

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM

Estudo de um  
Atuador Planar

Marilia Amaral da Silveira

Tese para obtenção do título de Doutor  
em Engenharia

Porto Alegre  
2003

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM

Estudo de um  
Atuador Planar

Marilia Amaral da Silveira,  
Mestre em Engenharia, Engenheira Eletricista

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre  
2003

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovada em sua forma final, pelo Orientador, pelo Co-Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho

Co-Orientador: Prof. Dr. Altamiro Amadeu Susin

Banca Examinadora:

Prof. Dr. João Pedro Assumpção Bastos

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich

Prof. Dr. Renato Machado de Brito

Prof. Dr. Carlos Arthur Ferreira  
Coordenador do PPGEM

Em parte, conhecemos,  
e em parte profetizamos....

Agora vemos por espelho, em enigma,  
mas então veremos face a face;  
agora conheço em parte,  
mas então conhecerei como  
também sou conhecido.

Agora, pois, permanecem a fé,  
a esperança e o amor...

I Coríntios, cap. 13

Aos meus pais, Favorino e Sophia, e ao  
Nico, por tudo o que representam para mim.  
Ao professor Ály Ferreira Flores Filho,  
por ter-me impedido de abandonar este  
trabalho antes de sua conclusão.  
To William, for bringing sunshine and  
happiness to my days.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Ály Ferreira Flores Filho, por sua valiosa e inestimável orientação, feita com sabedoria, percepção, amizade, paciência e dedicação e por sua visão, que me mostrou o caminho para um novo mundo.

Ao professor Altamiro Amadeu Susin, por sua co-orientação, por seu encorajamento e sua amizade, tão caros e fundamentais para mim.

Ao professor Roberto Petry Homrich, por sua leal e duradoura amizade, por seu incentivo, por suas sugestões e contribuições que sempre me levaram ao caminho certo.

Ao professor Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, por ser amigo, incentivador e solidário.

À professora Gládis Bordin Schuch, pelo apoio e pelo coleguismo.

Ao professor Luis Fernando Espinosa Cocian, pela amizade, pelo coleguismo e por todas as palavras de incentivo.

À professora Jane Pieruccini de Almeida, por sua amizade, por sua lealdade e seu comportamento ético.

Ao engenheiro Miguel Moreto, por sua dedicada e responsável colaboração a este trabalho, enquanto bolsista de iniciação científica.

A todos os componentes do Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia da UFRGS, pela amizade, pelo coleguismo e apoio.

A todos os amigos e colegas, pelo incentivo.

Certos autores têm a cara habilidade de expor um conteúdo de maneira a possibilitar o entendimento completo de um problema. Aos seguintes autores e seus respectivos livros, o meu mais profundo agradecimento: Nathan Ida & João P. A. Bastos – Electromagnetics and Calculation of Fields; Melvin Schwartz – Principles of Electrodynamics; e James R. Melcher – Continuum Electromechanics.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	9
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	21
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS</b> .....	22
<b>RESUMO</b> .....	30
<b>ABSTRACT</b> .....	31
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	32
1.1 O ATUADOR PLANAR.....	34
1.2 VISÃO GERAL DO TRABALHO.....	36
1.3 CONTRIBUIÇÕES DO PROJETO.....	37
<b>2 MOTORES LINEARES E DE SUPERFÍCIE</b> .....	39
2.1 BREVE HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO DOS MOTORES LINEARES E PLANARES.....	39
2.2 MOTORES PLANARES.....	42
2.3 O ATUADOR PLANAR.....	46
<b>2.3.1 Estrutura Básica do Atuador Planar</b> .....	46
<b>2.3.2 Princípio de Funcionamento</b> .....	51
<b>2.3.3 Exemplo de Operação</b> .....	58
<b>2.3.4 Comparação entre o Atuador Planar com Enrolamentos Ortogonais e Outros Dispositivos Existentes</b> .....	58
<b>3 MAGNETISMO E CIRCUITOS MAGNÉTICOS</b> .....	61
3.1 MATERIAIS MAGNÉTICOS.....	61
3.2 DEFINIÇÃO DE ALGUMAS GRANDEZAS MAGNÉTICAS.....	63
3.3 ANÁLISE DE CIRCUITOS MAGNÉTICOS CONTENDO ÍMÃS PERMANENTES.....	67
<b>3.3.1 Circuito Magnético do Atuador Planar</b> .....	71
<b>3.3.2 Características dos Materiais Magnéticos Empregados no Atuador Planar</b> .....	75
<b>4 MODELO ANALÍTICO DO ATUADOR PLANAR</b> .....	79
4.1 ANÁLISE DE CAMPOS MAGNÉTICOS.....	79
4.2 ESTUDO DE CAMPOS MAGNÉTICOS APLICADO AO ATUADOR PLANAR....	80

<b>4.2.1 Campo Magnético Produzido pelos Ímãs Permanentes</b> .....	80
4.2.1.1 <i>A Equação de Laplace em Termos do Potencial Escalar Magnético</i> .....	80
4.2.1.2 <i>A Equação de Poisson para Ímãs Permanentes em Termos do Potencial Escalar Magnético</i> .....	87
4.2.1.3 <i>Solução das Equações dos Potenciais no Entreferro e nos Ímãs Permanentes</i> .....	89
<b>4.2.2 Campo Produzido pela Reação da Armadura</b> .....	102
4.2.2.1 <i>A Equação de Poisson para a Região dos Enrolamentos em Termos do Potencial Vetor Magnético</i> .....	102
4.2.2.2 <i>A Equação de Laplace para a Região Livre de Corrente em Termos do Potencial Vetor Magnético</i> .....	109
4.2.2.3 <i>Solução das Equações para os Potenciais nos Enrolamentos e na Região Livre de Corrente</i> .....	110
<b>4.2.3 Análise do Campo Magnético Total</b> .....	121
<b>4.3 ANÁLISE DAS FORÇAS ESTÁTICAS QUE ATUAM SOBRE O CARRO DO ATUADOR PLANAR</b> .....	128
<b>4.3.1 Força Planar de Propulsão</b> .....	128
<b>4.3.2 A Força Normal</b> .....	136
<b>4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO ESTUDADO</b> .....	142
<b>5 ANÁLISE NUMÉRICA DO ATUADOR PLANAR PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS</b> .....	144
5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	144
5.2 ANÁLISE NUMÉRICA DO ATUADOR PLANAR.....	146
<b>5.2.1 Pacote Computacional MEGA 3D</b> .....	147
<b>5.2.2 Implementação do Modelo do Atuador Planar</b> .....	150
5.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	157
<b>5.3.1 Simulação 1 para o Caso 1</b> .....	158
<b>5.3.2 Simulação 7 para o Caso 1</b> .....	162
<b>5.3.3 Simulação 1 para o Caso 2</b> .....	167
<b>5.3.4 Simulação 7 para o Caso 2</b> .....	170
<b>5.3.5 Simulações de 8 a 14 para os Casos 1 e 2</b> .....	175
5.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE NUMÉRICA.....	176

<b>6 TESTES DO ATUADOR PLANAR.....</b>	<b>177</b>
6.1 MEDIÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO NO ENTREFERRO.....	177
<b>6.1.1 Medição da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro para o Caso 1.....</b>	<b>180</b>
<b>6.1.2 Medição da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro para o Caso 2.....</b>	<b>188</b>
6.2 MEDIÇÃO DAS FORÇAS QUE ATUAM SOBRE O CARRO.....	195
<b>6.2.1 Medição da Força Planar de Propulsão.....</b>	<b>195</b>
<b>6.2.2 Medição da Força Normal.....</b>	<b>202</b>
6.3 MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTO DO CARRO.....	204
<b>7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>208</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>213</b>
<b>APÊNDICE A - CARACTERÍSTICAS DE PROJETO DO ATUADOR PLANAR....</b>	<b>221</b>
<b>APÊNDICE B – ESPECIFICAÇÕES DO ATUADOR PLANAR.....</b>	<b>225</b>



## LISTA DE FIGURAS

1.1 - Mesa $xy$ composta de dois motores rotativos. ....	32
1.2 - Mesa $xy$ composta de dois motores lineares.....	32
1.3 - Fotografia do atuador planar desenvolvido.....	34
1.4 - Vista frontal do atuador planar, destacando a região do carro.....	35
2.1 - Desenho esquemático de um motor linear de indução (a) com duplo estator e (b) com estator simples [2].....	40
2.2 - Motor linear de corrente contínua, sem escovas, com dupla armadura [12] [13].....	40
2.3 - Motor linear de relutância variável com quatro fases [2].....	41
2.4 - Motor linear de passo híbrido [2].....	42
2.5 - Estrutura do motor de superfície [3].....	43
2.6 - (a) Vista geral e plano esquemático da parte móvel do motor linear planar e (b) detalhe de uma seção do motor linear [9].....	44
2.7 - Primário de um motor linear de indução com dois graus de liberdade [1].....	44
2.8 - Características construtivas do sistema de posicionamento de precisão [4].....	45
2.9 - Vista tridimensional do levitador magnético planar [27].....	46
2.10 - Atuador planar com enrolamento envolvente.....	47
2.11 – Estator do atuador planar: (a) vista superior e (b) vista lateral.....	49
2.12 – Detalhe do carro, com a culatra e os dois ímãs permanentes de NdFeB: (a) vista superior, (b) vista frontal, (c) vista lateral e (d) vista inferior.....	50
2.13 – Atuador planar em estudo: (a) vista geral, (b) sistema de suspensão composto de rolamentos lineares e trilhos, (c) detalhe do carro e (d) detalhe dos rolamentos lineares. As setas vermelhas em (c) apontam para os ímãs permanentes.....	51
2.14 – Vista esquemática bidimensional do atuador planar, indicando a localização dos enrolamentos da armadura.....	52
2.15 - Vista frontal do carro do atuador planar e sua posição relativa às fases do enrolamento $x$ da armadura que estão excitadas por corrente.....	54
2.16 – Vista tridimensional do atuador planar onde são mostradas apenas as duas fases do enrolamento $x$ da armadura localizadas sob os ímãs permanentes.....	56
2.17 - Vista tridimensional do atuador planar onde são mostradas apenas as duas fases do enrolamento $y$ da armadura localizadas sob os ímãs permanentes.....	57

2.18 - Exemplo de produção de movimento bidirecional: (a) carro em repouso, (b) movimento ao longo do eixo $x$ , (c) movimento ao longo do eixo $y$ e (d) movimento devido à excitação simultânea das fases dos enrolamentos $x$ e $y$ .....	59
3.1 – (a) Processo de fabricação do ímã permanente sinterizado e (b) processo de fabricação do ímã permanente compactado [20] [22].....	62
3.2 - Campo magnético num solenóide percorrido pela corrente $I$ [19].....	63
3.3 – (a) Bobina toroidal com núcleo de ar, (b) com núcleo de material ferromagnético e (c) núcleo toroidal de material ferromagnético magnetizado [19].....	65
3.4 - Curvas de desmagnetização de um ímã permanente [12].....	66
3.5 - Circuito magnético contendo um ímã permanente e um entreferro [22].....	69
3.6 – (a) Circuito magnético contendo um ímã permanente e uma bobina e (b) localização da reta de carga do circuito magnético em função da corrente $I$ [12].....	71
3.7 - (a) Circuito magnético simplificado do atuador planar e (b) análogo elétrico do mesmo dispositivo.....	73
3.8 - Curva de magnetização nominal do aço 1045 [73].....	75
3.9 - Curva de desmagnetização normal dos ímãs permanentes N35H de comprimento axial igual a 6,0 mm.....	76
3.10 - Curva de desmagnetização normal dos ímãs permanentes N35H de comprimento axial igual a 8,0 mm, fornecida por seu fabricante.....	77
4.1 - Geometria em estudo: (a) vista frontal e (b) vista superior. Na vista frontal apenas as fases do enrolamento $x$ que estão localizadas sob os ímãs permanentes estão destacadas.....	83
4.2 – Dimensões geométricas do modelo e formato presumível da distribuição da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro.....	83
4.3 - Modelo em estudo: divisão do modelo em regiões e fronteiras simbolizadas por $O$ , $B$ , $G$ e $P$ .....	84
4.4 – (a) Representação tridimensional da magnetização considerando os ímãs permanentes 1 e 2 e (b) gráfico da magnetização em função do eixo $x$ .....	88
4.5 – Fluxograma com o critério para a determinação do número de harmônicas ímpares consideradas para o cálculo da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético.....	94

4.6 - Gráficos do potencial escalar magnético no entreferro sob o ímã permanente $I$ em função de $x$ . Em (a), o gráfico refere-se ao caso 1 e em (b), ao caso 2. Em ambos os casos, os gráficos foram gerados a partir da equação (4.40), para $y = 25$ mm e $z = 8,5$ mm.....	95
4.7 - Gráficos da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o ímã <i>permanente</i> 1 em função <i>de</i> $x$ , para os casos 1 e 2. Os gráficos foram gerados a partir da equação (4.45), <i>para</i> $z = 8,5$ mm. Em (a) e (b), $y$ foi fixado em 5 mm, em (c) e (d), em 17 mm e em (e) e (f), em 25 mm.....	96
4.8 - Gráficos da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro calculados através da diagonal sob o carro, <i>para</i> $z = 8,5$ mm. ....	97
4.9 – Gráficos da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético em função de $x$ , obtidos na fronteira entre os ímãs permanentes e o ar. ....	98
4.10 - Gráficos tridimensionais da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, sob um ímã permanente, calculados na <i>fronteira</i> $G$ ( $z = l_g$ ) em função <i>de</i> $x$ e $y$ , resultantes da interpolação dos pontos gerados pela equação (4.45). Em (a), o gráfico refere-se ao caso 1 e em (b), ao caso 2.....	99
4.11 - Gráficos tridimensionais da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, sob um ímã permanente, calculados <i>para</i> $z = 8,5$ mm, em função <i>de</i> $x$ e $y$ , resultantes da interpolação dos pontos gerados pela equação (4.45). Em (a), o gráfico refere-se ao caso <i>1</i> e em (b), ao caso 2.....	100
4.12 - Gráficos tridimensionais da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético, sob os dois ímãs permanentes, no entreferro, em função <i>de</i> $x$ e $y$ , com $z = 8,5$ mm, resultantes da interpolação dos pontos gerados pela equação (4.45). Em (a), o gráfico refere-se ao <i>caso</i> 1 e em (b), ao <i>caso</i> 2.....	101
4.13 - Estator do atuador planar, representado apenas com duas fases do enrolamento $x$ . O vetor densidade de corrente possui apenas componente em $y$ .....	103
4.14 - Gráficos da densidade de corrente nas fases do enrolamento $x$ : (a) gráfico tridimensional e (b) gráfico bidimensional.....	105
4.15 - Vista frontal da geometria em estudo, com as condições de fronteira impostas para o modelo. As fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes estão destacadas.....	106

- 4.16 - Gráficos das componentes do vetor densidade de fluxo magnético em função da posição através do eixo  $x$ : em (a) e (c) são apresentadas as componentes  $x$  e  $z$  na região do enrolamento  $x$  no *plano*  $z = 4$  mm, respectivamente e, em (b) e (d), as *componentes*  $x$  e  $z$  na região do espaço livre de corrente no *plano*  $z = 8,5$  mm, respectivamente. Nos quatro gráficos a corrente nas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes foi considerada igual a 3,0 A..... 114
- 4.17 - Gráficos das componentes do vetor densidade de fluxo magnético em função da posição através do eixo  $x$  no plano  $z = 7,5$  mm, que corresponde à fronteira entre as duas regiões em questão: em (a) e (c) são apresentados os gráficos das componentes  $x$  e  $z$  na região do enrolamento  $x$ , e em (b) e (d), os gráficos das *componentes*  $x$  e  $z$  na região do espaço livre de corrente. Nos quatro gráficos, a corrente em cada fase do enrolamento  $x$  localizada sob um ímã permanente foi considerada igual a 3,0 A..... 115
- 4.18 - Estator do atuador planar, representado apenas com duas fases do enrolamento  $y$ . O vetor densidade de corrente possui apenas componente em  $x$ ..... 116
- 4.19 - Gráfico da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região livre de corrente, em função da posição através do eixo  $x$  no plano  $z = 8,5$  mm, considerando as fases do enrolamento  $x$  e do enrolamento  $y$ , localizadas sob os ímãs permanentes, excitadas por corrente com valor igual a 3,0 A. Os valores foram obtidos para  $y = 12,5$  mm..... 121
- 4.20 - Gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total calculados para  $z = 8,5$  mm e  $y = 17$  mm, em função de  $x$ , obtida pela equação (4.111), considerando que apenas as fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, são percorridas por uma corrente de 3 A: em (a) o gráfico refere-se ao caso 1 e em (b), ao caso 2..... 124
- 4.21 - Gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total no plano  $z = 8,5$  mm em função de  $x$ , obtida pela equação (4.111), considerando que as fases dos enrolamentos  $x$  e  $y$  são percorridas por uma corrente igual a 3 A, tendo  $y$  sido fixado em 17 mm: em (a) o gráfico refere-se ao caso 1 e, em (b), ao caso 2..... 124
- 4.22 - Gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total, obtidos pela equação (4.111), calculados através da diagonal sob o carro, para  $z = 8,5$  mm, considerando que apenas as fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, são percorridas por uma corrente de 3 A: em (a) o gráfico refere-se ao caso 1 e, em (b), ao caso 2..... 125

4.23 - Gráficos da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético total, obtidos pela equação (4.111), calculados através da diagonal sob o carro, para $z = 8,5$ mm, considerando que as duas fases do enrolamento $x$ e as duas fases do enrolamento $y$ , que estão localizadas sob os ímãs permanentes, sejam percorridas por 3,0 A: em (a) o gráfico refere-se ao caso 1 e, em (b), ao caso 2.....	125
4.24 - Gráficos tridimensionais da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro medida sob um ímã permanente no plano $z = 8,5$ mm, em função de $x$ e $y$ . Em (a) e (b) os gráficos referem-se aos casos 1 e 2, respectivamente, com as fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes percorridas por uma corrente de 3,0 A.....	126
4.25 - Gráficos tridimensionais da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro medida sob um ímã permanente no <i>plano</i> $z = 8,5$ mm, em função de $x$ e $y$ . Em (a) e (b) os gráficos referem-se aos casos 1 e 2, respectivamente, com <i>as</i> fases <i>dos</i> enrolamentos $x$ e $y$ localizadas sob os ímãs permanentes, percorridas por uma corrente de 3,0 A.....	127
4.26 - Gráfico da componente $x$ da força planar total, $F_{x1} + F_{x2}$ , calculado pela equação (4.118) em função da corrente que percorre as duas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes. Esta força provoca o movimento do carro através do <i>eixo</i> $x$ . Em (a), a força é calculada para o caso 1, e em (b), para o caso 2.....	130
4.27 - Gráfico da força planar total $F$ que atua diagonalmente sobre o carro do atuador planar, em função da circulação de corrente através das fases do enrolamento $x$ e do enrolamento $y$ localizadas sob os ímãs permanentes. Em (a) a força é calculada para o caso 1, e em (b), para o caso 2.....	131
4.28 - (a) Posição relativa de duas fases $x$ do enrolamento da armadura em relação à distribuição do fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes: (a) o carro está posicionado de forma que as duas fases estão localizadas exatamente sob os ímãs permanentes, em (b) o carro deslocou-se de 5 mm, em (c), de 12,5 mm e em (d) de 20 mm.....	133
4.29 - Gráficos da componente $x$ da força planar total calculados em função da corrente nas duas fases consideradas e do deslocamento do carro, todos para o caso 1.....	135
4.30 - Gráficos da componente $x$ da força planar total em função do deslocamento do carro a partir da origem, para os casos 1 e 2, para 3 A e 6 A.....	136

4.31 – Localização da superfície de integração utilizada para o cálculo da força normal: (a) vista frontal e (b) vista superior.....	139
4.32 – Gráficos da força normal que atua sobre o carro do atuador planar em função da corrente nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes: (a) para o caso 1 e (b) para o caso 2.....	142
5.1 - Elemento finito tridimensional.....	145
5.2 – Etapas envolvidas na técnica de análise numérica pelo MEF [12] [29].....	146
5.3 – Condutor com uma densidade de corrente $\vec{J}_s$ e a posição do ponto $P$ em relação a um elemento de volume $dV$ do mesmo condutor[19].....	148
5.4 - Detalhe da vista frontal da malha M2, com 4 elementos por nível na região dos ímãs permanentes.....	152
5.5 - Gráficos da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético em função de $x$ , medidos nos pontos do plano $z$ localizado 7,5 mm acima da superfície do núcleo da armadura, para as malhas (a) M 2, (b) M 3, (c) M 4, (d) M 5 e (e) M 6.....	154
5.6 - Malha 3D do modelo virtual do atuador planar.....	155
5.7 – Mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético para corrente nula nas fases do enrolamento da armadura: (a) vista superior com a localização do corte C-C', (b) detalhe do mapeamento 3D do carro do atuador planar, (c) mapa 2D e (d) mapa 2D correspondente dos vetores.....	160
5.8 - Gráfico da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro para $I_a = zero$ , calculado através da diagonal sob o carro, no plano $z = 8,5$ mm acima da superfície do núcleo da armadura.....	160
5.9 - (a) Mapeamento 2D da distribuição da densidade de fluxo magnético através da geometria do atuador planar para $I_a = zero$ , (b) mapa correspondente dos vetores e (c) vista superior do modelo do atuador planar com a localização do corte A-A'.....	161
5.10 - Gráficos da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o ímã permanente $I$ em função de $x$ , para $I_a = zero$ : em (a) os pontos foram tomados no plano $z = 14,5$ mm acima do núcleo da armadura e em (b), no plano $z = 13,5$ mm.....	161
5.11 - Vistas 3D do mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético do carro do atuador planar, para $I_a$ igual a zero, destacando a culatra em (a) e em (b) o carro completo. Este mapa permitiu verificar o grau de saturação magnética da culatra na sua fronteira com os ímãs permanentes.....	162

5.12 - Mapeamento do módulo da densidade de fluxo para $I_a = 6$ A nas fases do enrolamento da armadura: (a) vista superior com a localização do corte C-C', (b) detalhe do mapeamento 3D do carro do atuador planar, (c) mapa 2D e (d) mapa 2D correspondente dos vetores.....	164
5.13 - Gráfico da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro para $I_a = 6$ A, calculado através da diagonal sob o carro, no plano $z = 8,5$ mm acima da superfície do núcleo da armadura.....	164
5.14 - (a) Mapeamento 2D da distribuição da densidade de fluxo magnético através da geometria do atuador planar para $I_a = 6$ A, (b) mapa correspondente dos vetores e (c) vista superior do modelo do atuador planar com a localização do corte A-A'.....	165
5.15 – Gráficos da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o ímã permanente $I$ em função de $x$ , para $I_a = 6$ A: em (a) os pontos foram tomados no plano $z = 14,5$ mm acima do núcleo da armadura e em (b), no plano $z = 13,5$ mm.....	165
5.16 - Vistas 3D do mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético do carro do atuador planar para $I_a = 6,0$ A, destacando a culatra em (a) e em (b) o carro completo.....	166
5.17 – Gráfico da força planar de propulsão em função da corrente nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes, para o caso 1.....	166
5.18 – Gráfico da força normal em função da corrente nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes, para o caso 1. ....	166
5.19 - Mapeamento do módulo da densidade de fluxo para corrente nula nas fases do enrolamento da armadura: (a) vista superior com a localização do corte C-C', (b) detalhe do mapeamento 3D do carro do atuador planar, (c) mapa 2D e (d) mapa 2D correspondente dos vetores.....	168
5.20 - Gráfico da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro para $I_a = zero$ , calculado através da diagonal sob o carro, no plano $z = 8,5$ mm acima da superfície do núcleo da armadura.....	168
5.21 - (a) Mapa 2D da distribuição da densidade de fluxo magnético através da geometria do atuador planar, (b) vista superior do modelo utilizado para a análise do atuador planar e a localização do corte A-A' e (c) correspondente mapa dos vetores da densidade de fluxo magnético.....	169

5.22 - Gráficos da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o ímã permanente $I$ em função de $x$ , para $I_a = zero$ : em (a) os pontos foram tomados no plano $z = 12,5$ mm acima do núcleo da armadura e em (b), no plano $z = 11,5$ mm.....	169
5.23 - Vistas 3D do mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético do carro do atuador planar, destacando a culatra em (a) e em (b) o carro completo. Este mapa permitiu verificar o grau de saturação magnética da culatra na fronteira entre ela e os ímãs permanentes. ....	170
5.24- Mapeamento do módulo da densidade de fluxo para $I_a = 6$ A nas fases do enrolamento da armadura: (a) vista superior com a localização do corte C-C', (b) detalhe do mapeamento 3D do carro do atuador planar, (c) mapa 2D e (d) mapa 2D correspondente dos vetores. ....	172
5.25 - Gráfico da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro para $I_a = 6$ A, calculado através da diagonal sob o carro, no plano $z = 8,5$ mm acima da superfície do núcleo da armadura.....	172
5.26 - (a) Mapeamento 2D da distribuição da densidade de fluxo magnético através da geometria do atuador planar para $I_a = 6$ A, (b) mapa correspondente dos vetores e (c) vista superior do modelo do atuador planar com a localização do corte A-A'.....	173
5.27 - Gráficos da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o ímã permanente $I$ em função de $x$ , para $I_a = 6$ A: em (a) os pontos foram tomados no plano $z = 12,5$ mm acima do núcleo da armadura e em (b), no plano $z = 11,5$ mm.....	173
5.28 - Vistas 3D do mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético do carro do atuador planar, destacando a culatra em (a) e em (b) o carro completo, para $I_a = 6,0$ A.....	174
5.29 - Gráfico da força planar de propulsão em função da corrente nas fases do enrolamento $x$ da armadura para o caso 2.....	174
5.30 – Gráfico da força normal em função da corrente nas fases do enrolamento $x$ da armadura para o caso 2.....	174
5.31 - Gráficos da componente $x$ da força planar de propulsão em função do deslocamento do carro a partir da origem, para os casos 1 e 2, para 3 A e 6 A.....	175



6.1 – (a) Montagem para a medição da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético em pontos pré-definidos no entreferro do atuador planar e (b) telas do instrumento virtual desenvolvido para aquisição dos valores de densidade de fluxo magnético e das respectivas correntes. ....	178
6.2 - (a) Ponteira de efeito Hall utilizada para a medição dos valores de densidade de fluxo magnético. (b) Fotografia do atuador planar, destacando o gabarito utilizado para medir a componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro. O gabarito possui uma matriz de 625 pontos (25 por 25 pontos) distribuídos simetricamente no plano $xy$ . As fronteiras do gabarito, marcadas com a linha preta cheia, delimitam uma área equivalente àquela do modelo analítico utilizado no Capítulo 4.....	179
6.3 - Gráfico 3D resultante da interpolação dos pontos medidos da componente $z$ do vetor densidade de fluxo no entreferro sob o carro no plano $z = 8,5$ mm, com corrente nula nos enrolamentos da armadura, obtido através do ensaio 1, para o caso 1.....	181
6.4 – Quadrante positivo do gráfico 3D da figura 6.3.....	181
6.5 - Gráfico 3D resultante da interpolação dos pontos medidos da componente $z$ da densidade de fluxo no entreferro sob o carro no plano $z = 8,5$ mm, com $I_a = 3,0$ A nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes, obtido através do ensaio 2, para o caso 1.....	182
6.6 – Quadrante predominantemente positivo do gráfico 3D da figura 6.5.....	182
6.7 –Gráfico da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro vs. a posição através da diagonal sob o carro no plano $z = 8,5$ mm acima do núcleo da armadura, com (a) corrente nula nas fases dos enrolamentos da armadura e (b) com $I_a = 3,0$ A nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes, para o caso 1.....	184
6.8 - Gráficos da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético, medidos ao longo da linha $l_t / 2$ sob o carro ( $0 \leq x \leq l_t / 2$ ), no plano $z = 8,5$ mm, com $y$ igual a 25 mm (linha central do ímã permanente $l$ ), para o caso 1. Em (a), a corrente $I_a$ é igual a zero e em (b), $I_a = 3,0$ A nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes.....	185

6.9 - Gráficos da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético, medidos ao da longo da linha $l_t / 2$ sob o carro ( $0 \leq x \leq l_t / 2$ ), no plano $z = 8,5$ mm, com $y$ igual a 17 mm, para o caso 1. Em (a), a corrente $I_a$ é igual a zero e em (b), $I_a = 3,0$ A nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes.....	186
6.10 - Gráfico 3D resultante da interpolação dos pontos medidos da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o carro no plano $z = 8,5$ mm acima do núcleo da armadura, com corrente nula nos enrolamentos da armadura, obtido através do ensaio 3, para o caso 2. ....	189
6.11 – Quadrante positivo do gráfico 3D da figura 6.10.....	189
6.12 - Gráfico 3D resultante da interpolação dos pontos medidos da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o carro no plano $z = 8,5$ mm acima do núcleo da armadura, com $I_a = 3,0$ A nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes, obtido através do ensaio 4, para o caso 2.....	190
6.13 - Quadrante positivo do gráfico 3D da figura 6.12.....	190
6.14 –Gráfico da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro vs. a posição através da diagonal sob o carro no plano $z = 8,5$ mm, para o caso 2, com (a) corrente nula nas fases dos enrolamentos da armadura e (b) com $I_a$ igual a 3,0 A nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes.....	192
6.15 - Gráficos da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético, medidos ao da longo da linha $l_t / 2$ sob o carro ( $0 \leq x \leq l_t / 2$ ), no plano $z = 8,5$ mm, com $y$ igual a 25 mm (linha central do ímã permanente $I$ ), para o caso 2. Em (a), a corrente $I_a$ é igual a zero e em (b), $I_a$ é igual a 3,0 A nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes.....	193
6.16 - Gráficos da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético, medidos ao longo da linha $l_t / 2$ sob o carro ( $0 \leq x \leq l_t / 2$ ), no plano $z = 8,5$ mm, com $y$ igual a 17 mm, para o caso 2. Em (a), a corrente $I_a$ é igual a zero e em (b), $I_a = 3,0$ A nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes.....	194
6.17 – Gráfico da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro vs. a posição através da diagonal sob o carro no plano $z = 8,5$ mm, para o caso 2, com $I_a = 3,0$ A nas fases do enrolamento $x$ e do enrolamento $y$ localizadas sob os ímãs permanentes.....	195

6.18 - Montagem para a medição da força planar de propulsão que atua sobre o carro do atuador planar. A célula de carga $F_x$ é utilizada para a medição da componente $F_x$ , produzida pela excitação das fases do enrolamento $x$ , que estão localizadas sob os ímãs permanentes. A célula de carga $F_y$ é utilizada para a medição da componente $F_y$ , produzida pela excitação das fases do enrolamento $y$ , que estão localizadas sob os ímãs permanentes.....	198
6.19 - Telas do instrumento virtual empregado para a aquisição dos valores de força e de corrente.....	199
6.20 - Fotografia da montagem para a medição da força planar de propulsão.....	199
6.21 - (a) Gráfico da componente $x$ da força planar de propulsão, $F_x$ , em função da corrente aplicada a cada uma das fases do enrolamento $x$ e (b) gráfico da força que atua sobre o carro, resultante da excitação por corrente das fases dos enrolamentos $x$ e $y$ . Ambos os gráficos referem-se ao caso 1.....	200
6.22 – (a) Gráfico da componente $x$ da força planar de propulsão, $F_x$ , em função da corrente aplicada a cada uma das fases do enrolamento $x$ e (b) gráfico da força planar que atua sobre o carro, resultante da excitação por corrente das fases dos enrolamentos $x$ e $y$ . Ambos os gráficos referem-se ao caso 2.....	201
6.23 – (a) Montagem para a medição da força normal e (b) fotografia da montagem para medição da força normal. ....	203
6.24 - Gráfico da força normal que atua sobre o carro, em função da corrente aplicada às fases do enrolamento $x$ da armadura localizadas sob os ímãs permanentes, para o caso 1.....	204
6.25 - Gráfico da força normal que atua sobre o carro, em função da corrente aplicada às fases do enrolamento $x$ da armadura localizadas sob os ímãs permanentes, para o caso 2.....	204
6.26 - Esquema de montagem para a medição de deslocamento do carro do atuador planar.....	205
6.27 – (a) Detalhe do sistema de detecção de posição do carro e (b) localização da régua reticulada e do sensor de posição em relação ao atuador planar.....	206

6.28– (a) Gráfico do deslocamento do carro em função da corrente aplicada às duas fases localizadas sob os ímãs permanentes, para dois tempos de excitação diferentes. Em (b) o gráfico mostra o comportamento do tempo de deslocamento em função da corrente.....	207
7.1 – Correntes parasitas em uma chapa de material ferromagnético: (a) ímã permanente aproximando-se da região $A$ e (b) ímã permanente afastando-se da região $A$ .....	211
7.2 – Novo atuador planar proposto, com enrolamento envolvente e núcleo de material SMC.....	212
AA.1 – Ponto de operação dos ímãs permanentes do atuador planar, definido pela intercessão entre a curva de desmagnetização normal do ímã permanente N35H e a reta de carga definida pela equação (AA.1).....	222
AA.2 – Representação esquemática do circuito magnético principal do atuador planar. O enrolamento da armadura é formado por camadas intercaladas de condutores do enrolamento $x$ e do enrolamento $y$ .....	224

## LISTA DE TABELAS

2.1 – Características do atuador planar.....	48
3.1 – Características de projeto do atuador planar para o caso 1.....	74
3.2 – Valores da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético medidos no ponto localizado 0,5 mm acima do centro da superfície polar de cada ímã permanente.....	78
5.1 - Modelos utilizados para avaliar a sensibilidade da malha.....	152
5.2 - Valores da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético medidos na diagonal sob o carro, para avaliar a sensibilidade da malha.....	152
5.3 – Características finais do modelo utilizado para as simulações do atuador planar, que correspondem à malha M 5, com três níveis adicionais em relação à malha apresentada na tabela 5.1.....	155
5.4 - Descrição das análises realizadas com o protótipo virtual do atuador planar, tanto para o caso 1, como para o caso 2.....	156
6.1 - Descrição dos ensaios para a medição da densidade de fluxo magnético no entreferro do atuador planar.....	180
6.2 - Valores da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, obtidos pelas medições (ensaios 1 e 2), pelo método analítico e pela análise numérica.....	187
6.3 - Valores da componente $z$ do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, obtidos pelas medições (ensaios 3, 4 e 5), pelo método analítico e pela análise numérica.....	196
6.4 – Descrição dos ensaios para a medição da força estática planar de propulsão.....	199
6.5 – Valores da sensibilidade média da força planar obtidos através da análise numérica (Tensor de Força de Maxwell), através da equação da Força de Lorentz (4.118) e através das medições.....	202
6.6 - Medidas de deslocamento do carro.....	207
AB.1 – Componentes do Estator.....	225
AB.2 – Componentes do Sistema de Suspensão.....	225
AB.3 – Componentes do Carro.....	225
AB.4 – Especificações Gerais.....	225

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

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

$A_{b_x}$  - Componente  $x$  do potencial vetor magnético na fase do enrolamento  $y$ , gerada por  $J_x$   
[Wb/m]

$A_{b_y}$  - Componente  $y$  do potencial vetor magnético na fase do enrolamento  $x$ , gerada por  $J_y$   
[Wb/m]

$A_{g_x}$  - Componente  $x$  do potencial vetor magnético na região do espaço livre de corrente  
[Wb/m]

$A_{g_y}$  - Componente  $y$  do potencial vetor magnético na região do espaço livre de corrente  
[Wb/m]

$A_x$  - Componente  $x$  do potencial vetor magnético gerado por  $J_x$  [Wb/m]

$A_y$  - Componente  $y$  do potencial vetor magnético gerado por  $J_y$  [Wb/m]

$A_z$  - Componente  $z$  do potencial vetor magnético gerado por  $J_z$  [Wb/m]

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

$B_{b_x}$  - Componente  $x$  do vetor densidade de fluxo magnético total na região dos enrolamentos,  
produzida pelas correntes nos enrolamentos da armadura [T]

$B_{b_{xy}}$  - Componente  $y$  do vetor densidade de fluxo magnético na região das fases do  
enrolamento  $y$  produzida por  $J_x$  [T]

$B_{b_{xz}}$  - Componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região das fases do  
enrolamento  $y$  produzida por  $J_x$  [T]

$B_{b_y}$  - Componente  $y$  do vetor densidade de fluxo magnético total na região dos enrolamentos,  
produzida pelas correntes nos enrolamentos da armadura [T]

$B_{b_{yx}}$  - Componente  $x$  do vetor densidade de fluxo magnético na região das fases do  
enrolamento  $x$  produzida por  $J_y$  [T]

$B_{b_{yz}}$  - Componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região das fases do  
enrolamento  $x$  produzida por  $J_y$  [T]

$B_{b_z}$  - Componente  $z$  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]
- $B_{gb_x}$  - Componente  $x$  do vetor densidade de fluxo magnético total na região livre de corrente, produzida pelas correntes nos enrolamentos da armadura [T]
- $B_{gb_y}$  - Componente  $y$  do vetor densidade de fluxo magnético total na região livre de corrente, produzida pelas correntes nos enrolamentos da armadura [T]
- $B_{gb_z}$  - Componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total na região livre de corrente, produzida pelas correntes nos enrolamentos da armadura [T]
- $\vec{B}_{g_N}$  - Vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o ímã permanente  $N$ , produzida pelos ímãs permanentes [T]
- $B_{gT_z}$  - Componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total no entreferro [T]
- $B_{g_x}$  - Componente  $x$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, produzida pelos ímãs permanentes [T]
- $B_{g_x_y}$  - Componente  $y$  do vetor densidade de fluxo magnético na região do espaço livre de corrente produzida por  $J_x$  [T]
- $B_{g_x_z}$  - Componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região do espaço livre de corrente produzida por  $J_x$  [T]
- $B_{g_y}$  - Componente  $y$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro produzida pelos ímãs permanentes [T]
- $B_{g_y_x}$  - Componentes  $x$  do vetor densidade de fluxo magnético na região do espaço livre de corrente produzida por  $J_y$  [T]
- $B_{g_y_z}$  - Componentes  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região do espaço livre de corrente produzida por  $J_y$  [T]
- $B_{g_z}$  - Componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro produzida pelos ímãs permanentes [T]
- $B_{g_z_N}$  - 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/m<sup>3</sup>]

- $B_m$  - Densidade de fluxo no ímã permanente [T]
- $B_{n,m}$  - Conjunto dos coeficientes de uma série dupla de Fourier
- $\vec{B}_{pm}$  - Vetor densidade de fluxo magnético na região dos ímãs produzido por esses mesmos ímãs permanentes [T]
- $B_{pm_x}$  - Componente  $x$  do vetor densidade de fluxo na região dos ímãs permanentes, produzida por esses mesmos ímãs permanentes [T]
- $B_{pm_y}$  - Componente  $y$  do vetor densidade de fluxo magnético na região dos ímãs permanentes, produzida por esses mesmos ímãs permanentes [T]
- $B_{pm_z}$  - Componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região dos ímãs permanentes, produzida por esses mesmos ímãs permanentes [T]
- $\vec{B}_r$  - Vetor densidade de fluxo remanente ou remanência [T]
- $C_f$  - Coeficiente de espraio do fluxo magnético no entreferro
- $\vec{D}$  - Vetor densidade de fluxo elétrico ou indução elétrica [ $C/m^2$ ]
- $\vec{E}$  - 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 Lorentz) [N]
- $F_{Az}$  - 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]

$H_{gx_y}$  - Componente  $y$  do vetor intensidade de campo magnético na região do espaço livre de corrente, produzida por  $J_x$  [A/m]

$H_{gy_x}$  - Componente  $x$  do vetor intensidade de campo magnético na região do espaço livre de corrente, produzida por  $J_y$  [A/m]

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

$H_m$  - Intensidade de campo magnético do ímã permanente [A/m]

$\vec{H}_{mg}$  - Vetor intensidade de campo magnético produzido pelo magnetismo induzido nos materiais ferromagnéticos [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]

$\vec{H}_s$  - Vetor intensidade de campo magnético gerado pelas correntes conhecidas em uma região [A/m]

$I$  - Corrente elétrica [A]

$I_a$  - Corrente em uma fase do enrolamento da armadura [A]

$\vec{J}$  - Vetor densidade de corrente [A/m<sup>2</sup>]

$\vec{J}_N$  - Vetor densidade de corrente nas fases dos enrolamentos da armadura, localizadas sob o ímã permanente  $N$  [A/m<sup>2</sup>]

$J_x$  - Componente  $x$  do vetor densidade de corrente em uma fase do enrolamento  $y$  [A/m<sup>2</sup>]

$J_{xN}$  - Componente  $x$  do vetor densidade de corrente em uma fase do enrolamento  $y$ , localizada sob o ímã permanente  $N$  [A/m<sup>2</sup>]

$J_y$  - Componente  $y$  do vetor densidade de corrente em uma fase do enrolamento  $x$  [A/m<sup>2</sup>]

$J_{yc}$  - Valor corrigido da densidade de corrente por fase [A/m<sup>2</sup>]

$J_{yN}$  - Componente  $y$  do vetor densidade de corrente em uma fase do enrolamento  $x$ , localizada sob o ímã permanente  $N$  [A/m<sup>2</sup>]

