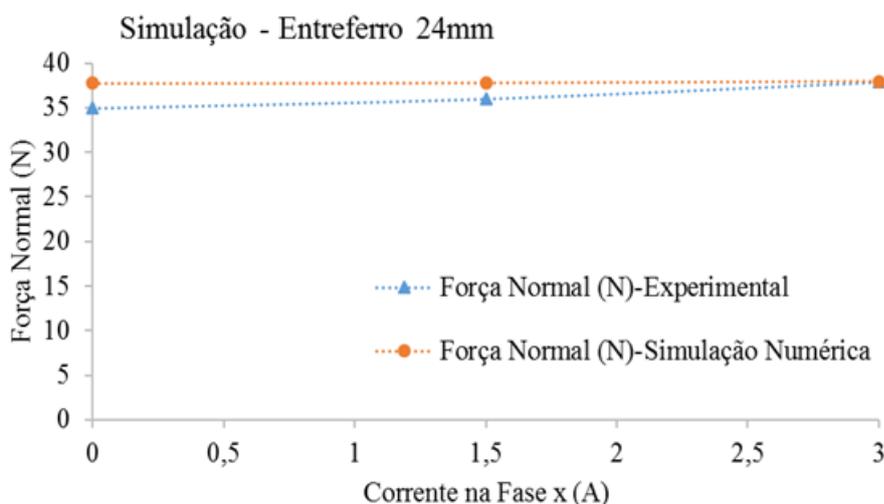


Figura 66: Gráfico da força normal que atua sobre os carros em função da corrente elétrica aplicada ao enrolamento x da bobina planar, quando o entreferro é de 24 mm.

Verifica-se, conforme dados da tabela 7, uma ampla faixa de diferença percentual dos valores medidos no experimento com os valores da simulação numérica. A menor diferença percentual registrada foi de 0,08% com entreferro de 24 mm, quando a corrente elétrica é de 3 A. Por outro lado, foi obtida a maior diferença percentual, de -18,05%, quando o entreferro está posicionado em 12mm e a corrente elétrica é de 0 A.

Nota-se no experimento com entreferro de 12 mm, os valores de diferença percentual tornam-se maiores, fato que pode ser explicado parcialmente pelo método de regulagem da posição dos carros superior e inferior, pela regulagem manual da fonte de corrente e pela dinâmica de interação dos fluxos magnéticos do enrolamento com os ímãs permanentes. Também pode-se salientar que os resultados feitos com simulação numérica são tomados em condições idealizadas em projeto e não possuem as variáveis de manuseio do experimento, assim os resultados experimentais e numéricos apresentam diferenças que podem ser significativas.

Tabela 7: Dados da força normal nos ensaios do experimento e da simulação numérica para entreferros de 12 mm e 24 mm, quando os carros dos ímãs permanente são posicionados em alinhamento com o uma fase do enrolamento x.

Entreferro (mm)	Corrente (A)	Força Normal (N)		Diferença (%)
		Experimental	Numérico	
12	0	96,00	117,15	-18,05
12	1,5	98,60	117,16	-15,84
12	3	103,20	117,18	-11,93
24	0	34,90	37,77	-7,60
24	1,5	36,00	37,81	-4,79
24	3	37,90	37,93	-0,08

6.2.3 MEDIÇÃO DA FORÇA DE DESACOPLAMENTO

A força necessária para que os dois carros do atuador planar sejam desalinhados completamente foi denominada de força de desacoplamento. Quando ambos os carros do atuador planar estiverem magneticamente acoplados e uma força for aplicada a um dos carros do atuador planar sobre os eixos x ou y , essa força de desacoplamento tenderá romper o acoplamento magnético dos carros do atuador planar, e assim desalinhar os carros superior e inferior. Quando ocorrer o desacoplamento, o atuador planar fica inoperante devido ao rompimento do circuito magnético entre ambos os carros. Pode-se medir a força de desacoplamento e comparar com a força de propulsão do atuador, deste modo é possível verificar se a força de propulsão é suficiente para romper o acoplamento magnético entre ambos carros do atuador planar.

O objetivo deste ensaio é provocar o completo desacoplamento entre os carros do atuador planar. Para tal, foram realizados ensaios com corrente nula e com imposição de corrente elétrica sobre uma fase do enrolamento x . Deste modo, podemos saber qual a força necessária para causar o desacoplamento magnético dos carros do atuador planar, quando a

corrente elétrica for nula e quando também existir corrente elétrica em uma bobina do enrolamento x .

Neste ensaio, o carro superior do atuador planar foi mantido fixo a uma célula de carga com suporte de apoio. O carro superior está alinhado a uma fase do enrolamento x . Já o carro inferior está livre e alinhado com a mesma fase do carro superior; ambos os carros estão magneticamente acoplados. A figura 68 mostra o desenho esquemático com detalhes do mecanismo para medição da força de desacoplamento do atuador planar, deve-se destacar que o carro superior fixo a célula de carga está registrando a força de desacoplamento do circuito magnético do atuador planar, o carro inferior móvel será deslocado manualmente com a intenção de provocar o desacoplamento dos carros, conforme esquematizado na figura 68. Os dados coletados no momento do desacoplamento são registrados em uma planilha de dados, isso é feito sistematicamente para os entreferros de 12 mm e 24 mm nas correntes de 0 a 3 A.

A figuras 67 e 68 mostram o posicionamento dos carros superior e inferior sobre uma fase do enrolamento x . Para registro da força de desacoplamento foi adotado um método de ensaio com os seguintes passos: (a) primeiramente foi feito o ajuste de entreferro entre os carros; (b) em seguida foi desacoplado o carro inferior por meio das guias lineares; (c) ajustado a zero o condicionador de sinal da célula de carga; (d) reposicionado o acoplamento do carro inferior; (e) novamente é ajustado a zero o condicionador de sinal da célula de carga (f) proporcionado força no carro inferior para promover seu desacoplamento do carro superior; (g) feita a leitura da força de desacoplamento no condicionador de sinal. Assim, quando o carro inferior sofre ação de uma força de desacoplamento, a célula de carga sofre força de tração e inicia o registro da força de desacoplamento F_x do carro inferior em relação ao carro superior, que é adquirido pelo condicionador de sinal.

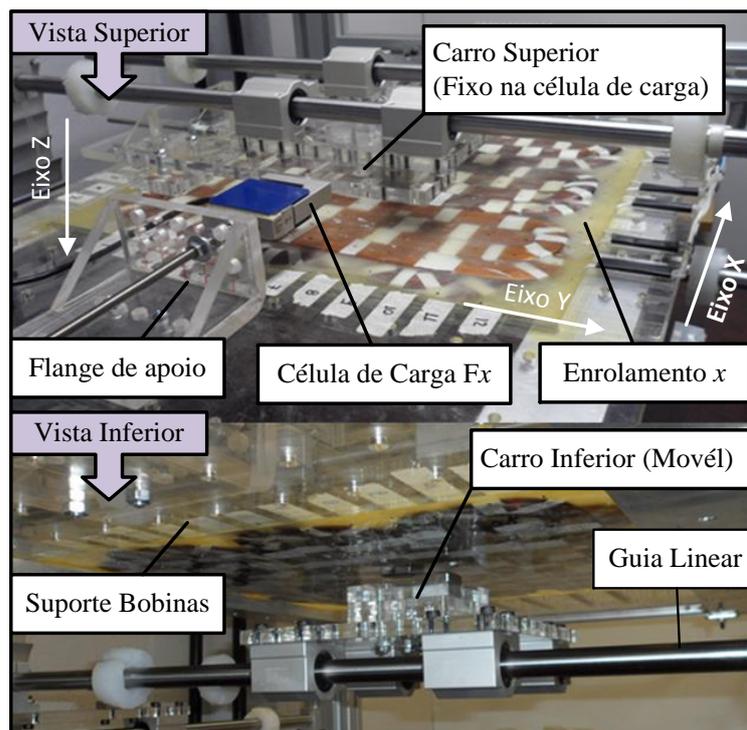


Figura 67: Fotografia com detalhe do mecanismo para medida da força de desacoplamento, na direção do eixo x quando ambos os carros estão alinhados ao o enrolamento da fase x .

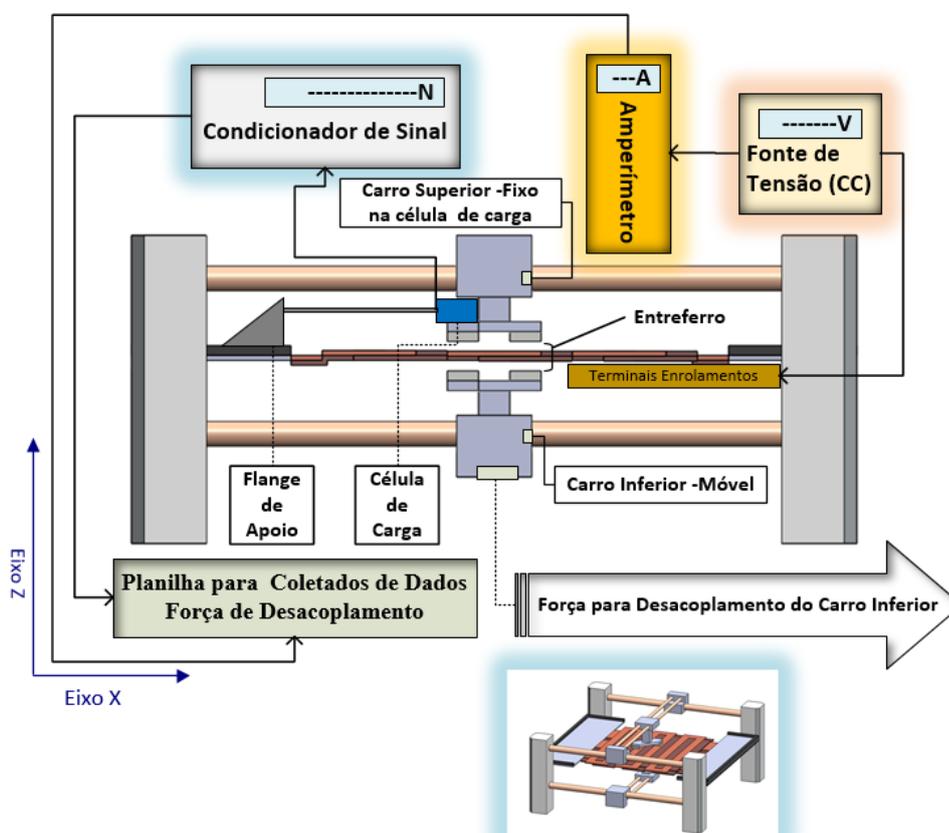


Figura 68: Desenho esquemático com detalhe do mecanismo para medida da força de desacoplamento, na direção do eixo x quando ambos os carros estão alinhados ao o enrolamento da fase x .

Durante os ensaios foram medidos os valores de força de desacoplamento que atuam sobre os carros em função da corrente aplicada à fase do enrolamento x , localizada entre os ímãs permanentes do atuador para entreferros de 12 mm e 24 mm. O gráfico da figura 69 mostra o comportamento da força de desacoplamento do carro inferior em relação ao carro superior, os dados representam a força de desacoplamento para entreferros de 12 mm e 24 mm em função da corrente de excitação de uma fase do enrolamento x .

Nota-se uma tendência de aumento da força de desacoplamento à medida que a corrente elétrica na fase do enrolamento x é incrementada de 0 a 3 A. Para o entreferro de 12 mm, a força de desacoplamento mantém a tendência de elevação à medida que a corrente elétrica é incrementada. Porém, na simulação com entreferro de 24 mm, a força de desacoplamento apresentou resultado menos sensíveis a corrente de excitação. Assim, podemos evidenciar uma redução da força de desacoplamento no experimento devido à dispersão do fluxo magnético à medida que o entreferro é aumentado.

A tabela 8 apresenta os valores de força de desacoplamento e a diferença percentual para entreferros de 12 mm e 24 mm. Verifica-se que com o aumento de corrente de excitação ocorre um incremento significativo na força necessária para o desacoplamento dos carros do atuador planar, está força aumenta em função do aumento da densidade de fluxo magnético no entreferro.