$J_o$  - Valor de pico das componentes  $x$  e  $y$  do vetor densidade de corrente nos enrolamentos da armadura [ $A/m^2$ ]  
 $J_{ox}$  - Valor de pico da componente  $x$  do vetor densidade de corrente [ $A/m^2$ ]  
 $J_{oy}$  - Valor de pico da componente  $y$  do vetor densidade de corrente [ $A/m^2$ ]  
 $\vec{J}_s$  - Vetor densidade de corrente em uma região [ $A/m^2$ ]  
 $L_f$  - Fator de dispersão do fluxo magnético  
 $\vec{M}$  - Vetor intensidade de magnetização ou magnetização [ $A/m$ ]  
 $M_{n,m}$  - Conjunto de coeficientes da série dupla de Fourier que representa a componente  $z$  do vetor magnetização.  
 $\vec{M}_r$  - Vetor magnetização residual ou remanente [ $A/m$ ]  
 $M_z$  - Componente  $z$  do vetor intensidade de magnetização [ $A/m$ ]  
 $M_o$  - Módulo do vetor magnetização residual [ $A/m$ ]  
 $N$  - Índice relacionado com cada um dos ímãs permanentes do carro, com  $N = 1$  para o ímã permanente 1 e 2 para o ímã permanente 2  
 $N_{af}$  - Número de condutores de uma fase do enrolamento  $x$  da armadura  
 $N_b$  - Número de espiras de um enrolamento  
 $S$  - Superfície que envolve inteiramente um corpo sobre o qual forças estão atuando [ $m^2$ ]  
 $T$  - Período de uma série de Fourier  
 $\vec{T}$  - Tensor de Força de Maxwell [ $N/m^2$ ]  
 $V_N$  - 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  $N$  [ $m^3$ ]  
 $d\vec{S}$  - Vetor superfície normal à superfície  $S$   
 $i$  - 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 4.1, correspondendo 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 médio da região em ferro [m]

$l_g$  - Comprimento do entreferro [m]

$l_{g1}$  - Comprimento do entreferro 1 do atuador planar [m]

$l_{g2}$  - Comprimento do entreferro 2 do atuador planar [m]

$l_m$  - Comprimento axial do ímã permanente [m]

$l_t$  - Grandeza definida pela figura 4.1, correspondendo ao comprimento, tanto em  $x$ , quanto em  $y$ , do modelo em estudo [m]

$q$  - Carga elétrica [C]

$r$  - Raio vetor de um elemento [m]

$\bar{r}$  - Vetor unitário na direção do raio  $r$  [m]

$s$  - Área de uma região onde está estabelecida uma densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$  [m<sup>2</sup>]

$s_a$  - Área da seção transversal ao fluxo de corrente ocupada pelos condutores de uma fase do enrolamento  $x$  [m<sup>2</sup>]

$s_{ac}$  - Valor corrigido da área transversal ao fluxo de corrente no enrolamento da armadura [m<sup>2</sup>]

$s_{af}$  - Área da seção de um condutor [m<sup>2</sup>]

$s_g$  - Área da superfície transversal ao fluxo magnético em cada um dos entreferros [m<sup>2</sup>]

$s_m$  - Área da superfície polar do ímã permanente [m<sup>2</sup>]

$\bar{v}$  - Vetor velocidade de uma carga elétrica [m/s]

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

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

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

$\gamma$  - 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]

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

$\mu$  - Permeabilidade magnética de um determinado material [H/m]

$\mu_m$  - Permeabilidade magnética dos ímãs permanentes [H/m]

$\mu_r$  - Permeabilidade magnética relativa

$\mu_o$  - Permeabilidade magnética do vácuo [H/m]

$\rho$  - Densidade de carga [C/m<sup>3</sup>]

$\chi$  - Suscetibilidade magnética

$\sigma$  - Condutividade elétrica do condutor [ $\Omega^{-1}m^{-1}$ ]

$\phi$  - Fluxo magnético [Wb]

$\phi_d$  - Fluxo magnético disperso [Wb]

$\phi_{Fe}$  - Fluxo magnético no ferro de um circuito magnético [Wb]

$\phi_g$  - Fluxo magnético no entreferro [Wb]

$\phi_m$  - Fluxo magnético produzido pelo ímã permanente [Wb]

$\phi_r$  - Potencial escalar reduzido [Wb]

$\psi$  - Potencial escalar magnético [A]

$\psi_g$  - Potencial escalar magnético no entreferro [A]

$\psi_{pm}$  - Potencial escalar magnético na região dos ímãs permanentes [A]

$\mathfrak{R}_{eq}$  - Relutância equivalente do circuito magnético do atuador planar [Ae/Wb]

$\mathfrak{R}_{fe1}$  - Relutância do núcleo da armadura do atuador planar [Ae/Wb]

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

$\mathfrak{R}_{g1}$  - Relutância do entreferro localizado sob o ímã permanente 1 do atuador planar [Ae/Wb]

$\mathfrak{R}_{g2}$  - Relutância do entreferro localizado sob o ímã permanente 2 do atuador planar [Ae/Wb]

$\mathfrak{F}_m$  - Força magnetomotriz total produzida pela soma de  $\mathfrak{F}_{m1}$  e  $\mathfrak{F}_{m2}$ , respectivamente a fmm produzida pelo ímã permanente 1 e a fmm produzida pelo ímã permanente 2 [Ae]

$\nabla$  - Operador nabla, que em coordenadas retangulares é igual a  $\frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$

## RESUMO

Um novo atuador planar eletromagnético multifase foi investigado. Este tipo de atuador pode ser utilizado em sistemas que requeiram movimento bidirecional sobre o plano como, por exemplo, em máquinas operatrizes industriais. O dispositivo em estudo possui uma armadura plana, estacionária, sem ranhuras e um carro com mobilidade planar. O núcleo da armadura é composto de uma chapa de material ferromagnético macio, em torno da qual estão montados os dois enrolamentos da armadura, que são ortogonais entre si. Cada enrolamento está dividido em seções ou fases. O carro, que possui dois ímãs permanentes de NdFeB de alto produto energético, está mecanicamente conectado a um sistema de suspensão, composto de rolamentos lineares e de trilhos, que permitem o seu deslocamento sobre a superfície da armadura, com dois graus de liberdade. Quando os ímãs permanentes estão localizados sobre as fases do enrolamento da armadura energizado com corrente, uma força eletromagnética planar de propulsão atuará sobre o carro, provocando seu deslocamento paralelamente à superfície da armadura. O atuador planar foi modelado analítica e teoricamente, com vistas a prever seu comportamento estático. O primeiro protótipo construído foi testado com a finalidade de avaliar suas características estáticas de funcionamento e de validar os modelos analítico e numérico. Os valores de densidade de fluxo no entreferro, de força normal e de força planar de propulsão, obtidos através dos ensaios, apresentaram uma boa aproximação em relação aos valores obtidos através dos modelos teóricos. Tanto nos modelos teóricos, como no protótipo construído, foram avaliados dois casos distintos: no caso 1 foram utilizados no carro ímãs permanentes de 6,0 mm de comprimento axial e no caso 2, ímãs permanentes de 8,0 mm de comprimento axial. Os testes indicaram que a sensibilidade média do atuador planar para o caso 1 é de 3,61 N/A e para o caso 2 é de 5,37 N/A, quando as duas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, foram percorridas por corrente.

## ABSTRACT

A novel multiphase electromagnetic planar actuator was investigated. That kind of actuator can be used on applications that require bi-directional movement over a plane, e.g. tooling machines and others. The actuator under study has a stationary slotless plane armature and a mover with mobility over a plane. The armature core is a slotless iron slab. The stator has multiphase armature windings placed in such a way that two orthogonal windings are produced. Each winding is made up by independent sections or phases. The wireless mover, that has two NdFeB permanent magnets, is attached to a suspension structure with rails and linear bearings that enable bi-directional motion over the armature plane, with two degrees of freedom. When the permanent magnets are located over excited winding phases, an electromagnetic planar force (propulsion force) will be created on the mover and that pushes the latter accordingly. The planar actuator was modeled analytical and numerically with the purpose of foreseeing its static performance. The first prototype was constructed and tested in order to compare its behavior with the theoretical results gathered by numerical simulations and analytical method and to get more information that would aid the improvement of its design. Tests for measurement of static forces and flux density were carried out and showed a good agreement to the theoretical ones. As in the theoretical study, as in the tests, they were analyzed two cases: in the case 1 they were employed in the mover permanent magnets 6.0-mm large and in the case 2, permanent magnets 8.0-mm large. The tests indicated that the mean sensitivity of the planar actuator for the case 1 is 3.61 N/A and for the case 2, 5.37 N/A, when the two  $x$ -winding phases located under the permanent magnets were driving with current.

## 1 INTRODUÇÃO

Várias aplicações na indústria exigem movimento de translação de partes móveis sobre um plano, em duas direções através dos eixos  $x$  e  $y$ . Usualmente, para produzir movimento sobre o plano, são empregadas as mesas  $xy$ , compostas por dois motores rotativos ou por dois motores lineares, dispostos conforme mostram as figuras 1.1 e 1.2, respectivamente. Em ambas as figuras, o movimento sobre o plano, com dois graus de liberdade, é obtido através do acionamento simultâneo e sincronizado dos dois motores.

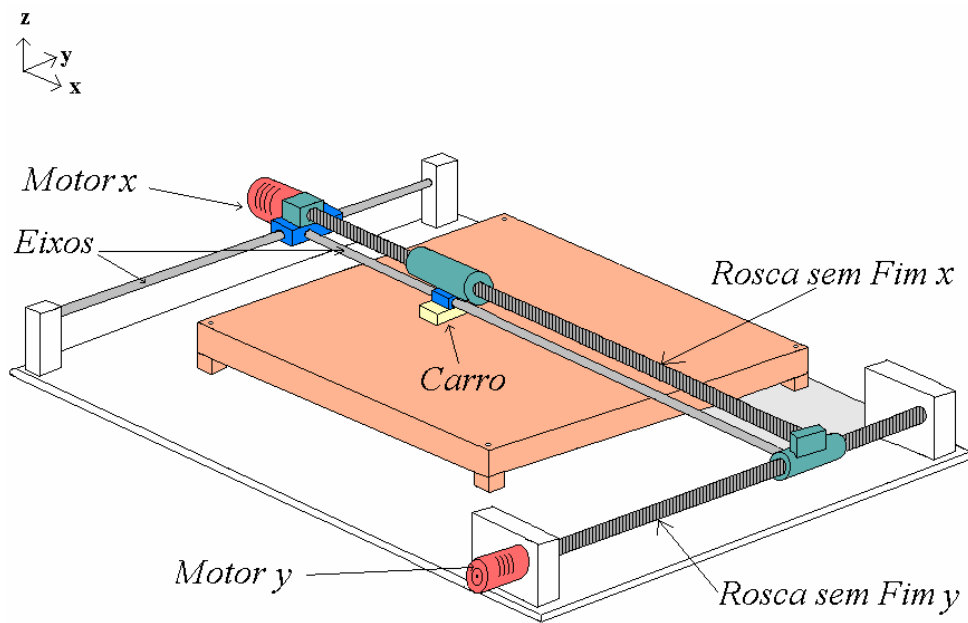


Figura 1.1 - Mesa  $xy$  composta de dois motores rotativos.

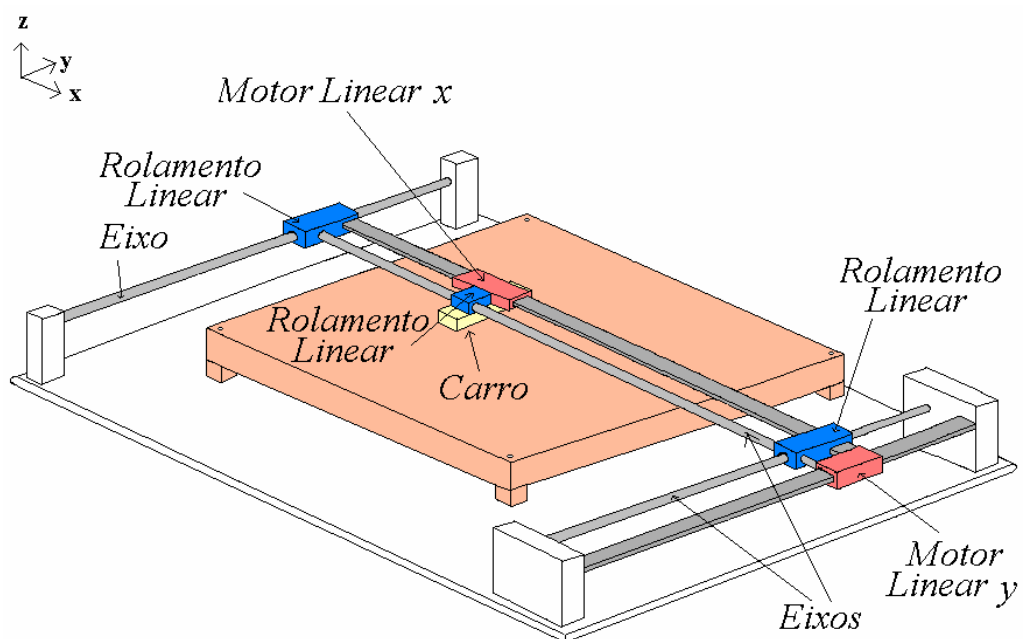


Figura 1.2 - Mesa  $xy$  composta de dois motores lineares.



Na figura 1.1 cada um dos dois motores desenvolve movimento rotativo, transformado em movimento linear através de um conversor mecânico. Um dos motores propiciará movimento através do eixo  $x$  e o outro, através do eixo  $y$ . Na figura 1.2, o movimento linear é produzido diretamente através de cada um dos motores lineares: um dos motores será responsável pelo movimento através do eixo  $x$  e o outro, através do eixo  $y$  [17]. Novamente o movimento sobre o plano é obtido pela ação combinada dos dois dispositivos de tração.

Nos motores planares, ou motores de superfície, o movimento sobre o plano pode ser obtido diretamente através de um único dispositivo de tração, denominado de carro, que desenvolve movimento sobre uma superfície, normalmente por ação eletromagnética. Nos últimos anos, tem-se verificado um aumento do número de pesquisas em torno dos motores planares para uso em periféricos para computadores e para aplicações na indústria, como, por exemplo, em máquinas de controle numérico.

Este trabalho foi inteiramente desenvolvido no Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia – LMEAE, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e teve os seguintes objetivos:

- estudar uma nova proposta de atuador planar eletromagnético, que desenvolvesse movimento sobre o plano em duas direções, a partir de um único dispositivo de tração;
- desenvolver e projetar o atuador planar em estudo, com definição de sua topologia e de suas características de projeto;
- modelar numericamente o comportamento estático do atuador planar através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Para isso, foram desenvolvidos modelos para análise numérica, com o objetivo de estudar o comportamento estático dos campos magnéticos envolvidos e das forças que atuam sobre o carro do atuador planar;
- desenvolver modelos analíticos a partir das equações dos potenciais magnéticos, para a análise estática do atuador planar. Através dos modelos analíticos foram geradas equações que descrevem o comportamento do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro e das forças que atuam sobre o carro do atuador planar;
- implementar o atuador planar estudado, com a construção de um primeiro protótipo;

- avaliar a performance estática do atuador planar construído, através de testes que caracterizaram o comportamento do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro e das forças que atuam sobre o carro do atuador planar;

- validação dos resultados gerados pelos modelos analítico e numérico através da comparação com os resultados obtidos a partir dos testes realizados com o atuador planar construído.

## 1.1 O ATUADOR PLANAR

A figura 1.3 mostra uma fotografia do Atuador Planar construído. Ele possui uma armadura plana estacionária e um carro. O carro está mecanicamente acoplado a um sistema de suspensão, composto por trilhos e rolamentos lineares.

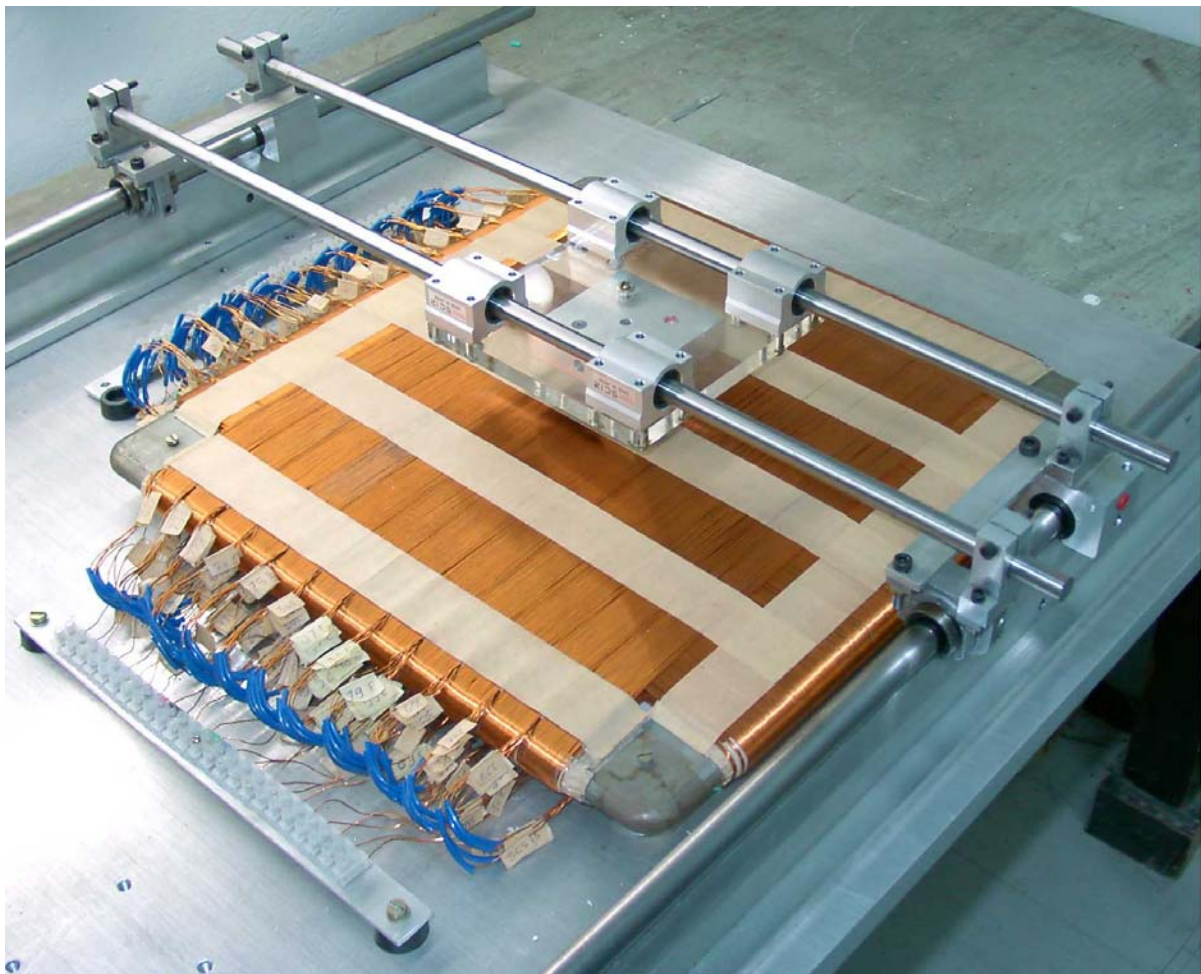


Figura 1.3 - Fotografia do atuador planar desenvolvido.

A figura 1.4 mostra uma vista frontal do atuador planar, destacando a região do carro. Na armadura estão localizados dois enrolamentos ortogonais entre si, denominados de  $x$  e  $y$ . Cada enrolamento está dividido em 12 segmentos colocados em torno de um núcleo de material ferromagnético macio, plano e não ranhurado. Cada segmento é denominado de fase e todos são eletricamente independentes entre si. O carro possui dois ímãs permanentes de Neodímio-Ferro-Boro, de alto produto energético. Os ímãs permanentes são unidos, através de suas superfícies superiores, por uma culatra de material ferromagnético macio, que propicia um caminho de baixa relutância para o fluxo magnético dos ímãs permanentes no trecho do circuito magnético correspondente ao carro. Duas placas de material não magnético unem o carro ao sistema de suspensão. Este último é formado por dois trilhos e por quatro rolamentos lineares por eixo, que propiciam ao carro movimento bidirecional.

O atuador planar desenvolve movimento sobre o plano, com dois graus de liberdade. A força planar de propulsão que age sobre o carro é produzida por ação eletromagnética, ou seja, pela interação entre as correntes aplicadas nos enrolamentos da armadura e o fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes. De acordo com a Lei de Lorentz, uma força eletromagnética atuará sobre o carro sempre que seus ímãs permanentes interagirem com as correntes elétricas impostas aos enrolamentos da armadura. Excitando adequadamente os enrolamentos  $x$  e  $y$  pode-se modificar a posição do carro no plano.

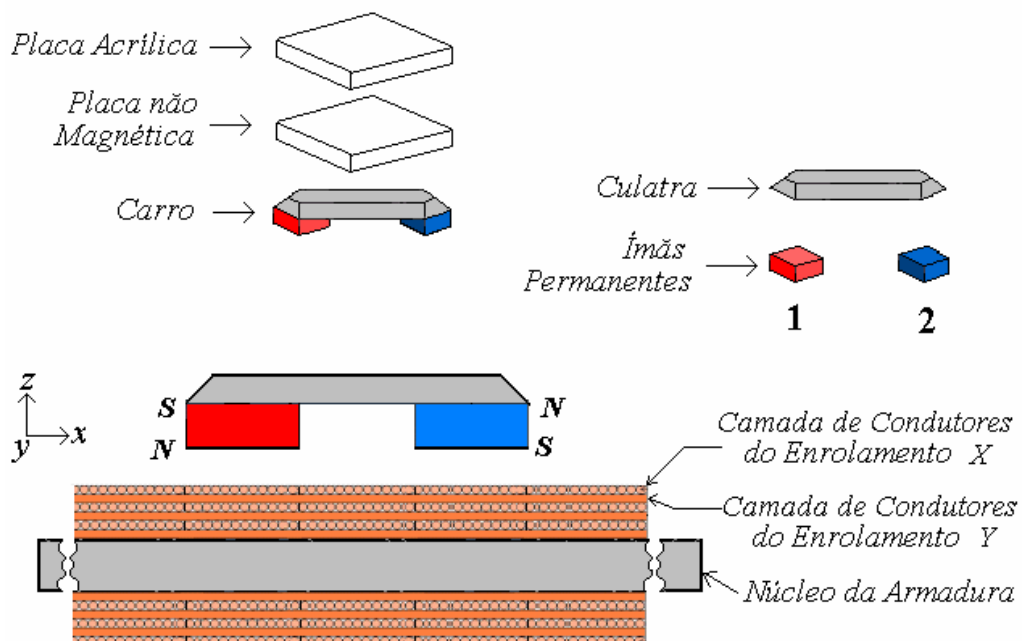


Figura 1.4 - Vista frontal do atuador planar, destacando a região do carro.

O atuador planar desenvolvido foi analisado teoricamente, através do Método dos Elementos Finitos e através de técnicas analíticas. Os resultados teóricos foram confrontados com os resultados obtidos através de testes realizados com o protótipo construído. Com relação ao circuito magnético do atuador planar, duas situações diferentes foram analisadas e ensaiadas para o mesmo protótipo: carro com dois ímãs permanentes de 6 mm de comprimento axial e entreferro de 14 mm de comprimento (caso 1) e carro com dois ímãs permanentes de 8 mm de comprimento axial e entreferro de 12 mm de comprimento (caso 2). Desta forma, primeiramente o atuador planar foi ensaiado com ímãs permanentes de comprimento igual a 6 mm, e, em uma segunda etapa, estes ímãs permanentes foram substituídos por outros de comprimento igual a 8 mm, e os ensaios foram então repetidos. Em ambas as situações, o atuador planar foi ensaiado para a caracterização do comportamento da distribuição do fluxo magnético no entreferro e das forças estáticas que atuam sobre seu carro. Na geração das informações obtidas através dos modelos teóricos, os valores de densidade de fluxo magnético e das forças envolvidas foram calculados em situações equivalentes àsquelas dos ensaios, com vistas a comparar e validar os modelos numérico e analítico.

## 1.2 VISÃO GERAL DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em sete capítulos. O capítulo 2 principia com um breve histórico da evolução dos motores lineares, chegando até os motores planares. O capítulo finaliza com a apresentação do atuador planar em estudo, enfocando suas características construtivas e de funcionamento.

No capítulo 3 é feita uma revisão dos principais conceitos referentes ao eletromagnetismo aplicados a este trabalho. O capítulo enfoca, principalmente, a análise de circuitos contendo ímãs permanentes.

No capítulo 4 são desenvolvidos os modelos analíticos que descrevem o comportamento da distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro do atuador planar e das forças estáticas que atuam sobre seu carro.

Os resultados da análise numérica estática pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) estão apresentados no capítulo 5. São apresentados e analisados os

mapeamentos de densidade de fluxo magnético na estrutura do protótipo virtual, e os valores de força obtidos através do Tensor de Força de Maxwell.

No capítulo 6 são apresentados os resultados dos testes realizados no atuador planar com o objetivo de caracterizar seu comportamento estático. Os resultados das medições de densidade de fluxo magnético no entreferro e das forças normal e de propulsão são apresentados e comparados aos valores analíticos e numéricos.

O capítulo 7 apresenta as conclusões do estudo do atuador planar, baseadas nas informações apresentadas nos capítulos 4, 5 e 6, e as sugestões para trabalhos futuros envolvendo este dispositivo.

Um ponto importante a ser destacado é quanto à divulgação dos resultados produzidos durante todas as etapas de estudo do atuador planar, tanto nacional quanto internacionalmente. Os artigos relacionados a este trabalho foram apresentados em várias conferências de destaque, principalmente internacionais. Até a presente data, este trabalho gerou 33 publicações, sendo 08 resumos nacionais [33] [34] [41] [44] [56] [64] [65] [66], 04 *digests/abstracts* internacionais [49] [54] [67] [71], 04 artigos completos publicados em anais de eventos nacionais [37] [50] [55] [63], 13 artigos completos publicados em anais de congressos internacionais [36] [38] [39] [40] [43] [45] [46] [47] [48] [52] [57] [68] [69], 02 artigos completos publicados em revistas nacionais indexadas [35] [42] e 02 artigos completos publicados na *Transactions on Magnetics* do *IEEE* [53] [72]. O pedido de depósito de patente do atuador planar, categoria inovação tecnológica, foi depositado no INPI em maio de 1999 [58]. Toda essa produção serviu para o aperfeiçoamento do trabalho em função das contribuições técnicas recebidas.

### 1.3 CONTRIBUIÇÕES DO PROJETO

Ao longo do processo de desenvolvimento do atuador planar foram estudados novos materiais magnéticos e novas topologias empregadas na construção de motores planares [26] [51]. Com o objetivo de prever o comportamento do atuador planar, foram empregados métodos para a modelagem analítica e técnicas de simulação através do Método dos Elementos Finitos. Foram utilizados produtos e processos oriundos de novas tecnologias, que podem ser aplicados ao desenvolvimento de outros dispositivos

eletromagnéticos. O emprego de ímãs de NdFeB tornou viável o desenvolvimento do atuador planar, pois, por serem de elevado produto energético, compensaram o efeito desmagnetizante de um longo entreferro. O estudo e a expansão de seu emprego em máquinas elétricas pode propiciar o surgimento de novos modelos construtivos, mais compactos e de maior eficiência.

A utilização de técnicas de simulação eletromagnética, através de métodos computacionais que empregam o Método dos Elementos Finitos, permite que seja feita uma análise do comportamento estático e dinâmico de dispositivos eletromagnéticos. No caso do atuador planar, os resultados oriundos de sua análise numérica mostraram-se bastante próximos daqueles obtidos nos seus testes em laboratório. Os modelos analíticos desenvolvidos podem ser adequados a geometrias semelhantes, constituindo-se em uma ferramenta importante para a previsão do comportamento estático de dispositivos eletromagnéticos. Finalmente, o principal produto deste trabalho foi o desenvolvimento de um dispositivo com características construtivas inéditas, que realiza movimento sobre o plano a partir de um único dispositivo de tração, e que pode vir a ser empregado em processos industriais.

## 2 MOTORES LINEARES E DE SUPERFÍCIE

Motores que desenvolvem diretamente movimento ao longo de um deslocamento linear são denominados motores lineares, enquanto que aqueles que desenvolvem movimento sobre o plano são denominados de motores de superfície, motores  $xy$  ou motores planares [1]. Basicamente, um motor planar é composto de um estágio móvel montado sobre uma superfície estática de formato plano. O estágio móvel movimenta-se sobre a superfície estática, apresentando movimentos de translação em duas direções (motores com dois graus de liberdade). Será visto nos dispositivos apresentados a seguir, que, dependendo de suas características construtivas e de operação, os mesmos poderão apresentar também movimentos de rotação e de levitação.

### 2.1 BREVE HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO DOS MOTORES LINEARES E PLANARES

Os primeiros motores elétricos foram desenvolvidos há mais de 170 anos [2]. Os motores elétricos que desenvolvem movimento linear surgiram na primeira metade do século XIX, havendo referências à patente de um projeto, datada de 1841 [1].

Embora os primeiros motores lineares já fossem conhecidos no início do século XX, sua aplicação em maior escala ocorreu a partir do final dos anos sessenta do mesmo século, sendo que, a partir do final da década de setenta, verificou-se um aumento significativo do número de pesquisas na área e, conseqüentemente, da aplicação desses motores em diversos setores da indústria e da informática [2]. A partir de 1980 cresceram as referências sobre novos motores de superfície em geral [3] [4] [5] [6], e sobre motores  $xy$  desenvolvidos a partir do motor de Sawyer [7] [8] [9] [10].

Motores lineares síncronos e de indução passaram a ser considerados em transporte em alta velocidade. A figura 2.1(a) mostra o desenho esquemático de um motor linear de indução com duplo estator e a figura 2.2(b), com estator simples.

A construção e o princípio de operação de um motor linear síncrono é similar ao seu equivalente rotativo. O motor possui ímãs permanentes ou enrolamento de campo. Esses motores podem ter enrolamentos de campo supercondutores. Este tipo de motor vem sendo utilizado no acionamento de trens MAGLEV de alta velocidade [2].

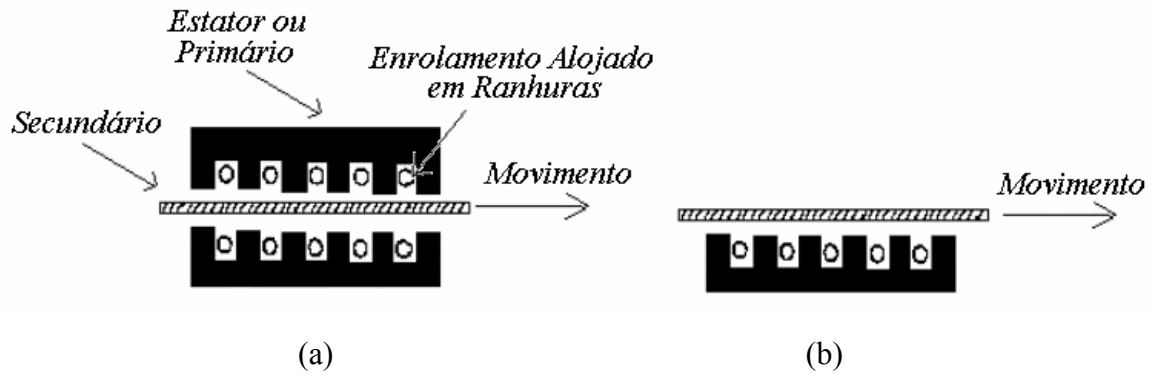


Figura 2.1 - Desenho esquemático de um motor linear de indução (a) com duplo estator e (b) com estator simples [2].

Os motores lineares de corrente contínua possuem o enrolamento de armadura excitado por corrente contínua. Existem várias formas construtivas. Entre elas, o motor de corrente contínua homopolar, com dupla armadura e sem escovas [12] [13]. Trata-se de um motor linear com cinco ímãs permanentes de NdFeB, que produzem o fluxo de excitação. O enrolamento da armadura é duplo, e cada uma de suas bobinas é montada em torno de um núcleo em forma de barra, sem ranhuras. Cada bobina é composta de seções, que podem ser excitadas de forma independente. A estrutura onde estão montados os enrolamentos da armadura e a parte móvel é feita de aço doce recozido. A figura 2.2 ilustra este tipo de motor.

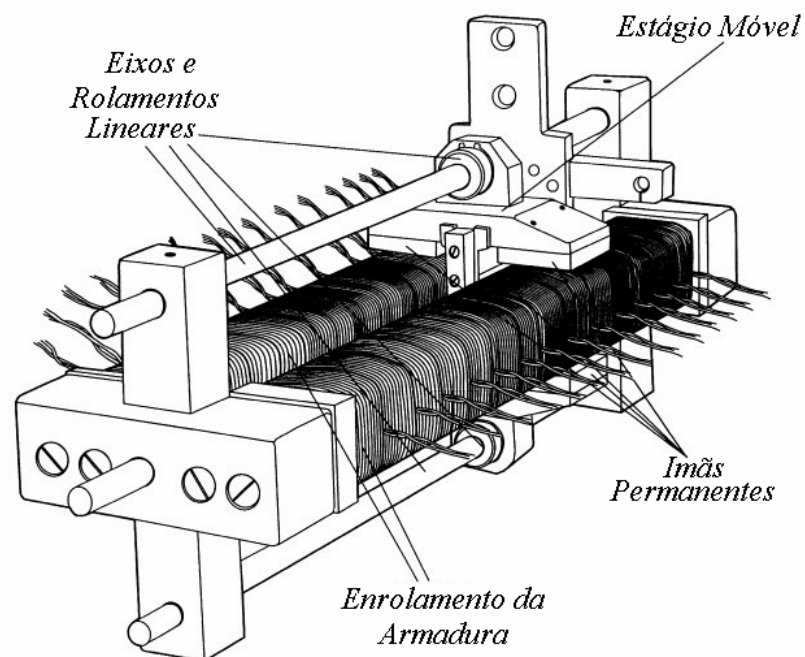


Figura 2.2 - Motor linear de corrente contínua, sem escovas, com dupla armadura [12] [13].



Os motores lineares de passo são largamente utilizados na indústria de periféricos para computadores. Sua principal característica de funcionamento é converter uma seqüência de pulsos em uma seqüência de movimentos, que ocorrem na forma de passos lineares, iguais ao número de pulsos. São dispositivos simples, precisos, de fácil controle, possuindo, como fator limitante uma baixa eficiência em termos de potência, não operando satisfatoriamente com cargas mecânicas pesadas.

Os dois principais tipos de motores lineares de passo são o motor de relutância variável e o motor híbrido [2]. O motor com relutância variável opera baseado no princípio da variação de relutância do circuito magnético ao longo da direção do movimento. A figura 2.3 mostra um motor linear de relutância variável com quatro fases.

O motor linear de passo híbrido possui, em seu primário, ímãs permanentes e enrolamentos alojados em um núcleo de material ferromagnético. Este motor caracteriza-se por operar com passos extremamente pequenos. A figura 2.4 mostra um motor linear de passos híbrido. O motor possui duas fases, A e B. Cada fase está enrolada em torno de um núcleo de material ferromagnético, que possui duas colunas, cada uma com três dentes localizados em oposição aos dentes do secundário. Motores com essas características construtivas e de funcionamento têm sido a base para o desenvolvimento da maior parte dos motores planares existentes, e são conhecidos por motores de Sawyer [2].

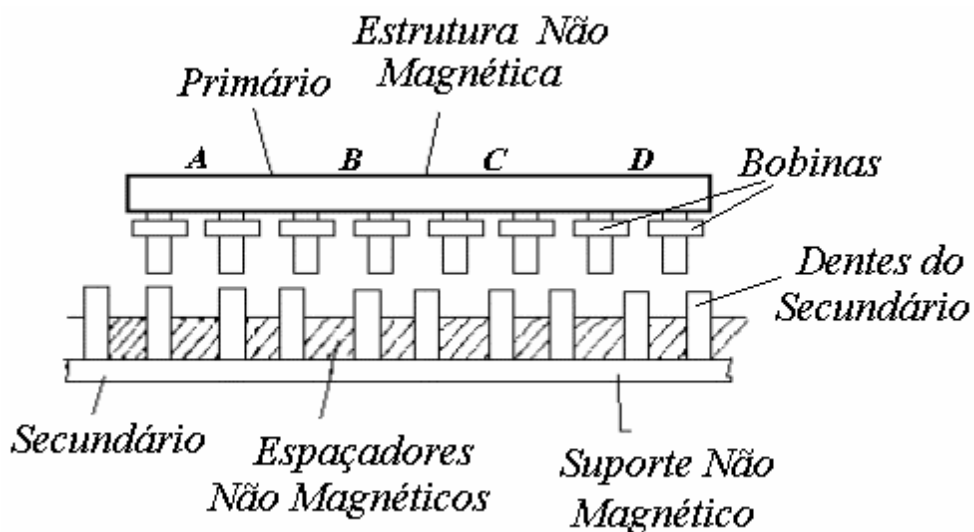


Figura 2.3 - Motor linear de relutância variável com quatro fases [2].

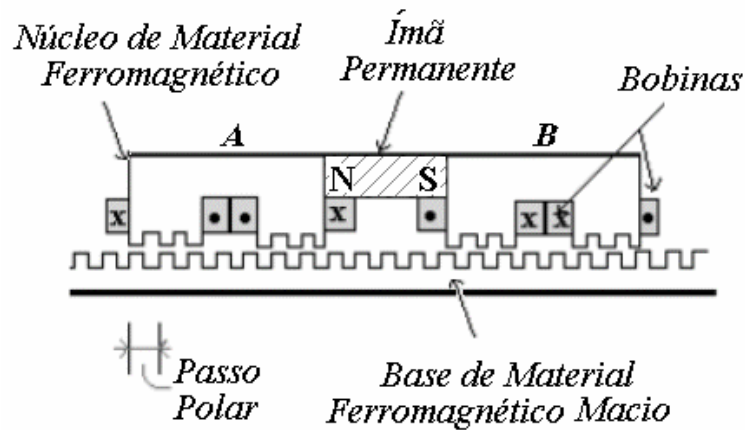


Figura 2.4 - Motor linear de passo híbrido [2].

## 2.2 MOTORES PLANARES

Motores planares são dispositivos eletromagnéticos que produzem movimento sobre um plano, com no mínimo dois graus de liberdade, sendo também utilizados como atuadores. Atuadores planares desenvolvem movimento sobre um plano, ao longo de uma pequena trajetória, e possuem aplicação principalmente em máquinas de controle numérico e em periféricos para microcomputadores.

Na figura 2.5 apresenta-se um motor de superfície [3] [15] [16]. Trata-se de um dispositivo constituído de um estator, formado por uma base de ferro, sobre a qual são montados ímãs permanentes de NdFeB. Os ímãs permanentes são montados sobre a chapa de ferro com suas superfícies polares arranjadas em forma de grade, de maneira que as polaridades de todos os pólos adjacentes sejam opostas. Desta forma, ao lado de um pólo sul, sempre haverá um pólo norte, e vice-versa. A parte móvel tem o formato de um carro, possuindo um conjunto de rolamentos que possibilita o seu movimento tanto na direção  $x$ , quanto na direção  $y$ . Este carro tem uma estrutura de baquelite, que suporta um número par de bobinas. Cada bobina é enrolada em torno de um núcleo de material ferromagnético. Condutores elétricos interligam o carro ao sistema de alimentação das bobinas.

Grande parte dos motores planares desenvolvidos estão baseados no motor de Sawyer (U. S. Patent 3,376,578, April 1968). Esse tipo de motor desenvolve movimento de translação sobre uma superfície plana, ao longo dos eixos  $x$  e  $y$ , e, em determinados tipos construtivos, movimentos de rotação (dispositivos com três graus de liberdade) [9].