Tabela 8: Dados da força de desacoplamento nos ensaios do experimento para entreferros de 12 mm, 24 mm, quando os carros dos ímãs permanente são posicionados em alinhamento com o uma fase do enrolamento x .

Entreferro (mm)	Corrente (A)	Força de Desacoplamento (N)		Diferença (%)
		Experimental		
12	0	31,49		0,00
12	1,5	35,90		14,00
12	3	41,20		30,84
Entreferro (mm)	Corrente (A)	Força de Desacoplamento (N)		Diferença (%)
		Experimental		
24	0	12,56		0,00
24	1,5	16,97		35,11
24	3	19,00		51,27

Nota: Para cálculo da diferença % da força de desacoplamento foi tomado como base a força em zero ampere, para cada entreferro.

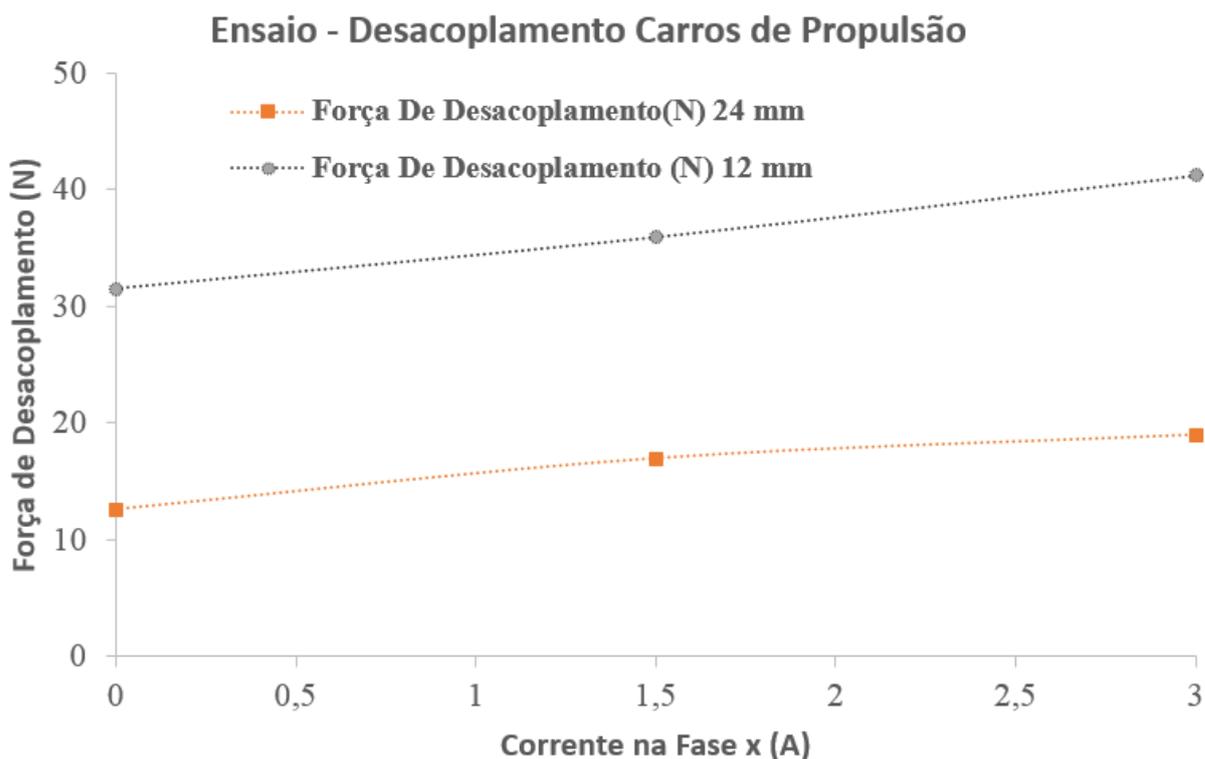


Figura 69: Gráfico da força de desacoplamento dos carros a partir da posição alinhamento com uma fase do enrolamento x , com simulações de entreferro de 12 mm e 24 mm.

Para as duas situações ensaiadas neste tópico do trabalho, ou seja, força de desacoplamento quando a bobina do enrolamento x é excitada na posição de entreferro de 12 mm e 24 mm, apresentaram valores nominais de força de desacoplamento superiores quando comparadas com as forças planares de propulsão para a mesma bobina de excitação e posição de entreferros. Conforme gráficos relacionados aos valores experimentais das figuras 54, 56 e 69, nota-se que os valores de força de desacoplamento são maiores, estes resultados são importantes para se ter segurança quanto a não possibilidade de desacoplamento dos carros do atuador planar devido a ação da força planar de propulsão.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesta dissertação é apresentado o estudo de um atuador planar com características inovadoras: armadura estacionária sem ferro com enrolamento ortogonais e dois carros acoplados magneticamente um ao outro com quatro ímãs de NdFeB de alto produto energético. O novo conceito de atuador planar permite a movimentação bidirecional em ambas as faces do plano de trabalho, com atuação de dois carros de tração. São abordados no trabalho aspectos das características construtivas e funcionais, bem como resultados da análise numérica, analítica e experimental do protótipo desenvolvido.

Através de pesquisa bibliográfica foram verificados conceitos de atuadores planares com diversas características construtivas. Essas referências de pesquisa ampliaram a visão sobre o princípio operacional dos atuadores planares, bem como suas topologias e possibilidade de aplicações. Foi feita uma revisão do estado da arte de atuadores planares com conceito de armadura estacionária sem ferro, com o propósito de confrontar topologias de dispositivos já existentes com a proposta em estudo.

Para inicialização do estudo de operação do atuador planar foram utilizados o método numérico para cálculo da força normal e da força planar de propulsão e o método analítico para o cálculo da força planar de propulsão. Estas análises preliminares de forças permitiram a definição das características construtivas do protótipo com respeito ao dimensionamento da estrutura de suspensão, o sistema de guias e os rolamentos lineares do duplo carro do atuador planar.

Um dos desafios e objetivos alcançados no trabalho foi a viabilização da prototipagem do atuador planar. Como o atuador planar não possui material ferromagnético na armadura, a estrutura de suspensão das bobinas dos enrolamentos foi dimensionada de forma a sustentar os enrolamentos em uma célula de resina epóxi. Assim, foi desenvolvido um conjunto de bobinas resinadas que formam, com a mesa de acrílico, uma estrutura única para apoio da armadura do atuador planar.

As pesquisas bibliográficas em conjunto com as várias tentativas de experimentação foram de extrema importância para a escolha da disposição dos enrolamentos do atuador planar. A forma e a disposição das bobinas planares no projeto possibilitaram a configuração de um mecanismo de posicionamento dos carros do atuador planar em ambas as faces do plano xy , com capacidade de regulagem do entreferro entre as faces polares dos ímãs permanentes.

O método dos elementos finitos foi de grande importância para a análise do comportamento da distribuição do fluxo magnético nas regiões do atuador planar. O mapeamento 3D do módulo do vetor densidade de fluxo magnético nas culatras e nos ímãs permanentes serviram de complemento a análise proposta no modelo numérico que considerou o estado de saturação da culatra infinitamente permeável. Assim, com o MEF podemos verificar nas imagens de mapeamento, figuras 35 e 40, a possibilidade de aperfeiçoamento na geometria das culatras em regiões onde a densidade de fluxo magnético é baixa.

Os valores comparativos da densidade de fluxo magnético podem ser verificados na simulação numérica, no modelo analítico e no ensaio experimental apresentados nos gráficos da figura 46, figura 47 e na tabela 4. Os resultados demonstram valores convergentes e bastante próximos nos dois casos analisados, sendo que a diferença percentual máxima entre os valores medidos, quando comparado com os valores numéricos e analíticos, analisados na região

central das faces polares, apresentaram os respectivos valores percentuais de 8,59% e -1,25% para a análise com entreferro de 12 mm.

Para o entreferro de 24 mm, a diferença percentual máxima entre os valores medidos quando comparado com os valores numéricos e analíticos, analisados na região central das faces polares, apresentaram os respectivos valores percentuais de -7,16% e -11,04%. Assim, podemos validar os resultados das simulações de densidade de fluxo magnético para os casos analisados no atuador planar.

A força planar de propulsão e a força normal foram verificadas em regime estático, para as diversas configurações de entreferro propostas no trabalho. Foram realizadas simulações numéricas, simulações pelo método analítico e os ensaios experimentais para a força planar de propulsão. Para a força normal, foram realizadas simulações numéricas e ensaios experimentais. Assim, foi possível comparar as diferenças dos resultados numérico, analítico e experimental em cada caso, como também visualizar as diferenças percentuais entre os valores simulados e experimentais para cada variação de entreferro.

Os resultados comparativos obtidos entre os valores de força planar de propulsão, quando somente uma fase do enrolamento x e y é excitado por corrente elétrica, são apresentados nos gráficos das figuras 54, 55, 56 e 57 para as simulações com entreferros de 12 mm e 24 mm. Também para estes entreferros são mostrados valores médios de sensibilidade da força planar de propulsão, conforme tabela 5. Estes resultados apresentaram boa concordância entre si, conforme podemos verificar no caso do entreferro de 12 mm quando uma fase do enrolamento x é excitada com corrente de 3 A, o valor da força planar de propulsão medido é de 23,54 N, para a simulação numérica 23,94 N e para o modelo analítico 24,03 N.

Para a força planar total de propulsão, correspondente ao acionamento das fases dos enrolamentos x e y , apresentaram resultados de força e sensibilidade convergentes, conforme

figuras 60, 61 e tabela 6. Para simulação com entreferro de 12 mm quando ambas as fases dos enrolamentos x e y estão excitadas por corrente elétrica de 3 A, o valor medido da força planar total de propulsão é de 31 N, para a simulação numérica 33,05 N e para o modelo analítico 34,64 N. A diferença encontrada entre os valores medidos e teóricos quanto a força podem ser justificados pela diferença existente entre as características dos ímãs permanentes do protótipo, também não deve ser descartado o efeito de reação da armadura.

Os valores obtidos pela simulação numérica e ensaio experimental para a força normal são mostrados na tabela 7 e nos gráficos das figuras 65 e 66. Os valores apresentados para o entreferro de 24mm mostraram boa concordância entre si. A força normal com entreferro de 24mm para situação de corrente elétrica nula foi de 34,90 N para o ensaio experimental, para a simulação numérica a força normal foi de 37,77 N, perfazendo uma diferença percentual de -7,60% do valor medido para o valor simulado. Quando a corrente de excitação é de 3 A, a força normal para o valor medido foi de 37,90 N e para o valor simulado numericamente de 37,93 N, uma diferença perceptual de -0,08%.

A força de desacoplamento foi verificada de forma experimental para determinar a força necessária que causa o desacoplamento magnético dos carros do atuador planar. Os ensaios foram realizados com e sem corrente elétrica em uma fase do enrolamento x . Podemos verificar na tabela 8 os valores de força de desacoplamento e a diferença percentual para os entreferros de 12 mm e 24 mm. Os resultados de força de desacoplamento para a simulação de entreferro de 12 mm é de 41,20 N para corrente de 3 A, e de 31,49 N para corrente nula. Assim, verifica-se que os valores de força de desacoplamentos são maiores que os valores de força planar propulsão, conforme gráfico da figura 54 onde 23,54 N corresponde a força de propulsão para corrente de 3 A no ensaio experimental da fase do enrolamento x .

Deste modo, podemos prever que componente x da força planar de propulsão não é suficiente para provocar o desacoplamento dos carros do atuador planar para o caso analisado.

Da mesma forma foi realizado ensaio para entreferro de 24 mm, onde a força de desacoplamento para corrente de 3 A é de 19 N e para corrente nula de 12,56 N. Por conseguinte, o componente x da força planar de propulsão não é suficiente para desacoplar os carros do atuador planar, pois seu valor, conforme gráficos da figura 56, é de 12,07 N para corrente de 3 A. Estes ensaios foram especialmente importantes por apresentarem valores experimentais que possibilitam validar o completo acoplamento dos carros quando sujeitos a uma força planar de propulsão.

7.1 RECOMENDAÇÕES

Este trabalho pode ser complementado com uma modelagem analítica e numérica mais detalhada. Desta forma, o protótipo desenvolvido poderá ser explorado em suas potencialidades em vários aspectos:

- Desenvolvimento de um sistema de controle para acionamento dos carros sobre os eixos x e y .
- Desenvolvimento de um sistema de medição do posicionamento dos carros sobre o atuador planar.
- Simulação numérica para o comportamento dinâmico do atuador planar.
- Desenvolver modelo analítico dinâmico do atuador planar.
- Testes do comportamento dinâmico do atuador planar.
- Investigar a dissipação térmica nos enrolamentos e sua influência no atuador planar.
- Modelo analítico da força de desacoplamento.

REFERÊNCIAS

- AKOUN, G.; YONNET, J. P. 3D Analytical Calculation of the Forces Exerted Between Two Cuboidal Magnets. **IEEE Transactions on Magnetics**,[S.I.],v. MAG-20, n.5, Sept. 1984.
- ANSYS. **Introduction to ANSYS Maxwell 16.0 Release**. ANSYS Maxwell 2015, March 2015.
- ARORA, N. et al. A planar electromagnetic actuator based on two layer coil assembly for micro applications. In: IEEE/ASME INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INTELLIGENT MECHATRONICS, 2014, Besançon. **Proceedings...** [S.I.: s.n.], 2014. p.174-179.
- BAGGIO FILHO, N.F. **Estudo e Desenvolvimento de um Atuador Planar com Enrolamentos Planificados e Núcleo de Material Ferromagnético Compósito**. Dissertação (Mestrado), PPGEE, Porto Alegre, UFRGS, 2003.
- BASAK, A. **Permanent Magnet DC Linear Motors**. Oxford: Clarendon, 1996.
- BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo e Cálculo de Campos**. Florianópolis: UFSC,1989.
- BINNS, K. J.; LAWRENSEN, P. J.; TROWBRIDGE, C. W. **The Analytical and Numerical Solution of Electric and Magnetic Fields**. West Sussex: John Wiley & Sons, 1992.
- BOEIJ, J. de; LOMONOVA, E.; VANDENPUT, A. Modeling Ironless Permanent-Magnet Planar Actuator Structures. **IEEE Transactions on Magnetics**, [S.I.], v. 42, n. 8, p. 2009-2016, Aug. 2006.
- CAMPBELL, P. **Permanent Magnet Materials and Their Application**. Cambridge: Cambridge University, 1994.
- CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**: características gerais, tratamento térmicos, principais tipos. 7.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1996.
- FARIA, R.N; LIMA, L. F.C.P. **Introdução ao Magnetismo dos Materiais**. São Paulo: Livraria da Física, 2005.
- FIORILLO, F. **Measurement and Characterization of Magnetic Materials**. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2004.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, JR., C.; UMANS, S.D. **Electric Machinery**. 5th ed. New York: McGraw-Hill,1990.

FLORES FILHO, A. F. et al. Application of Neodymium-Iron-Boron permanent magnets on the assembling of a novel planar actuator. **IEEE Transactions on Magnetics**, [S.I.], v. 35, n. 5, p. 4034–4036, 1999.

FLORES FILHO, A. F.; SUSIN, A. A.; DA SILVEIRA, M. A. Investigation of the Forces Produced by New Electromagnetic Planar Actuator. In: ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE, 2001, Cambridge. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2001. p. 8-13.

FLORES FILHO, A.F. **Aplicação do Método dos Elementos Finitos à Análise de Dispositivos Eletromagnéticos**. Porto Alegre: LMEAE/PPGEE/UFRGS, 2003. 27p. (Apostila Universitária)

FLORES FILHO, A.F.; DA SILVEIRA, M. A. The Study of the forces present in a planar actuator. In: IEEE INTERNATIONAL MAGNETICS CONFERENCE - INTERMAG. 2006, San Diego. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2006. p. 155

FLORES FILHO, A.F.; SUZIM, A.A; SILVEIRA, M.A. Development of a novel planar actuator. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND DRIVES-EMD, 9.,1999, Canterbury. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 1999. p.268-271.

FLORES FILHO, A.F; SUZIM, A.A; SILVEIRA, M.A. Development and Analysis of a Novel Electromagnetic Planar Actuator. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MAGNETICALLY LEVITATED SYSTEMS AND LINEAR DRIVES – MAGLEV,16., 2000, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Laboratory for Applied Superconductivity/DEE/UFRJ, 2000. p.374-378

GIERAS, J. **Linear Induction Drives**. New York: Oxford University, 1994.

HAMEYER, K. *et al.* The Art of Modelling Electrical Machines. **Internacional Compumag Society**, [S.I.], v.19, n.2 , p.1-19, Jul. 2012.

JANSEN,J.W; J.P.C. et al. Overview of Analytical Models for the Design of Linear and Planar Motors. **IEEE Transactions on Magnetics**, [S.I.], v.50, n.11, p,1-7, November.2014.

JANSEN, J. W. et al. Ironless magnetically levitated planar actuator. **Journal of Applied Physics**, [S.I.], v.103, p.07E905-1-07E905-3, Apr. 2008.

JANSEN, J. W. *et al.* Modeling of Magnetically Levitated Planar Actuators With Moving Magnets. **IEEE Transactions on Magnetics**, [S.I.], v.43, n.1, p.15-25, Jan. 2007.

JIANG, H. *et al.* Analytical Force Calculations for High-Precision Planar Actuator with Halbach Magnet Array. **IEEE Transactions on Magnetics**, [S.I.], v.45. n.10, p. 4543-4546, Oct. 2009.

KRAUS, J. D.; CARVER, K. R. **Eletromagnetismo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.

MARTINS, N. **Introdução à teoria da eletricidade e do magnetismo**. São Paulo: Edgard Bluncher, 1975.

MATSUMOTO, S.; ARAI, Y.; NAKAGAWA, T. Noncontact Levitation and Conveyance Characteristics of a Very Thin Steel Plate Magnetically Levitated by a LIM-Driven Cart. **IEEE Transactions on Magnetics**, [S.I.], v.50, n.11, p.1-4, Nov. 2014.

MELCHER, J. R. **Continuum Electromechanics**. Cambridge, MS: MIT, 1981.

MIN, W. *et al.* Analysis and Design of Novel Overlapping Ironless Windings for Planar Motors. **IEEE Transactions on Magnetics**, [S.I.], v. 47, n.11, p.4635-4642, Nov. 2011.

MIN, W. *et al.* Analysis and Optimization of a New 2-D Magnet Array for Planar Motor. **IEEE Transactions on Magnetics**, [S.I.], v.46, n.5, p.1167-1171, May 2010.

NASAR, S.A; BOLDEA, I. **Linear Electric Motors: theory, design and applications**. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall., 1987.

PAHL, G.; BEITZ, W.. **Engineering Design: systematic approach**. London: Springer, 1996.

ROVERS, J. M. M. *et al.* Analysis Method of the Dynamic Force and Torque Distribution in the Magnet Array of a Commutated Magnetically Levitated Planar Actuator. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [S.I.], v.59, n.5, p.2157-2163, May 2012.

ROVERS, J. M. M.; JANSEN, J. W.; LOMONOVA, E. A. Analytical Calculation of the Force Between a Rectangular Coil and a Cuboidal Permanent Magnet. **IEEE Transactions on Magnetics**, [S.I.], v.46, n.6, p.1656-1659, June 2010.

ROVERS, J. M. M.; JANSEN, J. W.; LOMONOVA, E. A. Multiphysical Analysis of Moving-Magnet Planar Motor Topologies. **IEEE Transactions on Magnetics**, [S.I.], v.49, n.12, p. 5730-5741, Dec. 2013.

SANZ, S. *et al.* Evaluation of Magnetic Forces in Permanent Magnets. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, [S.I.], v. 20, n.3, p.846-850, June 2010.

SCHWARTZ, M. **Principles of Electrodynamics**. New York: Dover Publications, 1987.

SILVEIRA, M. A. **Estudo de um Atuador Planar**. 2003. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia) -Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

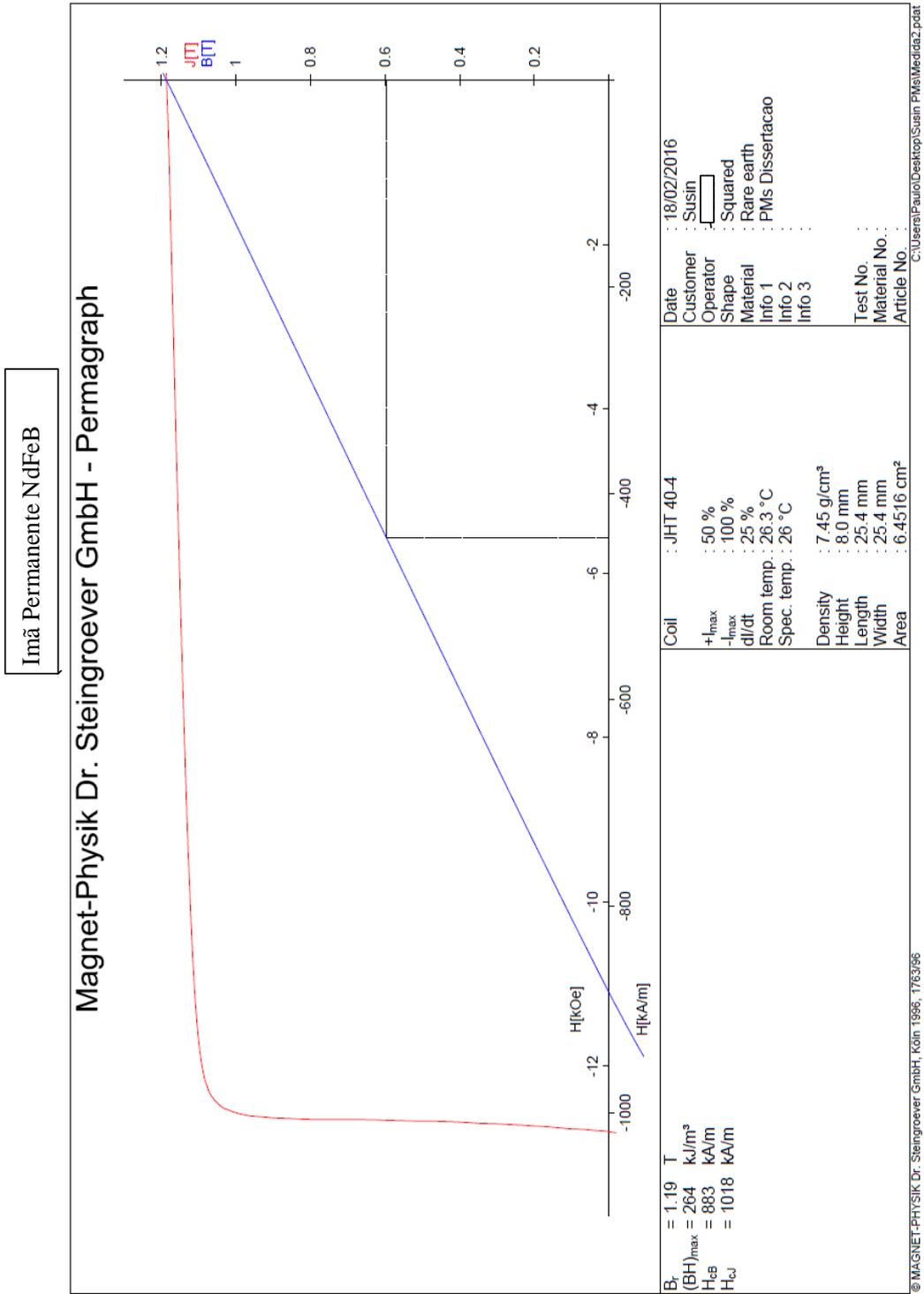
SUSIN, M. *et al.* Numerical Simulation of Forces in an Ironless Planar Actuator. In: IEEE MAGNETICS CONFERENCE – INTERMAG. 2015, Beijing, China. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2015, p.1.

VAN VLACK, Lawrence Hall. **Princípios de Ciência dos Materiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

ZHU, Y. *et al.* Optimal Design of Ironless Permanent Magnet Planar Motors for Minimization of Force Ripples. **IET Electric Power Applications**, [S.I.], v.7, n.4, p.321-330, 2013.