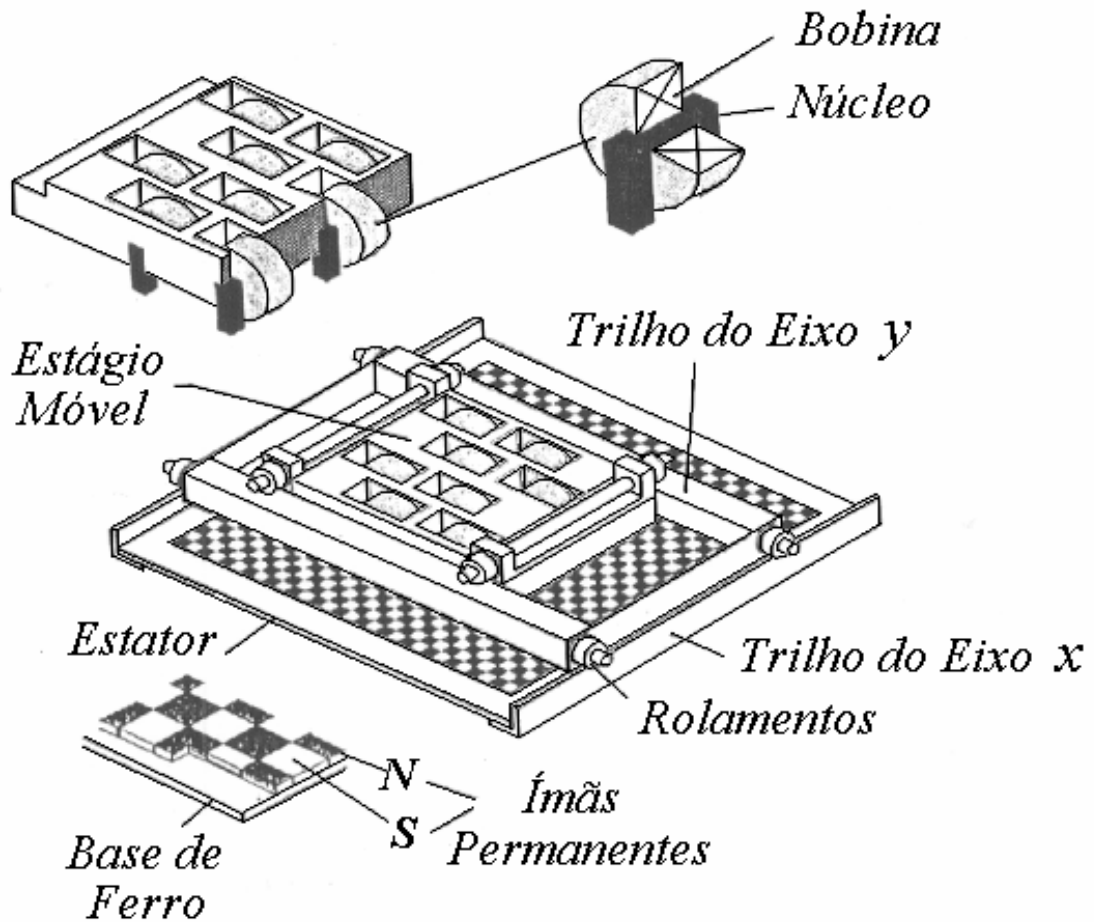


Figura 2.5 - Estrutura do motor de superfície [3].

A figura 2.6(a) mostra um desenho esquemático de um dispositivo baseado no Motor de Sawyer. O arranjo usual combina quatro seções de motores lineares, integrantes da parte móvel do motor, que produzem força e torque no plano. Todas as quatro seções de um motor são idênticas. Cada uma delas é formada por dois núcleos de material ferromagnético macio em forma de E, dispostos lado a lado, conforme mostra a figura 2.6(b).

A figura 2.7 mostra o desenho do primário de um motor linear de indução, com dois graus de liberdade. O primário é formado de uma estrutura dentada, de forma plana, com ranhuras ao longo da superfície, tanto na direção  $x$ , quanto na direção  $y$ . No interior das ranhuras são alojados os enrolamentos primários, normalmente polifásicos. Esses enrolamentos possuem bobinas que são perpendiculares entre si. Através do ajuste da corrente de excitação, o secundário, constituído de uma chapa, é movimentado para qualquer ponto sobre o plano  $xy$  [1].

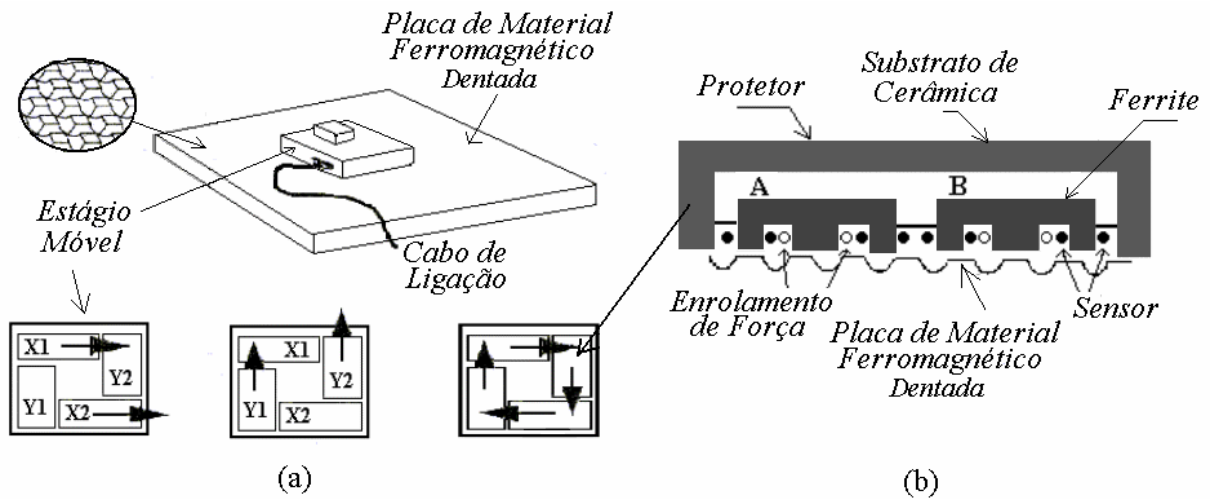


Figura 2.6 - (a) Vista geral e plano esquemático da parte móvel do motor linear planar e (b) detalhe de uma seção do motor linear [9].

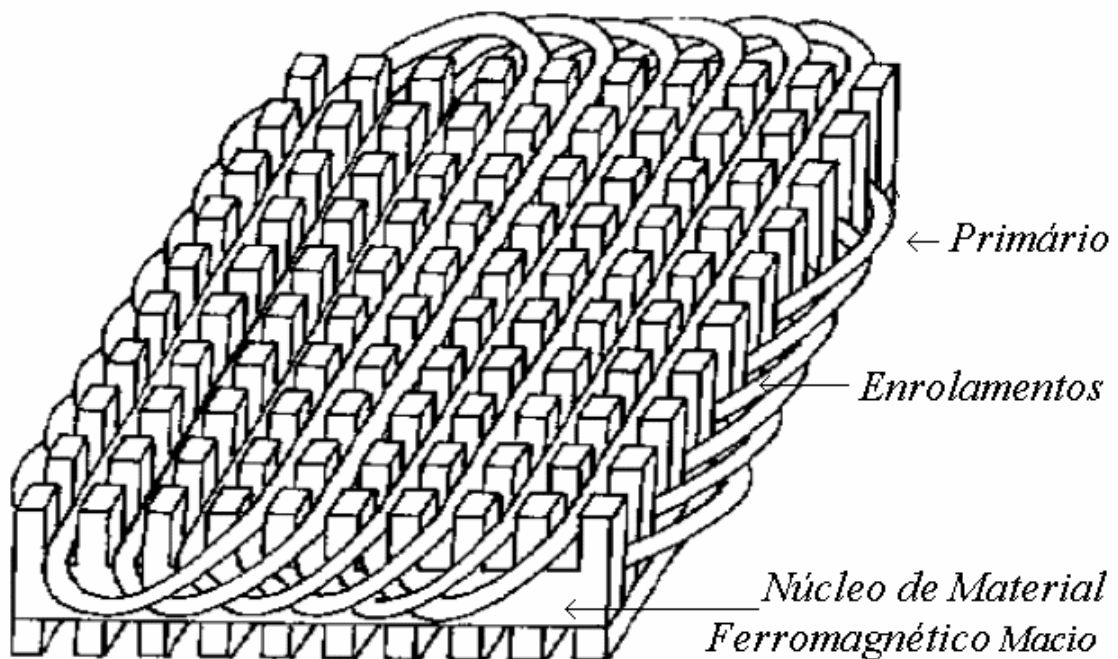


Figura 2.7 - Primário de um motor linear de indução com dois graus de liberdade [1].

O sistema de posicionamento de precisão [4] [5] utiliza um motor de superfície. O sistema, mostrado na figura 2.8, possui um estágio de posicionamento móvel, que é guiado sobre um plano, sendo sustentado por três dispositivos de suspensão a ar. Desta forma, a parte móvel flutua sobre a parte estacionária. Este estágio pode movimentar-se com

três graus de liberdade, sendo dois movimentos de translação ao longo dos eixos  $x$  e  $y$ , e um movimento de rotação em torno do eixo  $z$  ( $x, y, \theta_z$ ) [5]. Há três motores lineares dispostos em forma de H. Sobre a base plana, estão montados os ímãs permanentes, e, na parte móvel, as bobinas correspondentes a cada motor.

O Levitador Magnético Planar [27], mostrado na figura 2.9, é outro tipo de motor com características planares. Consiste de um arranjo de quatro motores lineares montados de forma a produzir movimento sobre o plano. No carro estão localizados quatro arranjos de ímãs permanentes. No estator, estão localizadas quatro bobinas, cada uma delas montada em torno de um núcleo. Cada bobina está montada sob um dos arranjos de ímãs permanentes do carro. Os ímãs permanentes são montados de tal forma, que, além de propiciarem movimento ao longo do plano, também possibilitam que o carro levite sobre o estator.

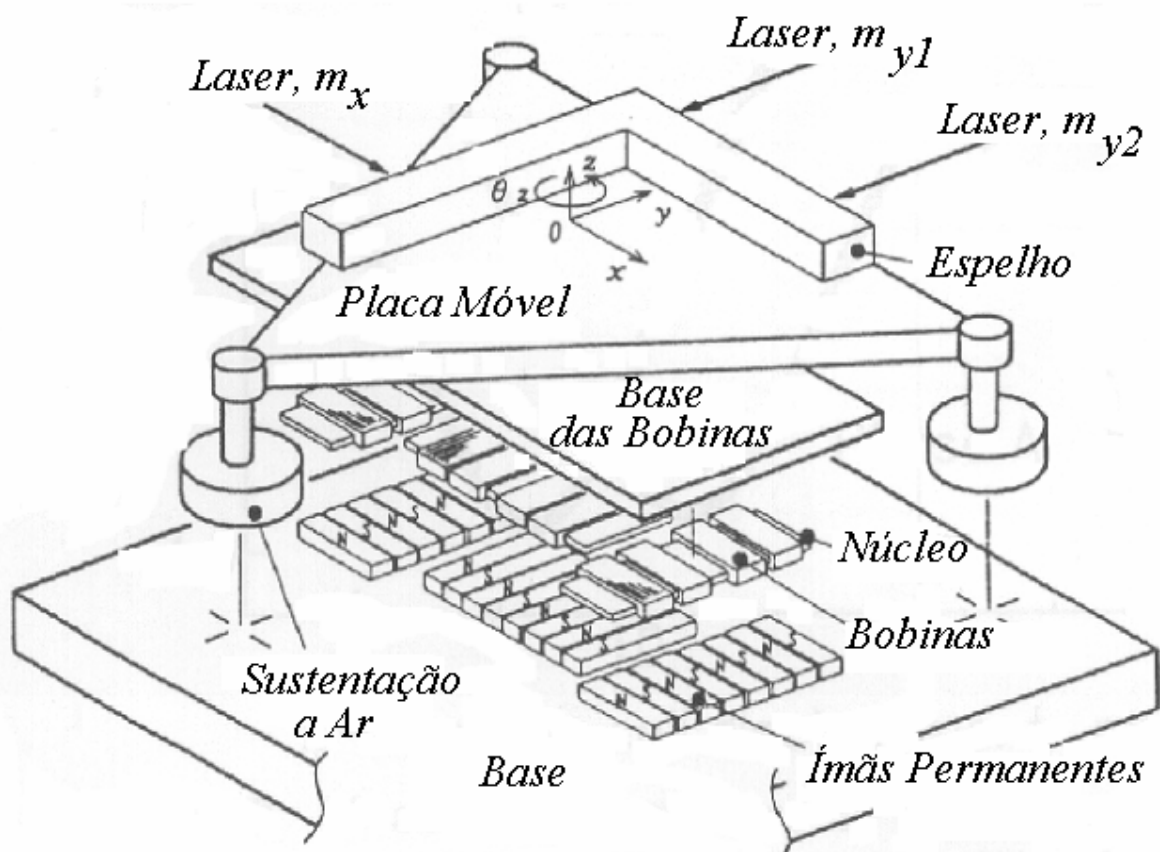


Figura 2.8 - Características construtivas do sistema de posicionamento de precisão [4].

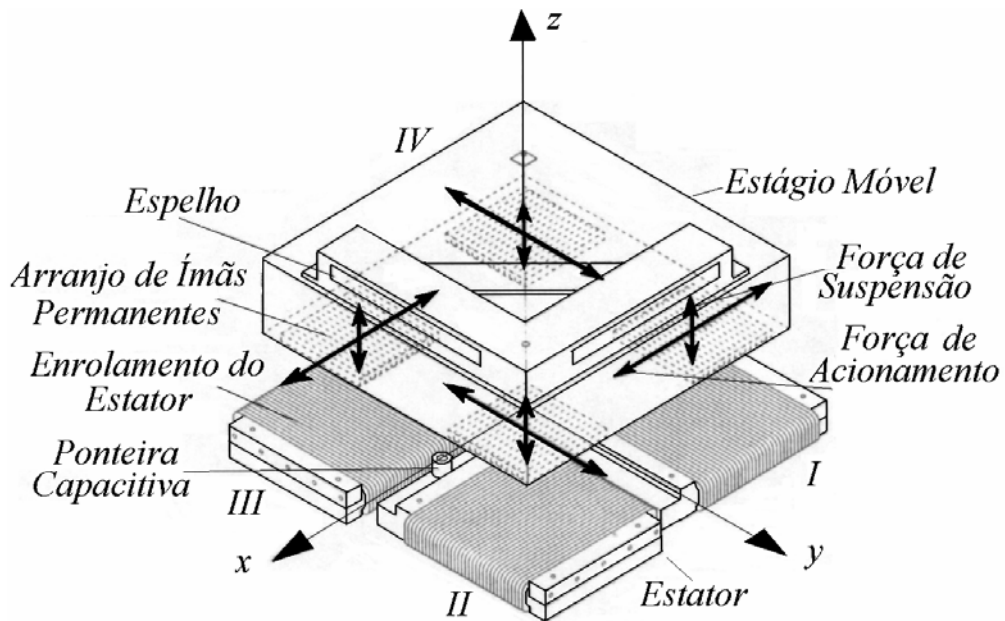


Figura 2.9 - Vista tridimensional do levitador magnético planar [27].

## 2.3 O ATUADOR PLANAR

O atuador planar apresentado neste trabalho pode representar uma alternativa às mesas  $xy$ , normalmente acionadas ou por dois motores rotativos, ou por dois motores lineares. O atuador em questão possui como grande vantagem o fato de desenvolver movimento sobre o plano, através dos eixos  $x$  e  $y$ , a partir de um único dispositivo de tração. Sua nova topologia beneficia-se de uma distribuição tridimensional de densidade de fluxo magnético.

### 2.3.1 Estrutura Básica do Atuador Planar

A figura 2.10 apresenta o desenho do atuador planar em estudo, e a tabela 2.1, suas características construtivas [35] [36] [37]. O enrolamento multifase da armadura, localizado no estator, está montado de maneira que dois enrolamentos ortogonais são produzidos: um enrolamento é colocado em torno do eixo  $x$ , formando as fases do enrolamento  $x$ , e o outro enrolamento é colocado em torno do eixo  $y$ , formando as fases do enrolamento  $y$ . Cada enrolamento possui 12 fases eletricamente independentes entre si. Os enrolamentos ortogonais não possuem conexões elétricas entre si e são montados em camadas intercaladas, isto é, entre duas camadas do enrolamento  $x$  é montada uma camada do

enrolamento  $y$ , e assim consecutivamente. O núcleo da armadura é composto de uma placa maciça de aço 1045.

O carro possui dois ímãs permanentes sinterizados anisotrópicos de NdFeB, grau N35H, unidos, através de suas faces polares superiores, por uma culatra de material ferromagnético. Esta culatra oferece um caminho de baixa relutância magnética para o fluxo magnético. A área disponível no plano, para o deslocamento do carro sobre o estator, equivale a  $300 \times 300 \text{ mm}^2$ .

A utilização de ímãs permanentes de NdFeB, de alto produto energético, possibilitou o desenvolvimento de um atuador planar com uma nova topologia e o uso de um entreferro efetivo de 14 mm no caso 1, e de 12 mm no caso 2 [47] [53] [54], resultante da ausência de ranhuras. A porção ativa do enrolamento da armadura, que produz força planar de propulsão, está localizada junto ao entreferro, entre os ímãs permanentes e o núcleo da armadura, conforme mostram as figuras 2.11 e 2.14.

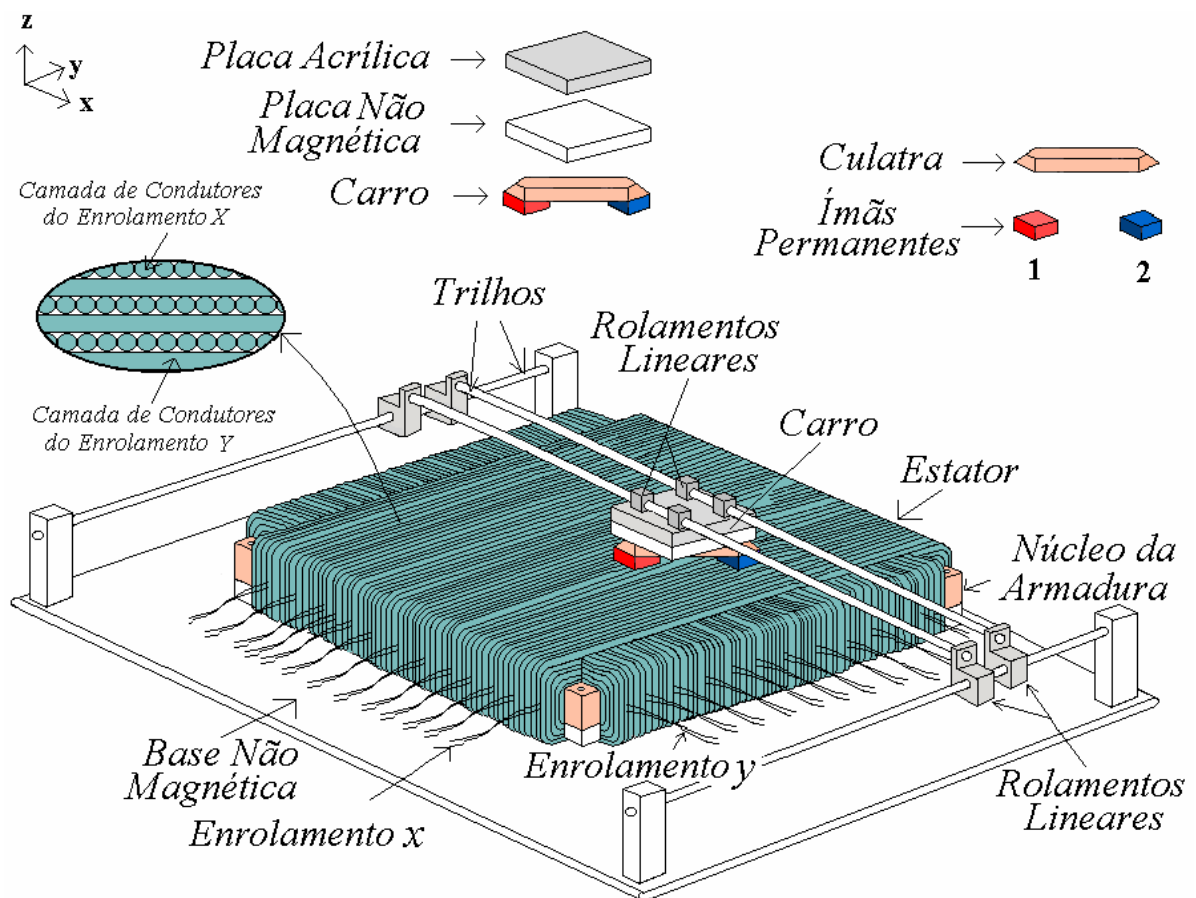


Figura 2.10 - Atuador planar com enrolamento envolvente.

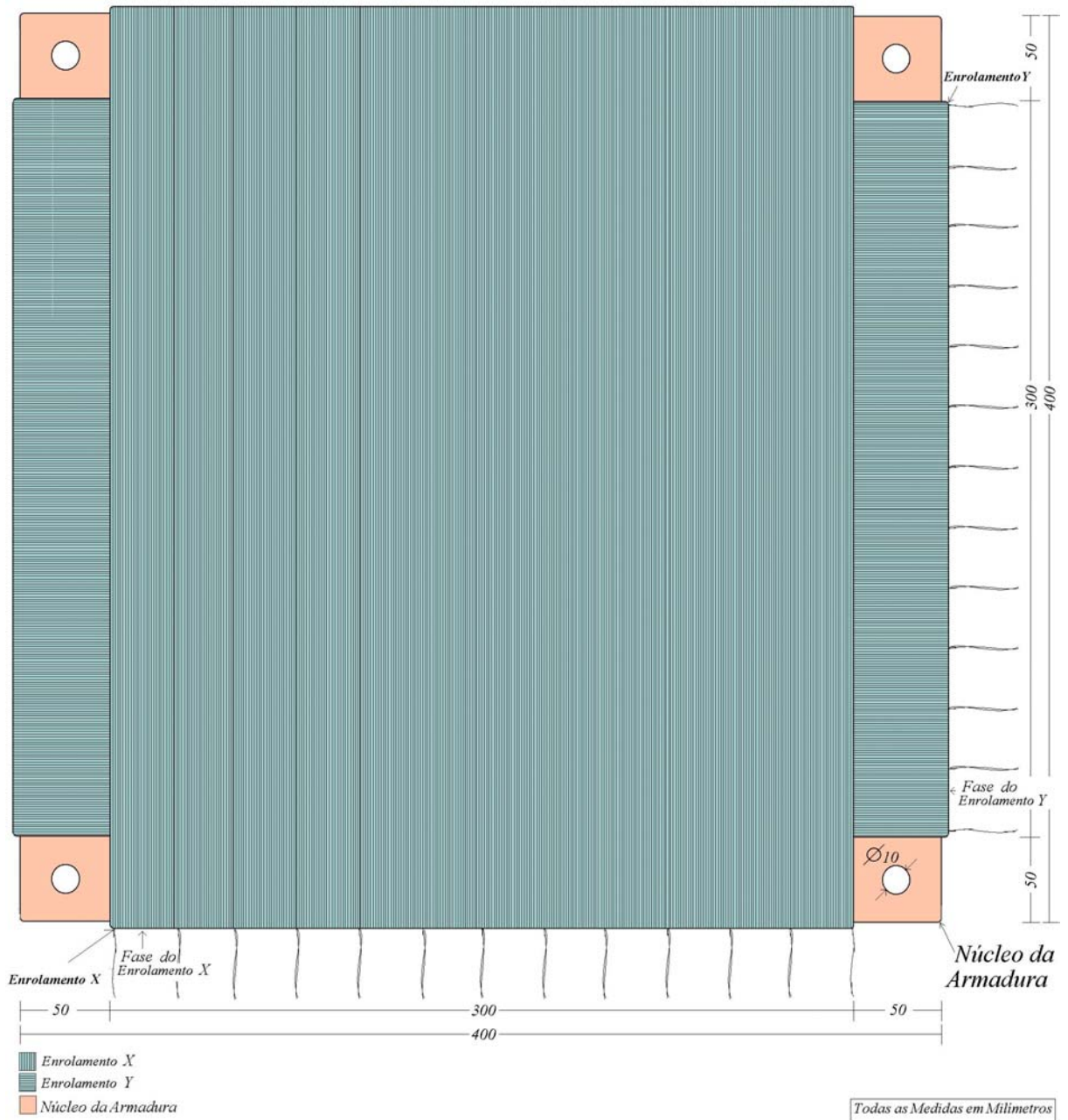
Tabela 2.1 – Características do atuador planar.

Item	Características	
Núcleo da armadura	400 x 400 x 15 mm <sup>3</sup> Aço 1045	
Número de enrolamentos	2	
Número de fases por enrolamento	12	
Número de espiras por fase	280	
Resistência de uma fase	21,5 $\Omega$	
Material da culatra	Aço 1045	
Sistema de suspensão	4 rolamentos lineares e 2 trilhos por eixo	
Número de ímãs permanentes	2	
Material dos ímãs permanentes	NdFeB sinterizado anisotrópico	
Situações analisadas	Caso 1 <sup>1</sup>	Caso 2
Produto de máxima energia (BH) <sub>máx</sub>	37,17 MGOe = 295,79 kJ/m <sup>3</sup>	36 MGOe $\pm$ 10% = 286,48 kJ/m <sup>3</sup> $\pm$ 10%
Remanência $B_r$	1,24 T	1,21 T $\pm$ 5%
Coercitividade Normal $H_c$	>923,1 kA/m	> 867,4 kA/m
Coercitividade Intrínseca $H_{ci}$	>1246,86 kA/m	> 955 kA/m
Área da superfície polar dos ímãs permanentes	25 x 25 mm <sup>2</sup>	25,4 x 25,4 mm <sup>2</sup>
Comprimento dos ímãs permanentes	6 mm	8 mm
Entreferro	14 mm	12 mm
Espaço livre em ar	6,5 mm	4,5 mm
Altura ocupada pelos enrolamentos no entreferro	7,5 mm	7,5 mm

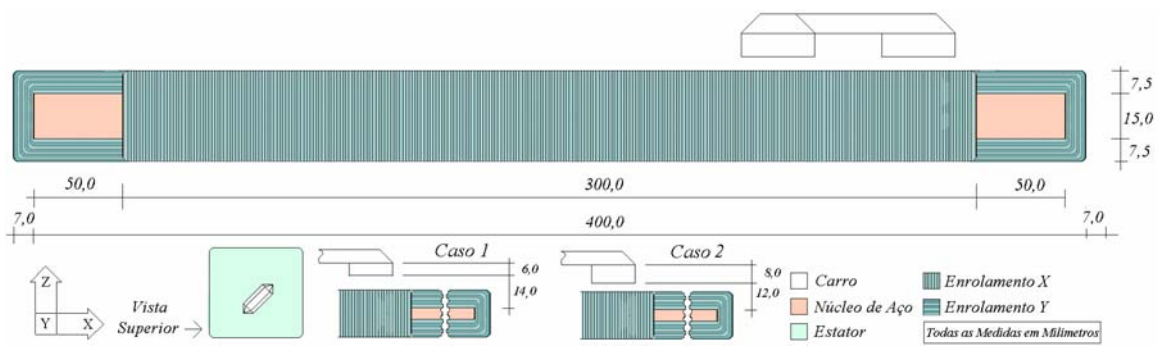
A figura 2.11(a) mostra a vista superior do estator do atuador planar e a figura 2.11(b), sua vista lateral. A figura 2.12 apresenta um detalhe do carro, com a culatra e os dois ímãs permanentes. A largura de cada ímã permanente é aproximadamente igual à largura de cada uma das fases dos enrolamentos  $x$  e  $y$  com uma variação de 0,4 mm. O carro é acoplado mecanicamente a uma estrutura de suspensão, composta por trilhos e rolamentos lineares, que lhe propiciam movimento bidirecional, resultando em um atuador com dois graus de liberdade.

<sup>1</sup> O fabricante não forneceu as características magnéticas dos ímãs permanentes de 6 mm de comprimento. Os valores de máximo produto de energia, coercitividade e remanência foram obtidos de um catálogo comercial.





(a)



(b)

Figura 2.11 – Estator do atuador planar: (a) vista superior e (b) vista lateral.

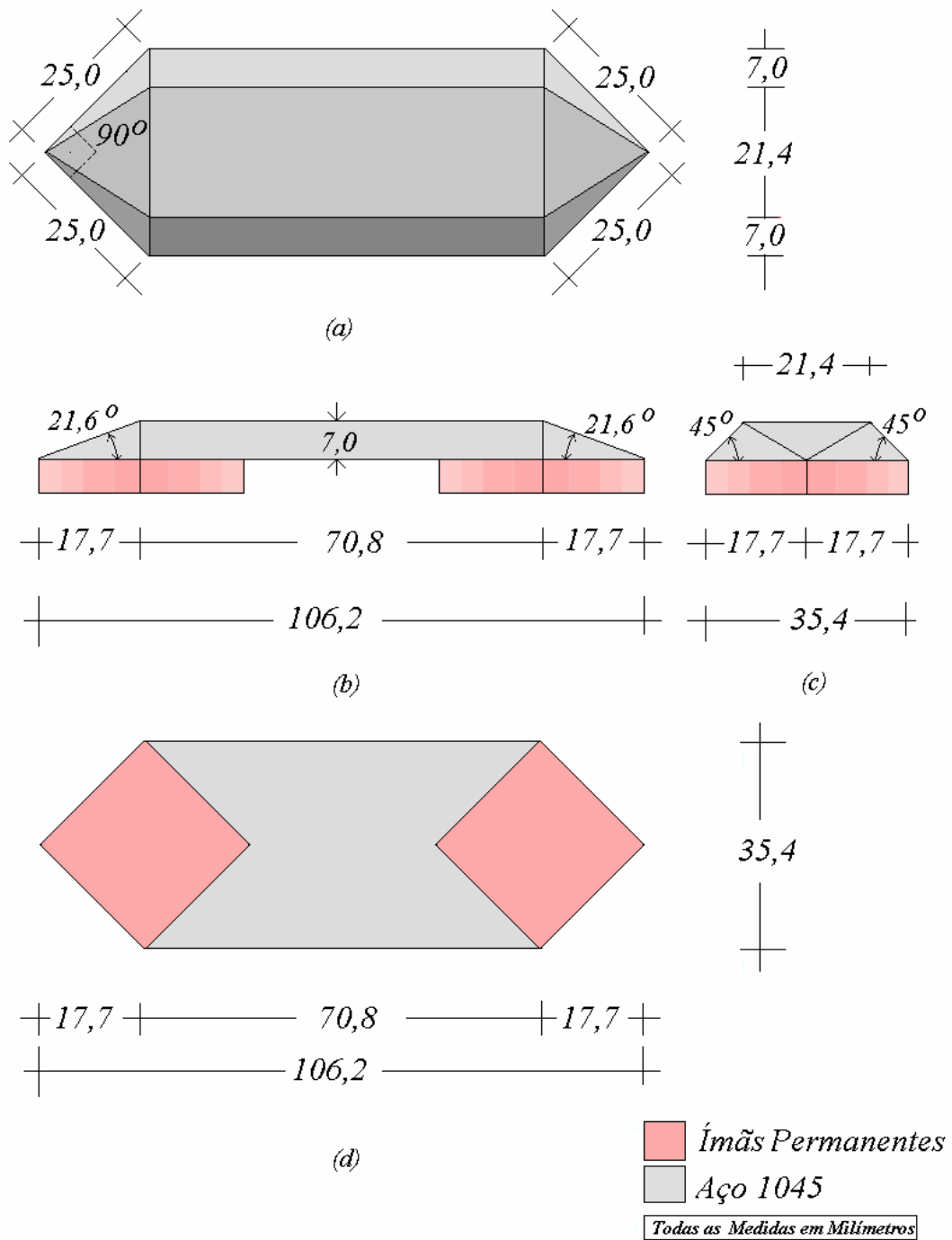


Figura 2.12 – Detalhe do carro, com a culatra e os dois ímãs permanentes de NdFeB: (a) vista superior, (b) vista frontal, (c) vista lateral e (d) vista inferior.

As figuras 2.13(a), 2.13(b), 2.13(c) e 2.13(d) apresentam as fotografias do primeiro protótipo desenvolvido. Em 2.13(a), é mostrada uma vista geral, em 2.13(b), o sistema de suspensão, composto por trilhos e rolamentos lineares, em 2.13(c), o detalhe do carro e, em 2.13(d), o detalhe dos rolamentos lineares aos quais o carro está mecanicamente acoplado.

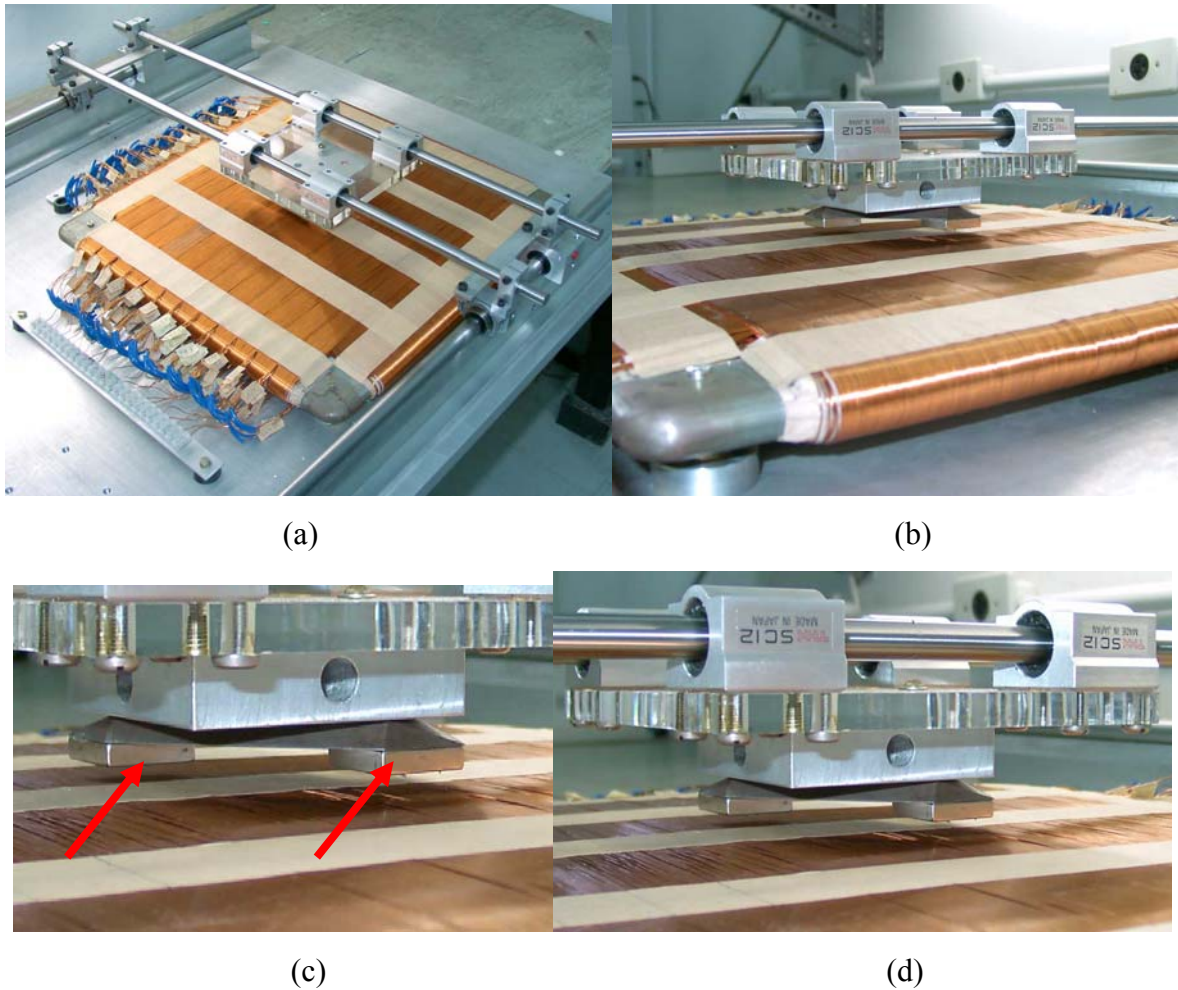


Figura 2.13 – Atuador planar em estudo: (a) vista geral, (b) sistema de suspensão composto de rolamentos lineares e trilhos, (c) detalhe do carro e (d) detalhe dos rolamentos lineares. As setas vermelhas em (c) apontam para os ímãs permanentes.

### 2.3.2 Princípio de Funcionamento

Quando um ímã permanente está localizado sobre uma fase do enrolamento da armadura excitada por corrente contínua, será desenvolvida uma força planar de propulsão sobre o carro. As correntes através das fases interagem com o fluxo magnético estabelecido no entreferro pelos ímãs permanentes. O efeito da força planar de propulsão resultante é o de movimentar o carro paralelamente à superfície plana da armadura. A intensidade e o sentido desta força dependerão dos valores e das polaridades da força magnetomotriz das fases ativas e da densidade de fluxo magnético estabelecida no entreferro pelos ímãs permanentes. A figura 2.14 mostra a vista esquemática bidimensional do atuador

planar, indicando a localização do enrolamento da armadura no entreferro e o caminho do fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes.

A força planar de propulsão que atua sobre o carro pode ser obtida pela Lei de Lorentz. A força eletromagnética que age sobre uma carga é conhecida como força de Lorentz e engloba as influências elétricas e magnéticas [59]. Para a situação em estudo, é considerada apenas a influência magnética. Assim, a força de Lorentz é escrita como:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

onde  $\vec{B}$  é o vetor densidade de fluxo magnético no qual a carga  $q$  está imersa e  $\vec{v}$  é a velocidade desta carga em relação a um referencial ou observador. Assim, a equação (2.1) fornece o módulo e o sentido da força eletromagnética que atuará sobre uma carga elétrica em movimento em uma região onde exista um campo magnético.

Quando um condutor metálico de comprimento  $l$  percorrido por uma corrente elétrica  $i$  está imerso em um campo magnético, a força que atuará sobre ele é igual à soma das forças magnéticas que atuam sobre as cargas em movimento que constituem a corrente. A equação (2.1) pode ser reescrita como [11]:

$$\vec{F} = i\vec{l} \times \vec{B} \quad (2.2)$$

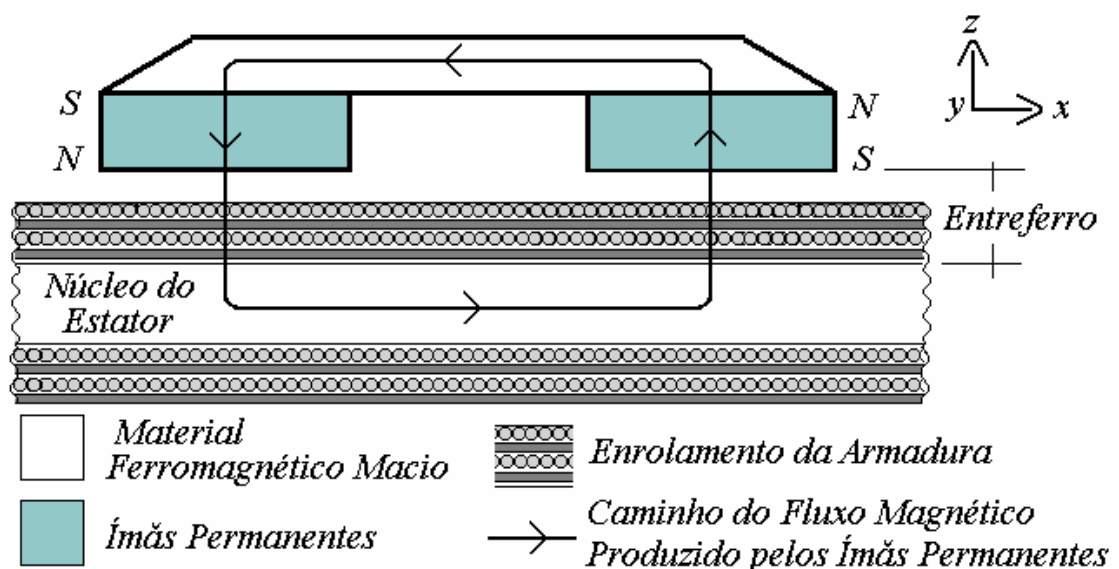


Figura 2.14 – Vista esquemática bidimensional do atuador planar, indicando a localização dos enrolamentos da armadura.

onde  $\vec{l}$  é o vetor cujo módulo é o comprimento ativo do condutor e cujos sentido e direção são paralelos a  $q\vec{v}$ . A equação (2.2) supõe que o condutor seja retilíneo e que a densidade de fluxo magnético seja constante em todo o seu comprimento. Quando uma destas duas situações, ou ambas, não forem satisfeitas, pode-se obter a força  $d\vec{F}$  que atua sobre um segmento de condutor  $d\vec{l}$ , por:

$$d\vec{F} = id\vec{l} \times \vec{B} \quad (2.3)$$

Ao invés de utilizar-se o segmento de condutor, pode-se utilizar o elemento de volume  $dV = s_{af} dl$ , considerando que  $\vec{J}dV = id\vec{l}$ , onde  $\vec{J}$  é o vetor densidade de corrente no condutor, aqui considerado uniforme através de sua área transversal [60]. O símbolo  $s_{af}$  representa a área da seção transversal de um condutor. Desta forma, no atuador planar, a força planar de propulsão que atua sobre os condutores das fases percorridas por corrente localizadas sob o ímã permanente  $N$ , pode ser obtida pela lei de Lorentz através da equação (2.4) [48] [52].

$$\vec{F}_N = \int_{V_N} \vec{J}_N \times \vec{B}_{gN} dV_N \quad (2.4)$$

Na equação (2.4),  $\vec{F}_N$  é o vetor força eletromagnética planar de propulsão, ou força planar de propulsão, relacionada com o ímã permanente  $N$ , com  $N = 1$  para o ímã permanente 1 e 2 para o ímã permanente 2;  $\vec{B}_{gN}$  é a correspondente densidade de fluxo magnético no entreferro relacionada com o ímã permanente  $N$ ;  $\vec{J}_N$  é o vetor densidade de corrente nas fases dos enrolamentos da armadura localizadas sob o ímã permanente  $N$ ;  $V_N$  é o volume de integração, ou seja, corresponde ao volume dos condutores com corrente, que estão imersos no fluxo magnético produzido pelo ímã permanente  $N$ .