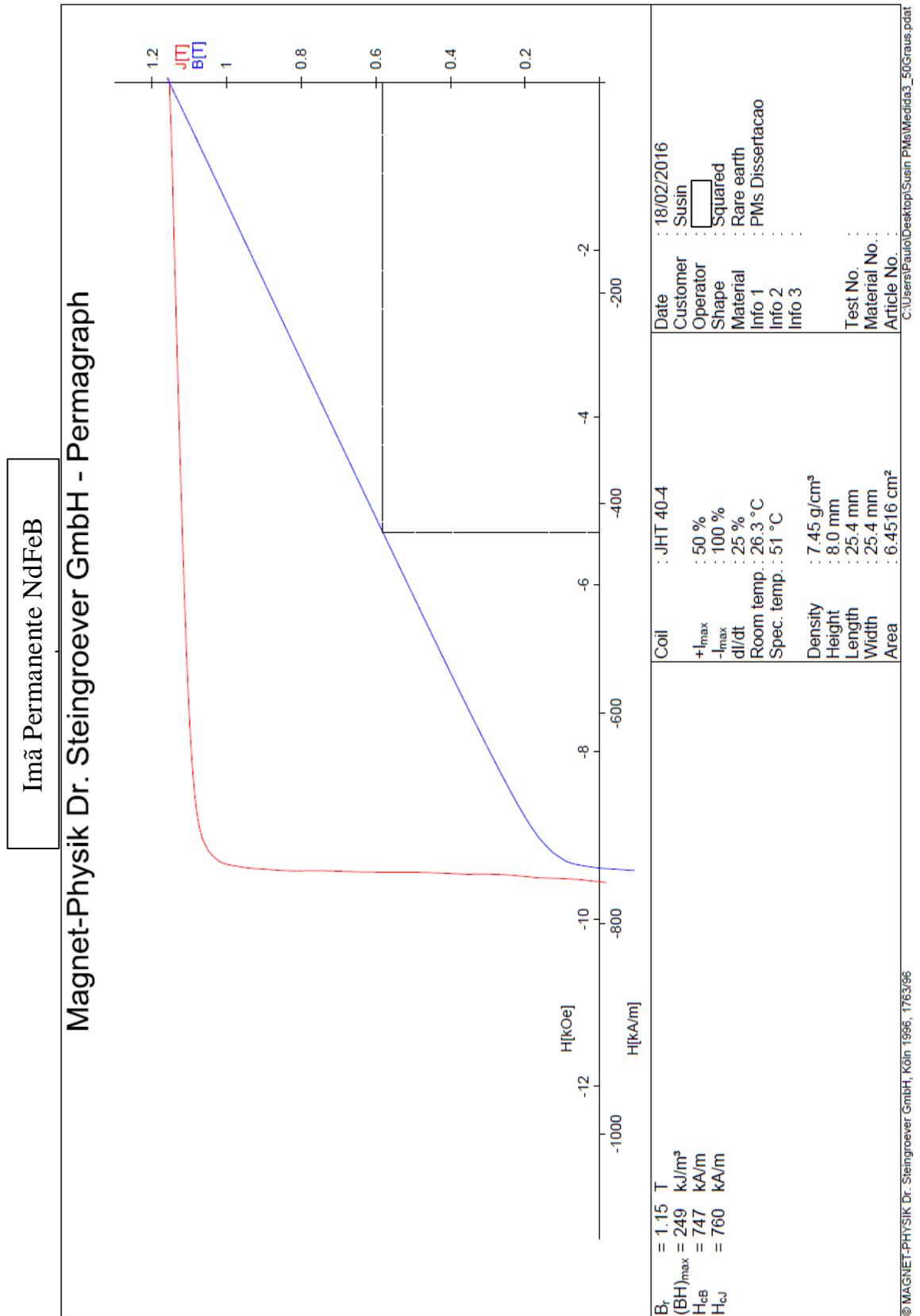
Apêndice A

Curva de magnetização do ímã permanente NdFeB a 26°C.



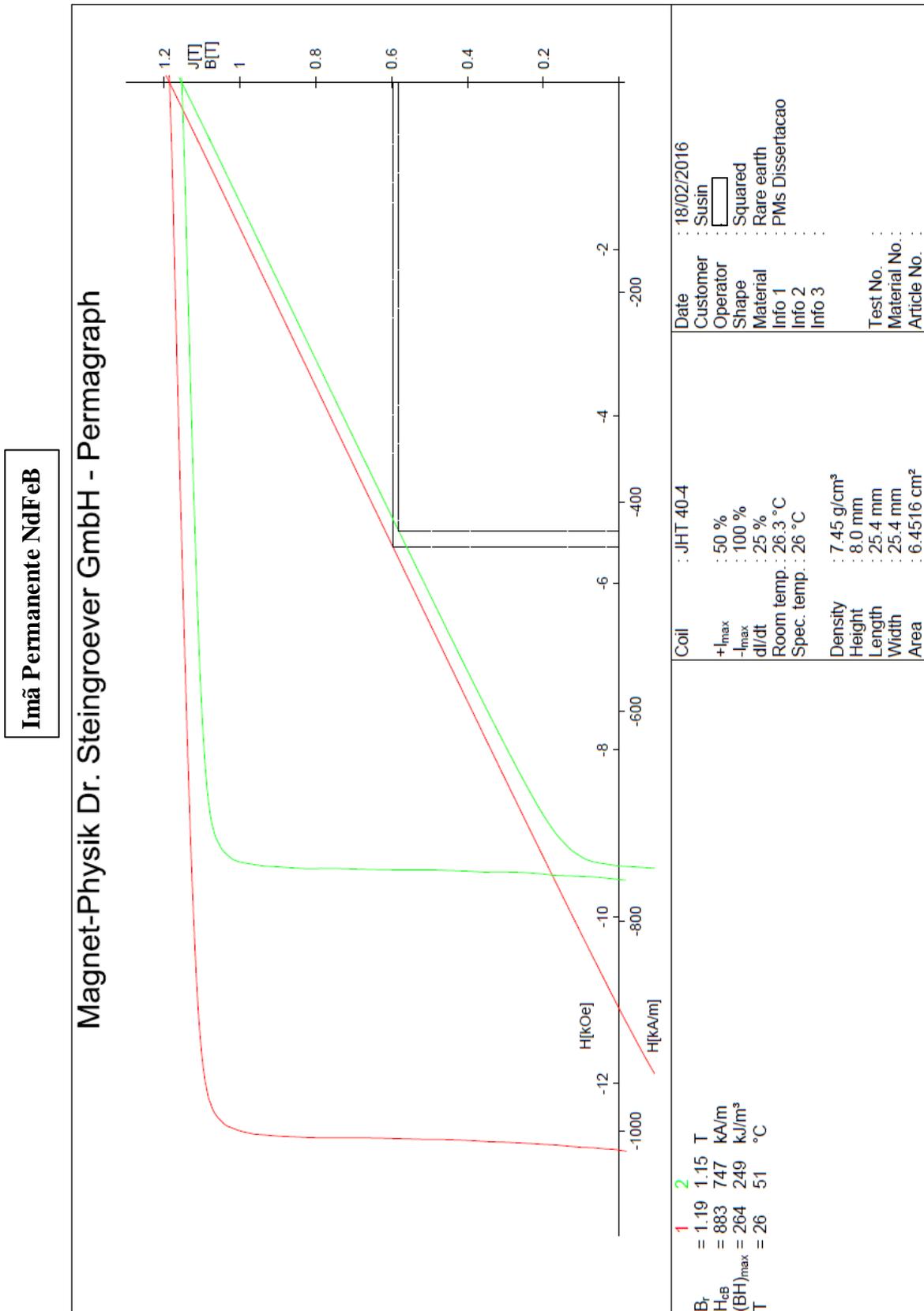
Apêndice B

Curva de magnetização do ímã permanente NdFeB a50°C.



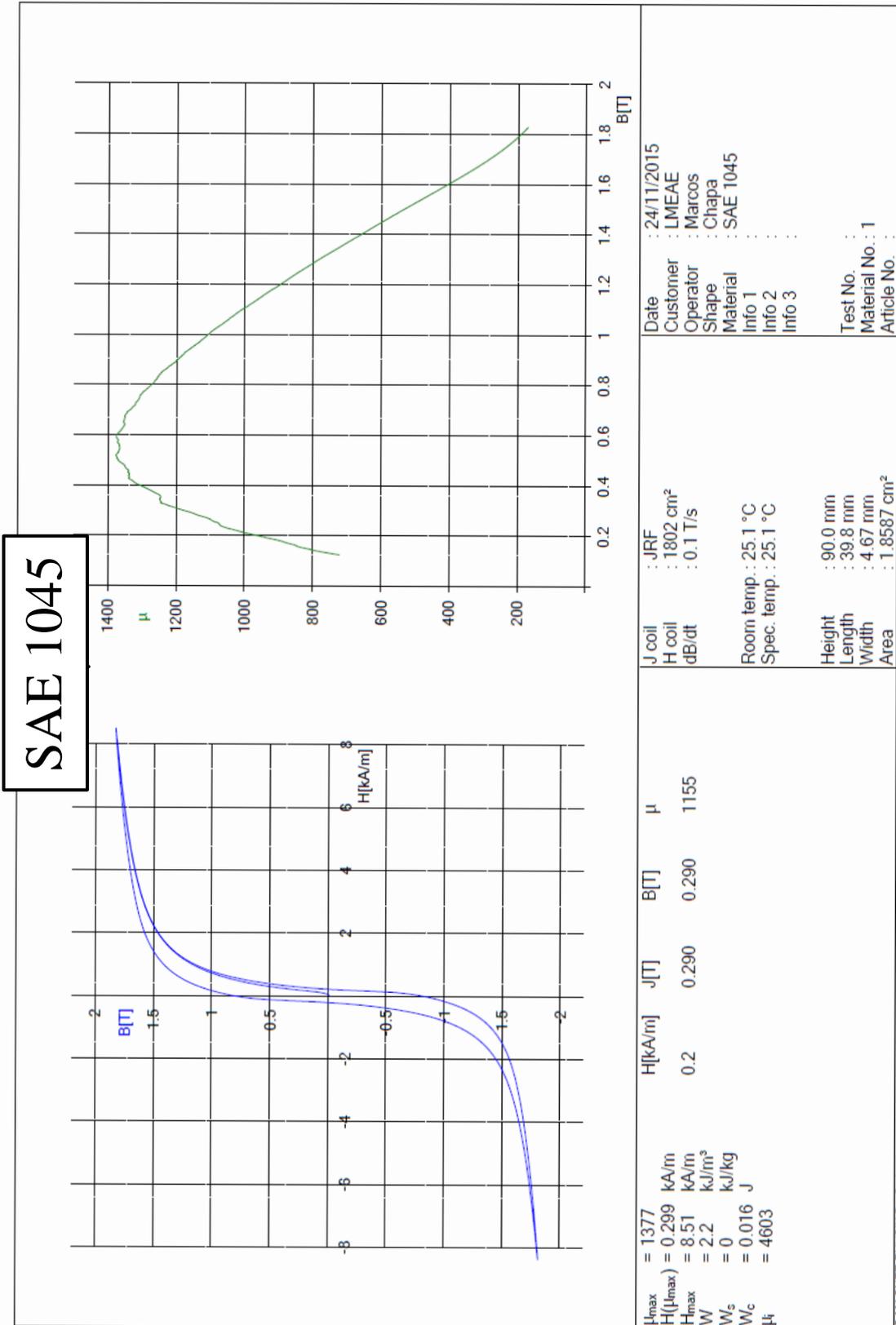
Apêndice C

Comparativos de Curvas de magnetização ímã permanente NdFeB à 26°C e a 50°C.