A equação (2.4) permite determinar o módulo e o sentido da força que atua sobre os condutores percorridos por corrente, imersos no campo magnético do ímã permanente  $N$ . No atuador planar, os condutores são estacionários, enquanto que os ímãs permanentes, fontes do campo magnético, estão localizados no carro, possuindo liberdade para movimentar-se. Assim, a força produzida entre os condutores percorridos por corrente e

o campo magnético provocará o deslocamento do carro e, por conseguinte, do campo magnético, sobre o plano. Para determinar o sentido da força que atua sobre o carro, a equação (2.4) é modificada para a equação (2.5), conforme mostrado a seguir:

$$\vec{F}_N = \int_{V_N} -(\vec{J}_N \times \vec{B}_{gN}) dV_N = \int_{V_N} (\vec{B}_{gN} \times \vec{J}_N) dV_N \quad (2.5)$$

A figura 2.15 apresenta a vista frontal do carro do atuador planar e sua posição relativa às fases dos enrolamentos da armadura que estão excitadas por corrente. Na figura está indicado o sentido do vetor força mecânica de origem eletromagnética que atua sobre o carro, resultante da interação entre os vetores densidade de corrente nos condutores dos enrolamentos da armadura e densidade de fluxo magnético no entreferro.

Conforme pode ser visto pela figura 2.15, na produção de força sobre o plano, ao longo dos eixos  $x$  e  $y$ , somente a componente normal do fluxo magnético no entreferro,  $B_{gzN}$ , deve ser levada em conta. Assim, na equação (2.5),  $B_{gzN}$  pode ser substituída por:

$$\vec{B}_{gN} = B_{gzN} \vec{k} \quad (2.6)$$

O vetor densidade de corrente possui duas componentes a serem consideradas:  $J_{xN}$  e  $J_{yN}$ . A primeira é a componente  $x$  do vetor densidade de corrente através das fases do enrolamento  $y$ , enquanto que a segunda é a componente  $y$  do vetor densidade de corrente através das fases do enrolamento  $x$ . A equação (2.7) define  $\vec{J}_N$ .

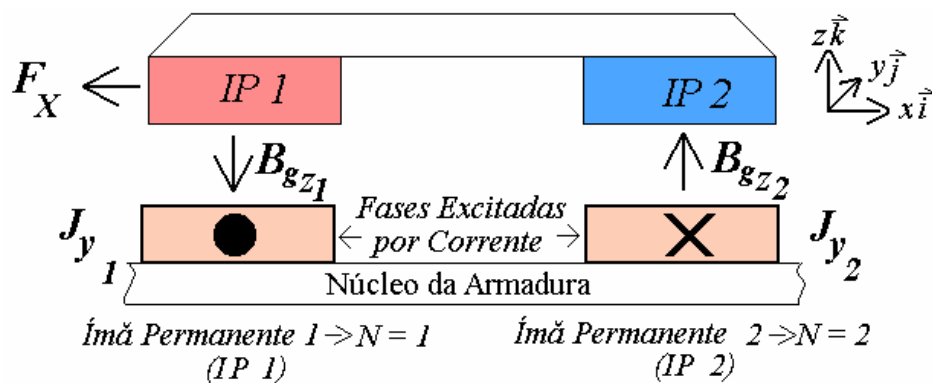


Figura 2.15 - Vista frontal do carro do atuador planar e sua posição relativa às fases do enrolamento  $x$  da armadura que estão excitadas por corrente.

$$\vec{J}_N = J_{xN} \vec{i} + J_{yN} \vec{j} \quad (2.7)$$

Aplicando as equações (2.6) e (2.7) à equação (2.5), obtém-se:

$$\begin{aligned} \vec{F}_N &= \int_{V_N} (\vec{B}_{gN} \times \vec{J}_N) dV_N = \int_{V_N} B_{gzN} \vec{k} \times (J_{xN} \vec{i} + J_{yN} \vec{j}) dV_N \\ &= \int_{V_N} B_{gzN} (-J_{yN} \vec{i} + J_{xN} \vec{j}) dV_N = -F_{xN} \vec{i} + F_{yN} \vec{j} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Na equação (2.8),  $F_{xN}$  é a componente  $x$  da força eletromagnética produzida por uma fase do enrolamento  $x$  que possui uma densidade de corrente igual a  $J_{yN}$  (componente  $y$  do vetor densidade de corrente  $\vec{J}_N$ ), enquanto que  $F_{yN}$  é a componente  $y$  da mesma força produzida por uma fase do enrolamento  $y$  que possui uma densidade de corrente igual a  $J_{xN}$  (componente  $x$  do vetor densidade de corrente  $\vec{J}_N$ ), sob a ação do ímã permanente  $N$ . Quando o efeito dos dois ímãs permanentes é considerado, o resultado é uma força eletromagnética planar total,  $\vec{F}$ , atuando sobre o carro, que pode produzir movimento simultâneo ao longo de ambos os eixos. A direção de  $\vec{F}$  define o sentido do movimento do carro. E este sentido depende do módulo e do sentido das correntes nas fases que estão ativas e do sentido da densidade de fluxo no entreferro. A força planar total é obtida através da equação (2.9):

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = -(F_{x1} + F_{x2}) \vec{i} + (F_{y1} + F_{y2}) \vec{j} \quad (2.9)$$

A figura 2.16 mostra o desenho tridimensional do atuador planar destacando apenas as duas fases do enrolamento  $x$  da armadura localizadas sob os ímãs permanentes, com o objetivo de ilustrar os vetores envolvidos na produção de força sobre o plano na direção do eixo  $x$ . Por definição, o enrolamento montado em torno do eixo  $x$  é denominado de enrolamento  $x$ , enquanto que enrolamento montado em torno do eixo  $y$  é denominado de enrolamento  $y$ .

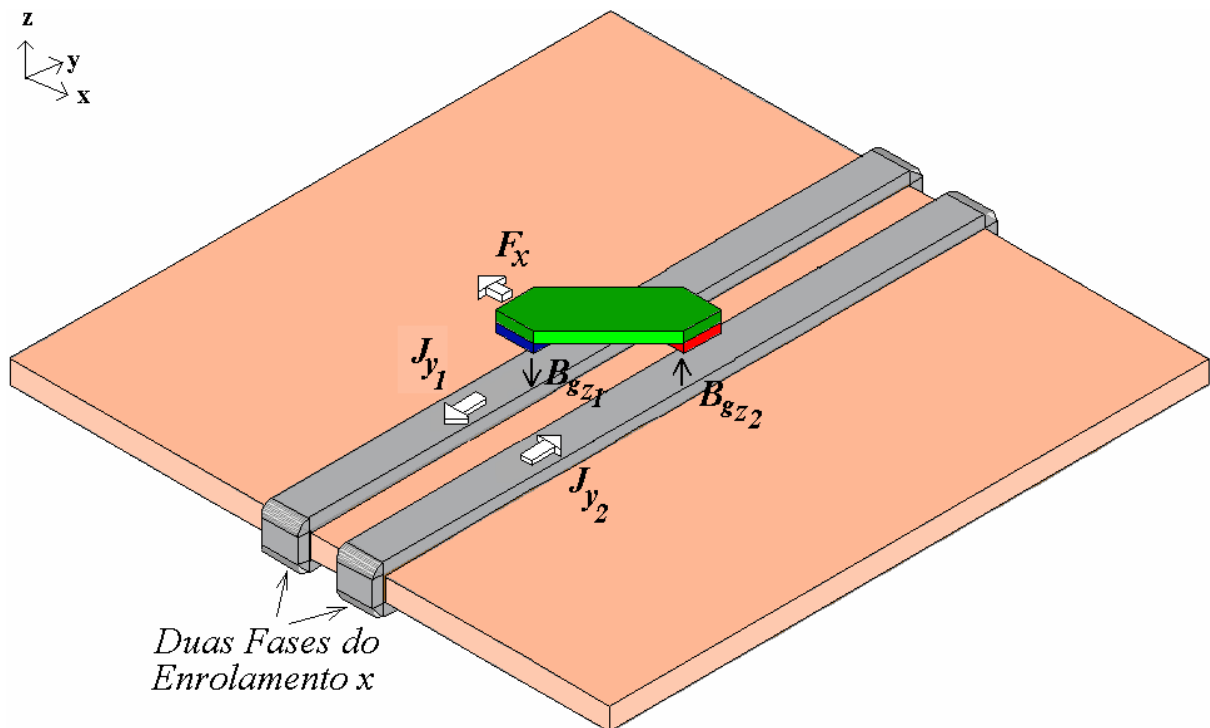


Figura 2.16 - Vista tridimensional do atuador planar onde são mostradas apenas as duas fases do enrolamento  $x$  da armadura localizadas sob os ímãs permanentes.

O vetor densidade de corrente no enrolamento  $x$  possui apenas componente  $y$  na região de atuação do carro. A força mecânica produzida sobre o carro será perpendicular ao plano formado pelos vetores densidade de corrente e densidade de fluxo magnético. Assim, quando apenas as fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes forem percorridas por corrente, será produzida uma força sobre o carro que terá componente apenas em  $x$ .

Conforme mostra a figura 2.16, as fases de um mesmo enrolamento, localizadas sob diferentes ímãs permanentes, são excitadas em oposição, para produzir forças com o mesmo sentido. Assim, fases do enrolamento  $x$  com um determinado valor de densidade de corrente com componente apenas em  $y$ , localizadas sob os ímãs permanentes, provocam o deslocamento do carro através do eixo  $x$ .

Já o vetor densidade de corrente no enrolamento  $y$  possui apenas componente  $x$  na região de atuação do carro. Desta forma, quando as fases do enrolamento  $y$



localizadas sob os ímãs permanentes forem percorridas por corrente, será produzida uma força sobre o carro que terá componente apenas em  $y$ , conforme pode ser visto pela figura 2.17.

Uma força normal está presente e é resultado da atração entre os ímãs permanentes do carro e o núcleo da armadura. Esta força aumenta o atrito, tendendo a produzir um efeito de frenagem sobre o carro. Sua equação é apresentada a seguir:

$$F_{Az} = \frac{s_g}{2\mu_0} \left( B_{gTz1}^2 + B_{gTz2}^2 \right) \quad (2.10)$$

Na equação (2.10),  $F_{Az}$  é a força magnética de atração normal,  $s_g$  corresponde à área da superfície transversal ao fluxo magnético no entreferro sob cada um dos ímãs permanentes,  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo e  $B_{gTz1}$  e  $B_{gTz2}$  correspondem à componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total estabelecida no entreferro sob os ímãs permanentes 1 e 2, respectivamente.

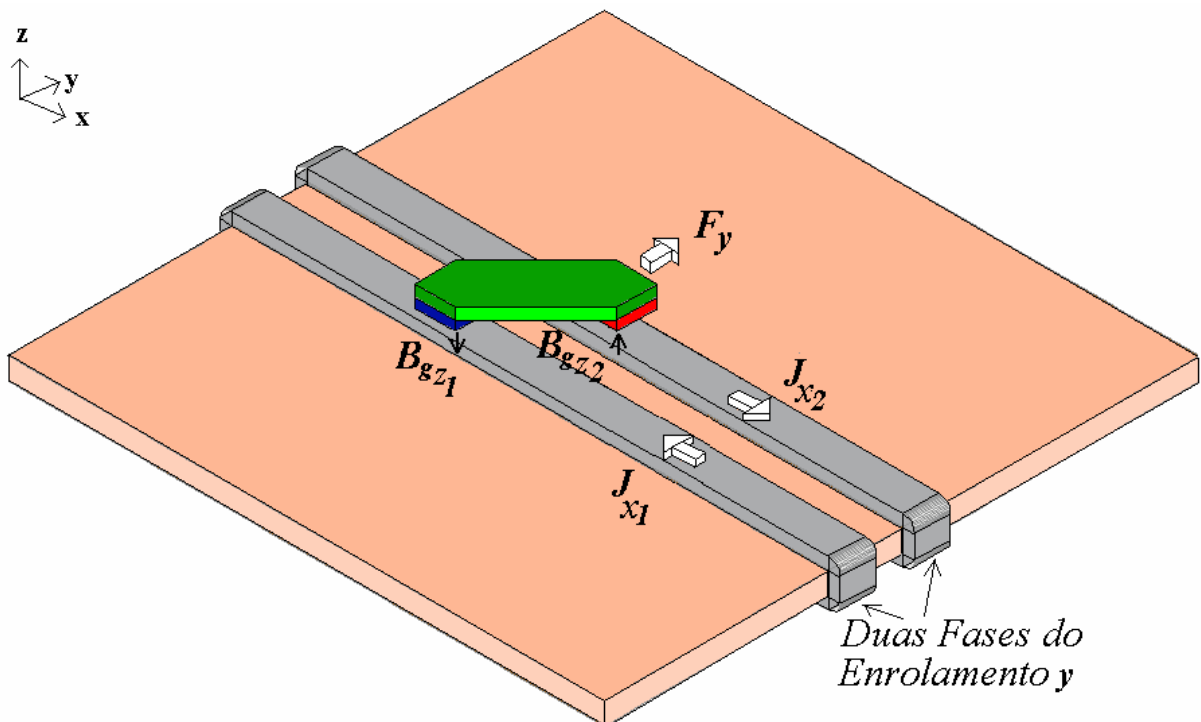


Figura 2.17 - Vista tridimensional do atuador planar onde são mostradas apenas as duas fases do enrolamento  $y$  da armadura localizadas sob os ímãs permanentes.

### 2.3.3 Exemplo de Operação

As figuras 2.18(a), 2.18(b), 2.18(c) e 2.18(d) apresentam uma vista superior esquemática do atuador planar, mostrando o desenho dos enrolamentos e do carro, com um exemplo de deslocamento devido à excitação de duas fases de um dos enrolamentos da armadura [39] [42] [46]. Os enrolamentos têm suas fases energizadas (*on*) ou não (*off*) conforme o movimento desejado.

A figura 2.18(a) mostra a posição do carro localizado sobre as fases dos enrolamentos. Aqui, um ímã permanente está localizado sobre a 9ª fase do enrolamento  $x$  e a 5ª fase do enrolamento  $y$  e o outro ímã permanente, sobre a 11ª fase do enrolamento  $x$  e a 7ª fase do enrolamento  $y$ . Por exemplo, se é requerido modificar a posição do carro ao longo do eixo  $x$ , as fases 9 e 11 do enrolamento  $x$  devem ser excitadas por corrente. A excitação da 9ª fase terá um sentido oposto àquela da 11ª. O carro deslocar-se-á até uma nova posição, de forma que um ímã permanente estará posicionado sobre a 8ª fase do enrolamento  $x$  e o outro ímã, sobre a 10ª fase do mesmo enrolamento. O carro não sofreu alteração de sua posição com relação ao enrolamento  $y$ , conforme mostra a figura 2.18(b). Isto significa que o movimento ocorreu apenas ao longo do eixo  $x$ . Se fases números 5 e 7 do enrolamento  $y$  forem excitadas adequadamente, o carro deslocar-se-á ao longo do eixo  $y$ , apenas, de acordo com a figura 2.18(c). Assim, a excitação de fases do enrolamento  $y$  produziu o deslocamento do carro apenas através do eixo  $y$ .

O movimento poderá ocorrer de forma simultânea ao longo dos eixos  $x$  e  $y$ , conforme mostra a figura 2.18(d). Para isso, as fases do enrolamento  $x$  e do enrolamento  $y$  localizadas sob os ímãs permanentes são excitadas por corrente de forma simultânea. Na figura 2.18(d), a excitação simultânea das fases 8 e 10 do enrolamento  $x$  e das fases 6 e 8 do enrolamento  $y$  provocou o deslocamento do carro através da diagonal.

### 2.3.4 Comparação entre o Atuador Planar com Enrolamentos Ortogonais e Outros Dispositivos Existentes

O atuador planar com enrolamentos ortogonais possui características construtivas inéditas. Graças ao seu estator, composto de enrolamentos ortogonais, divididos em fases, e ao seu carro, composto por dois ímãs permanentes montados em oposição quanto

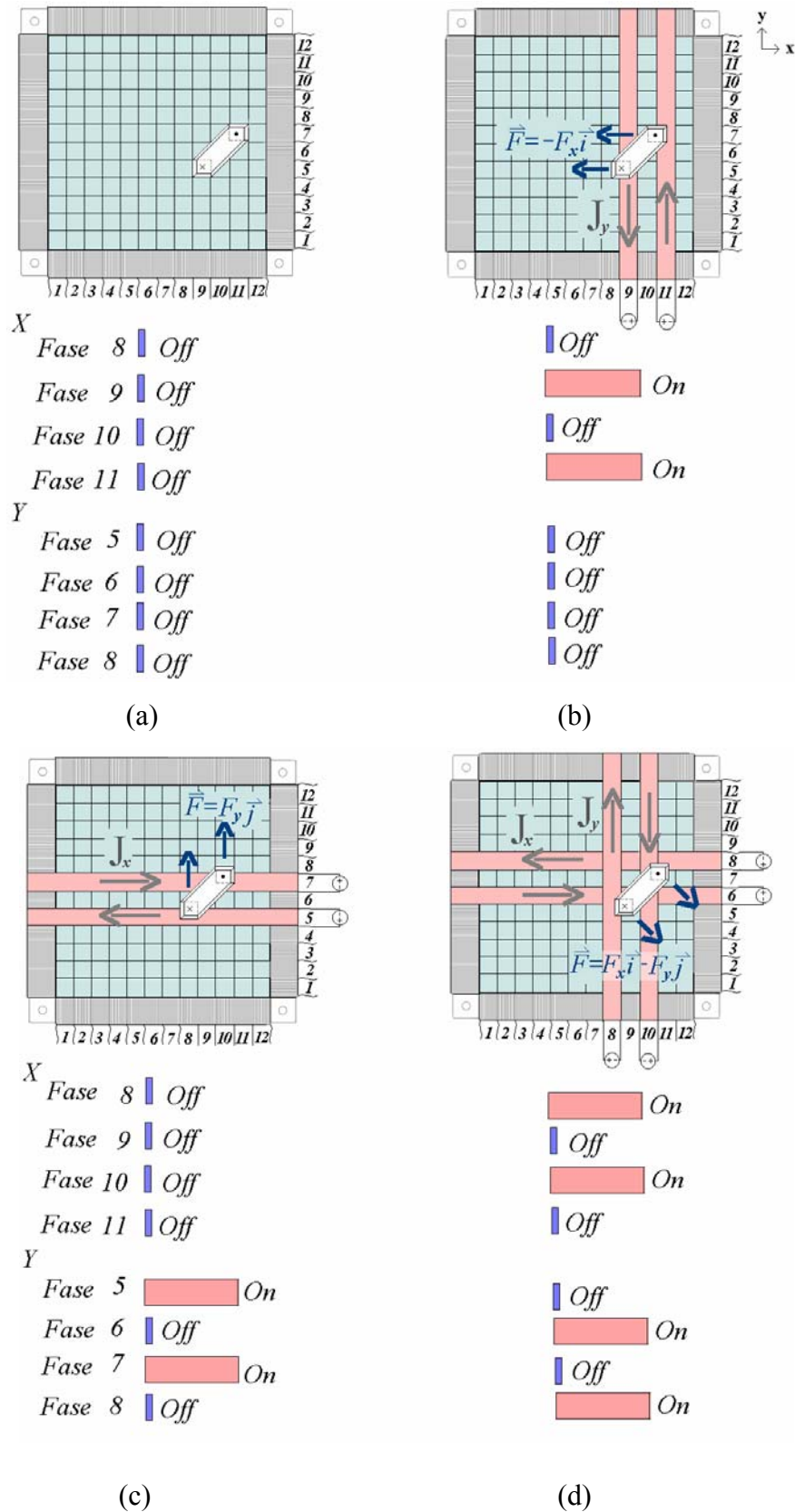


Figura 2.18 - Exemplo de produção de movimento bidirecional: (a) carro em repouso, (b) movimento ao longo do eixo  $x$ , (c) movimento ao longo do eixo  $y$  e (d) movimento devido à excitação simultânea das fases dos enrolamentos  $x$  e  $y$ .

às polaridades de suas superfícies polares, desenvolve movimento planar diretamente a partir de um único dispositivo de tração. Em relação a outros dispositivos que desenvolvem movimento sobre uma superfície plana, o atuador planar é um dispositivo bastante simples. Conforme já mencionado, através de um único dispositivo montado no carro obtém-se movimento no plano, ao contrário de alguns dispositivos que incorporam entre três e quatro motores lineares para produzir deslocamento planar. Outros dispositivos possuem bobinas ortogonais localizadas em um carro e arranjos de ímãs permanentes montados em uma chapa planar.

Os dispositivos baseados no motor de Sawyer talvez sejam os motores mais utilizados em aplicações que requeiram movimento sobre o plano. Eles são formados por um arranjo de quatro motores lineares localizados no carro, sendo normalmente empregados para o acionamento de cargas mecânicas leves. Já o atuador planar com enrolamentos ortogonais é um dispositivo robusto, podendo acionar cargas mecânicas relativamente maiores. Sua sensibilidade média em N/A é maior quando comparada com outros dispositivos similares.

### 3 MAGNETISMO E CIRCUITOS MAGNÉTICOS

A utilização de ímãs permanentes modernos de alto produto energético tem propiciado o surgimento de dispositivos eletromagnéticos com novas características construtivas e de funcionamento. O emprego de ímãs permanentes de NdFeB possibilitou o desenvolvimento do atuador planar em estudo. Devido ao seu alto produto energético, foi possível compensar os efeitos desmagnetizantes de um entreferro de elevado comprimento.

#### 3.1 MATERIAIS MAGNÉTICOS

Os materiais ferromagnéticos são classificados em duas categorias principais: materiais magneticamente macios (*soft magnetic materials*) e materiais magneticamente duros (*hard magnetic materials*). Os primeiros são materiais sensíveis a campos magnéticos externos, têm alta permeabilidade magnética, permitindo que neles se estabeleça um fluxo magnético de forma concentrada, sendo utilizados na construção de máquinas elétricas; além de terem por função alojar os condutores dos circuitos da armadura e de campo, providenciam um caminho de baixa relutância magnética para o fluxo magnético, pois possuem, a menos da saturação, elevada permeabilidade magnética e baixa coercitividade. Os materiais magneticamente duros são utilizados para a fabricação de ímãs permanentes.

Entre os principais materiais utilizados para a produção de ímãs permanentes tem-se as ferrites, ligas contendo terras raras, ligas contendo alumínio-níquel-cobalto (AlNiCo), ligas ferro-cobalto, ferro-cromo, ferro-tungstênio e ferro-carbono [18]. As ferrites são as mais importantes para a produção de ímãs permanentes, em termos comerciais, pois são consideradas baratas e possuem alta coercitividade [18]. As ferrites são pertencentes ao grupo dos materiais que possuem óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). São também denominadas de cerâmicas [18].

O termo terras raras é utilizado para classificar elementos químicos tais como o Samário, o Prússia e o Neodímio. A primeira referência ao desenvolvimento de ligas NdFeB foi feita em junho de 1983 por uma empresa japonesa, quando foi anunciado o desenvolvimento de um ímã permanente com um  $(BH)_{máx}$  de 278,52 kJ/m<sup>3</sup> (35 MGOe) [18].

A produção de materiais para a confecção de ímãs permanentes pode ser feita através de fundição, ou pela metalurgia do pó [18]. O processo de fundição baseia-se na fusão de um metal que é fundido à elevada temperatura e posteriormente moldado em chapas ou lingotes. O uso do processo da metalurgia do pó permite a obtenção de ímãs de alto produto energético [21].

Ímãs permanentes obtidos através do processo da metalurgia do pó podem ser do tipo compactado ou sinterizado, conforme o método de fabricação empregado. A figura 3.1 apresenta o algoritmo geral de fabricação de ímãs permanentes pela metalurgia do pó. Em (a) é apresentada o processo de fabricação do ímã permanente sinterizado e, em (b), o do ímã permanente compactado [20].

O processo de produção de ímãs permanentes de NdFeB sinterizado envolve as seguintes etapas: preparação da liga, pré-moagem, moagem, controle e ajuste da composição, alinhamento das partículas, compressão, sinterização, tratamento por calor, usinagem e magnetização [18] [21]. Em relação ao SmCo, o NdFeB apresenta melhores características magnéticas e mecânicas e é também menos quebradiço. Verifica-se que os ímãs de SmCo possuem temperatura máxima de operação superior à dos ímãs permanentes de NdFeB [18].

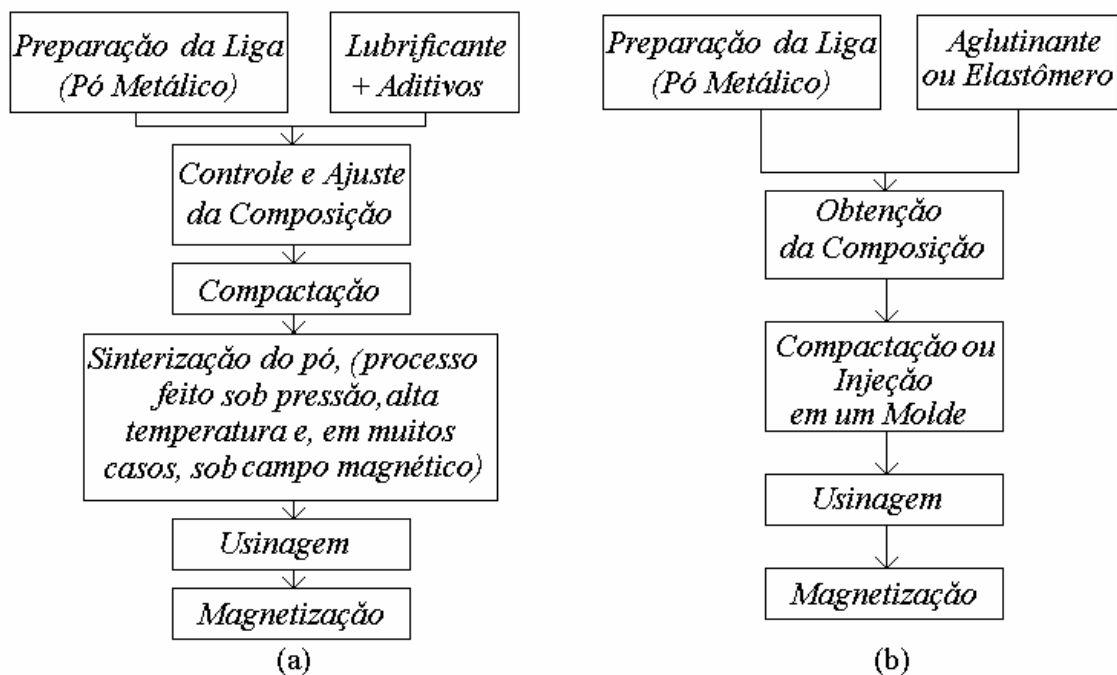


Figura 3.1 – (a) Processo de fabricação do ímã permanente sinterizado e (b) processo de fabricação do ímã permanente compactado [20] [22].

### 3.2 DEFINIÇÃO DE ALGUMAS GRANDEZAS MAGNÉTICAS

Um campo magnético pode ser produzido por um ímã permanente, ou por um condutor percorrido por corrente elétrica [11]. Quando um condutor elétrico em forma de um solenóide é percorrido por corrente elétrica, haverá o aparecimento de um campo magnético, cujas linhas de força estarão concentradas, principalmente, em seu interior, conforme mostra a figura 3.2 [19]. Se uma barra de material ferromagnético (núcleo) é colocada no interior do solenóide, as linhas de fluxo magnético ficarão concentradas nesta barra, porque o caminho oferecido por ela possui alta permeabilidade magnética. O símbolo  $\vec{B}$  representa o vetor densidade de fluxo magnético, e expressa a relação entre o fluxo magnético  $\phi$  através de uma determinada região, e o elemento de área,  $d\vec{S}$ , perpendicular a  $\vec{B}$ .

A maneira como o vetor  $\vec{B}$  comporta-se em diferentes meios pode ser exemplificada através dos três casos apresentados na figura 3.3. Quando o núcleo magnético não configura um caminho fechado contínuo, diz-se que um entreferro está presente no circuito. O fluxo magnético estabelecido no entreferro se distribuirá através de uma área transversal maior do que a área transversal de um material ferromagnético presente no mesmo circuito. Este efeito é chamado de espraiamento do fluxo magnético. O efeito do espraiamento do fluxo magnético no entreferro não é considerado nos três casos da figura 3.3.

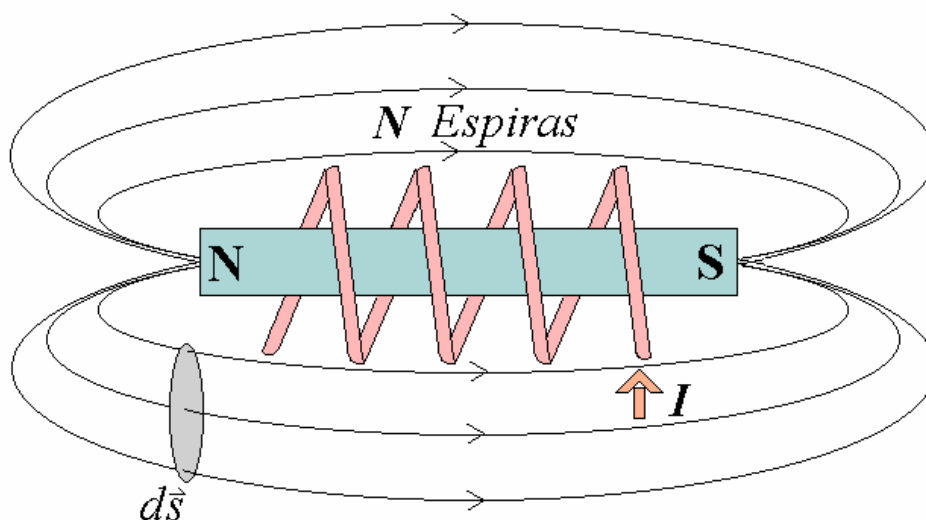


Figura 3.2 - Campo magnético num solenóide percorrido pela corrente  $I$  [19].

Na figura 3.3(a) a bobina possui um núcleo de material não ferromagnético. O módulo do vetor densidade de fluxo magnético,  $\vec{B}$ , é constante ao longo de toda a estrutura, tanto dentro do solenóide, como no entreferro. Para que se estabeleça um determinado fluxo magnético é necessário vencer a relutância do circuito magnético. O vetor intensidade de campo magnético,  $\vec{H}$ , representa o número de ampères-espiras por metro, necessário para vencer a relutância total do circuito. A relutância representa a dificuldade oferecida por um circuito magnético ao estabelecimento do fluxo magnético. Os vetores  $\vec{B}$  e  $\vec{H}$  estão relacionados por  $\vec{B} = \mu_o \vec{H}$ , onde  $\mu_o$  é a permeabilidade do vácuo [11] [20].

A bobina toroidal representada em 3.3(b) possui um núcleo de material ferromagnético. Com a presença do material ferromagnético, o módulo do vetor densidade de fluxo magnético produzido no interior do solenóide será mais intenso quando comparado com o módulo do vetor densidade de fluxo magnético produzido no solenóide da figura 3.3(a), considerando-se a mesma força magnetomotriz. O vetor  $\vec{B}$ , considerado uniforme ao longo de todo o circuito, é calculado no material ferromagnético por:

$$\vec{B} = \mu_o (\vec{M} + \vec{H}) \quad (3.1)$$

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 [19] [20]. No ar seu valor é igual a zero. Nos materiais ferromagnéticos,  $\vec{M}$  é diferente de zero, e possui o mesmo sentido de  $\vec{B}$ . A magnetização total do material resulta da ação de uma força magnetizante externa,  $\vec{H}$  e da magnetização  $\vec{M}$ . A permeabilidade magnética de um material,  $\mu$ , relaciona os vetores  $\vec{B}$  e  $\vec{H}$  através da expressão  $\vec{B} = \mu \vec{H}$ .

O núcleo toroidal de material ferromagnético magnetizado, apresentado em 3.3(c), possui um entreferro. O material ferromagnético possui uma magnetização,  $\vec{M}$ , que se reduz a zero no entreferro. O vetor  $\vec{B}$  é uniforme ao longo de todo o circuito. Verifica-se que, nesta situação, o campo magnético  $\vec{H}$  têm um efeito desmagnetizante sobre o material ferromagnético, pois seu sentido é oposto ao da magnetização  $\vec{M}$  [19] [20]. O comportamento do vetor  $\vec{B}$  para este material é modelado pela equação (3.1).



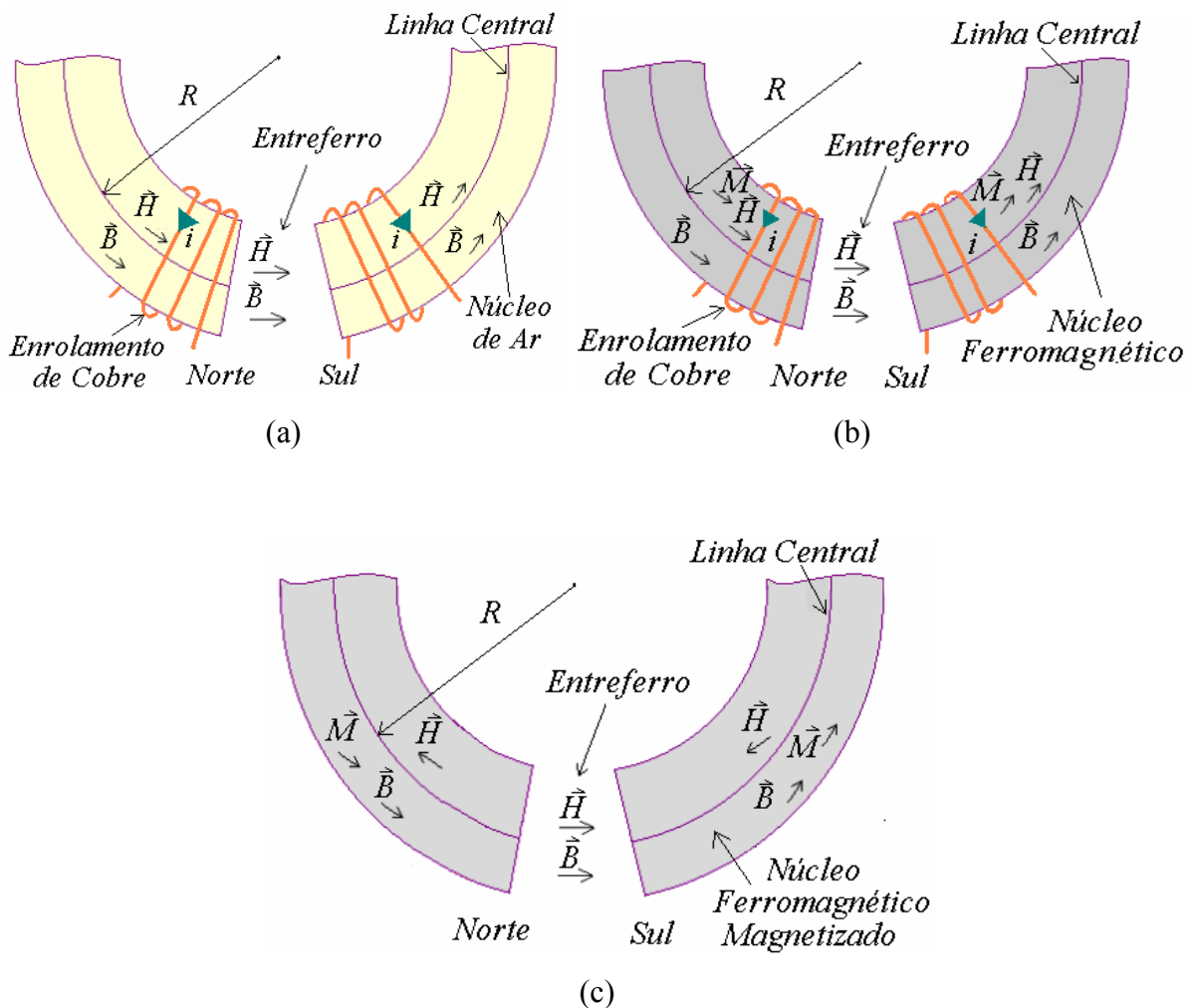


Figura 3.3 – (a) Bobina toroidal com núcleo de ar, (b) com núcleo de material ferromagnético e (c) núcleo toroidal de material ferromagnético magnetizado [19].

Para um ímã permanente, durante o processo de magnetização, o valor do campo aplicado,  $\vec{H}$ , é tão elevado, que existe uma diferença significativa entre suas características normais e intrínsecas. A curva de desmagnetização intrínseca é usada para determinar os efeitos de condições externas desmagnetizantes sobre o ímã permanente, e a curva normal, para a determinação da densidade de fluxo nos entrefeos de um circuito magnético do qual faça parte um ímã permanente. Quanto maior for o valor do campo externo aplicado, mais divergentes serão as curvas intrínseca e normal [22]. O valor de  $\vec{H}$  no qual  $\vec{B}$  torna-se zero na curva de desmagnetização intrínseca, corresponde à coercitividade intrínseca,  $H_{ci}$  [19] [20]. As curvas de desmagnetização de um ímã permanente estão apresentadas na figura 3.4.

Em materiais permanentemente magnetizados, os vetores  $\vec{B}$  e  $\vec{M}$  variam com o vetor  $\vec{H}$ , conforme pode ser visto pelo gráfico da figura 3.4, e estão relacionados pela equação (3.1). O vetor magnetização pode ser calculado pela seguinte relação [74]:

$$\vec{M} = \chi\vec{H} + \vec{M}_r \quad (3.2)$$

onde  $\chi$  é a suscetibilidade magnética do material, calculada por  $(\mu_r - 1)$ , e  $\vec{M}_r$  é o vetor magnetização residual ou magnetização remanente. Substituindo a equação (3.2) na equação (3.1), obtém-se:

$$\vec{B} = \mu_o[(1 + \chi)\vec{H} + \vec{M}_r] \quad (3.3)$$

ou:

$$\vec{B} = \mu_o(\mu_r\vec{H} + \vec{M}_r) \quad (3.4)$$

A magnetização residual está relacionada com a densidade de fluxo remanente,  $\vec{B}_r$ , pela seguinte expressão:

$$\vec{B}_r = \mu_o\vec{M}_r \quad (3.5)$$

Assim, a equação (3.4) transforma-se em:

$$\vec{B} = \mu_o\mu_r\vec{H} + \vec{B}_r \quad (3.6)$$

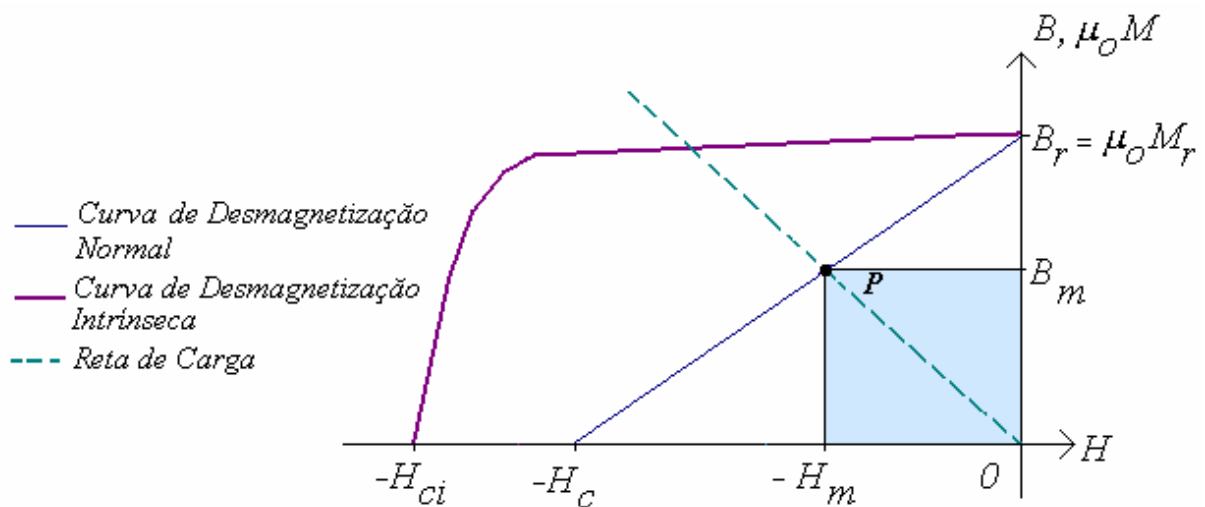


Figura 3.4 - Curvas de desmagnetização de um ímã permanente [12].