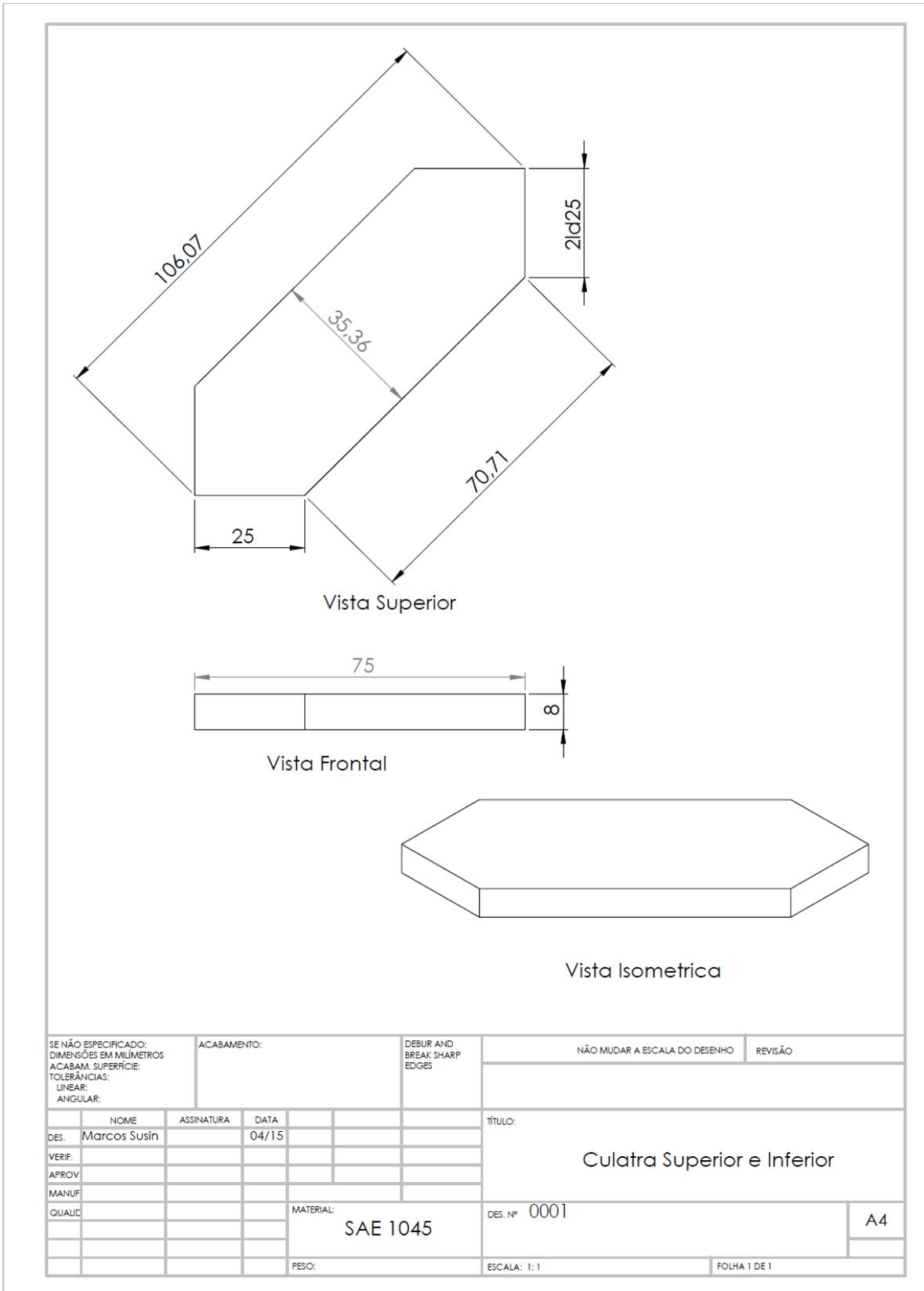
Apêndice D

Curva de magnetização do aço SAE 1045.



Apêndice E

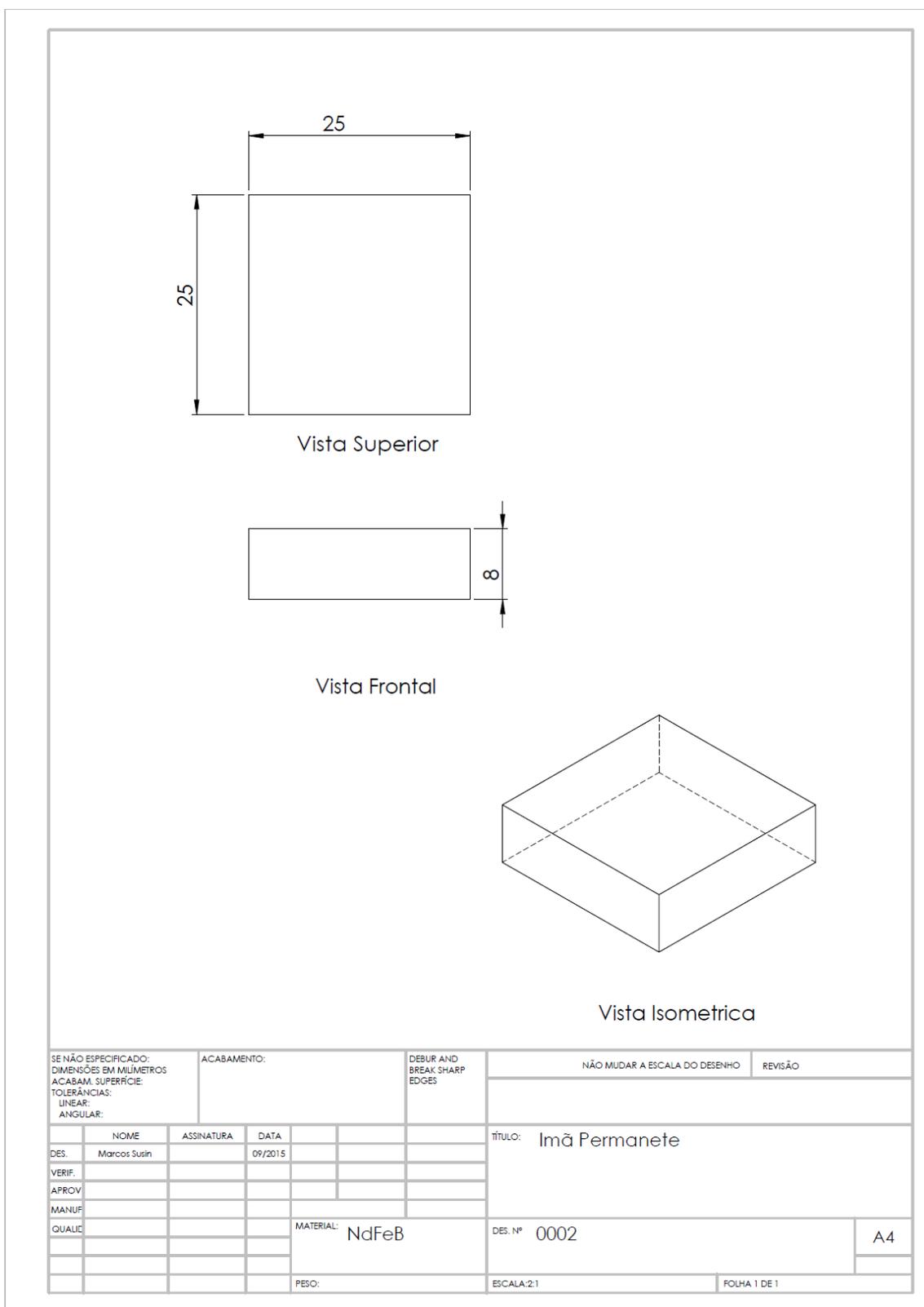
Desenho da Culatra de Aço SAE 1045.



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
ACABAM. SUPERFÍCIE:									
TOLERÂNCIAS:									
LINEAR:									
ANGULAR:									
DES.	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO:					
	Marcos Susin		04/15	Culatra Superior e Inferior					
VERIF.									
APROV.									
MANUF.									
QUALC.				MATERIAL:		DES. Nº		A4	
				SAE 1045		0001			
				PESO:		ESCALA: 1:1		FOLHA 1 DE 1	

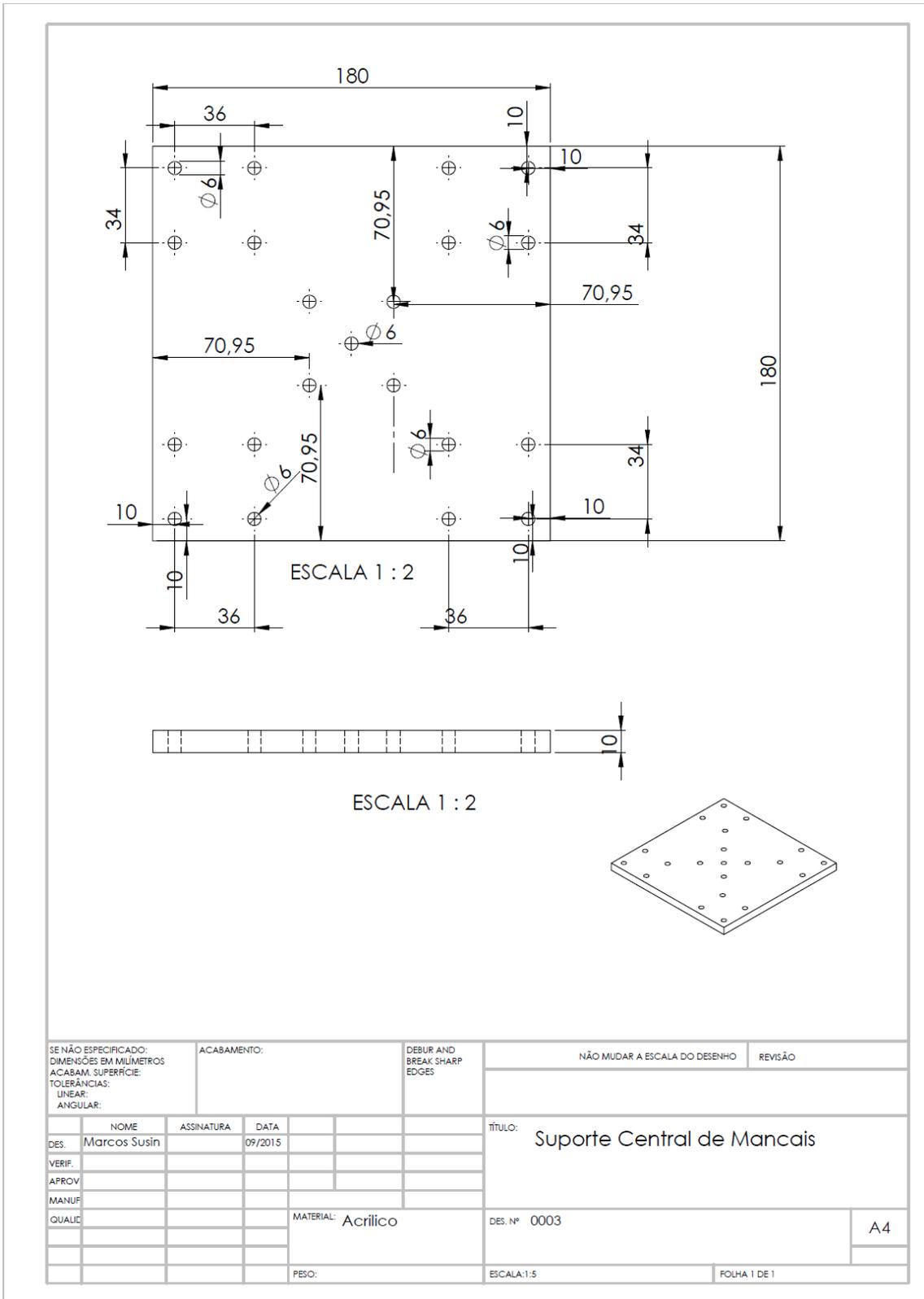
Apêndice F

Desenho do Ímã Permanente - NdFeB.