Uma outra forma de representar a equação (3.2) é mostrada a seguir:

$$\vec{M} = (\mu_r - 1)\vec{H} + \vec{M}_r \quad (3.7)$$

Substituindo-se  $\vec{M}_r$  por  $\vec{B}_r$  na equação anterior, obtém-se:

$$\vec{M} = \left( \frac{\mu}{\mu_o} - 1 \right) \vec{H} + \frac{\vec{B}_r}{\mu_o} \quad (3.8)$$

Multiplicando-se os termos da equação (3.8) por  $\mu_o$ , tem-se:

$$\mu_o \vec{M} = (\mu - \mu_o) \vec{H} + \vec{B}_r = \mu_o (\mu_r - 1) \vec{H} + \vec{B}_r \quad (3.9)$$

que é a equação da curva de desmagnetização intrínseca do ímã permanente. Em ímãs permanentes como o NdFeB, a permeabilidade relativa aproxima-se da unidade. Nestes casos, a maior parte da curva de desmagnetização intrínseca possui uma inclinação muito pequena, podendo, por simplificação, ser considerada constante com a variação de  $\vec{H}$  na região de operação do ímã permanente. Será visto no capítulo 4 deste trabalho, que, para o modelo em estudo, considerou-se que o vetor magnetização possui componente apenas em  $z$ . A variação da magnetização não foi considerada, ou seja,  $\vec{M}$  foi representada por uma função, através do módulo do vetor magnetização residual,  $\vec{M}_r$ , para qualquer ponto de operação do ímã permanente [27] [74]. Se a magnetização está sendo considerada constante através de uma faixa de operação, então a permeabilidade relativa está sendo considerada igual à unidade, e a equação (3.9) é simplificada para:

$$\mu_o \vec{M} = \mu_o \vec{M}_r = \vec{B}_r \quad (3.10)$$

### 3.3 ANÁLISE DE CIRCUITOS MAGNÉTICOS CONTENDO ÍMÃS PERMANENTES

A análise de um circuito magnético contendo ímãs permanentes prende-se ao segundo quadrante da curva de histerese, definida como curva de desmagnetização normal, apresentada na figura 3.4. Entre a remanência,  $B_r$ , e a coercitividade,  $H_c$ , existe um par de coordenadas da curva, cujo produto entre  $B$  e  $H$  será máximo, possuindo a dimensão de Joule por metro cúbico. O par de coordenadas  $(B, H)$  onde ocorre o máximo produto  $BH$ , abreviado por  $(BH)_{máx}$ , é denominado de ponto de máximo produto energético. O

produto máximo fornece uma indicação da qualidade do ímã permanente [18] [20]. 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 [19] [20], sendo representado pelo ponto  $P$  na reta que une os pontos de coordenadas  $(0, 0)$  e  $(B, H)$  no gráfico da figura 3.4.

O circuito apresentado na figura 3.5 contém um ímã permanente, um núcleo de ferro e um entreferro. Como o circuito não possui bobinas com corrente, a integral de linha de  $\vec{H}$  ao longo da linha que corresponde ao caminho médio do fluxo magnético através do circuito magnético de comprimento  $l$ , corresponde a [12]:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = N_b \cdot I = 0 \quad (3.11)$$

onde  $N_b$  corresponde ao número de espiras de uma determinada bobina e  $I$ , à corrente elétrica nessa bobina hipotética. O fluxo produzido pelo ímã permanente,  $\phi_m$ , 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 (3.11) pode ser desenvolvida em sua forma escalar como:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_{l_m} H_m dl_m + \int_{l_{Fe}} H_{Fe} dl_{Fe} + \int_{l_g} H_g dl_g = 0 \quad (3.12)$$

onde  $l_{Fe}$  é o comprimento médio da região em ferro e  $l_g$  e  $l_m$  estão definidos pela figura 3.5. Se o ferro for considerado ideal com alta permeabilidade, a equação anterior resulta em:

$$\int_{l_m} H_m dl_m + \int_{l_g} H_g dl_g = 0 \quad (3.13)$$

Se a intensidade de campo magnético for considerada constante em cada região do circuito, a equação (3.13) pode ser resolvida, de forma que sua solução seja igual a [12]:

$$H_m l_m + H_g l_g = 0 \quad (3.14)$$

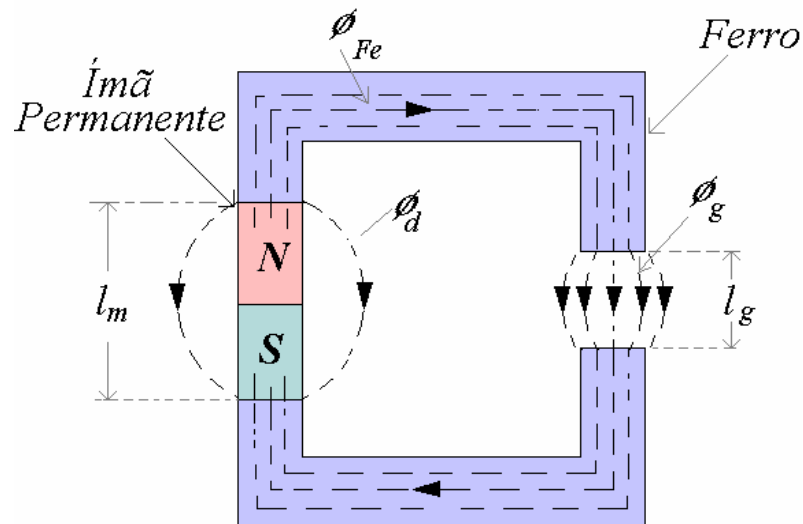


Figura 3.5 - Circuito magnético contendo um ímã permanente e um entreferro [22].

Resolvendo a equação anterior, tem-se:

$$-H_m l_m = H_g l_g \quad (3.15)$$

Conforme verificado,  $H_m$  e  $H_g$  têm sinais opostos, e o campo  $H_g$  tem uma ação desmagnetizante sobre ímã permanente. No entreferro, a intensidade de campo magnético é calculada por:

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_o} \quad (3.16)$$

Logo,

$$\frac{B_g}{H_m} = -\mu_o \left( \frac{l_m}{l_g} \right) \quad (3.17)$$

Se o fluxo disperso for desprezado, ou seja, se o valor do fluxo magnético no entreferro,  $\phi_g$ , é igual ao valor do fluxo magnético no ímã permanente,  $\phi_m$ , tem-se que  $B_m \cdot s_m = B_g \cdot s_g$ . Desta forma, a equação (3.17) transforma-se em:

$$\frac{B_m}{H_m} = -\mu_o \left( \frac{l_m}{l_g} \right) \left( \frac{s_g}{s_m} \right) \quad (3.18)$$

A equação acima é a equação da reta de carga do ímã permanente. O ponto onde a reta de carga corta a curva normal fornece o ponto de operação do ímã

permanente, ou seja, o par de coordenadas  $(-H_m, B_m)$  do gráfico apresentado na figura 3.4. Através deste ponto, é possível obter-se o valor da densidade de fluxo no entreferro. Os fatores de fluxo disperso e de espraçamento de fluxo no entreferro foram até agora ignorados, pois considerou-se o circuito magnético ideal.

Na região do entreferro o fluxo magnético sofre um espraçamento, resultando em uma área transversal maior considerada para o cálculo da densidade de fluxo no entreferro. O grau do espraçamento do fluxo no entreferro depende da geometria das extremidades do circuito em ferro, da área do ferro e do comprimento do entreferro. A área do entreferro é estimada em função do coeficiente de espraçamento do fluxo no entreferro,  $C_f$ ,

que relaciona  $s_g$  e  $s_m$ , tal que  $C_f = \frac{s_g}{s_m}$ . Este coeficiente é de difícil determinação [20],

assim como o fator de dispersão do fluxo,  $L_f$ , que relaciona o fluxo total com o fluxo que cruza o entreferro, ou seja,

$$L_f = \frac{\phi_g + \phi_d}{\phi_g} = \frac{\phi_m}{\phi_g} = \frac{s_m B_m}{s_g B_g} \quad (3.19)$$

Substituindo-se a equação (3.19) na equação (3.17), tem-se

$$\frac{B_g}{H_m} = -\left(\frac{l_m}{l_g}\right)\mu_o = \frac{B_m}{L_f H_m} \left(\frac{s_m}{s_g}\right) = -\left(\frac{l_m}{l_g}\right)\mu_o \quad (3.20)$$

ou,

$$\frac{B_m}{H_m} = -\left(\frac{l_m}{l_g}\right)\left(\frac{s_g}{s_m}\right)\mu_o L_f = -\left(\frac{l_m}{l_g}\right)\mu_o L_f C_f \quad (3.21)$$

Se um circuito magnético, similar ao apresentado na figura 3.6(a), for composto por um ímã permanente e por uma ou mais bobinas percorridas por corrente, o ponto de operação do ímã permanente dependerá, além das características geométricas do circuito magnético, da força magnetomotriz produzida pelas bobinas [12]. Como há um enrolamento percorrido por corrente no circuito magnético da figura 3.6(a), a equação (3.11) transforma-se em:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = N_b \cdot I = H_m l_m + H_g l_g \quad (3.22)$$

Considerando que  $B_g = \frac{B_m}{L_f C_f}$ , após algumas operações, obtém-se:

$$B_m = \left( \frac{N_b I}{l_m} - H_m \right) \left( \frac{l_m}{l_g} \right) \mu_o L_f C_f \quad (3.23)$$

A equação anterior representa a reta de carga de um ímã permanente inserido em um circuito que contém um ou mais enrolamentos percorridos por corrente. A força magnetomotriz da bobina define a posição da reta de carga em relação ao eixo de  $H$ , através de  $\frac{N_b I}{l_m}$ , conforme mostra a figura 3.6(b) [12].

### 3.3.1 Circuito Magnético do Atuador Planar

A representação do circuito magnético do atuador planar é feita por analogia entre este e um circuito elétrico, através da representação dos ímãs permanentes

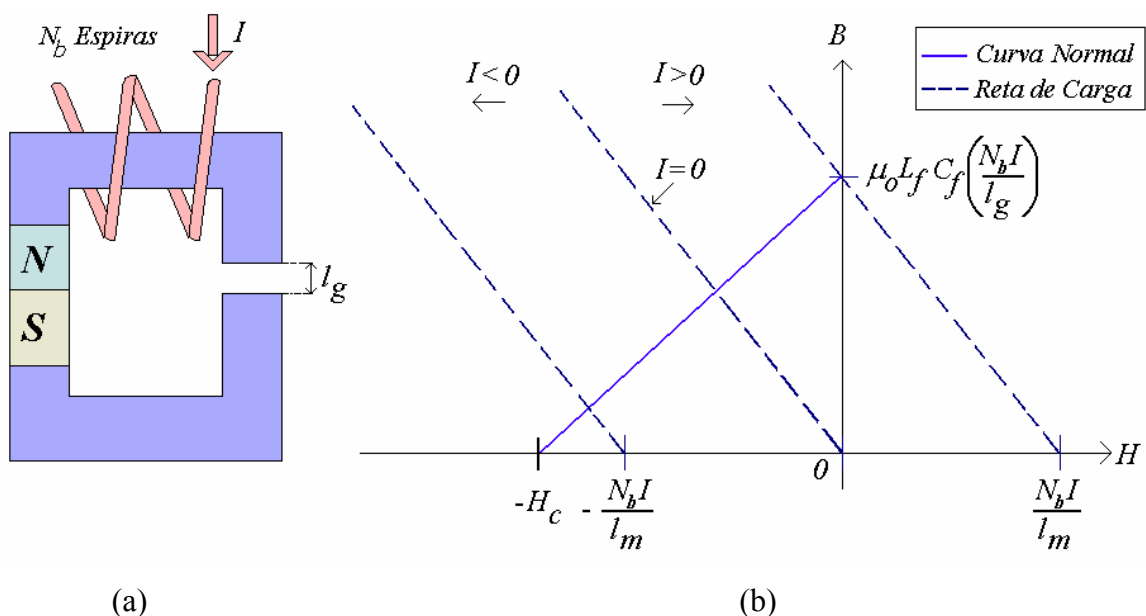


Figura 3.6 – (a) Circuito magnético contendo um ímã permanente e uma bobina e (b) localização da reta de carga do circuito magnético em função da corrente  $I$  [12].

como se fossem fontes de tensão e as relutâncias do material ferromagnético e do entreferro como se fossem resistores. O efeito do fluxo disperso pode ser representado por um resistor em paralelo com a fonte de tensão. No análogo elétrico, a tensão entre os terminais da fonte corresponde à força magnetomotriz do ímã permanente e o fluxo magnético é representado pela corrente. O valor do fluxo magnético estabelecido através do núcleo magnético dependerá da magnitude da força magnetomotriz e das relutâncias do circuito. No circuito magnético simplificado do atuador planar, apresentado na figura 3.7(a), o fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes, que atravessa o entreferro  $l_{g1}$ , deixa o pólo norte do ímã permanente 1 adjacente ao núcleo da armadura; atravessa o entreferro  $l_{g2}$  em direção ao pólo sul do ímã permanente 2 e completa seu caminho através da culatra de material ferromagnético. O análogo elétrico deste circuito está apresentado na figura 3.7(b). O cálculo do valor de  $H_m l_m$  de cada ímã permanente de 6 mm de comprimento axial é apresentado no Apêndice A deste trabalho.

Desprezando-se a relutância relacionada ao fluxo disperso, a relutância equivalente do circuito será obtida por:

$$\mathfrak{R}_{eq} = \mathfrak{R}_{fe1} + \mathfrak{R}_{fe2} + \mathfrak{R}_{g1} + \mathfrak{R}_{g2} \quad (3.24)$$

onde  $\mathfrak{R}_{eq}$  é a relutância equivalente do circuito magnético do atuador planar,  $\mathfrak{R}_{fe1}$ , a relutância do núcleo da armadura,  $\mathfrak{R}_{fe2}$ , a relutância da culatra,  $\mathfrak{R}_{g1}$ , a relutância do entreferro localizado sob o ímã permanente 1 e  $\mathfrak{R}_{g2}$ , a relutância do entreferro localizado sob o ímã permanente 2. Se a permeabilidade magnética do material ferromagnético macio for considerada infinita, tem-se:

$$\mathfrak{T}_m = \phi_m \cdot (\mathfrak{R}_{g1} + \mathfrak{R}_{g2}) \quad (3.25)$$

onde  $\mathfrak{T}_m$  é força magnetomotriz total produzida pela soma de  $\mathfrak{T}_{m1}$  e  $\mathfrak{T}_{m2}$ , respectivamente a fmm produzida pelo ímã permanente 1 e a fmm produzida pelo ímã permanente 2.



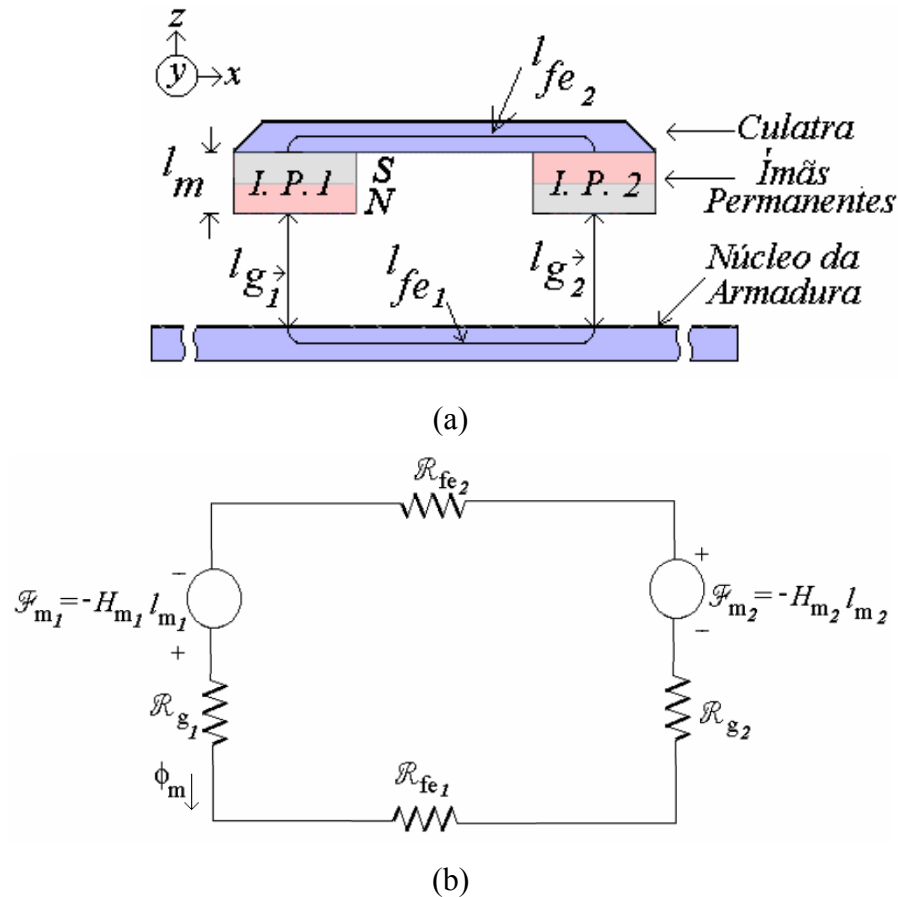


Figura 3.7 - (a) Circuito magnético simplificado do atuador planar e (b) análogo elétrico do mesmo dispositivo.

O circuito elétrico equivalente, mostrado na figura 3.7(a), foi utilizado para a definição inicial das características construtivas do atuador planar. A permeabilidade do material do núcleo da armadura e da culatra foi considerada idealmente infinita. Os dois ímãs permanentes foram considerados magneticamente idênticos. Foi feita uma definição inicial dos coeficientes de dispersão e de espraçamento do fluxo magnético [55] [56] [57]. A previsão inicial da performance do atuador planar foi feita com base nos valores das forças estáticas normal e planar de propulsão que seriam produzidas sobre o carro. Foram calculados diferentes pontos de operação do circuito magnético, pela variação da relação  $l_m / l_g$ . Como a força coercitiva dos ímãs permanentes é alta e o entreferro possui um comprimento elevado, considerou-se que o efeito de reação da armadura não influencia o ponto de operação destes ímãs permanentes. Assim, a reta de carga foi definida pela equação (3.21). Cada ponto de operação produziu um valor de densidade de fluxo magnético nos ímãs permanentes e de densidade de fluxo magnético nos entreferros e, conseqüentemente, de força normal e de força planar de propulsão. O estudo levou em conta os níveis das forças de propulsão e normal,

calculadas pelas equações (2.9) e (2.10), como função do ponto de operação dos ímãs permanentes e da densidade de corrente aplicada às fases localizadas sob os ímãs permanentes. O ponto de operação do circuito magnético escolhido definiu as principais características construtivas do atuador planar. O Apêndice A apresenta o método utilizado para a definição inicial das características de projeto do primeiro protótipo construído. Os resultados são apresentados na tabela 3.1.

Os valores apresentados na tabela 1 referem-se ao caso 1, em que os ímãs permanentes utilizados possuem comprimento axial de 6,0 mm e o entreferro possui um comprimento total de 14,0 mm. As características dos ímãs permanentes de 6,0 mm definiram as características construtivas do atuador planar. O primeiro protótipo foi construído e testado. Posteriormente os ímãs permanentes de 6,0 mm foram substituídos por ímãs permanentes de comprimento axial igual a 8,0 mm, e os ensaios foram repetidos. Em termos da corrente que pode ser aplicada a cada fase dos enrolamentos da armadura, definiu-se uma faixa de operação entre zero e 6,0 A por fase, tanto para o caso 1, quanto para o caso 2. Esta faixa foi determinada com base em uma estimativa inicial que estipulou os níveis de corrente que seriam suportáveis pelos condutores dos enrolamentos da armadura durante um determinado intervalo de tempo, baseada no limite térmico de operação desses condutores.

Tabela 3.1 – Características de projeto do atuador planar para o caso 1.

Item	Característica
Comprimento de cada ímã permanente	6 mm
Comprimento de cada entreferro	14 mm
Ponto de operação	$B_m = 0,816 \text{ T}$ , $H_m = -315,651 \text{ kA/m}$
Densidade de fluxo no entreferro	0,17 T
Densidade de corrente em cada fase	8,96 A/mm <sup>2</sup>
Área da superfície polar dos ímãs permanentes	25 x 25 mm <sup>2</sup>
Volume ativo ocupado pelos condutores	9.375 mm <sup>3</sup>
Força planar de propulsão, considerando duas fases excitadas de um mesmo enrolamento	28,58 N
Força normal	57,50 N
Densidade de corrente corrigida em cada fase	29,41 A/mm <sup>2</sup>
Volume ativo corrigido ocupado pelos condutores	2.856 mm <sup>3</sup>
Faixa de operação em Ampères/fase	0 a 6,0 A/fase

### 3.3.2 Características dos Materiais Magnéticos Empregados no Atuador Planar

Na construção do núcleo da armadura e da culatra do atuador planar foi empregado o aço 1045 (Steel JIS S45C ou Steel DIN CK45). Sua densidade de fluxo de saturação é igual 1,95 T. A curva de magnetização deste material é mostrada na figura 3.8.

O carro possui dois ímãs permanentes idênticos de NdFeB. No caso 1 foram empregados ímãs permanentes de 6,0 mm de comprimento axial e área polar de 25,0 x 25,0 mm<sup>2</sup>. No caso 2, os ímãs permanentes possuem 8,0 mm de comprimento axial e área polar igual a 25,4 x 25,4 mm<sup>2</sup>. Em ambos os casos os ímãs permanentes empregados possuem grau N35H. Para esse grau, a densidade do material possui valores entre 7,45 e 7,55 g/cm<sup>3</sup>. A temperatura máxima de trabalho é de 120 °C.

As características apresentadas a seguir referem-se aos ímãs permanentes NdFeB de 6,0 mm de comprimento e foram obtidas através de catálogos:

- tipo: NdFeB sinterizado anisotrópico níquelado
- produto de máxima energia  $(BH)_{máx} = 37,17 \text{ MGOe} = 295,79 \text{ kJ/m}^3$
- remanência  $B_r = 12.400 \text{ G} = 1,24 \text{ T}$
- coercitividade normal  $H_c > 11.596 \text{ Oe} = 923,1 \text{ kA/m}$
- coercitividade intrínseca  $H_{ci} > 15.664 \text{ Oe} = 1246,86 \text{ kA/m}$
- permeabilidade relativa = 1,069

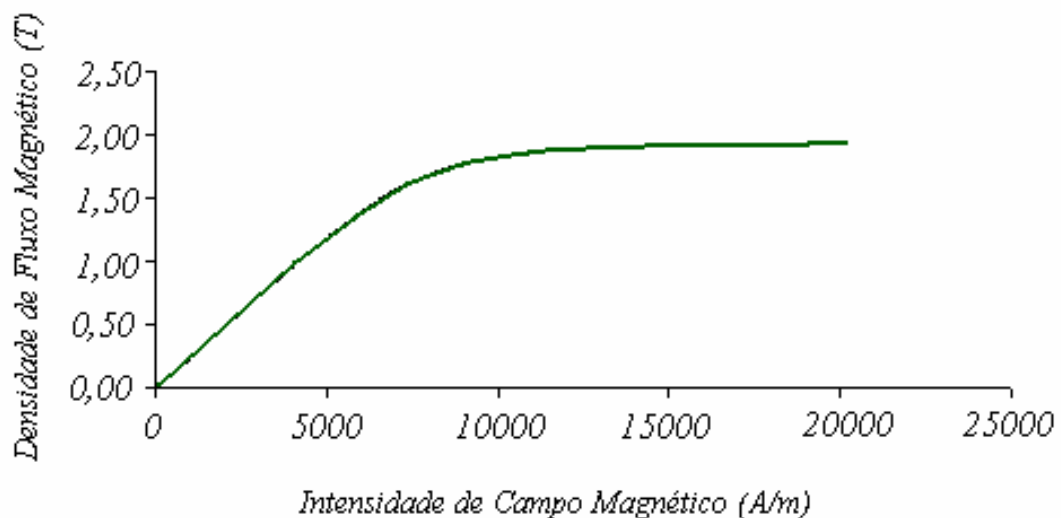


Figura 3.8 - Curva de magnetização nominal do aço 1045 [73].

A figura 3.9 apresenta a curva de desmagnetização normal dos ímãs permanentes N35H de 6,0 mm de comprimento. Esta curva foi gerada através das informações obtidas em catálogos.

Os dados apresentados a seguir, referem-se aos ímãs permanentes NdFeB de 8,0 mm de comprimento e foram fornecidos pelo fabricante:

- tipo: NdFeB sinterizado anisotrópico niquelado
- produto de máxima energia  $(BH)_{máx} = 36 \text{ MGOe} \pm 10\% = 286,48 \text{ kJ/m}^3 \pm 10\%$
- remanência  $B_r = 12.100 \text{ G} \pm 5\% = 1,21 \text{ T} \pm 5\%$
- coercitividade normal  $H_c > 10.900 \text{ Oe} = 867,4 \text{ kA/m}$
- coercitividade intrínseca  $H_{ci} > 12.000 \text{ Oe} = 955 \text{ kA/m}$
- permeabilidade relativa = 1,11

A figura 3.10 apresenta a curva de desmagnetização normal dos ímãs permanentes. Esta curva foi fornecida pelo fabricante.

As características magnéticas dos materiais apresentados anteriormente foram àquelas utilizadas nos modelos teóricos analítico e numérico para a obtenção dos valores de densidade de fluxo magnético e de força. Será visto no Capítulo 6 deste trabalho que os valores teóricos diferiram em relação aos valores obtidos através dos testes efetuados no protótipo do atuador planar.

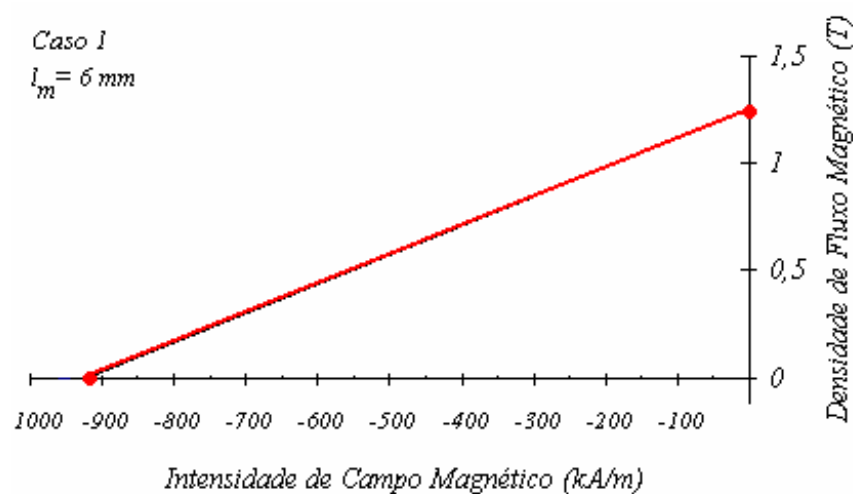


Figura 3.9 - Curva de desmagnetização normal dos ímãs permanentes N35H de comprimento axial igual a 6,0 mm.

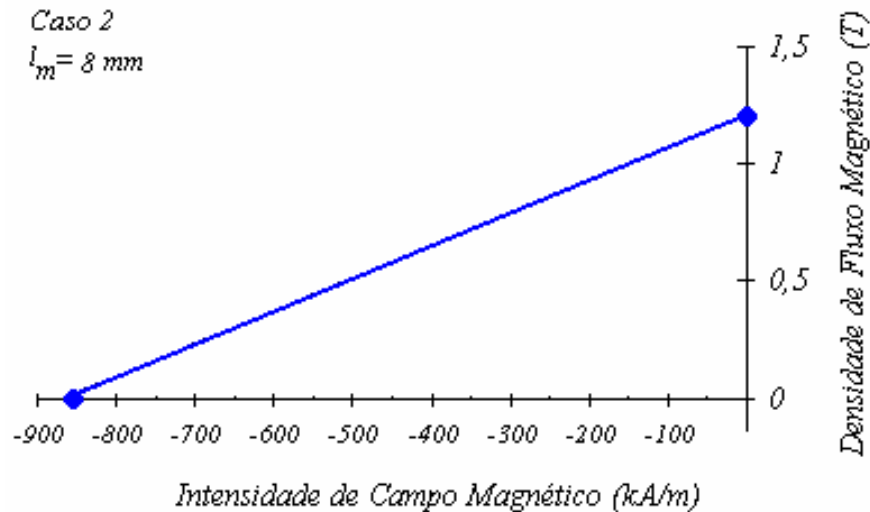


Figura 3.10 - Curva de desmagnetização normal dos ímãs permanentes N35H de comprimento axial igual a 8,0 mm, fornecida por seu fabricante.

A maior diferença foi verificada nos valores da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, que chegou a 12,06 %. Essas diferenças podem estar relacionadas às diferenças entre as características magnéticas fornecidas pelos fabricantes e aquelas que os ímãs permanentes realmente apresentam. Com relação ao modelo analítico, será visto no Capítulo 4 que foram feitas algumas simplificações, que tendem a produzir valores teóricos com pequenas diferenças em relação a valores reais.

Com vistas a avaliar as diferenças produzidas entre valores teóricos e medidos, foram efetuadas medições da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no ponto central das superfícies polares dos ímãs permanentes de comprimento axial igual a 8,0 mm. Durante as medições, os ímãs permanentes foram removidos do carro e mantidos afastados de materiais ferromagnéticos. Através de uma ponteira de efeito Hall e de um Gaussímetro foi medido o valor da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no ponto localizado 0,5 mm acima do centro de cada superfície polar dos ímãs permanentes. As mesmas condições desse ensaio foram reproduzidas em uma análise numérica. Para isso, foi criado um modelo tridimensional de elementos finitos para análise numérica da distribuição da densidade de fluxo magnético. Cada ímã permanente foi modelado numericamente, sendo caracterizado por suas grandezas geométricas, pelas grandezas magnéticas relacionadas nesta seção e pelas condições de fronteira. Através do modelo numérico foram obtidos os valores da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no ponto localizado 0,5 mm acima da superfície polar de cada ímã permanente, ou seja, na posição equivalente à dos ensaios. A

tabela 3.2 apresenta os resultados obtidos através da análise numérica e das medições realizadas nos ímãs permanentes de 8,0 mm de comprimento axial utilizados no atuador planar. Verifica-se pela tabela que os valores medidos e simulados da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético diferiram entre si. Possivelmente essas diferenças estão relacionadas com divergências entre as características magnéticas fornecidas pelos fabricantes e aquelas que realmente os ímãs permanentes apresentam. São apresentados apenas os resultados relacionados aos ímãs permanentes de 8,0 mm, pois suas características de fabricação foram fornecidas pelo fabricante. O fabricante não informou as características magnéticas dos ímãs permanentes de 6,0 mm.

Tabela 3.2 – Valores da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético medidos no ponto localizado 0,5 mm acima do centro da superfície polar de cada ímã permanente.

Ímãs Permanentes	Componente $z$ do Vetor Densidade Fluxo Magnético (mT)			
	Medido		Numérico	
	Face N	Face S	Face N	Face S
IM 1 – 8,0 mm	287,06	-286,84	273,4	-273,4
IM 2 – 8,0 mm	280,18	-285,46	273,4	-273,4

## 4 MODELO ANALÍTICO DO ATUADOR PLANAR

As forças que atuam sobre o carro do atuador planar dependem da distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro. E o comportamento da distribuição do fluxo magnético no entreferro é determinado pelo ponto de operação dos ímãs permanentes e pela reação da armadura produzida pelos condutores percorridos por corrente. Esta distribuição pode ser determinada usando um modelo analítico. O método de análise, que será apresentado, está baseado em um modelo tridimensional, desenvolvido em coordenadas retangulares para descrever o comportamento da densidade de fluxo magnético no entreferro em função dos campos magnéticos produzidos pelos ímãs permanentes e pela reação da armadura.

### 4.1 ANÁLISE DE CAMPOS MAGNÉTICOS

A análise de campos magnéticos é realizada em termos de dois tipos de funções potenciais: o potencial vetor magnético e o potencial escalar magnético. A descrição clássica de campos eletromagnéticos é feita em termos das equações de Maxwell, um sistema de equações diferenciais envolvendo os campos e as densidades de fluxo. As equações dos potenciais comumente empregadas na análise do campo magnético, e que são mais fáceis de resolver, derivam-se das equações de Maxwell. As grandezas eletromagnéticas envolvidas são o vetor intensidade de campo elétrico,  $\vec{E}$ , o vetor densidade de fluxo elétrico ou indução elétrica,  $\vec{D}$ , o vetor intensidade de campo magnético,  $\vec{H}$ , o vetor densidade de fluxo magnético ou indução magnética,  $\vec{B}$ , o vetor densidade de corrente,  $\vec{J}$ , e a densidade de carga,  $\rho$ , [19] [32]. Em problemas associados à quase-estática, as equações de Maxwell envolvidas na análise assumem a seguinte forma [32]:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.2)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.3)$$

Se não houver fontes de corrente e se as grandezas não são variáveis com o tempo, as equações (4.1) e (4.3) assumem a forma  $\nabla \times \vec{H} = 0$  e  $\nabla \times \vec{E} = 0$ ,

respectivamente. Nas equações anteriores,  $\nabla$  é o operador nabla, que em coordenadas retangulares é igual a  $\frac{\partial}{\partial x}\bar{i} + \frac{\partial}{\partial y}\bar{j} + \frac{\partial}{\partial z}\bar{k}$ .

## 4.2 ESTUDO DE CAMPOS MAGNÉTICOS APLICADO AO ATUADOR PLANAR

No estudo de campos magnéticos aplicado ao atuador planar, o campo magnético produzido pelos ímãs permanentes foi analisado separadamente do campo magnético produzido pelas correntes nos enrolamentos da armadura. Na análise do campo magnético produzido pelos ímãs permanentes, foi empregado o potencial escalar magnético e, na análise do campo magnético produzido pelas correntes de armadura, o potencial vetor magnético.

### 4.2.1 Campo Magnético Produzido pelos Ímãs Permanentes

No carro do atuador planar os ímãs permanentes estão montados em oposição quanto às suas polaridades, ou seja, em antiparalelo. A formulação a ser empregada na análise do campo magnético produzido pelos ímãs permanentes é a do potencial escalar magnético. Quando uma determinada região de um modelo em estudo não possui fontes de corrente, o rotacional do vetor  $\vec{H}$  é nulo ( $\nabla \times \vec{H} = 0$ ) e um potencial escalar magnético  $\psi$  pode ser definido, a partir do qual o campo  $\vec{H}$  é derivado, através da seguinte expressão [12] [32]:

$$\vec{H} = -\nabla \psi \quad (4.4)$$

A equação (4.4) indica <sup>2</sup> que  $\vec{H}$  é igual ao gradiente negativo de um potencial escalar magnético  $\psi$ .

#### 4.2.1.1 A Equação de Laplace em Termos do Potencial Escalar Magnético

No Capítulo 3 a equação (3.1) definiu a relação existente entre os vetores  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  e  $\vec{M}$ . Em uma região onde exista apenas ar, como o entreferro do atuador planar, o vetor  $\vec{M}$  é nulo e a aplicação das equações (4.2) e (4.4) à equação  $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$  resultará em:

---

<sup>2</sup> Quando não houver correntes envolvidas, então  $\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0$  e entre dois pontos quaisquer de uma região existe uma diferença de potencial magnético calculada por  $\psi_1 - \psi_2 = Hl$ .



$$\nabla \cdot \vec{B} = \mu_0 \nabla \cdot \vec{H} = \mu_0 \nabla \cdot (-\nabla \psi_g) = 0 \quad (4.5)$$

onde  $\psi_g$  representa o potencial escalar magnético no entreferro. Em coordenadas retangulares, a equação (4.5) assume a forma:

$$\frac{\partial^2 \psi_g}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_g}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi_g}{\partial z^2} = 0 \quad (4.6)$$

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 (4.6) que satisfaça as condições de fronteira impostas para o problema [19][24]. Supondo que  $\psi_g$  possa ser expresso como o produto de três funções  $X(x)$ ,  $Y(y)$  e  $Z(z)$ , obtém-se:

$$\psi_g(x, y, z) = X(x)Y(y)Z(z) \quad (4.7)$$

onde  $X(x)$  é função de  $x$  somente,  $Y(y)$  é função de  $y$  somente e  $Z(z)$  é função de  $z$  somente. Introduzindo-se estas três funções na equação (4.6), tem-se

$$YZ \frac{d^2 X}{dx^2} + XZ \frac{d^2 Y}{dy^2} + XY \frac{d^2 Z}{dz^2} = 0 \quad (4.8)$$

A equação (4.8) pode ser reescrita como:

$$\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} + \frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} = 0 \quad (4.9)$$

Como a soma dos três termos à esquerda da equação anterior é igual a uma constante (zero), e cada variável é independente, cada termo deve ser igual a uma constante [14] [19]. Separando-se as variáveis, obtém-se o seguinte conjunto de equações:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} = \alpha^2 X, \quad \frac{d^2 Y}{dy^2} = \beta^2 Y, \quad \frac{d^2 Z}{dz^2} = \gamma^2 Z \quad (4.10)$$

$$\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2 = 0 \quad (4.11)$$

Uma vez que  $\gamma$  dever produzir um valor real,  $\alpha$  e  $\beta$  devem produzir valores imaginários  $\left( \gamma = \sqrt{-\alpha^2 - \beta^2} \right)$ . A solução para o conjunto de equações apresentado em (4.10) é fornecida a seguir:

$$\begin{aligned}
X(x) &= A_1 e^{\alpha x} + B_1 e^{-\alpha x} \\
Y(y) &= A_2 e^{\beta y} + B_2 e^{-\beta y} \\
Z(z) &= A_3 e^{\gamma z} + B_3 e^{-\gamma z}
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Substituindo as três equações anteriores em (4.7), obtém-se a solução geral da equação de Laplace:

$$\psi_g(x, y, z) = \left( A_1 e^{\alpha x} + B_1 e^{-\alpha x} \right) \left( A_2 e^{\beta y} + B_2 e^{-\beta y} \right) \left( A_3 e^{\gamma z} + B_3 e^{-\gamma z} \right) \tag{4.13}$$

Na equação (4.13),  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$  são constantes arbitrárias, que devem satisfazer a equação de Laplace, as condições de fronteira impostas para o modelo e as condições do campo magnético na região dos ímãs permanentes, assim como  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  devem satisfazer a equação (4.11) [19][24][25]. A figura 4.1 mostra as vistas frontal e superior da geometria em estudo, onde  $l_g$  é o comprimento do entreferro,  $l_m$  é o comprimento axial dos ímãs permanentes, e  $(2l_d)^2$  corresponde à área da superfície polar de cada ímã permanente. A grandeza  $l_t$  está definida pela figura 4.1(b). Na elaboração do modelo, foi suposto que há simetria na distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro sob os ímãs permanentes. Assim sendo, a linha central de cada semicírculo do gráfico de  $B_{g_z}$  em função da distância através do eixo  $x$ , coincide com a linha central de cada ímã permanente,  $LC$ . Considerando que  $l_d$  corresponda à distância entre a linha central do carro, denominada de linha neutra,  $LN$ , e a parede lateral de um dos ímãs permanentes, então, por simetria, a mesma distância existe entre a lateral oposta do mesmo ímã permanente e a fronteira do modelo. Assim,  $l_t$  é igual a 8 vezes o valor de  $l_d$ . A figura 4.2 mostra a relação entre as dimensões geométricas do modelo e o valor de  $l_t$ , e também o formato presumível da distribuição da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético para o modelo em estudo. O gráfico apresentado na figura 4.2 tem por objetivo mostrar, de forma qualitativa, o formato presumido da distribuição da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o carro. Essa distribuição será simétrica em relação à linha central dos ímãs permanentes, e terá valor nulo na linha neutra, localizada entre os dois ímãs permanentes.

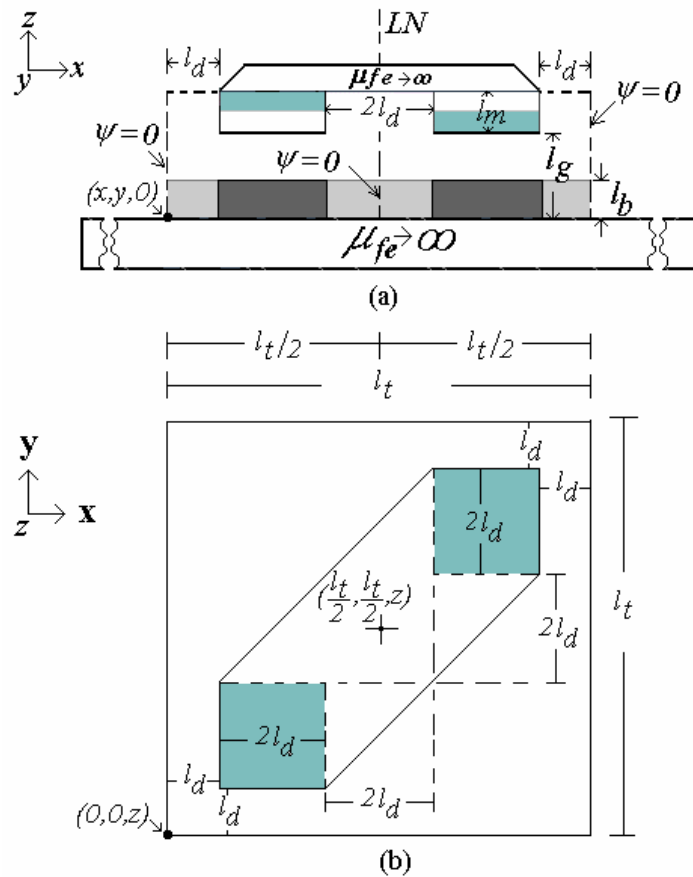


Figura 4.1 - Geometria em estudo: (a) vista frontal e (b) vista superior. Na vista frontal apenas as fases do enrolamento  $x$  que estão localizadas sob os ímãs permanentes estão destacadas.