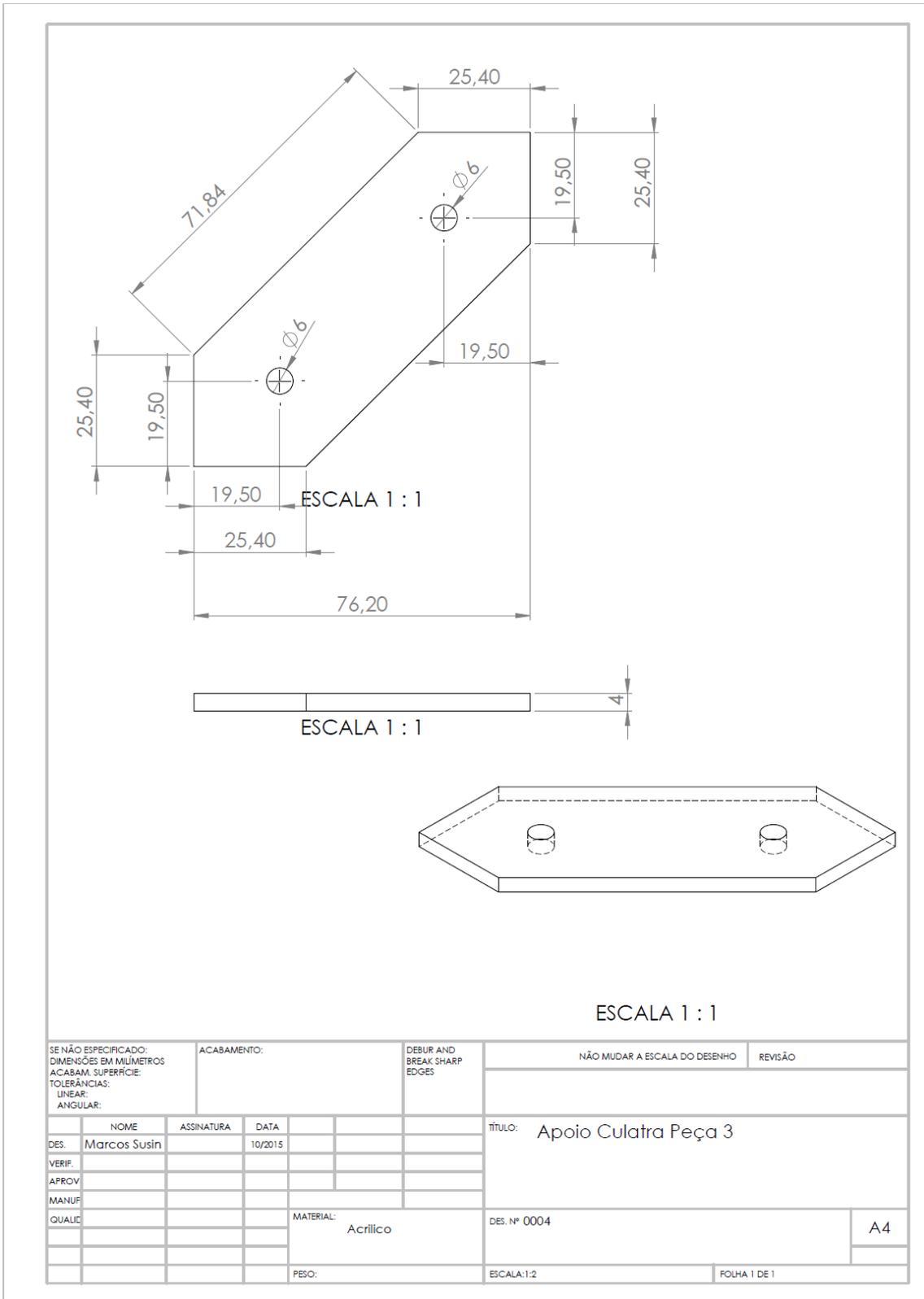
Apêndice G

Desenho do Suporte Central de Mancais.