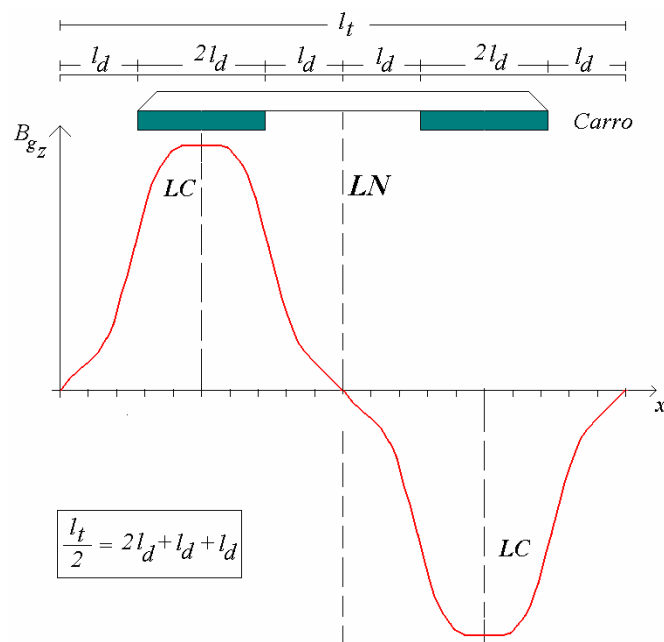


Figura 4.2 – Dimensões geométricas do modelo e formato presumível da distribuição da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro.

As condições de fronteira foram definidas de forma que o potencial escalar magnético fosse igual a zero nos planos  $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $x = l_t / 2$ ,  $y = l_t / 2$ ,  $x = l_t$  e  $y = l_t$ . A permeabilidade magnética do núcleo do estator e da culatra foi assumida como sendo infinita. Devido à simetria na distribuição do fluxo magnético no entreferro, a análise leva em conta os efeitos de apenas um ímã permanente. O circuito magnético do atuador planar foi dividido em regiões e foram impostas condições para o campo e o potencial escalar magnéticos nas fronteiras entre essas regiões. A figura 4.3 apresenta as regiões e suas fronteiras, simbolizadas por  $O$ ,  $B$ ,  $G$  e  $P$ .

Conforme definido pela figura 4.1(a), o potencial escalar magnético na fronteira  $x = 0$  é igual a zero. Inserindo-se esta condição em  $X = A_1 e^{\alpha x} + B_1 e^{-\alpha x}$ , tem-se:

$$X(0) = A_1 + B_1 = 0 \quad (4.14)$$

Fazendo operação similar com a condição definida em  $y = 0$ , obtém-se:

$$Y(0) = A_2 + B_2 = 0 \quad (4.15)$$

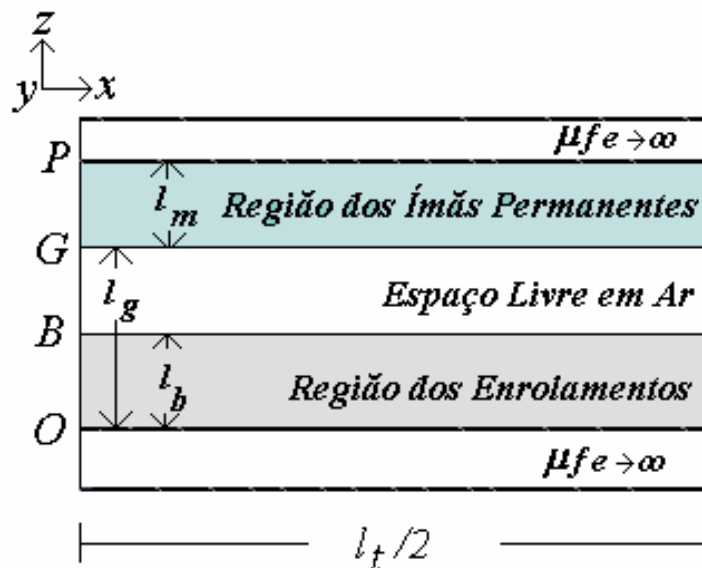


Figura 4.3 - Modelo em estudo: divisão do modelo em regiões e fronteiras simbolizadas por  $O$ ,  $B$ ,  $G$  e  $P$ .

Aplicando-se a condição do plano  $x = l_t / 2$  em  $X = A_1 e^{\alpha x} + B_1 e^{-\alpha x}$ , obtém-se

$$X(l_t / 2) = A_1 e^{\alpha(l_t / 2)} - A_1 e^{-\alpha(l_t / 2)} = 0 \quad (4.16)$$

A equação anterior produz o seguinte resultado:

$$e^{\alpha(l_t / 2)} = e^{-\alpha(l_t / 2)}$$

ou

$$e^{2\alpha(l_t / 2)} = 1 \quad (4.17)$$

Aplicando a identidade de Euler ( $e^{j\theta} = \cos \theta + j \operatorname{sen} \theta$ ) à equação (4.17), obtém-se:

$$e^{2\alpha(l_t / 2)} = \cos(\alpha l_t) + j \operatorname{sen}(\alpha l_t) = 1 \quad (4.18)$$

Como o resultado da expressão anterior é um número real, a parcela imaginária deve ter resultado igual a zero. Tomando apenas a parte real da equação anterior, tem-se:

$$\cos(\alpha l_t) = 1 \quad (4.19)$$

Considerando a identidade de Euler e a expressão anterior,  $\alpha$  deverá resultar em:

$$\alpha = j \frac{2\pi n}{l_t} \quad (4.20)$$

onde  $n$  é um número positivo e inteiro.

Assim, a função  $X(x)$  pode ser representada por:

$$X(x) = j 2 A_1 \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi n}{l_t} x \right) \quad (4.21)$$

A mesma análise pode ser feita para o plano  $y = l_t / 2$ . Por analogia  $\beta$  será calculado por  $\beta = j \frac{2\pi m}{l_t}$ , e a expressão de  $Y(y)$  é igual a:

$$Y(y) = j2 A_2 \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \quad (4.22)$$

onde  $m$  também é um número inteiro e positivo. Através da equação (4.11) já é possível determinar  $\gamma$ , através das expressões de  $\alpha$  e  $\beta$ :

$$\gamma = \sqrt{-\alpha^2 - \beta^2} = \frac{\pi}{(l_t/2)} \sqrt{n^2 + m^2} \quad (4.23)$$

Aplicando os resultados anteriores à equação (4.13), o potencial escalar magnético no entreferro,  $\psi_g$ , pode ser representado por uma série dupla de Fourier, de acordo com a seguinte expressão [30]:

$$\psi_g(x, y, z) = \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \left( j2 A_1 \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \right) \left( j2 A_2 \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \right) \left( A_3 e^{\gamma z} + B_3 e^{-\gamma z} \right) \quad (4.24)$$

que pode ser modificada para:

$$\psi_g(x, y, z) = \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \left( k_1 e^{\gamma z} + k_2 e^{-\gamma z} \right) \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \quad (4.25)$$

O termo  $k_1 e^{\gamma z} + k_2 e^{-\gamma z}$  corresponde a  $\psi_{g_{n,m}}$ , que representa o conjunto de coeficientes da série dupla de Fourier. A determinação das constantes  $k_1$  e  $k_2$  depende das características magnéticas dos ímãs permanentes, das condições de fronteira e das características geométricas do atuador planar. Como o efeito do campo de reação da armadura será analisado separadamente, a equação (4.25) define o comportamento do potencial escalar magnético entre as fronteiras  $O$  e  $G$ , que limitam o entreferro total utilizado para a análise do campo magnético produzido pelos ímãs permanentes.

#### 4.2.1.2 A Equação de Poisson para Ímãs Permanentes em Termos do Potencial Escalar Magnético

No carro os ímãs permanentes estão montados em oposição com relação às suas polaridades. A permeabilidade magnética dos ímãs permanentes de NdFeB,  $\mu_m$ , é aproximadamente igual a  $\mu_o$ , a permeabilidade do vácuo. Em regiões onde existam ímãs permanentes, os vetores  $\vec{B}$ ,  $\vec{H}$  e  $\vec{M}$  relacionam-se pela seguinte expressão:

$$\vec{B} = \mu_o (\vec{H} + \vec{M}) \quad (4.26)$$

Uma função  $f(x,y)$  ímpar e periódica pode ser representada através de uma série dupla de Fourier, conforme a expressão:

$$f(x, y) = \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} B_{n,m} \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{T} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{T} y\right) \quad (4.27)$$

onde  $B_{n,m}$  representa o conjunto dos coeficientes da série dupla de Fourier e  $T$  representa o período da série. O conjunto de coeficientes,  $B_{n,m}$ , é obtido através da seguinte expressão:

$$B_{n,m} = \left(\frac{4}{T}\right) \left(\frac{4}{T}\right) \int_0^{\frac{T}{2}} \int_0^{\frac{T}{2}} f(x, y) \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{T} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{T} y\right) dx dy \quad (4.28)$$

Em cada um dos ímãs permanentes do carro, o vetor magnetização,  $\vec{M}$ , dado em A/m, tem somente uma componente através do eixo  $z$ . Desta forma,  $\vec{M}$  pode ser representado por  $M_z \vec{k}$ . A figura 4.4(a) apresenta o gráfico tridimensional da magnetização, e a figura 4.4(b), seu gráfico bidimensional. Em ambos os gráficos,  $M_o$  representa o valor de pico da magnetização, sendo igual ao módulo de  $\vec{M}_r$ , que representa o vetor magnetização residual nos ímãs permanentes. A magnetização é uma função dependente de  $x$  e  $y$  e pode também ser representada por uma dupla série de Fourier. Os coeficientes desta série, representados por  $M_{n,m}$ , são obtidos por:

$$M_{n,m} = \left(\frac{4}{l_t}\right) \left(\frac{4}{l_t}\right) M_o \left[ \int_{ld}^{\frac{lt}{2}-ld} \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) dx \int_{ld}^{\frac{lt}{2}-ld} \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) dy \right] \quad (4.29)$$

Assim, a componente  $z$  da magnetização é representada por:

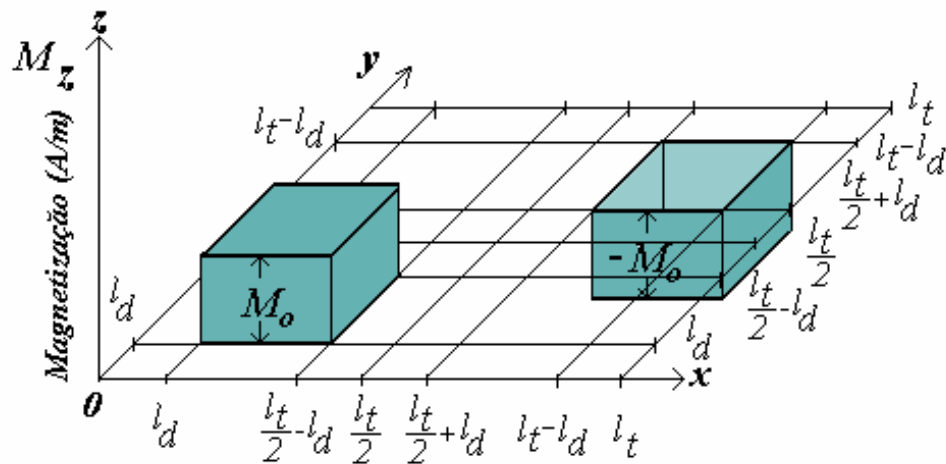
$$M_z = \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \left( \frac{16M_o}{\pi^2} \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{nm} \right) \text{sen} \left( \frac{2\pi n}{l_t} x \right) \text{sen} \left( \frac{2\pi m}{l_t} y \right) \quad (4.30)$$

Aplicando o teorema da divergência à equação (4.26), obtém-se:

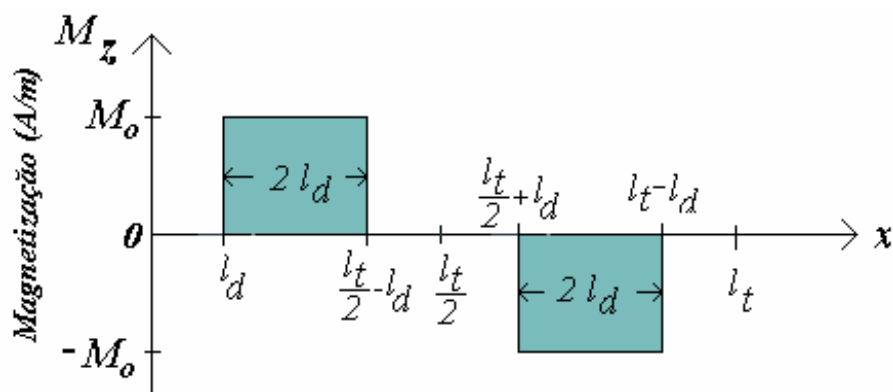
$$\nabla \cdot \vec{H} = -\nabla \cdot \vec{M} \quad (4.31)$$

Considerando que  $\vec{H} = -\nabla \psi$ , a equação (4.31) transforma-se em:

$$\nabla^2 \psi = \nabla \cdot \vec{M} \quad (4.32)$$



(a)



(b)

Figura 4.4 – (a) Representação tridimensional da magnetização considerando os ímãs permanentes 1 e 2 e (b) gráfico da magnetização em função do eixo  $x$ .



que é a equação de Poisson para os ímãs permanentes. Nessa região, o potencial escalar magnético deve satisfazer à equação de Poisson. Desta forma, o potencial escalar magnético é representado por  $\psi = \psi_h + \psi_p$ , onde  $\psi_h$  é a solução homogênea que deve satisfazer a equação de Laplace, e  $\psi_p$  é a solução particular, obtida através da equação de Poisson [27] [28]. Através da equação (4.30) 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 do potencial escalar magnético no entreferro, obtém-se a seguinte expressão para o potencial na região dos ímãs permanentes:

$$\psi_{pm}(x, y, z) = \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} (k_3 e^{\gamma z} + k_4 e^{-\gamma z}) \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \quad (4.33)$$

#### 4.2.1.3 Solução das Equações dos Potenciais no Entreferro e nos Ímãs Permanentes

As constantes  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$  nas equações (4.25) e (4.33) são obtidas a partir das condições de fronteira [27] [28][30]. O potencial escalar magnético na fronteira  $O$ , onde  $z = 0$ , é definido como sendo igual a zero. A expressão do potencial escalar magnético no entreferro em  $z = 0$ ,  $\psi_g^O$  (o sobrescrito identifica a fronteira), é dada pela seguinte equação:

$$\psi_g^O = \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} (k_1 e^0 + k_2 e^0) \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) = 0 \quad (4.34)$$

O potencial escalar magnético na fronteira  $P$ , onde  $z = (l_g + l_m)$ , é também definido com sendo igual a zero. Logo, a expressão do potencial escalar magnético na região do ímã permanente na fronteira  $P$ ,  $\psi_{pm}^P$ , é definida por:

$$\psi_{pm}^P = \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \left( k_3 e^{\gamma(l_g+l_m)} + k_4 e^{-\gamma(l_g+l_m)} \right) \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) = 0 \quad (4.35)$$

Na fronteira  $G$  o potencial escalar magnético no entreferro e o potencial escalar magnético na região dos ímãs permanentes estão relacionados por [27][28][30]:

$$\psi_g^G = \psi_{pm}^G \quad (4.36)$$

e, na mesma fronteira, as componentes  $z$  do vetor intensidade de campo magnético no entreferro e do vetor intensidade de campo magnético na região dos ímãs permanentes estão relacionadas por [27][28]:

$$H_{g_z}^G = H_{pm_z}^G + M_z \quad (4.37)$$

onde  $H_{g_z}$  é a componente  $z$  do vetor intensidade de campo magnético no entreferro, e  $H_{pm_z}$  é a componente  $z$  do vetor intensidade de campo magnético na região dos ímãs permanentes. A componente  $z$  do vetor  $\vec{H}$  é obtida através da derivada parcial do potencial escalar magnético em relação a  $z$ , ou seja,  $H_z = -\partial\psi / \partial z$ . Na fronteira  $G$ , onde  $z = l_g$ , as expressões para  $H_{g_z}^G$  e  $H_{pm_z}^G$  são dadas, respectivamente, por:

$$H_{g_z}^G = \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \gamma \left( -k_1 e^{\gamma l_g} + k_2 e^{-\gamma l_g} \right) \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \quad (4.38)$$

e

$$H_{pm_z}^G = \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \gamma \left( -k_3 e^{\gamma l_g} + k_4 e^{-\gamma l_g} \right) \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \quad (4.39)$$

As equações (4.34), (4.35), (4.36) e (4.37) formam um conjunto de quatro equações e quatro incógnitas, que permite obter as expressões dos potenciais magnéticos nas regiões em estudo. A expressão resultante para o potencial escalar magnético no entreferro é igual a:

$$\psi_g(x, y, z) = \frac{8M_o}{\pi^2} \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} (e^{-\gamma z} - e^{\gamma z}) \frac{(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{\gamma m} \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \quad (4.40)$$

A expressão resultante para o potencial escalar magnético na região dos ímãs permanentes é igual a:

$$\psi_{pm}(x, y, z) = \frac{8M_o}{\pi^2} \sum_{\substack{n=1,3,\dots \\ m=1,3,\dots}}^{\infty} \left[ e^{-\gamma z} \frac{(e^{\gamma l_g} - e^{-\gamma l_g})}{(1 - e^{-2\gamma(l_m+l_g)})} - e^{\gamma z} \frac{(e^{\gamma l_g} - e^{-\gamma l_g})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \right] \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{\gamma m} \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \quad (4.41)$$

A força que produz movimento sobre o plano depende somente da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro produzida pelos ímãs permanentes. As três componentes do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro,  $B_{g_x}$ ,  $B_{g_y}$  e  $B_{g_z}$ , são obtidas através do gradiente do potencial escalar magnético no entreferro multiplicado pela permeabilidade magnética do ar, de acordo com a expressão (4.42):

$$\vec{B}_g = -\mu_o \left( \frac{\partial \psi_g}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial \psi_g}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial \psi_g}{\partial z} \vec{k} \right) = B_{g_x} \vec{i} + B_{g_y} \vec{j} + B_{g_z} \vec{k} \quad (4.42)$$

Assim:

$$B_{g_x} = \mu_o \frac{16M_o}{\pi l_t} \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} (e^{\gamma z} - e^{-\gamma z}) \frac{(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \cdot \frac{\cos(2\pi m l_d / l_t) \cos(2\pi n l_d / l_t)}{\gamma m} \cos\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \quad (4.43)$$

$$B_{gy} = \mu_o \frac{16M_o}{\pi l_t} \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} (e^{\gamma z} - e^{-\gamma z}) \frac{(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{\gamma m} \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \cos\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \quad (4.44)$$

e

$$B_{gz} = \mu_o \frac{8M_o}{\pi^2} \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} (e^{\gamma z} + e^{-\gamma z}) \frac{(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{nm} \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \quad (4.45)$$

As três componentes do vetor densidade de fluxo magnético na região dos ímãs permanentes,  $B_{pm_x}$ ,  $B_{pm_y}$  e  $B_{pm_z}$ , são obtidas através da relação  $\vec{B}_{pm} = \mu_o \cdot (\vec{M} + \vec{H}_{pm})$ , onde  $\vec{H}_{pm} = -\nabla \psi_{pm}$ , ou seja:

$$\begin{aligned} \vec{B}_{pm} &= \mu_o \left[ -\frac{\partial \psi_{pm}}{\partial x} \vec{i} - \frac{\partial \psi_{pm}}{\partial y} \vec{j} + \left( -\frac{\partial \psi_{pm}}{\partial z} + M_z \right) \vec{k} \right] \\ &= B_{pm_x} \vec{i} + B_{pm_y} \vec{j} + B_{pm_z} \vec{k} \end{aligned} \quad (4.46)$$

Assim:

$$B_{pm_x} = \mu_o \frac{16M_o}{\pi l_t} \sum_{\substack{n=1,3,\dots \\ m=1,3,\dots}}^{\infty} \left[ e^{\gamma z} \frac{(e^{\gamma l_g} - e^{-\gamma l_g})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} - e^{-\gamma z} \frac{(e^{\gamma l_g} - e^{-\gamma l_g})}{(1 - e^{-2\gamma(l_m+l_g)})} \right] \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{\gamma m} \cos\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \quad (4.47)$$

$$B_{pm_y} = \mu_o \frac{16M_o}{\pi l_t} \sum_{\substack{n=1,3,\dots \\ m=1,3,\dots}}^{\infty} \left[ e^{\gamma z} \frac{(e^{\gamma g} - e^{-\gamma g})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} - e^{-\gamma z} \frac{(e^{\gamma g} - e^{-\gamma g})}{(1 - e^{-2\gamma(l_m+l_g)})} \right] \quad (4.48)$$

$$\cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{\gamma n} \text{sen} \left( \frac{2\pi n}{l_t} x \right) \cos \left( \frac{2\pi m}{l_t} y \right)$$

e

$$B_{pm_z} = \mu_o \frac{8M_o}{\pi^2} \sum_{\substack{n=1,3,\dots \\ m=1,3,\dots}}^{\infty} \left[ e^{\gamma z} \frac{(e^{\gamma g} - e^{-\gamma g})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} + e^{-\gamma z} \frac{(e^{\gamma g} - e^{-\gamma g})}{(1 - e^{-2\gamma(l_m+l_g)})} - 2 \right] \quad (4.49)$$

$$\cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{nm} \text{sen} \left( \frac{2\pi n}{l_t} x \right) \text{sen} \left( \frac{2\pi m}{l_t} y \right)$$

Os gráficos apresentados a seguir resultam do estudo analítico apresentado nesta seção. Os valores do potencial escalar magnético e da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro foram obtidos através do somatório da fundamental e de quatro harmônicas ímpares produzidas pelas equações (4.40) e (4.45), respectivamente.

Os valores da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região dos ímãs permanentes foram obtidos através do somatório da fundamental e de quatro harmônicas ímpares produzidas pela equação (4.49). O critério utilizado para a definição do número de harmônicas, empregado na geração de cada um dos gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético, está ilustrado no fluxograma da figura 4.5. Os incrementos, tanto em  $n$ , como em  $m$ , são feitos até que a diferença entre o valor de pico da fundamental e o valor de pico de uma harmônica seja superior a 99%, ou seja, tenda a 100%. Desta forma, o erro relativo é inferior a 1%. O mesmo critério foi aplicado para o cálculo do potencial escalar magnético. Os gráficos resultaram do somatório de uma fundamental mais quatro harmônicas, tanto em  $n$ , como em  $m$ .

A figura 4.6 apresenta os gráficos do potencial escalar magnético no entreferro sob o ímã permanente  $I$  em função de  $x$ . Em (a), o gráfico refere-se ao caso 1, em que os ímãs permanentes têm, cada um, 6 mm de comprimento e o entreferro tem 14 mm de

comprimento. Em (b), os ímãs permanentes têm 8,0 mm de comprimento e o entreferro, 12 mm. Em ambos os casos, os gráficos foram gerados a partir da equação (4.40), para  $y = 25$  mm e  $z = 8,5$  mm.

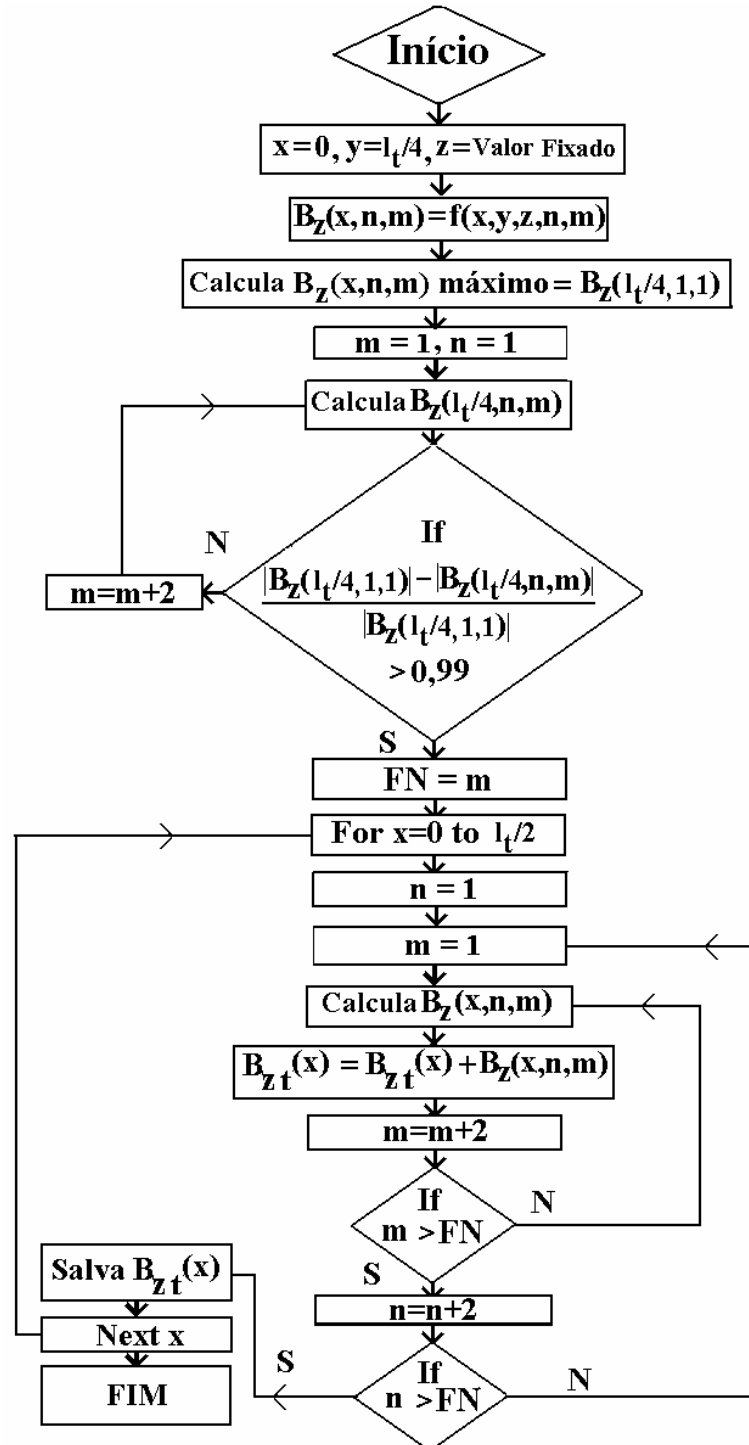


Figura 4.5 – Fluxograma com o critério para a determinação do número de harmônicas ímpares consideradas para o cálculo da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético.

A figura 4.7 apresenta os gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o ímã permanente  $I$  em função de  $x$ . Em (a), (c) e (e), os gráficos referem-se ao caso 1. Em (b), (d) e (f) os gráficos referem-se ao caso 2. Em ambos os casos, os gráficos foram gerados a partir da equação (4.45), para  $z = 8,5$  mm. Em (a) e (b),  $y$  foi fixado em 5 mm, em (c) e (d) em 17 mm e em (e) e (f), em 25 mm. A figura 4.8 apresenta os gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, calculados através da diagonal sob o carro, gerados a partir da equação (4.45), para  $z = 8,5$  mm.

Os gráficos descritos anteriormente foram calculados no plano  $z = 8,5$  mm. Será visto no capítulo 6 deste trabalho que todas as medidas da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético foram realizadas no plano  $xy$  localizado 8,5 mm acima da superfície do núcleo da armadura. Esta distância corresponde à altura ocupada pelos enrolamentos da armadura no entreferro, somada às espessuras do gabarito e do filme usado para posicionar a ponteira do gaussímetro e à espessura do sensor Hall desta ponteira.

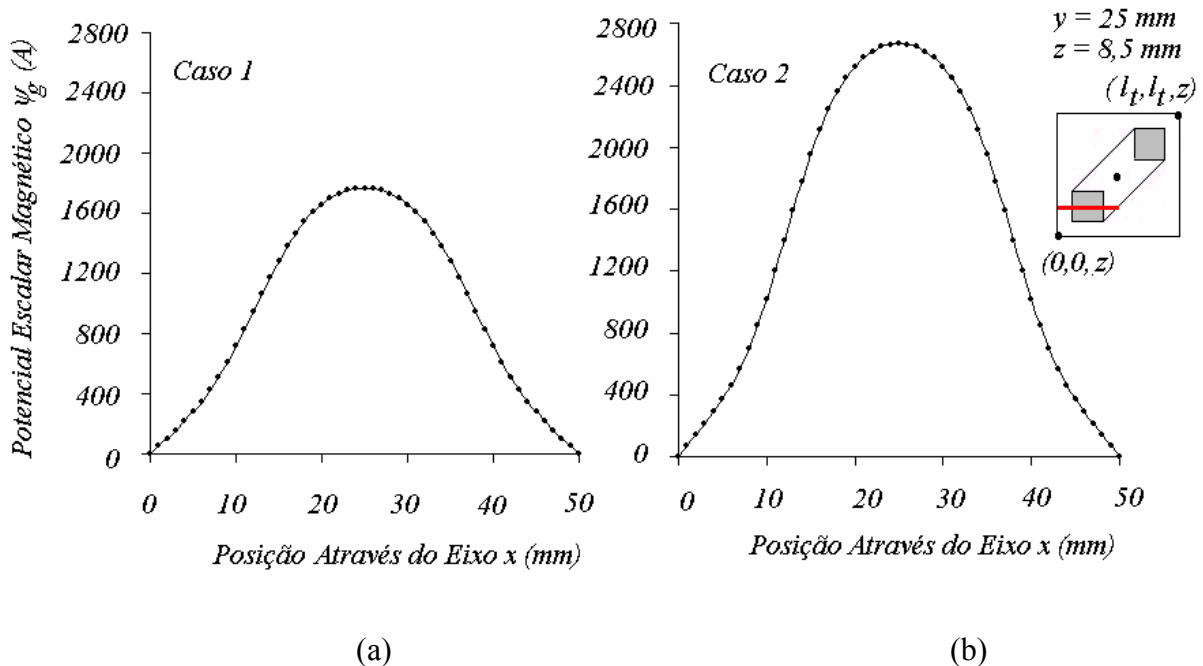


Figura 4.6 - Gráficos do potencial escalar magnético no entreferro sob o ímã permanente  $I$  em função de  $x$ . Em (a), o gráfico refere-se ao caso 1 e em (b), ao caso 2. Em ambos os casos, os gráficos foram gerados a partir da equação (4.40), para  $y = 25$  mm e  $z = 8,5$  mm.

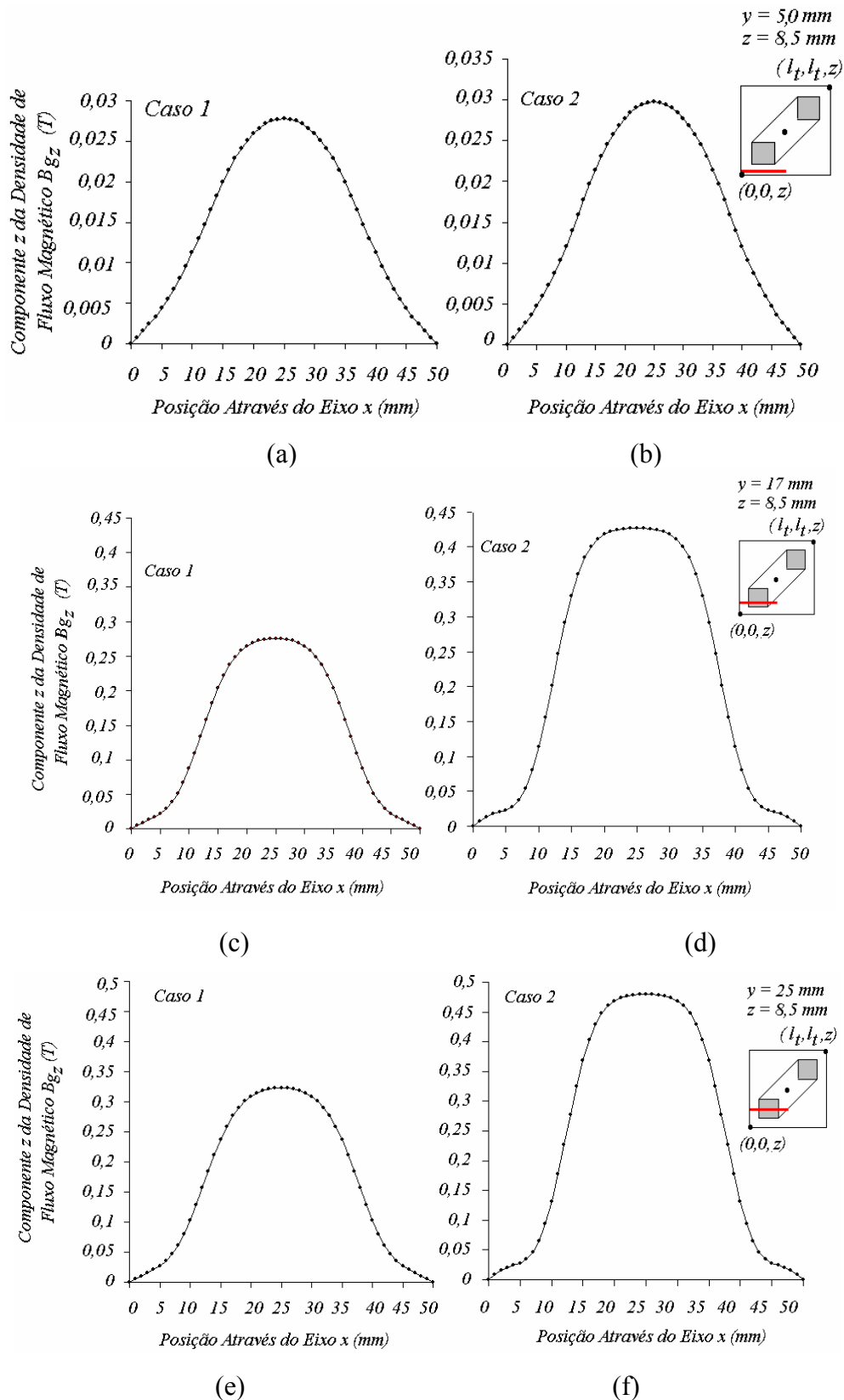


Figura 4.7 - Gráficos da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o ímã permanente  $I$  em função de  $x$ , para os casos 1 e 2. Os gráficos foram gerados a partir da equação (4.45), para  $z = 8,5$  mm. Em (a) e (b),  $y$  foi fixado em 5 mm, em (c) e (d), em 17 mm e em (e) e (f), em 25 mm.



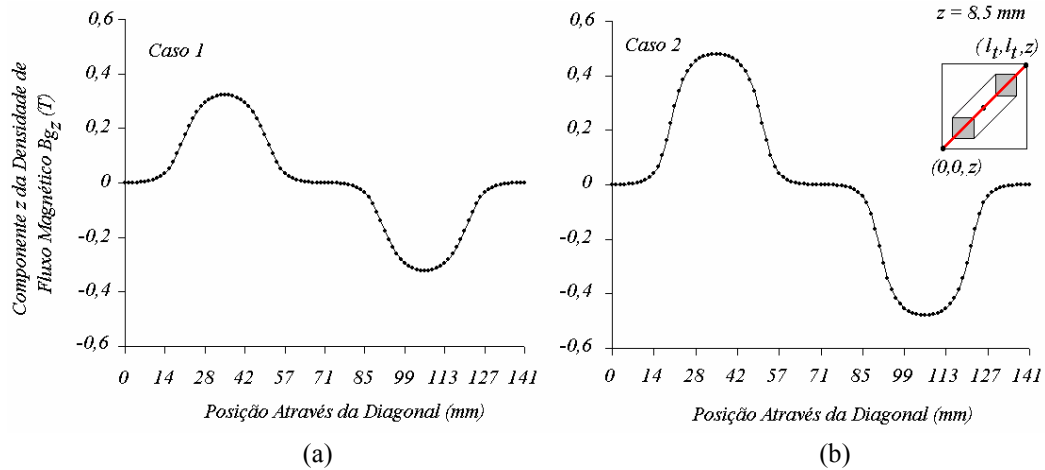


Figura 4.8 - Gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro calculados através da diagonal sob o carro, para  $z = 8,5$  mm.

Os gráficos da figura 4.9 estão relacionados à condição de fronteira definida pela equação (4.37). Para um mesmo caso e para os mesmos valores de  $y$  e  $z$ , estão colocados lado a lado os gráficos gerados pelas equações (4.45) e (4.49). O objetivo foi o de comprovar que na fronteira os valores da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro,  $B_z^G$ , e os valores da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo

magnético na região dos ímãs permanentes,  $B_z^{pm}$ , são iguais, embora tenham sido gerados

por equações diferentes. Os gráficos (a), (b), (c) e (d) referem-se ao caso 1, com  $z$  fixado em 14 mm, e os gráficos (e), (f), (g) e (h), ao caso 2, com  $z$  fixado em 12 mm. Pode ser observado o formato peculiar da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético nos cantos do ímã permanente, nos pontos  $x = 12,5$  mm e  $x = 37,5$  mm. A comparação dos gráficos obtidos na fronteira do modelo com aqueles calculados para  $z = 8,5$  mm demonstra que, à medida que o valor de  $z$  aumenta, a distribuição da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro assume um comportamento mais achatado em seu topo. A figura 4.10 apresenta os gráficos tridimensionais da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob um ímã permanente, em função de  $x$  e  $y$ , na fronteira  $G$  ( $z = l_g$ ), resultante da interpolação dos pontos gerados pela equação (4.45). Em (a), o gráfico refere-se ao caso 1 e em (b), ao caso 2. Na figura 4.11 apresentam-se os mesmos gráficos para  $z = 8,5$  mm. A figura 4.12 apresenta os gráficos tridimensionais da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob os dois ímãs permanentes em  $z = 8,5$  mm. Em (a), o gráfico refere-se ao caso 1 e em (b), ao caso 2.

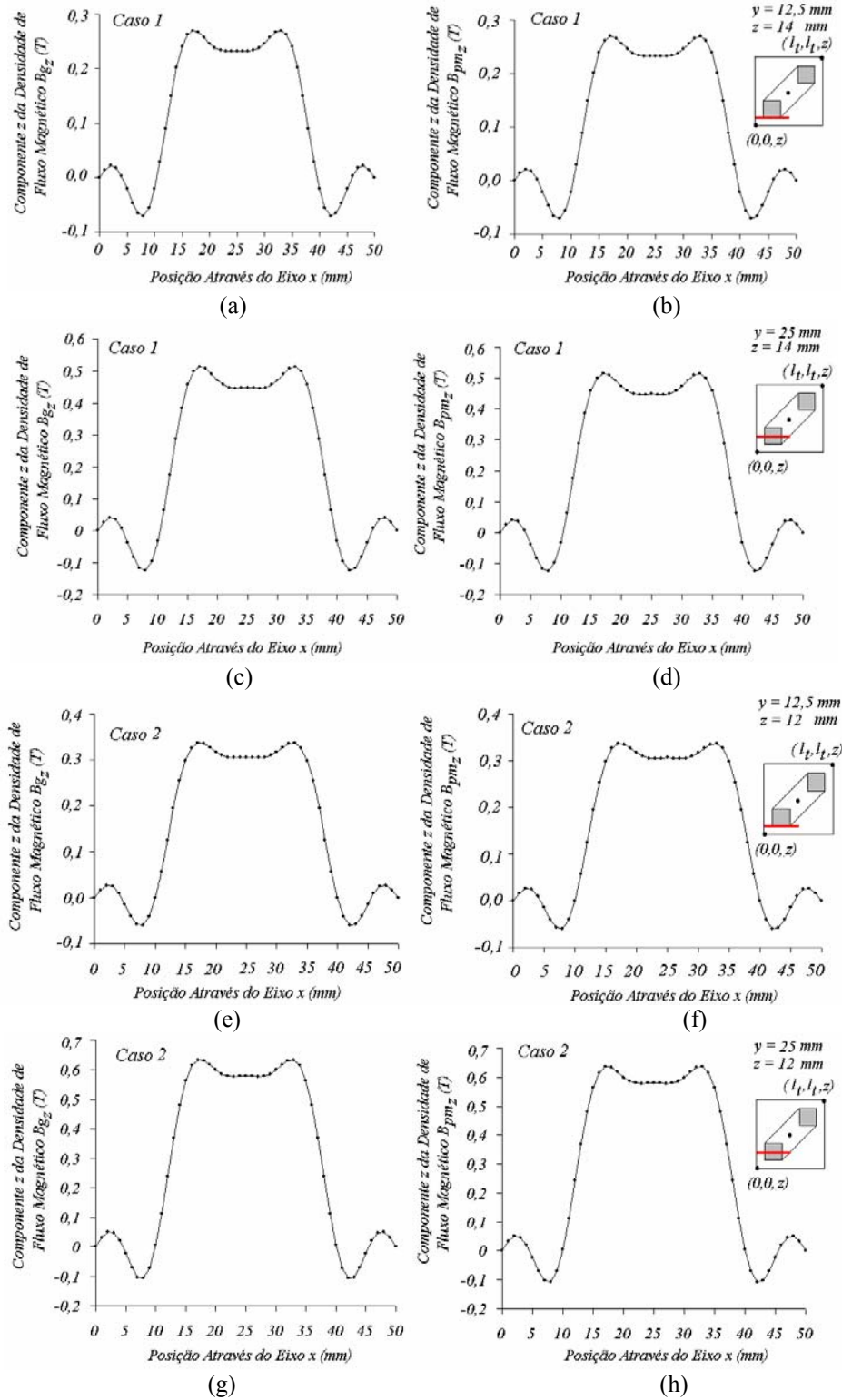


Figura 4.9 – Gráficos da componente z do vetor densidade de fluxo magnético em função de  $x$ , obtidos na fronteira entre os ímãs permanentes e o ar. Comparando-se os gráficos das duas regiões envolvidas, para um mesmo caso e mesmos valores de  $y$  e  $z$ , verifica-se que os valores

de  $B_z^G$  e  $B_{pmz}^G$  são idênticos, embora tenham sido gerados por equações diferentes.

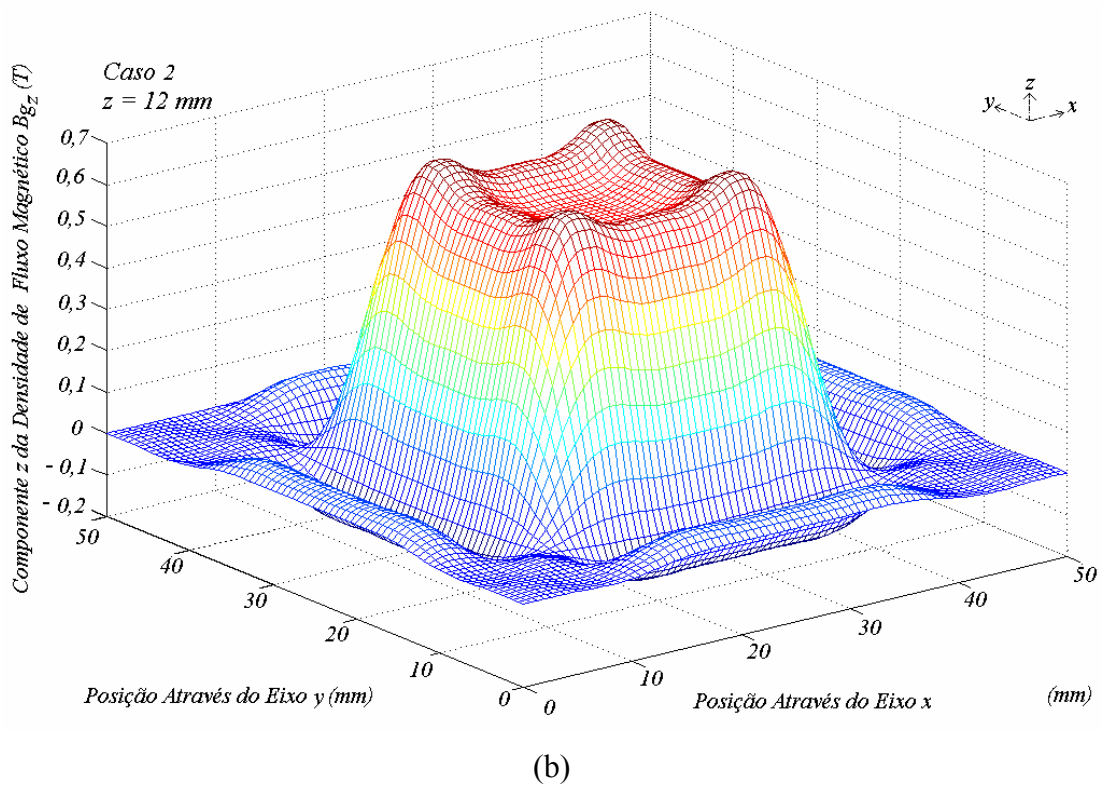
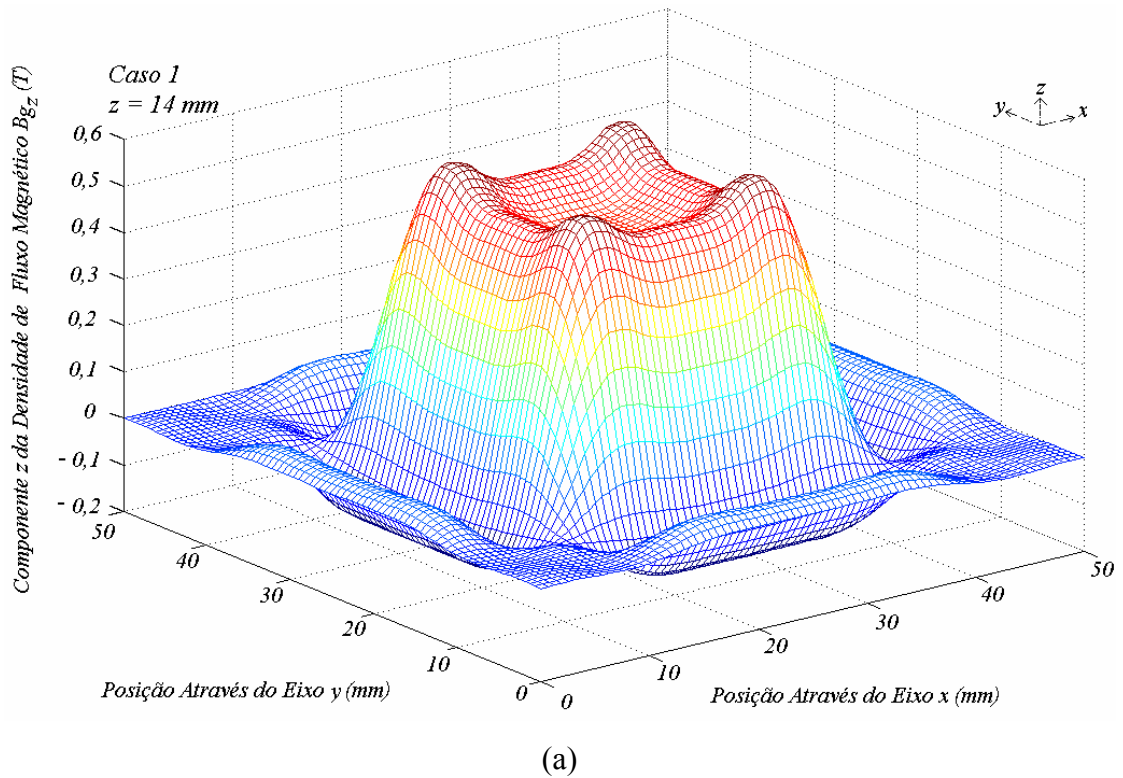


Figura 4.10 - Gráficos tridimensionais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, sob um ímã permanente, calculados na fronteira  $G$  ( $z = l_g$ ) em função de  $x$  e  $y$ , resultantes da interpolação dos pontos gerados pela equação (4.45). Em (a), o gráfico refere-se ao caso 1 e em (b), ao caso 2.

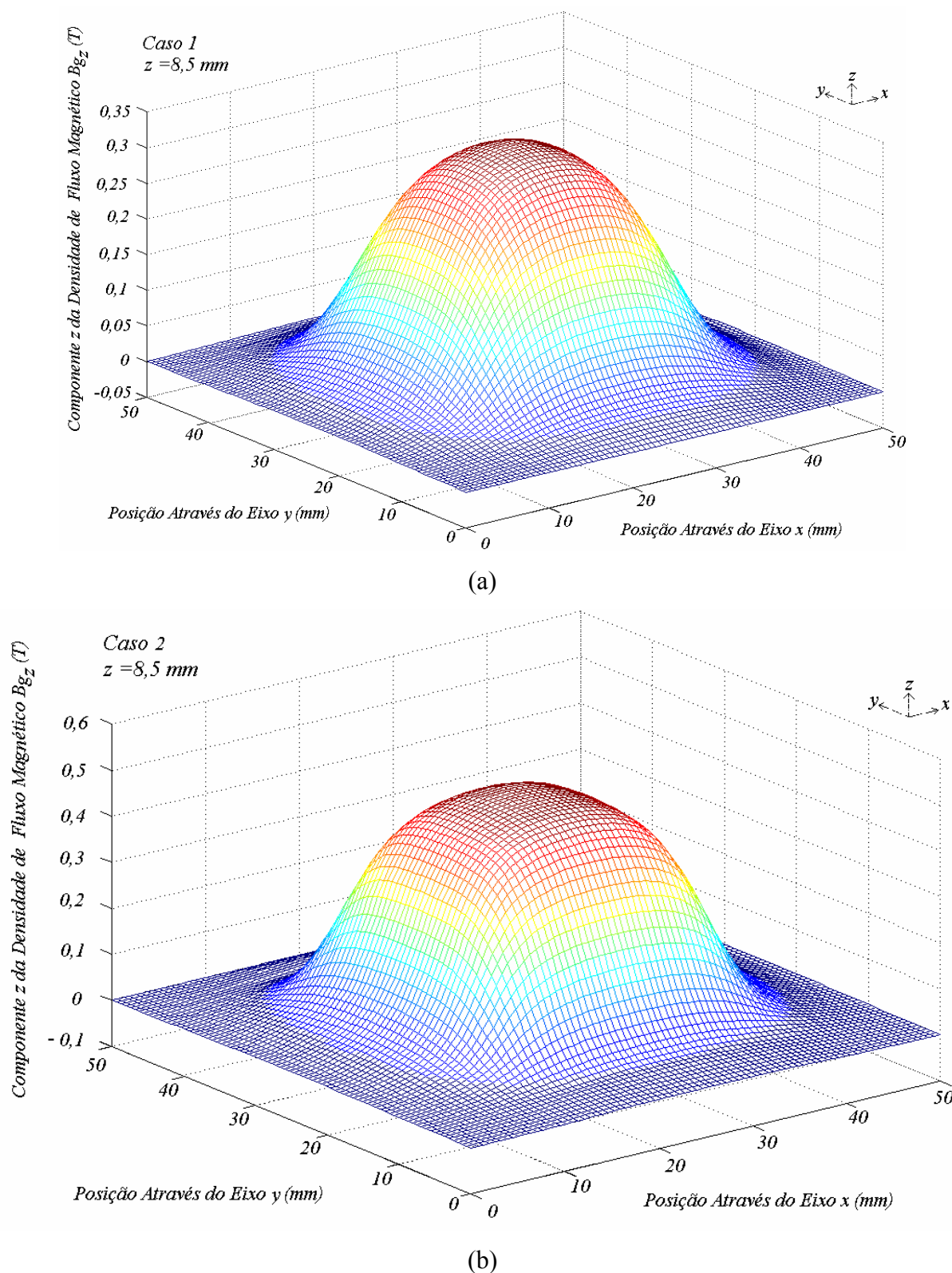
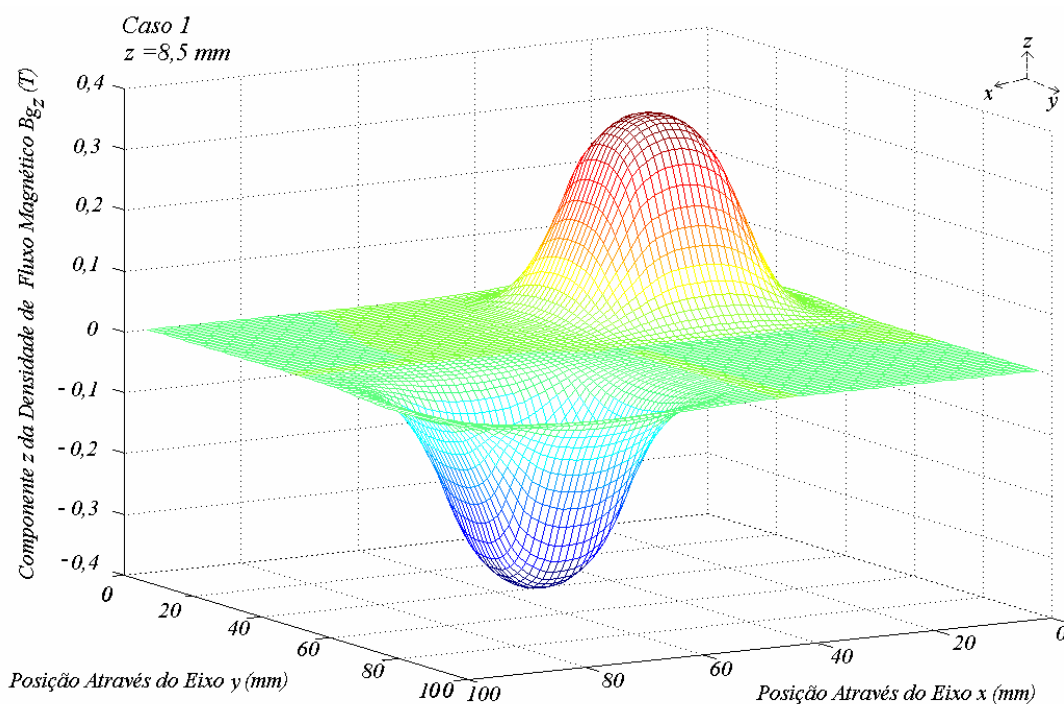
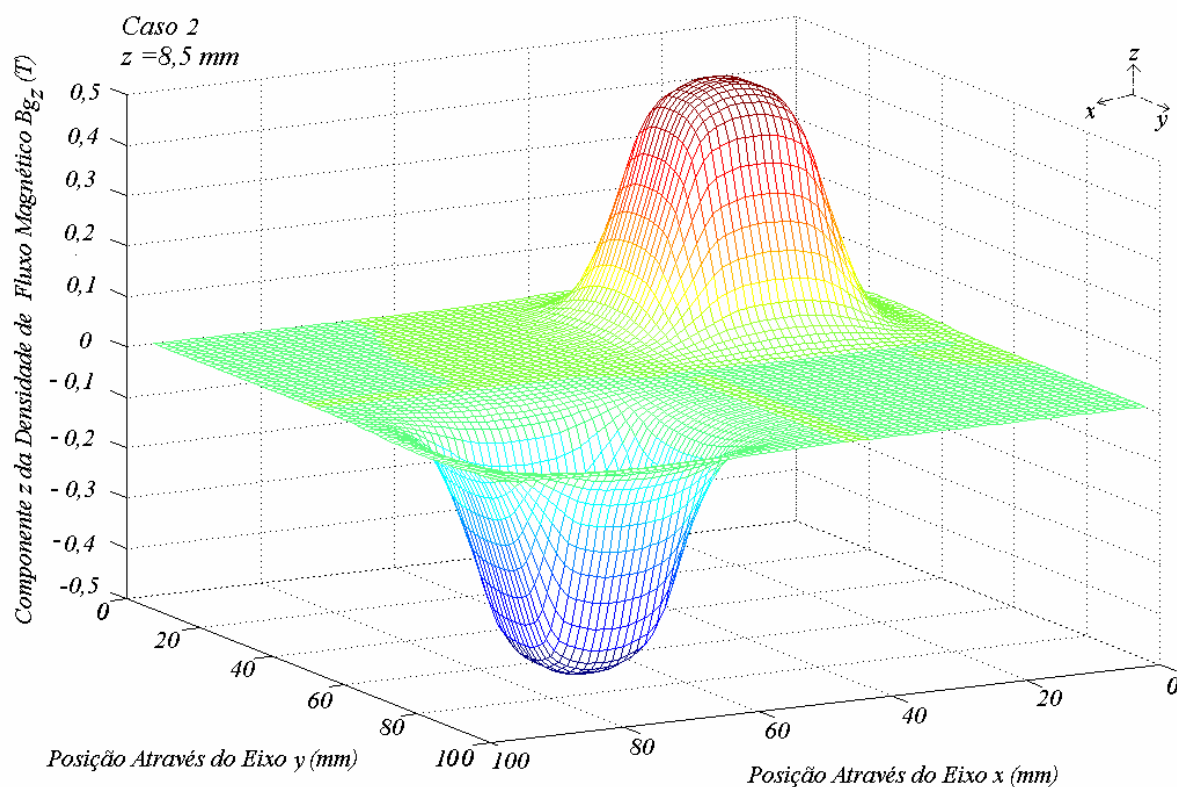


Figura 4.11 - Gráficos tridimensionais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, sob um ímã permanente, calculados para  $z = 8,5 \text{ mm}$ , em função de  $x$  e  $y$ , resultantes da interpolação dos pontos gerados pela equação (4.45). Em (a), o gráfico refere-se ao caso 1 e em (b), ao caso 2.



(a)



(b)

Figura 4.12 - Gráficos tridimensionais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético, sob os dois ímãs permanentes, no entreferro, em função de  $x$  e  $y$ , com  $z = 8,5 \text{ mm}$ , resultantes da interpolação dos pontos gerados pela equação (4.45). Em (a), o gráfico refere-se ao caso 1 e em (b), ao caso 2.

## 4.2.2 Campo Produzido pela Reação da Armadura

A armadura do atuador planar possui dois enrolamentos ortogonais, sendo cada um deles dividido em 12 fases independentes. Um enrolamento é montado em torno do eixo  $x$ , formando o enrolamento  $x$ , e outro, enrolado em torno do eixo  $y$ , formando o enrolamento  $y$ . Quando o atuador planar está em operação, somente as fases localizadas sob os ímãs permanentes serão excitadas. Na análise do campo magnético produzido pela reação da armadura, a região do entreferro, entre os planos  $z = 0$  e  $z = l_b$ , é governada pela equação de Poisson, expressa em termos do potencial vetor magnético,  $\vec{A}$ , relacionado com o vetor densidade de corrente,  $\vec{J}$  ( $\vec{A}$  é paralelo a  $\vec{J}$ ) [61].

### 4.2.2.1 A Equação de Poisson para a Região dos Enrolamentos em Termos do Potencial Vetor Magnético

Quando uma determinada região do espaço é percorrida por correntes, o cálculo do vetor intensidade de campo magnético,  $\vec{H}$ , é feito através do vetor densidade de corrente,  $\vec{J}$ , aplicado ao rotacional de  $\vec{H}$  ( $\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$ ). A divergência de  $\vec{B}$  é sempre zero em qualquer parte. Por essa razão  $\vec{B}$  pode ser expresso como o rotacional de alguma outra função vetorial. Essa função é denominada de potencial vetor magnético,  $\vec{A}$ . Assim,

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (4.50)$$

Tomando o rotacional da equação (4.50), obtém-se uma relação entre o vetor  $\vec{A}$  e o vetor  $\vec{J}$  ( $\nabla \times \vec{B} = \nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu \vec{J}$ ). Após algumas operações matemáticas, obtém-se as seguintes equações escalares, que definem a relação entre as componentes de  $\vec{A}$  e as componentes de  $\vec{J}$ :  $\nabla^2 A_x = -\mu J_x$ ,  $\nabla^2 A_y = -\mu J_y$  e  $\nabla^2 A_z = -\mu J_z$ . Cada uma dessas três equações tem a mesma forma da equação de Poisson [19], ou seja, cada uma delas corresponde à equação de Poisson para o potencial vetor magnético, como será visto a seguir [25]. A solução para cada uma das três equações anteriores é obtida pela integração através do volume ocupado pela distribuição de densidade de corrente  $\vec{J}$  [19] [61].

No atuador planar, o vetor densidade de corrente possui duas componentes, a saber,  $x$  e  $y$ . A componente  $x$  corresponde à densidade de corrente nas fases

do enrolamento  $y$ , enquanto que a componente  $y$ , corresponde à densidade de corrente nas fases do enrolamento  $x$ .

Na análise do campo magnético produzido pelas correntes nos enrolamentos da armadura, o campo produzido pelo enrolamento  $x$  será obtido separadamente do campo produzido pelo enrolamento  $y$ . Posteriormente, os efeitos de ambos os enrolamentos serão somados para a análise do comportamento do atuador planar, quando suas fases forem percorridas por corrente. O vetor densidade de corrente em uma das fases do enrolamento  $x$  é igual a  $J_y \bar{j}$ , onde  $J_y$  é a componente  $y$  do vetor densidade de corrente. A figura 4.13 mostra o estator do atuador planar, representado apenas com duas fases do enrolamento  $x$ . Conforme pode ser verificado, o vetor densidade de corrente possui apenas componente em  $y$ ; então  $\nabla \times \nabla \times \bar{A} = \mu J_y \bar{j}$ , ou seja, o rotacional do rotacional do vetor  $\bar{A}$  nas fases do enrolamento  $x$  terá apenas componente em  $y$ . Efetuando o rotacional de  $\bar{A}$ , obtém-se:

$$\nabla \times \bar{A} = \begin{bmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & A_y & 0 \end{bmatrix} = -\frac{\partial A_y}{\partial z} \bar{i} + \frac{\partial A_y}{\partial x} \bar{k} \quad (4.51)$$

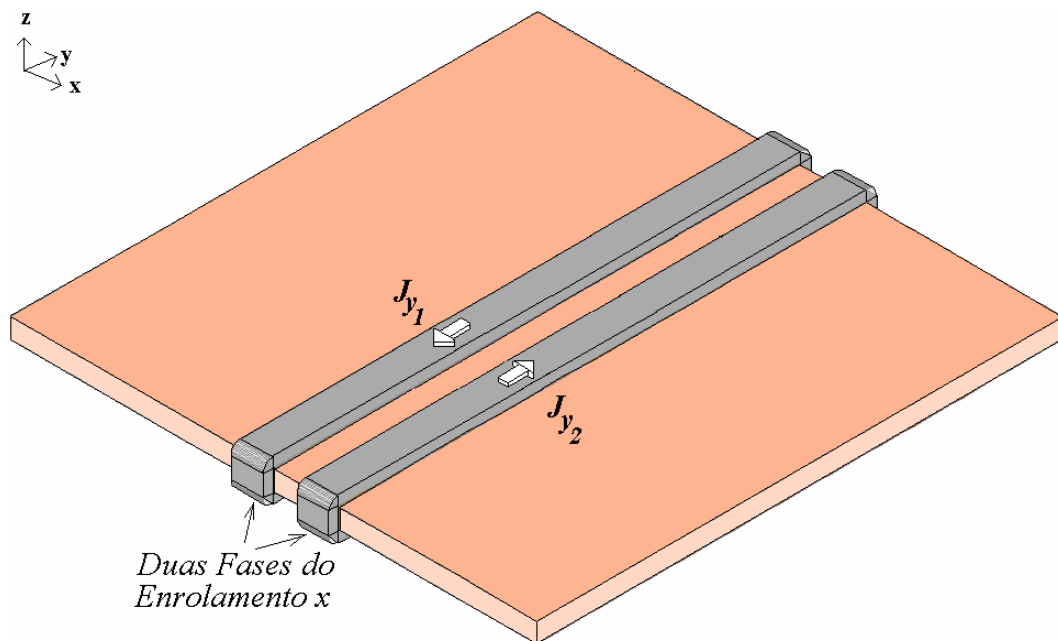


Figura 4. 13 - Estator do atuador planar, representado apenas com duas fases do enrolamento  $x$ . O vetor densidade de corrente possui apenas componente em  $y$ .

e

$$\nabla \times \nabla \times \bar{A} = \begin{bmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ -\frac{\partial A_y}{\partial z} & 0 & \frac{\partial A_y}{\partial x} \end{bmatrix} =$$

$$\frac{\partial^2 A_y}{\partial x \partial y} \bar{i} - \frac{\partial^2 A_y}{\partial x^2} \bar{j} - \frac{\partial^2 A_y}{\partial z^2} \bar{j} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial y \partial z} \bar{k} \quad (4.52)$$

Como  $\nabla \times \nabla \times \bar{A} = \mu J_y \bar{j}$ , apenas a componente  $y$  da equação (4,52) é considerada. Assim, pode-se concluir que:

$$\nabla \times \nabla \times \bar{A} = \mu J_y \bar{j} = -\frac{\partial^2 A_y}{\partial x^2} \bar{j} - \frac{\partial^2 A_y}{\partial z^2} \bar{j} \quad (4.53)$$

ou, na forma escalar,

$$\nabla^2 A_y = -\mu J_y = \frac{\partial^2 A_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_y}{\partial z^2} = -\mu J_y \quad (4.54)$$

A equação anterior corresponde à equação de Poisson para o potencial vetor magnético. A equação do potencial vetor magnético na região do enrolamento  $x$ , compreendida entre as fronteiras  $O$  e  $B$ , é representada por:

$$\frac{\partial^2 A_{b_y}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{b_y}}{\partial z^2} = -\mu_o J_y \quad (4.55)$$

onde  $A_{b_y}$  é a componente  $y$  do potencial vetor magnético na região do enrolamento  $x$  e  $J_y$  é a componente  $y$  do vetor densidade de corrente que gera  $A_{b_y}$  nas fases do mesmo enrolamento. Na região dos enrolamentos, a densidade de corrente no enrolamento  $x$  é constante através de  $y$  e varia periodicamente com  $x$ , como mostram as figuras 4.14(a) e 4.14(b). No gráfico,  $J_o$  é igual ao valor de pico de  $J_y$ . O gráfico de  $J_y$  vs.  $x$  assumiu a forma apresentada, pois no presente estudo apenas as fases localizadas sob os ímãs



permanentes são excitadas por corrente. De acordo com os gráficos da figura 4.14, 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:

$$J_{n,m} = \left(\frac{4}{l_t}\right) J_o \left[ \int_{l_d}^{\frac{l_t}{2}-l_d} \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) dx \right] \quad (4.56)$$

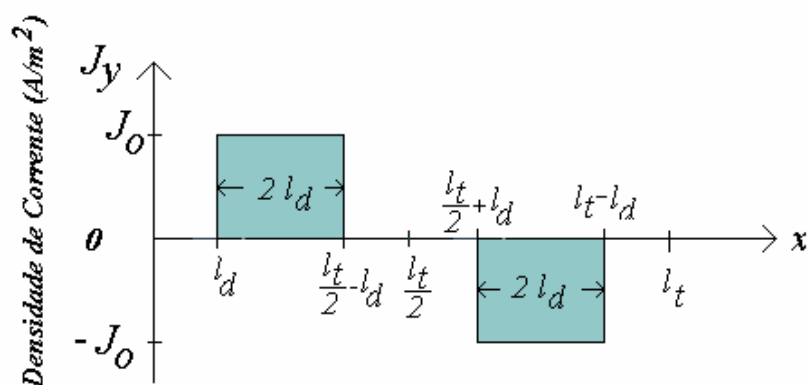
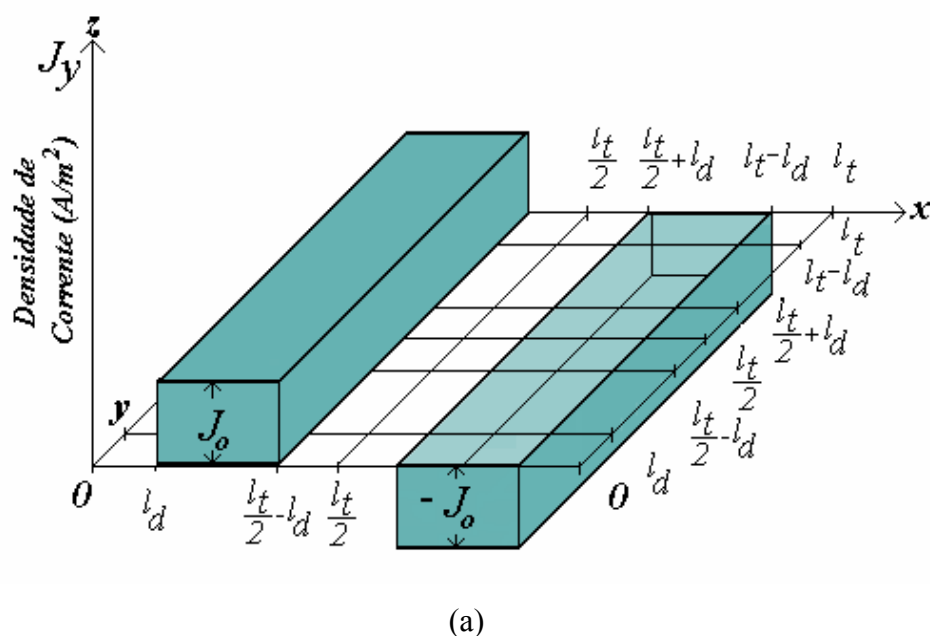


Figura 4. 14 - Gráficos da densidade de corrente nas fases do enrolamento  $x$ : (a) gráfico tridimensional e (b) gráfico bidimensional.

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

$$J_y = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4J_o}{\pi} \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t)}{n} \text{sen} \frac{2\pi n}{l_t} x \quad (4.57)$$

Na região do modelo onde são estabelecidas correntes, o potencial vetor magnético é descrito pela equação (4.55). Assim como na análise da região dos ímãs permanentes, a solução da equação (4.55) possui uma parte particular,  $A_{b_{yp}}$ , obtida pela equação de Poisson  $\nabla^2 A_{b_{yp}} = -\mu_o J_y$ , e uma parte homogênea,  $A_{b_{yh}}$ , obtida pela equação de Laplace  $\nabla^2 A_{b_{yh}} = 0$ . Assim,  $A_{b_y} = A_{b_{yp}} + A_{b_{yh}}$  [61]. A figura 4.15 apresenta a vista frontal da geometria em estudo com as condições de fronteira impostas para a determinação do campo magnético produzido pelos condutores do enrolamento da armadura percorridos por corrente.

Para a obtenção da solução homogênea, adota-se o mesmo procedimento da seção 4.2.1 deste capítulo, ou seja, pode-se supor que na equação de Laplace para o potencial vetor magnético,  $A_{b_{yh}}$  é expresso como o produto de duas funções  $X(x)$  e  $Z(z)$ , obtendo-se [19][24]:

$$A_{b_{yh}}(x, z) = X(x)Z(z) \quad (4.58)$$

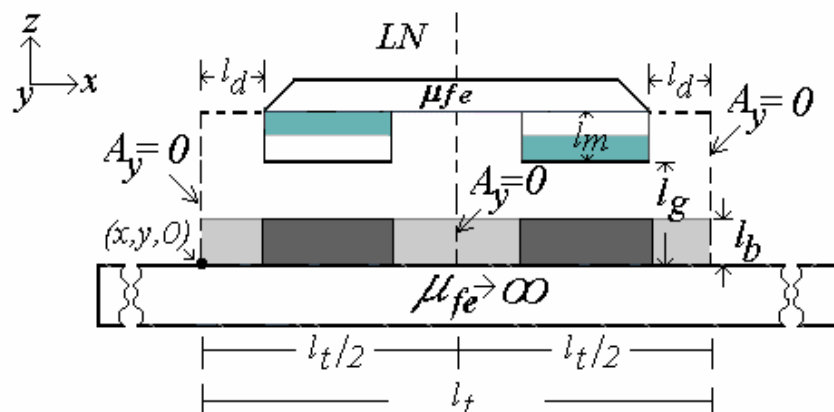


Figura 4. 15 - Vista frontal da geometria em estudo, com as condições de fronteira impostas para o modelo. As fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes estão destacadas.

onde  $X(x)$  é função de  $x$  somente e  $Z(z)$  é função de  $z$  somente. Considerando que  $\nabla^2 A_{b_{yh}} = 0$ , após algumas operações matemáticas obtém-se o seguinte conjunto de equações:

$$\frac{d^2 X}{dx^2} = \alpha^2 X \quad \text{e} \quad \frac{d^2 Z}{dz^2} = \lambda^2 Z \quad (4.59)$$

e

$$\alpha^2 + \lambda^2 = 0 \quad (4.60)$$

A solução para o conjunto de equações apresentado em (4.59) é fornecida a seguir:

$$\begin{aligned} X &= A_4 e^{\alpha x} + B_4 e^{-\alpha x} \\ Z &= A_5 e^{\lambda z} + B_5 e^{-\lambda z} \end{aligned} \quad (4.61)$$

Substituindo-se (4.61) em (4.58), obtém-se a solução geral da equação de Laplace para o potencial vetor magnético na região dos enrolamentos:

$$A_{b_{yh}}(x, z) = \left( A_4 e^{\alpha x} + B_4 e^{-\alpha x} \right) \left( A_5 e^{\lambda z} + B_5 e^{-\lambda z} \right) \quad (4.62)$$

Na equação (4.62),  $A_4$ ,  $A_5$ ,  $B_4$  e  $B_5$  são constantes arbitrárias, que devem satisfazer a equação de Laplace, as condições de fronteira impostas para o modelo e as condições do campo magnético na região das bobinas, assim como  $\alpha$  e  $\lambda$  devem satisfazer a equação (4.60) [19][24]. Os valores do potencial vetor magnético na região em estudo foram definidos como sendo iguais a zero nos planos  $x = 0$ ,  $x = l_t / 2$  e  $x = l_t$ , conforme mostra a figura 4.15. Aplicando as condições de fronteira na função  $X$ , tem-se:

$$X(0) = A_4 + B_4 = 0 \quad (4.63)$$

e

$$X(l_t / 2) = A_4 e^{\alpha(l_t / 2)} - A_4 e^{-\alpha(l_t / 2)} = 0 \quad (4.64)$$

Assim como na equação (4.20),  $\alpha$  será dada por:

$$\alpha = j \frac{2\pi n}{l_t} \quad (4.65)$$

onde  $n$  é um número real, positivo e inteiro. Assim, a função  $X(x)$  pode ser representada por:

$$X(x) = j2A_4 \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t}x\right) \quad (4.66)$$

e  $\lambda$  é definido por:

$$\lambda = \sqrt{-\alpha^2} = \frac{2\pi n}{l_t} \quad (4.67)$$

Aplicando os resultados anteriores à equação (4.58), a solução homogênea da equação do potencial vetor magnético na região dos enrolamentos,  $A_{b_{yh}}$ , pode ser representada por uma série de Fourier, de acordo com a seguinte expressão [30]:

$$A_{b_{yh}}(x, z) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left( k_5 e^{\lambda z} + k_6 e^{-\lambda z} \right) \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t}x\right) \quad (4.68)$$

As constantes  $k_5$  e  $k_6$  são obtidas através da solução da equação (4.68), levando-se em conta as condições de fronteira impostas para o modelo, as características geométricas do atuador planar e as características do campo de reação da armadura.

A solução particular da equação (4.55) pode ser obtida através das equações (4.54) e (4.57):

$$\frac{\partial^2 A_{b_{yp}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{b_{yp}}}{\partial z^2} = -\mu_0 \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4J_o}{\pi} \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t)}{n} \text{sen} \frac{2\pi n}{l_t} x \quad (4.69)$$

cuja solução mais simples pode ser obtida integrando-se a equação (4.69) duas vezes através de  $x$ , resultando em:

$$A_{b,yp} = \mu_o \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{J_o l_t^2}{(\pi n)^3} \cdot \cos(2\pi n l_d / l_t) \text{sen} \frac{2\pi n}{l_t} x \quad (4.70)$$

A solução completa para a equação do potencial vetor magnético na região do enrolamento  $x$  é igual a:

$$A_{b,y} = A_{b,yh} + A_{b,yp} = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left[ \left( k_5 e^{\lambda z} + k_6 e^{-\lambda z} \right) + \left( \mu_o \frac{J_o l_t^2}{(\pi n)^3} \cdot \cos(2\pi n l_d / l_t) \right) \right] \text{sen} \left( \frac{2\pi n}{l_t} x \right) \quad (4.71)$$

#### 4.2.2.2 A Equação de Laplace para a Região Livre de Corrente em Termos do Potencial Vetor Magnético

Nas regiões não condutoras de corrente, ou seja, no espaço livre em ar e na região dos ímãs permanentes,  $J_y$  é igual a zero, e a equação  $\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu \vec{J}$  assume a forma da equação de Laplace para o potencial vetor magnético. Como o campo da armadura está sendo analisado separadamente do campo produzido pelos ímãs permanentes, a região de comprimento  $l_m$  será considerada com tendo as mesmas propriedades magnéticas do espaço livre em ar. Assim, no espaço entre a fronteira  $B$  e a fronteira  $P$ , a equação do potencial vetor magnético, em termos da equação de Laplace, é igual a:

$$\frac{\partial^2 A_{g,y}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{g,y}}{\partial z^2} = 0 \quad (4.72)$$

onde  $A_{g,y}$  é a componente  $y$  do potencial vetor magnético na região do espaço livre de corrente, que corresponde ao espaço entre as fronteiras  $B$  e  $P$ .

Adotando o mesmo procedimento da seção 4.2.2.1 deste capítulo, pode-se supor que  $A_{g,y}$  é expresso como o produto de duas funções  $X(x)$  e  $Z(z)$ , obtendo-se:

[19][24]

$$A_{g,y}(x, z) = X(x)Z(z) \quad (4.73)$$

onde  $X(x)$  é função de  $x$  somente e  $Z(z)$  é função de  $z$  somente. Após algumas operações matemáticas, obtém-se a seguinte equação:

$$A_{g_y}(x, z) = (A_7 e^{\alpha x} + B_7 e^{-\alpha x}) (A_8 e^{\lambda z} + B_8 e^{-\lambda z}) \quad (4.74)$$

Na equação (4.74),  $A_7$ ,  $A_8$ ,  $B_7$  e  $B_8$  são constantes arbitrárias, que devem satisfazer a equação de Laplace, as condições de fronteira impostas para o modelo e as condições do campo magnético na região das bobinas, assim como  $\alpha$  e  $\lambda$  devem satisfazer a equação (4.60) [19][24]. Aplicando as condições de fronteira à equação (4.74), o potencial vetor magnético na região onde não há fluxo de corrente,  $A_{g_y}$ , pode ser representado por uma série de Fourier, de acordo com a seguinte expressão [30]:

$$A_{g_y}(x, z) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} (k_7 e^{\lambda z} + k_8 e^{-\lambda z}) \text{sen} \left( \frac{2\pi n}{l_t} x \right) \quad (4.75)$$

#### 4.2.2.3 Solução das Equações para os Potenciais nos Enrolamentos e na Região Livre de Corrente

As constantes  $k_5$ ,  $k_6$ ,  $k_7$  e  $k_8$  são obtidas a partir das condições de fronteira [27] [28]. A solução para cada uma das duas equações que descrevem o comportamento do potencial vetor magnético nas regiões que compõem o modelo é feita a partir da determinação das relações existentes entre as componentes do fluxo e do campo nas fronteiras  $O$ ,  $B$ , e  $P$ . Na fronteira inferior do modelo, onde  $z = 0$ , como o material ferromagnético do estator é considerado infinitamente permeável, todo fluxo magnético é normal a esta fronteira. Assim, a componente  $x$  do vetor densidade de fluxo magnético na fronteira  $O$  é nula, ou seja,

$$B_{by_x}^O = - \left( \frac{\partial A_{by}}{\partial z} \right)_{z=0} = 0 \quad (4.76)$$

ou

$$B_{by_x}^O = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \lambda (-k_5 + k_6) \text{sen} \left( \frac{2\pi n}{l_t} x \right) = 0 \quad (4.77)$$

Na fronteira  $B$  tem-se [61]:

$$B_{by_z}^B = B_{gy_z}^B, \quad \text{ou} \quad \left( \frac{\partial A_{by}}{\partial x} \right)_{z=l_b} = \left( \frac{\partial A_{gy}}{\partial x} \right)_{z=l_b} \quad (4.78)$$

e

$$H_{by_x}^B = H_{gy_x}^B, \quad \text{ou} \quad \left( \frac{\partial A_{by}}{\partial z} \right)_{z=l_b} = \left( \frac{\partial A_{gy}}{\partial z} \right)_{z=l_b} \quad (4.79)$$

Na fronteira  $P$ , onde  $z = l_g + l_m$ , o material ferromagnético da culatra é considerado infinitamente permeável. Então todo fluxo magnético é considerado normal a esta fronteira. Assim, a componente  $x$  do vetor densidade de fluxo magnético na fronteira  $P$  é nula, ou seja,

$$B_{gy_x}^P = - \left( \frac{\partial A_{gy}}{\partial z} \right)_{z=l_g+l_m} = 0 \quad (4.80)$$

ou,

$$B_{gy_x}^P = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \lambda \left( -k_7 e^{\lambda(l_g+l_m)} + k_8 e^{-\lambda(l_g+l_m)} \right) \text{sen} \left( \frac{2\pi n}{l_t} x \right) = 0 \quad (4.81)$$

Nas equações anteriores,  $B_{by_x}$ ,  $B_{by_z}$ ,  $B_{gy_x}$  e  $B_{gy_z}$  correspondem às componentes  $x$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região das fases do enrolamento  $x$  e na região do espaço livre de correntes, respectivamente, enquanto que  $H_{by_x}$  e  $H_{gy_x}$  correspondem às componentes  $x$  do vetor intensidade de campo magnético nas mesmas regiões. Todas estas quatro grandezas são geradas por  $J_y$ .