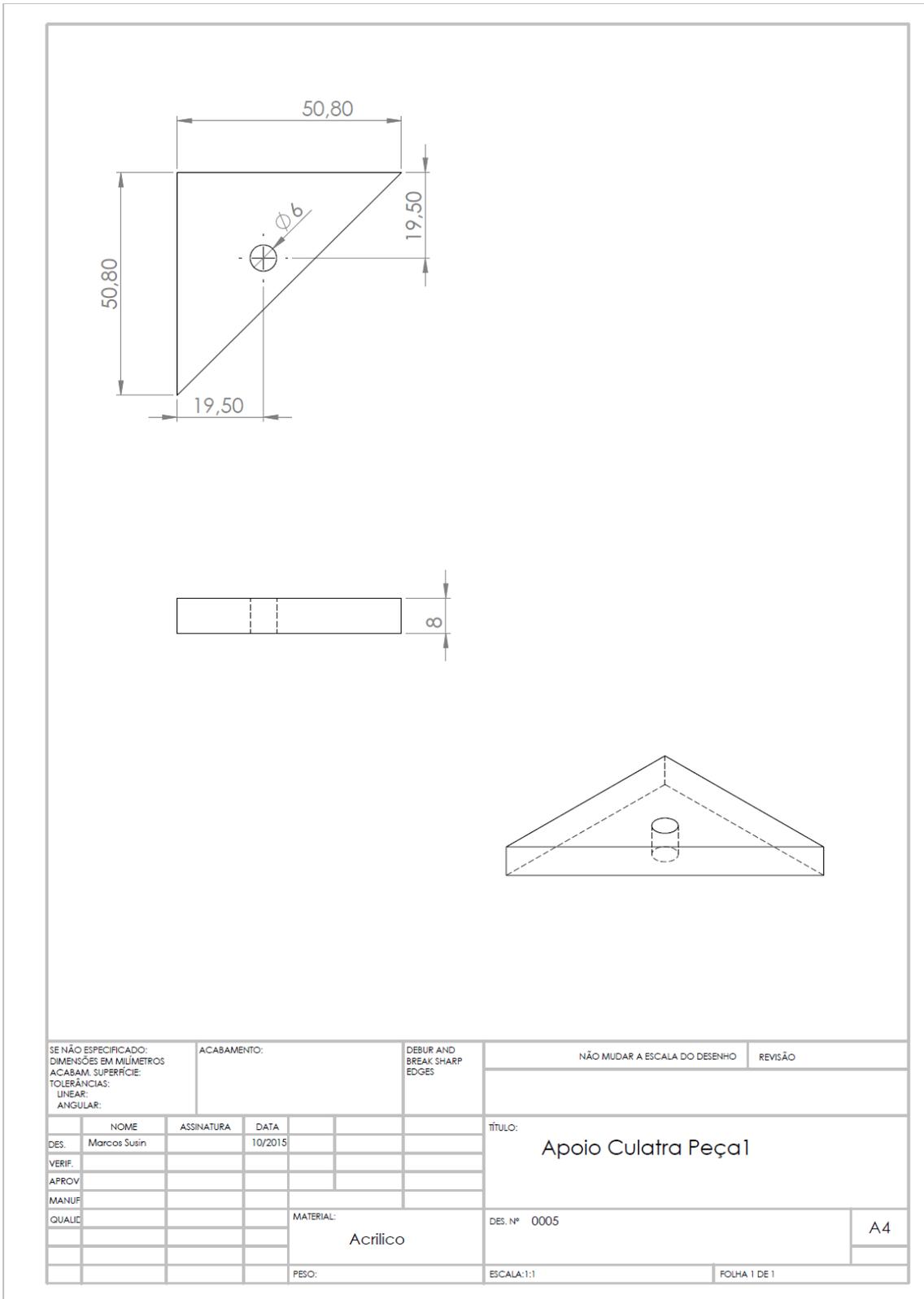
Apêndice H

Desenho do Apoio para Culatras



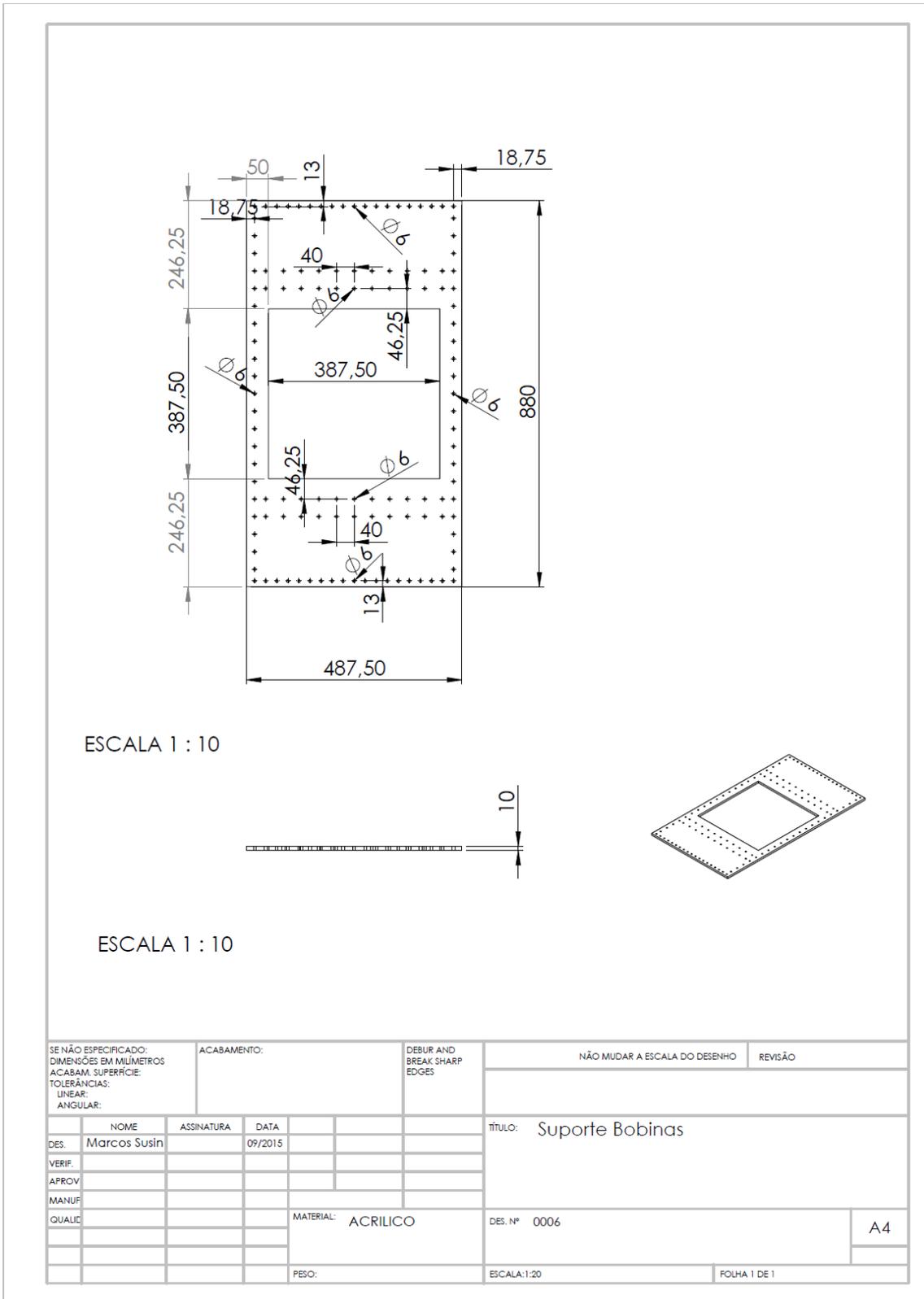
Apêndice I

Desenho do apoio culatra -peça lateral



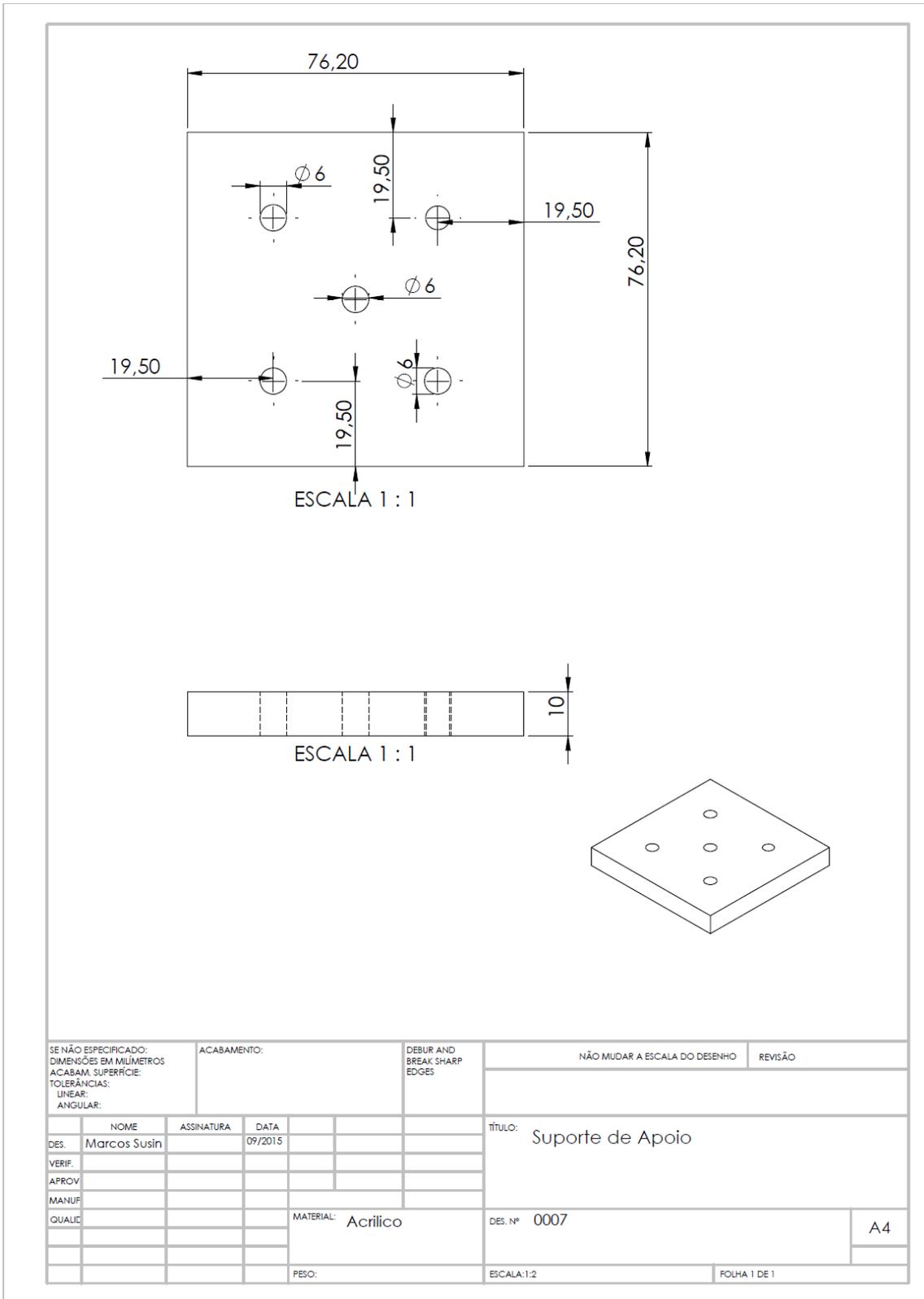
Apêndice J

Desenho da mesa para suporte de bobinas



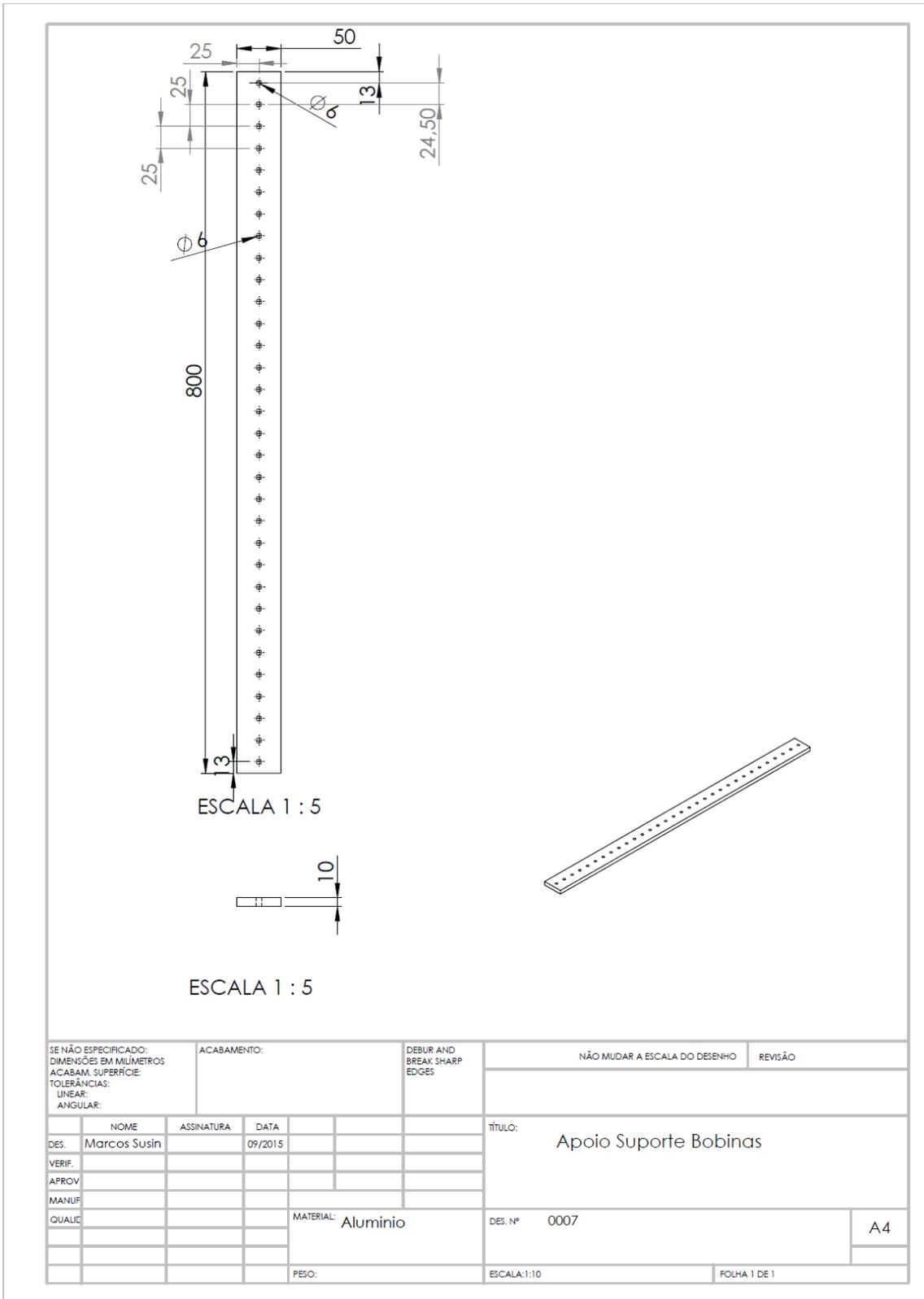
Apêndice K

Desenho do apoio mancais central



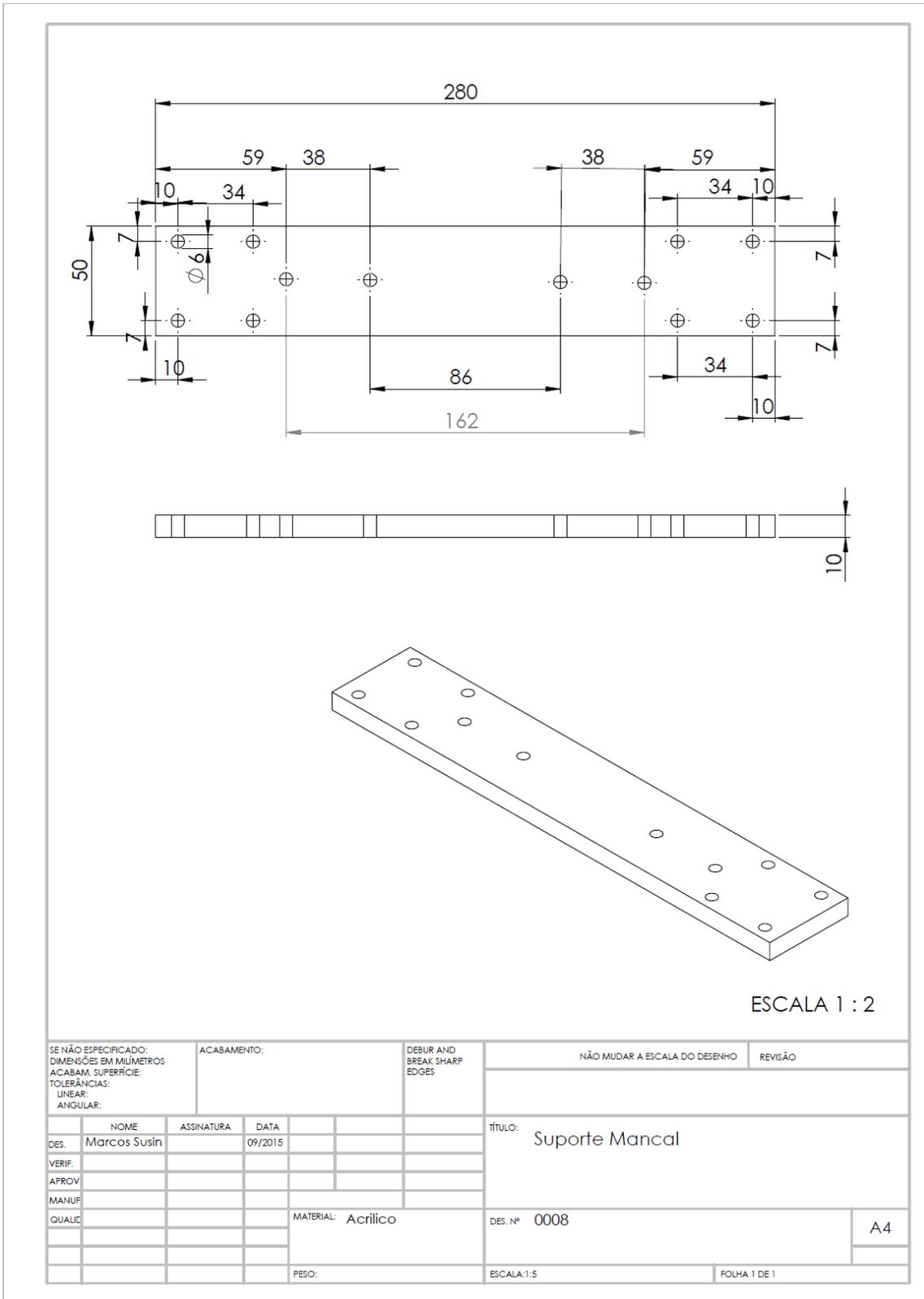
Apêndice L

Desenho do apoio para suporte de bobinas



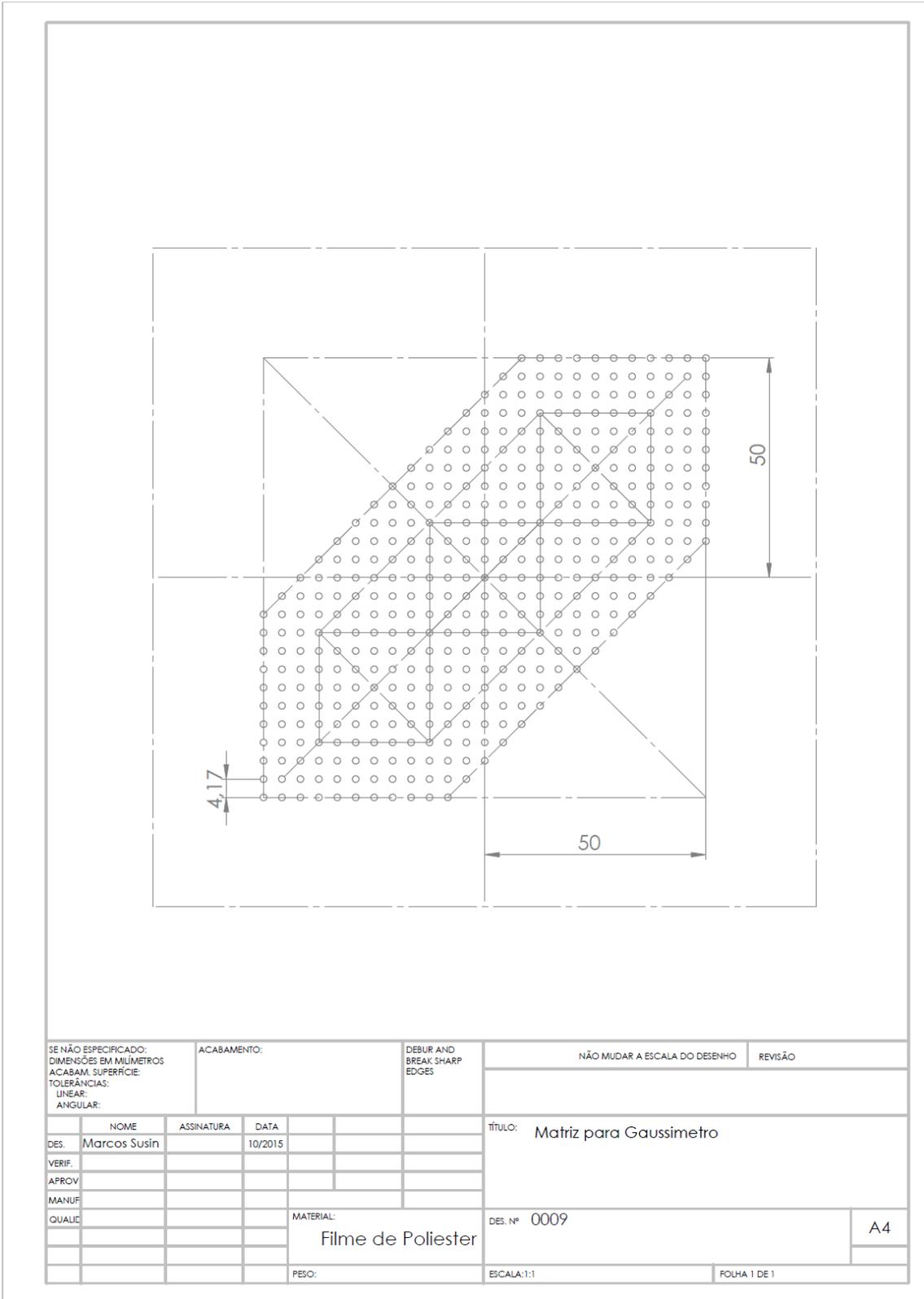
Apêndice M

Desenho do suporte mancais



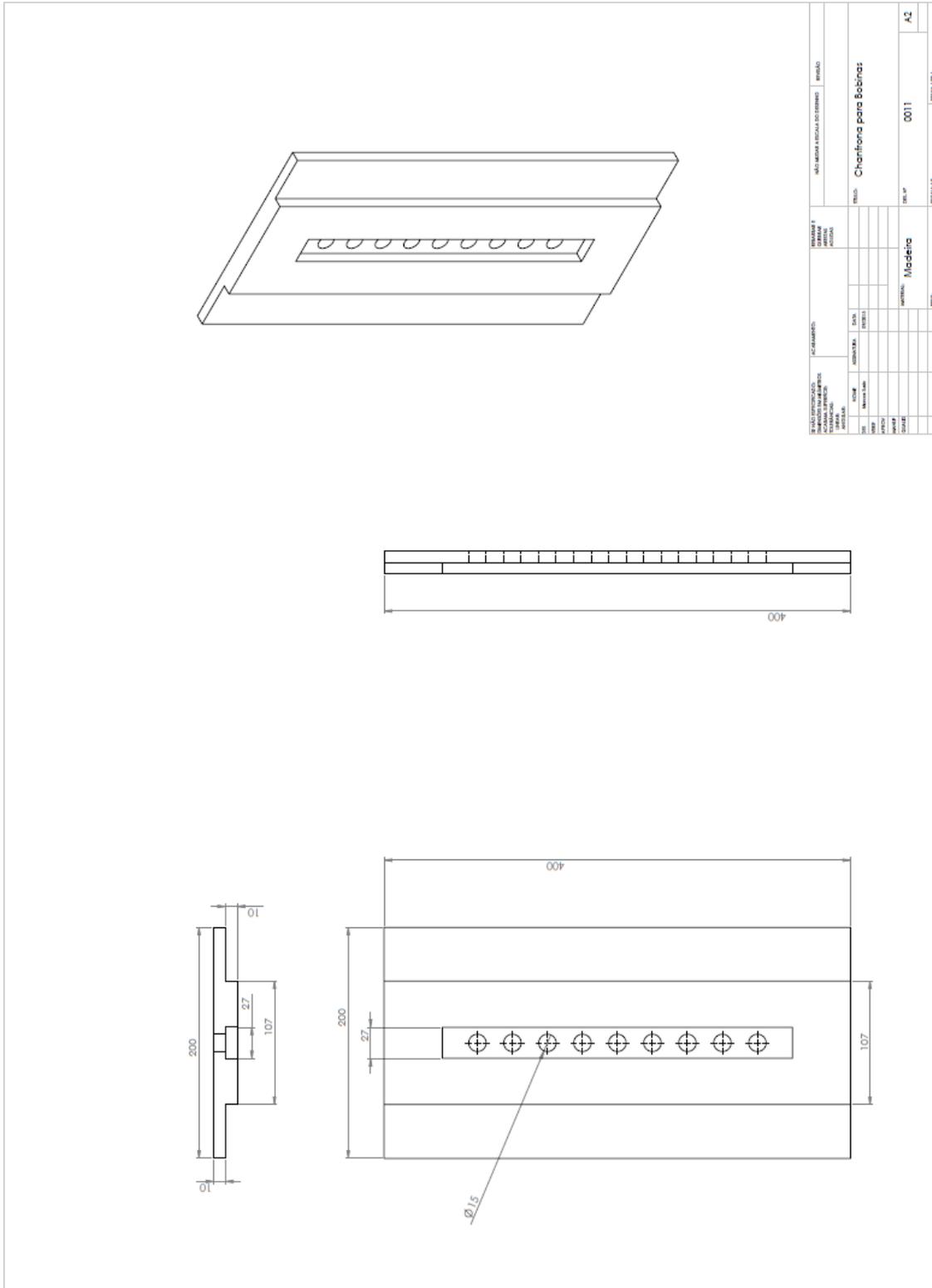
Apêndice N

Desenho do gabarito para medidas com gaussímetro



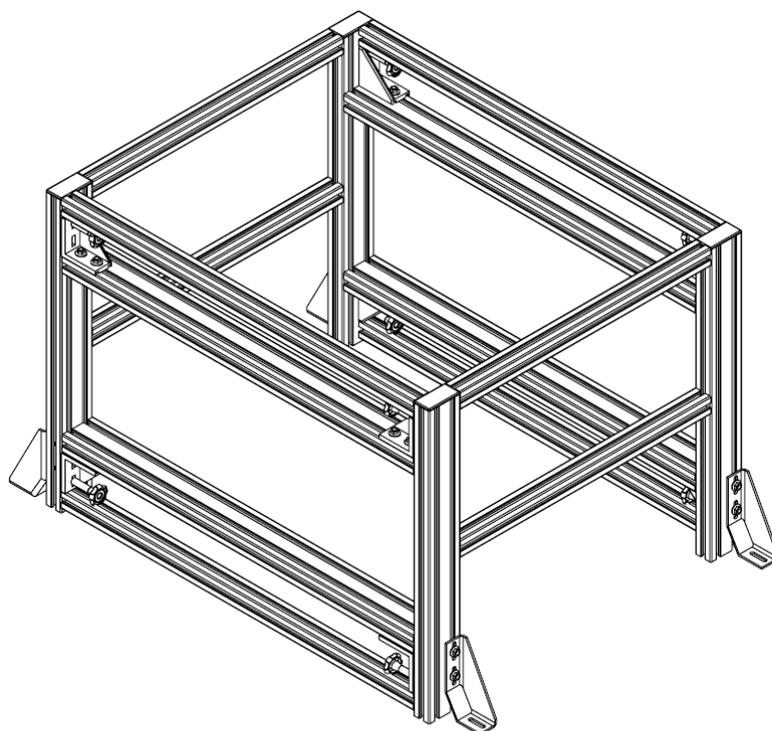
Apêndice P

Desenho da chanfrona para confecção bobina



Apêndice Q

Desenho da estrutura de suporte geral do atuador

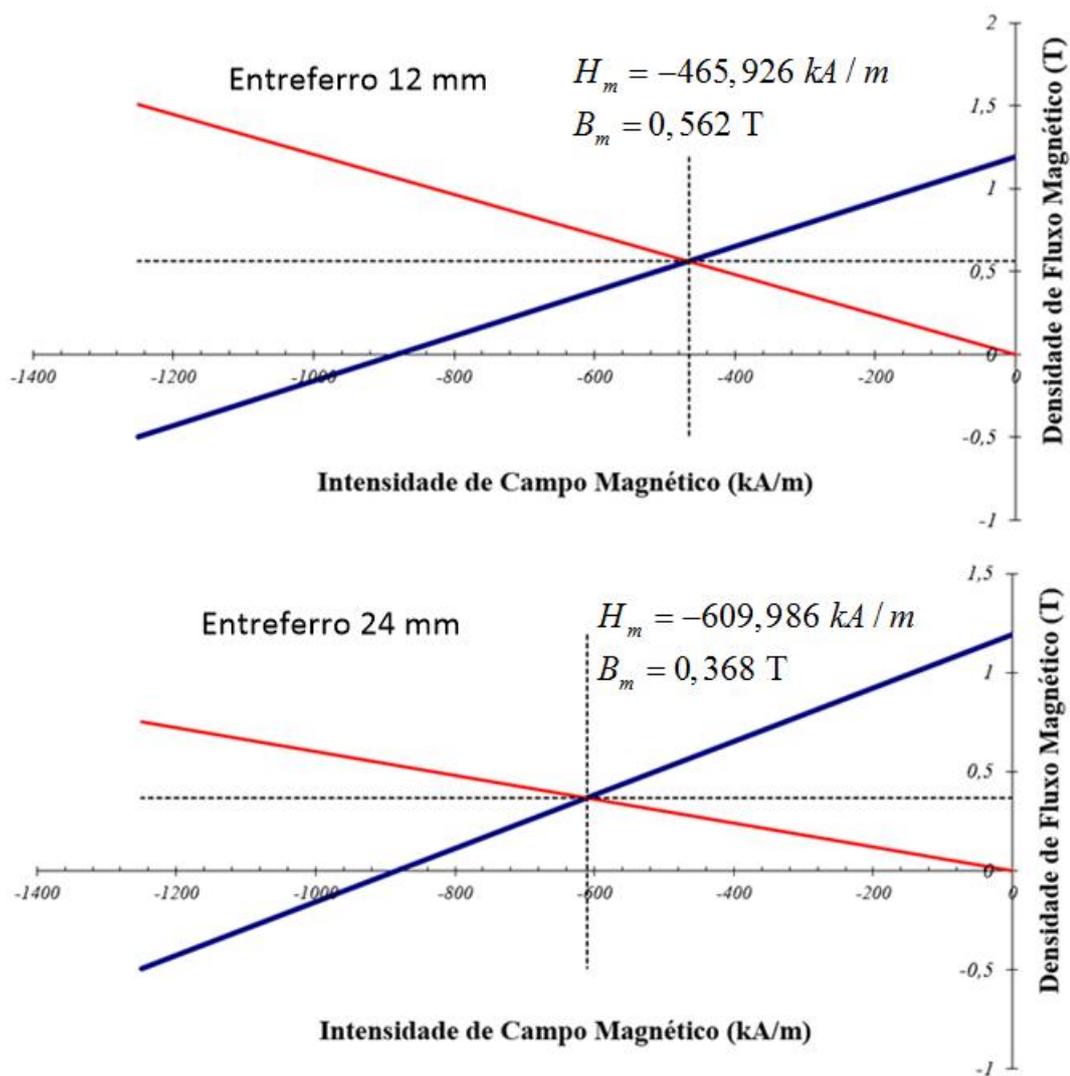


ESCALA 1 : 10

SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		NÃO MUDAR A ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
NOME		ASSINATURA		DATA		TÍTULO:			
DES.	Marcos Susin			09/2015		Estrutura de Alumínio			
VERIF.									
APROV									
MANUF									
QUALIC					MATERIAL:	DES. Nº		A4	
					Perfil de Alumínio	0012			
					PESO:	ESCALA: 1:20		FOLHA 1 DE 1	

Apêndice R

Gráfico da curva normal do ímã permanente e reta de carga com ponto de operação do ímã permanente para entreferros de 12 mm e 24 mm.



Fonte: SILVEIRA, Marília Amaral, (2003)

Apêndice S

Fluxograma das etapas do processo de prototipagem do atuador planar.