As equações (4.76), (4.78), (4.79) e (4.80) produzem um conjunto de quatro equações e quatro incógnitas. A solução deste sistema fornece as constantes  $k_5$ ,  $k_6$ ,  $k_7$  e  $k_8$ . As equações que definem o comportamento dos potenciais na região dos enrolamentos da armadura e na região livre de corrente, são apresentadas a seguir, respectivamente:

$$A_{b_y}(x, z) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left[ \mu_o \frac{J_o l_t^2}{(\pi n)^3} \cos(2\pi n l_d / l_t) \left( 1 + \frac{(e^{\lambda b} - e^{\lambda(2(l_m+l_g)-l_b)})}{(e^{2\lambda(l_m+l_g)} - 1)} \cosh(\lambda z) \right) \right] \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \quad (4.82)$$

e

$$A_{g_y}(x, z) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \mu_o \frac{J_o l_t^2}{2(\pi n)^3} \cos(2\pi n l_d / l_t) \frac{(e^{\lambda b} - e^{-\lambda b})}{(e^{2\lambda(l_m+l_g)} - 1)} \left( e^{\lambda z} + e^{\lambda(2(l_m+l_g)-z)} \right) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \quad (4.83)$$

Nas equações anteriores,  $A_{b_y}(x, z)$  é o potencial na região do enrolamento  $x$  da armadura, e  $A_{g_y}(x, z)$ , o potencial na região livre de corrente. As equações que descrevem o comportamento das componentes  $x$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético nos enrolamentos e na região livre de corrente são apresentadas a seguir:

$$B_{b_y_x}(x, z) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left[ \mu_o \frac{J_o l_t^2}{(\pi n)^3} \cos(2\pi n l_d / l_t) \left( \frac{(e^{\lambda(2(l_m+l_g)-l_b)} - e^{\lambda b})}{(e^{2\lambda(l_m+l_g)} - 1)} \lambda \operatorname{sen}(\lambda z) \right) \right] \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \quad (4.84)$$

$$B_{b_y_z}(x, z) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left[ \mu_o \frac{2J_o l_t}{(\pi n)^2} \cos(2\pi n l_d / l_t) \left( 1 + \frac{(e^{\lambda b} - e^{\lambda(2(l_m+l_g)-l_b)})}{(e^{2\lambda(l_m+l_g)} - 1)} \cosh(\lambda z) \right) \right] \cos\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \quad (4.85)$$

$$B_{g_y_x}(x, z) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \mu_o \frac{J_o l_t^2}{2(\pi n)^3} \cos(2\pi n l_d / l_t) \frac{(e^{\lambda b} - e^{-\lambda b})}{(e^{2\lambda(l_m+l_g)} - 1)} \lambda \left( e^{\lambda(2(l_m+l_g)-z)} - e^{\lambda z} \right) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \quad (4.86)$$

$$B_{g_y_z}(x, z) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \mu_o \frac{J_o l_t}{(\pi n)^2} \cos(2\pi n l_d / l_t) \frac{(e^{\lambda b} - e^{-\lambda b})}{(e^{2\lambda(l_m+l_g)} - 1)} \left( e^{\lambda z} + e^{\lambda(2(l_m+l_g)-z)} \right) \cos\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \quad (4.87)$$



Nas equações anteriores  $B_{by_x}(x,z)$  e  $B_{by_z}(x,z)$  correspondem, respectivamente, às componentes  $x$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região do enrolamento  $x$ , e  $B_{gy_x}(x,z)$  e  $B_{gy_z}(x,z)$ , às componentes  $x$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região livre de corrente. Todas essas quatro grandezas são geradas por  $J_y$ .

Nos gráficos apresentados a seguir, apenas estão sendo consideradas as componentes do vetor densidade de fluxo magnético produzidas pelas correntes no enrolamento  $x$  da armadura. O efeito dos ímãs permanentes não está sendo considerado.

A figura 4.16 apresenta os gráficos que ilustram o comportamento da distribuição da densidade de fluxo magnético estabelecida pelo campo magnético produzido pela reação da armadura na região do enrolamento  $x$  e na região livre de corrente. Em todos os quatro gráficos, a corrente em cada fase do enrolamento  $x$ , localizada sob um ímã permanente, foi considerada igual a 3,0 A. As fases adjacentes não foram consideradas portadoras de corrente, nem as fases do enrolamento  $y$ . Os gráficos são válidos tanto para o caso 1, como para o caso 2, porque, em ambos, o comprimento da região dos enrolamentos é o mesmo, e o comprimento do espaço livre em ar somado ao comprimento dos ímãs permanentes é o mesmo, também. As figuras 4.16(a) e 4.16(c) apresentam os gráficos das componentes  $x$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região dos enrolamentos, em função da posição através do eixo  $x$ , no plano  $z = 4$  mm. Em (a) apresenta-se o gráfico da componente  $x$  e, em (c) da componente  $z$ . As figuras 4.16(b) e 4.16(d) apresentam os gráficos das componentes  $x$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região do espaço livre de corrente, em função da posição através do eixo  $x$ , no plano  $z = 8,5$  mm. Em (b) apresenta-se o gráfico da componente  $x$  e, em (d) da componente  $z$ .

Através dos gráficos verifica-se que a componente  $x$  do vetor densidade de fluxo magnético possui seu máximo coincidente com a linha central dos ímãs permanentes, enquanto que a componente  $z$  possui seus máximos próximos às fronteiras do modelo considerado para estudo da densidade de fluxo magnético estabelecida no entreferro do atuador planar. Na linha central dos ímãs permanentes a componente  $z$  da densidade de fluxo magnético é nula.

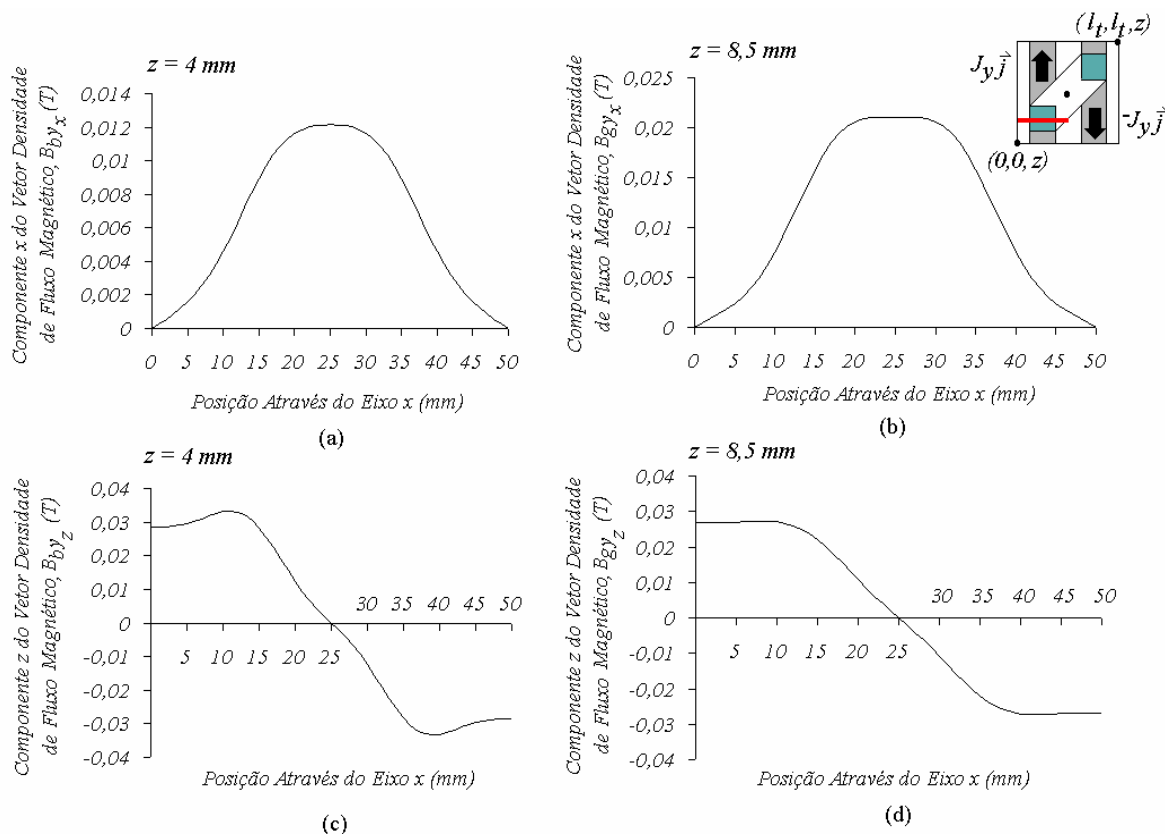


Figura 4.16 - Gráficos das componentes do vetor densidade de fluxo magnético em função da posição através do eixo  $x$ : em (a) e (c) são apresentadas as componentes  $x$  e  $z$  na região do enrolamento  $x$  no plano  $z = 4$  mm, respectivamente e, em (b) e (d), as componentes  $x$  e  $z$  na região do espaço livre de corrente no plano  $z = 8,5$  mm, respectivamente. Nos quatro gráficos a corrente nas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes foi considerada igual a 3,0 A.

Os gráficos apresentados na figura 4.17 estão relacionados com as condições de fronteira definidas pelas equações (4.78) e (4.79). Nas figuras 4.17(a) e (c) são apresentados os gráficos das componentes  $x$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região do enrolamento  $x$ , e em (b) e (d), os gráficos das componentes  $x$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região do espaço livre de corrente. Nos quatro gráficos, as componentes do vetor densidade de corrente são apresentados em função da posição através do eixo  $x$ , no plano  $z = 7,5$  mm, que corresponde à fronteira entre as duas regiões em questão. A corrente em cada fase do enrolamento  $x$ , localizada sob um ímã permanente, foi considerada igual a 3,0 A.

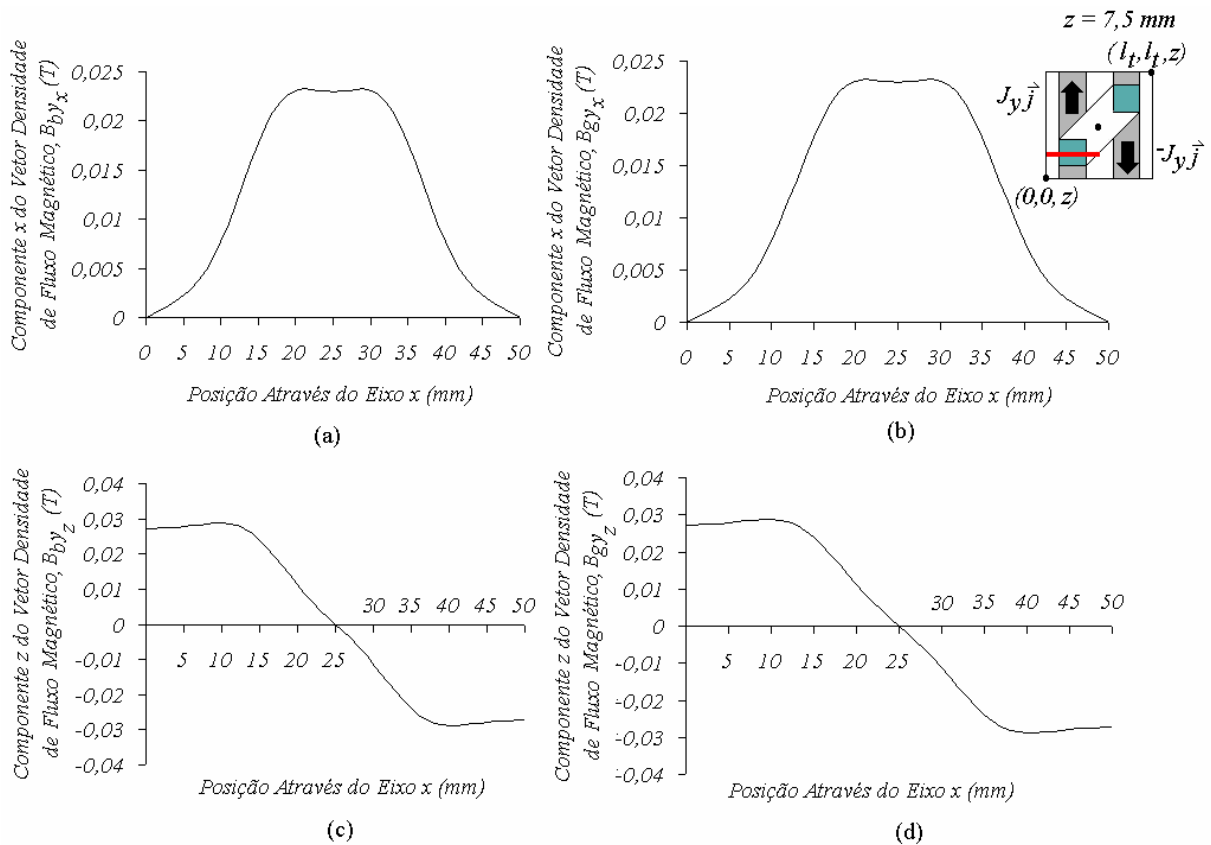


Figura 4.17 - Gráficos das componentes do vetor densidade de fluxo magnético em função da posição através do eixo  $x$  no plano  $z = 7,5 \text{ mm}$ , que corresponde à fronteira entre as duas regiões em questão: em (a) e (c) são apresentados os gráficos das componentes  $x$  e  $z$  na região do enrolamento  $x$ , e em (b) e (d), os gráficos das componentes  $x$  e  $z$  na região do espaço livre de corrente. Nos quatro gráficos, a corrente em cada fase do enrolamento  $x$  localizada sob um ímã permanente foi considerada igual a  $3,0 \text{ A}$ .

Embora o carro tenha sido representado junto aos gráficos anteriores, o efeito do campo magnético dos ímãs permanentes não foi considerado para o cálculo dos valores de densidade de fluxo magnético. O carro foi mostrado apenas com o objetivo de localizar as fases de interesse em relação aos ímãs no modelo em estudo. Esta forma de representação será útil quando forem considerados conjuntamente os campos produzidos pelas correntes do enrolamento da armadura e pelos ímãs permanentes.

O vetor densidade de corrente é igual a  $J_x \hat{i}$ , se apenas as fases do enrolamento  $y$  da armadura do atuador planar são consideradas. Assim,  $J_x$  é a componente  $x$

do vetor densidade de corrente no enrolamento  $y$ . A figura 4.18 mostra o estator do atuador planar, representado apenas com duas fases do enrolamento  $y$ . Conforme pode ser verificado, o vetor densidade de corrente possui apenas componente em  $x$ . Então pode-se concluir, por analogia ao enrolamento  $x$ , que:

$$\nabla^2 A_{bx} = -\mu J_x = \frac{\partial^2 A_{bx}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_{bx}}{\partial z^2} = -\mu_0 J_x \quad (4.88)$$

onde  $A_{bx}$  é a componente  $x$  do potencial vetor magnético nas fases do enrolamento  $y$ , gerada por  $J_x$ . Pode-se supor que a componente  $x$  do potencial vetor magnético é expressa como o produto de duas funções,  $Y(y)$  e  $Z(z)$ , onde  $Y(y)$  é função de  $y$  somente, e  $Z(z)$  é função de  $z$  somente. Obtém-se, após algumas operações matemáticas, o seguinte conjunto de equações:

$$\frac{d^2 Y}{dy^2} = \beta^2 Y \quad \text{e} \quad \frac{d^2 Z}{dz^2} = \delta^2 Z \quad (4.89)$$

e

$$\beta^2 + \delta^2 = 0 \quad (4.90)$$

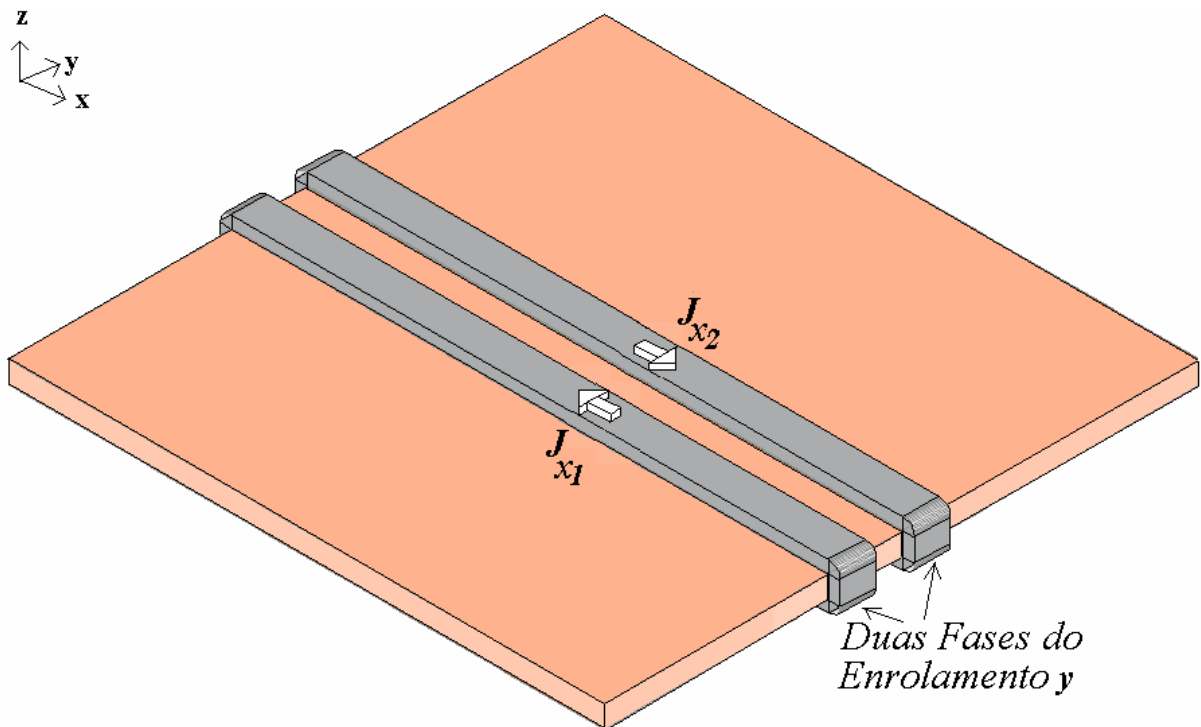


Figura 4. 18 - Estator do atuador planar, representado apenas com duas fases do enrolamento  $y$ . O vetor densidade de corrente possui apenas componente em  $x$ .

Após algumas operações, obtém-se:

$$\beta = j \frac{2\pi m}{l_t} \quad (4.91)$$

$$\delta = \sqrt{-\beta^2} = \frac{2\pi m}{l_t} \quad (4.92)$$

A densidade de corrente nas fases do enrolamento  $y$  poderá ser representada também através de uma série de Fourier, de acordo com a expressão:

$$J_x = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4J_o}{\pi} \cdot \frac{\cos(2\pi m l_d / l_t)}{m} \text{sen} \frac{2\pi m}{l_t} y \quad (4.93)$$

A solução para cada uma das equações que descrevem o comportamento do potencial vetor magnético nas regiões que compõem o modelo é feita a partir da determinação das relações existentes entre as componentes do fluxo e da intensidade do campo nas fronteiras  $O$ ,  $B$ , e  $P$ . São elas:

$$B_{bx_y}^O = \left( \frac{\partial A_{b_x}}{\partial z} \right)_{z=0} = 0 \quad (4.94)$$

$$B_{bx_z}^B = B_{gx_z}^B, \quad \text{ou} \quad \left( \frac{\partial A_{b_x}}{\partial y} \right)_{z=l_b} = \left( \frac{\partial A_{g_x}}{\partial y} \right)_{z=l_b} \quad (4.95)$$

$$H_{bx_y}^B = H_{gx_y}^B, \quad \text{ou} \quad \left( \frac{\partial A_{b_x}}{\partial z} \right)_{z=l_b} = \left( \frac{\partial A_{g_x}}{\partial z} \right)_{z=l_b} \quad (4.96)$$

$$B_{gx_y}^P = \left( \frac{\partial A_{g_x}}{\partial z} \right)_{z=l_g+l_m} = 0 \quad (4.97)$$

Nas equações anteriores,  $B_{bx_y}$ ,  $B_{bx_z}$ ,  $B_{gx_y}$  e  $B_{gx_z}$  correspondem às componentes  $y$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região das fases do enrolamento

$y$  e na região do espaço livre de correntes, respectivamente, enquanto que  $H_{bx,y}$  e  $H_{gx,y}$  correspondem às componentes  $y$  do vetor intensidade de campo magnético nas mesmas regiões. Todas estas quatro grandezas são geradas por  $J_x$ . Aplicando as condições de fronteira anteriores às equações dos potenciais nas regiões em estudo, após algumas operações, obtém-se:

$$A_{bx}(y,z) = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \mu_o \frac{J_o l_t^2}{(\pi m)^3} \cdot \cos(2\pi m l_d / l_t) \left( 1 + \frac{(e^{\delta b} - e^{\delta(2(l_m+l_g)-l_b)})}{(e^{2\delta(l_m+l_g)} - 1)} \cosh(\delta z) \right) \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi m}{l_t} y \right) \quad (4.98)$$

e

$$A_{gx}(y,z) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \mu_o \frac{J_o l_t^2}{2(\pi n)^3} \cdot \cos(2\pi n l_d / l_t) \cdot \frac{(e^{\delta b} - e^{-\delta b})}{(e^{2\delta(l_m+l_g)} - 1)} \left( e^{\delta z} + e^{\delta(2(l_m+l_g)-z)} \right) \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi n}{l_t} y \right) \quad (4.99)$$

onde  $A_{bx}$  e  $A_{gx}$  correspondem às componentes  $x$  do potencial vetor magnético na região do enrolamento  $y$  e na região livre de corrente, respectivamente, geradas por  $J_x$ . As equações que descrevem o comportamento das componentes  $y$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético em cada uma das duas regiões são iguais a:

$$B_{bx,y}(y,z) = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \mu_o \frac{J_o l_t^2}{(\pi m)^3} \cos(2\pi m l_d / l_t) \left( \frac{(e^{\delta(2(l_m+l_g)-l_b)} - e^{\delta b})}{(e^{2\delta(l_m+l_g)} - 1)} \delta \operatorname{senh}(\delta z) \right) \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi m}{l_t} y \right) \quad (4.100)$$

$$B_{bx,z}(y,z) = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \mu_o \frac{2J_o l_t}{(\pi m)^2} \cos(2\pi m l_d / l_t) \left( 1 + \frac{(e^{\delta b} - e^{\delta(2(l_m+l_g)-l_b)})}{(e^{2\delta(l_m+l_g)} - 1)} \cosh(\delta z) \right) \cos \left( \frac{2\pi m}{l_t} y \right) \quad (4.101)$$

$$B_{gx,y}(y,z) = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \mu_o \frac{J_o l_t^2}{2(\pi m)^3} \cos(2\pi m l_d / l_t) \frac{(e^{\delta b} - e^{-\delta b})}{(e^{2\delta(l_m+l_g)} - 1)} \delta \left( e^{\delta(2(l_m+l_g)-z)} - e^{\delta z} \right) \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi m}{l_t} y \right) \quad (4.102)$$

$$B_{gx_z}(y, z) = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \mu_o \frac{J_o l_t}{(\pi m)^2} \cos(2\pi m l_d / l_t) \frac{(e^{\delta l_b} - e^{-\delta l_b})}{(e^{2\delta(l_m+l_g)} - 1)} \left( e^{\delta z} + e^{\delta(2(l_m+l_g)-z)} \right) \cos\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \quad (4.103)$$

Nas equações anteriores  $B_{bx_y}(y, z)$  e  $B_{bx_z}(y, z)$  correspondem, respectivamente, às componentes  $y$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região do enrolamento  $y$ , e  $B_{gx_y}(y, z)$  e  $B_{gx_z}(y, z)$ , às componentes  $y$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região livre de corrente. Todas essas quatro grandezas são geradas por  $J_x$ . As equações totais das componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético, relacionadas com as correntes nas fases dos enrolamentos  $x$  e  $y$  da armadura, para a região dos enrolamentos, são iguais, respectivamente, a:

$$B_{b_x} = B_{by_x}(x, z) = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \mu_o \frac{J_o l_t^2}{(\pi n)^3} \cos(2\pi n l_d / l_t) \left( \frac{(e^{\lambda(2(l_m+l_g)-l_b)} - e^{\lambda l_b})}{(e^{2\lambda(l_m+l_g)} - 1)} \lambda \operatorname{senh}(\lambda z) \right) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \quad (4.104)$$

$$B_{b_y} = B_{bx_y}(y, z) = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \mu_o \frac{J_o l_t^2}{(\pi m)^3} \cos(2\pi m l_d / l_t) \left( \frac{(e^{\delta(2(l_m+l_g)-l_b)} - e^{\delta l_b})}{(e^{2\delta(l_m+l_g)} - 1)} \delta \operatorname{senh}(\delta z) \right) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \quad (4.105)$$

$$\begin{aligned} B_{b_z} &= B_{by_z}(x, z) + B_{bx_z}(y, z) \\ &= \mu_o \frac{2J_o l_t}{(\pi)^2} \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \left[ \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m x / l_t)}{n^2} \left( 1 + \frac{(e^{\lambda l_b} - e^{\lambda(2(l_m+l_g)-l_b)})}{(e^{2\lambda(l_m+l_g)} - 1)} \cosh(\lambda z) \right) \right] \\ &\quad + \left[ \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m y / l_t)}{m^2} \left( 1 + \frac{(e^{\delta l_b} - e^{\delta(2(l_m+l_g)-l_b)})}{(e^{2\delta(l_m+l_g)} - 1)} \cosh(\delta z) \right) \right] \end{aligned} \quad (4.106)$$

onde  $B_{b_x}$ ,  $B_{b_y}$  e  $B_{b_z}$  correspondem, respectivamente, às componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total na região dos enrolamentos, relacionadas com o campo magnético produzido pelas correntes nos enrolamentos  $x$  e  $y$  da armadura. As equações totais

das componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético, relacionadas com as correntes nas fases dos enrolamentos  $x$  e  $y$  da armadura, para a região do espaço livre de correntes, são iguais, respectivamente, a:

$$\begin{aligned}
 B_{gb_x} &= B_{gy_x}(x, z) \\
 &= \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \mu_0 \frac{J_o l_t^2}{2(\pi n)^3} \cos(2\pi n l_d / l_t) \frac{(e^{\lambda b} - e^{-\lambda b})}{(e^{2\lambda(l_m+l_g)} - 1)} \lambda \left( e^{\lambda(2(l_m+l_g)-z)} - e^{\lambda z} \right) \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi n}{l_t} x \right)
 \end{aligned} \tag{4.107}$$

$$\begin{aligned}
 B_{gb_y} &= B_{gx_y}(y, z) \\
 &= \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \mu_0 \frac{J_o l_t^2}{2(\pi m)^3} \cos(2\pi m l_d / l_t) \frac{(e^{\delta b} - e^{-\delta b})}{(e^{2\delta(l_m+l_g)} - 1)} \delta \left( e^{\delta(2(l_m+l_g)-z)} - e^{\delta z} \right) \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi m}{l_t} y \right)
 \end{aligned} \tag{4.108}$$

$$\begin{aligned}
 B_{gb_z} &= B_{gy_z}(x, z) + B_{gx_z}(y, z) \\
 &= \mu_0 \frac{J_o l_t}{\pi^2} \sum_{\substack{n=1,3,\dots \\ m=1,3,\dots}}^{\infty} \left[ \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t)}{n^2} \frac{(e^{\lambda b} - e^{-\lambda b})}{(e^{2\lambda(l_m+l_g)} - 1)} \left( e^{\lambda z} + e^{\lambda(2(l_m+l_g)-z)} \right) \cos \left( \frac{2\pi n}{l_t} x \right) \right] \\
 &\quad + \left[ \frac{\cos(2\pi m l_d / l_t)}{m^2} \frac{(e^{\delta b} - e^{-\delta b})}{(e^{2\delta(l_m+l_g)} - 1)} \left( e^{\delta z} + e^{\delta(2(l_m+l_g)-z)} \right) \cos \left( \frac{2\pi m}{l_t} y \right) \right]
 \end{aligned} \tag{4.109}$$

onde  $B_{gb_x}$ ,  $B_{gb_y}$  e  $B_{gb_z}$  correspondem, respectivamente, às componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total na região livre de corrente, relacionadas com o campo magnético produzido pelas correntes nos enrolamentos  $x$  e  $y$  da armadura.

Na figura 4.19 é apresentado o gráfico da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região livre de corrente, em função da posição através do eixo  $x$  no plano  $z = 8,5$  mm, considerando as fases do enrolamento  $x$  e do enrolamento  $y$  localizadas sob os ímãs permanentes, excitadas por corrente com valor igual a 3,0 A. Os valores foram obtidos para  $y = 12,5$  mm.



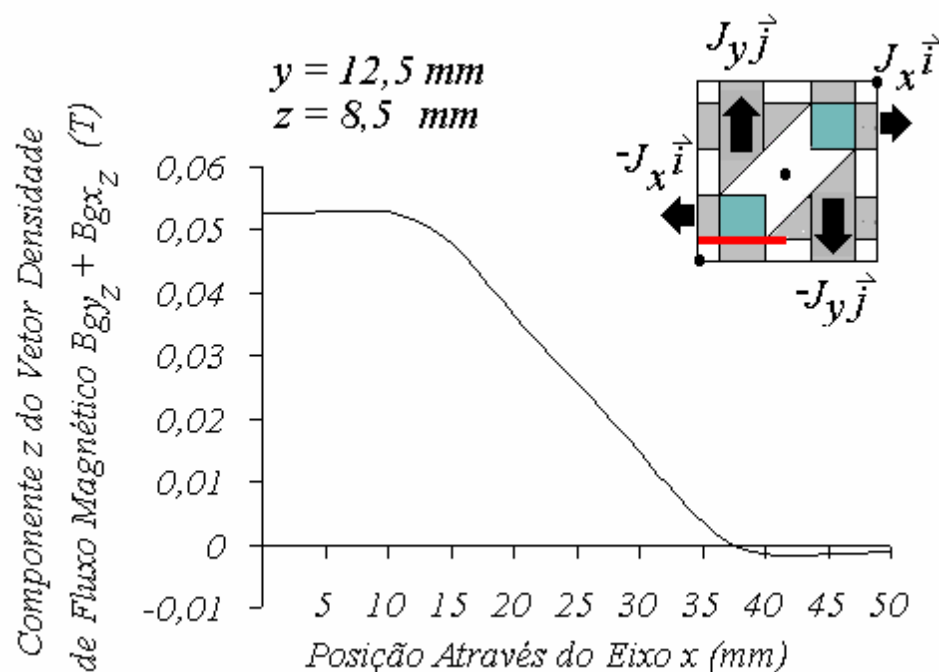


Figura 4. 19 - Gráfico da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região livre de corrente, em função da posição através do eixo x no plano  $z = 8,5 \text{ mm}$ , considerando as fases do enrolamento x e do enrolamento y, localizadas sob os ímãs permanentes, excitadas por corrente com valor igual a 3,0 A. Os valores foram obtidos para  $y = 12,5 \text{ mm}$ .

Novamente na figura anterior, embora o carro tenha sido representado junto ao gráfico, o efeito do campo magnético dos ímãs permanentes não foi considerado para o cálculo dos valores de densidade de fluxo magnético, apenas foi levado em conta o campo produzido pelos condutores dos enrolamentos x e y da armadura.

#### 4.2.3 Análise do Campo Magnético Total

A componente z do vetor densidade de fluxo magnético total nas regiões em estudo é resultante da ação dos campos magnéticos produzidos pelos ímãs permanentes e pelos condutores do enrolamento da armadura com corrente. O comportamento dos campos magnéticos foi considerado linear, tendo-se desprezado o efeito de saturação magnética. Considerou-se que a força magnetomotriz dos enrolamentos não afetou o ponto de operação dos ímãs permanentes. Assim, a componente z do vetor densidade de fluxo magnético total é resultado da soma entre a componente z do vetor densidade de fluxo magnético estabelecida pelos ímãs permanentes, e a componente z do vetor densidade de

fluxo magnético estabelecida pelos condutores dos enrolamentos da armadura percorridos por corrente. Entre as fronteiras  $O$  e  $B$ , ou seja, entre os planos  $z = 0$  e  $z = l_b$ , sua equação é dada por:

$$\begin{aligned}
 B_{T_z}^{OB} &= B_{g_z} + B_{b_z} = B_{g_z}(x, y, z) + B_{b_{y_z}}(x, z) + B_{b_{x_z}}(y, z) \\
 &= \mu_o \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \left\{ \frac{8M_o}{\pi^2} (e^{\gamma z} + e^{-\gamma z}) \frac{(e^{\lambda g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \right. \\
 &\quad \left. \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{n.m} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \right\} \\
 &\quad + \frac{2J_o l_t}{(\pi)^2} \left\{ \left[ \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m x / l_t)}{n^2} \left( 1 + \frac{(e^{\lambda b} - e^{\lambda(2(l_m+l_g)-l_b)})}{(e^{2\lambda(l_m+l_g)} - 1)} \cosh(\lambda z) \right) \right] \right. \\
 &\quad \left. \left[ \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m y / l_t)}{m^2} \left( 1 + \frac{(e^{\delta b} - e^{\delta(2(l_m+l_g)-l_b)})}{(e^{2\delta(l_m+l_g)} - 1)} \cosh(\delta z) \right) \right] \right\} \quad (4.110)
 \end{aligned}$$

Entre as fronteiras  $B$  e  $G$ , ou seja, entre os planos  $z = l_b$  e  $z = l_g$ , a equação da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total é dada por:

$$\begin{aligned}
 B_{T_z}^{BG} &= B_{g_z} + B_{g_{b_z}} = B_{g_z}(x, y, z) + B_{g_{y_z}}(x, z) + B_{g_{x_z}}(y, z) \\
 &= \mu_o \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \left\{ \frac{8M_o}{\pi^2} (e^{\gamma z} + e^{-\gamma z}) \frac{(e^{\lambda g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \right. \\
 &\quad \left. \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{n.m} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \right\} \quad (4.111) \\
 &\quad + \frac{J_o l_t}{\pi^2} \left\{ \left[ \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t)}{n^2} \frac{(e^{\lambda b} - e^{-\lambda b})}{(e^{2\lambda(l_m+l_g)} - 1)} \left( e^{\lambda z} + e^{\lambda(2(l_m+l_g)-z)} \right) \cos\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \right] \right. \\
 &\quad \left. + \left[ \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t)}{m^2} \frac{(e^{\delta b} - e^{-\delta b})}{(e^{2\delta(l_m+l_g)} - 1)} \left( e^{\delta z} + e^{\delta(2(l_m+l_g)-z)} \right) \cos\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \right] \right\}
 \end{aligned}$$

Entre as fronteiras  $G$  e  $P$  (entre os planos  $z = l_g$  e  $z = l_g + l_m$ ), a equação da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total é dada por:

$$\begin{aligned}
B_{T_z}^{GP} &= B_{pm_z} + B_{gb_z} = B_{pm_z}(x, y, z) + B_{gy_z}(x, z) + B_{gx_z}(y, z) \\
&= \mu_o \sum_{n,m=1,3,..}^{\infty} \left\{ \frac{8M_o}{\pi^2} \left[ e^{\gamma z} \frac{(e^{\lambda_g} - e^{-\lambda_g})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} + e^{-\gamma z} \frac{(e^{\lambda_g} - e^{-\lambda_g})}{(1 - e^{-2\gamma(l_m+l_g)})} - 2 \right] \right. \\
&\quad \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{n \cdot m} \left. \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \right\} \\
&\quad + \frac{J_o l_t}{\pi^2} \left[ \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t)}{n^2} \frac{(e^{\lambda_b} - e^{-\lambda_b})}{(e^{2\lambda(l_m+l_g)} - 1)} \left( e^{\lambda z} + e^{\lambda(2(l_m+l_g)-z)} \right) \cos\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \right] \\
&\quad + \left[ \frac{\cos(2\pi m l_d / l_t)}{m^2} \frac{(e^{\delta_b} - e^{-\delta_b})}{(e^{2\delta(l_m+l_g)} - 1)} \left( e^{\delta z} + e^{\delta(2(l_m+l_g)-z)} \right) \cos\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \right] \left. \right\} \quad (4.112)
\end{aligned}$$

Nos gráficos apresentados a seguir, a densidade de fluxo magnético é resultante da ação conjunta dos campos produzidos pelos ímãs permanentes e pelas correntes nos enrolamentos da armadura. A figura 4.20 mostra os gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético calculados para  $z = 8,5$  mm e  $y = 17$  mm, em função de  $x$ , obtidos pela equação (4.111), considerando que apenas as fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, são percorridas por uma corrente de 3 A: em (a) o gráfico refere-se ao caso 1 e, em (b), ao caso 2. A figura 4.21 mostra os gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total no plano  $z = 8,5$  mm em função de  $x$ , obtidos pela equação (4.111), considerando que as fases dos enrolamentos  $x$  e  $y$  são percorridas por uma corrente igual a 3 A, tendo  $y$  sido fixado em 17 mm: em (a) o gráfico refere-se ao caso 1 e, em (b), ao caso 2. A figura 4.22 mostra os gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total, calculados através da diagonal sob o carro, para  $z = 8,5$  mm, obtidos pela equação (4.111), considerando que apenas as fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, são percorridas por uma corrente de 3 A: em (a) o gráfico refere-se ao caso 1 e, em (b), ao caso 2. A figura 4.23 mostra os gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total obtidos pela equação (4.111), calculados através da diagonal sob o carro, para  $z = 8,5$  mm, considerando que as fases dos enrolamentos  $x$  e  $y$  são percorridas por uma corrente igual a 3 A: em (a) o gráfico refere-se ao caso 1 e, em (b), ao caso 2.

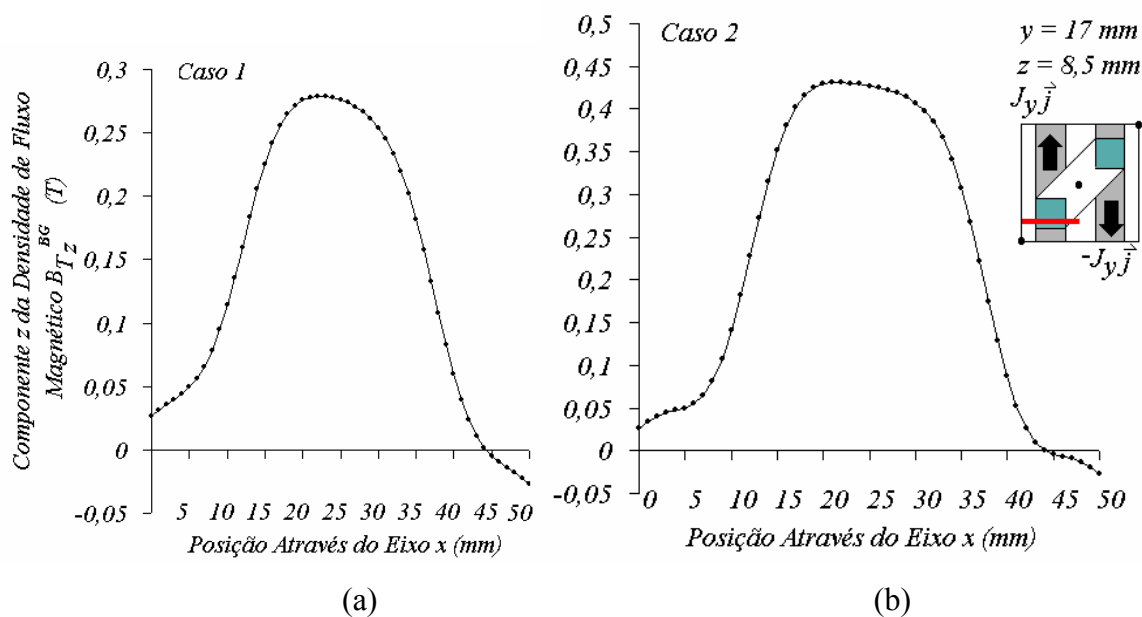


Figura 4. 20 - Gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total calculados para  $z = 8,5$  mm e  $y = 17$  mm, em função de  $x$ , obtida pela equação (4.111), considerando que apenas as fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, são percorridas por uma corrente de 3 A: em (a) o gráfico refere-se ao caso 1 e em (b), ao caso 2.

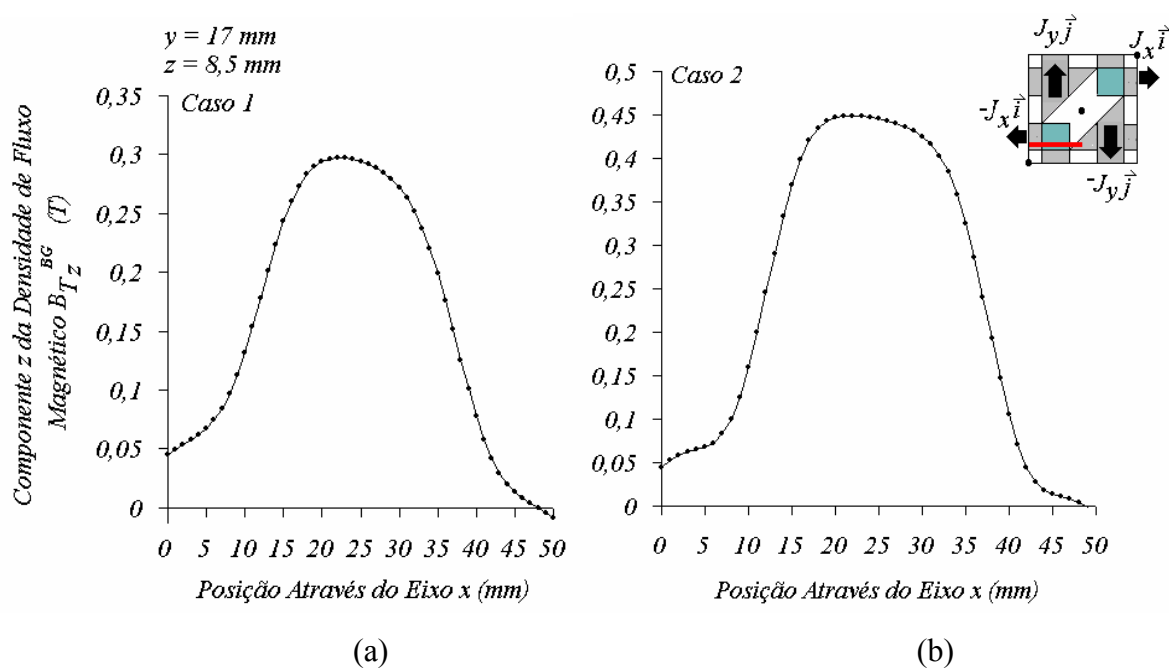


Figura 4. 21 - Gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total no plano  $z = 8,5$  mm em função de  $x$ , obtida pela equação (4.111), considerando que as fases dos enrolamentos  $x$  e  $y$  são percorridas por uma corrente igual a 3 A, tendo  $y$  sido fixado em 17 mm: em (a) o gráfico refere-se ao caso 1 e, em (b), ao caso 2.

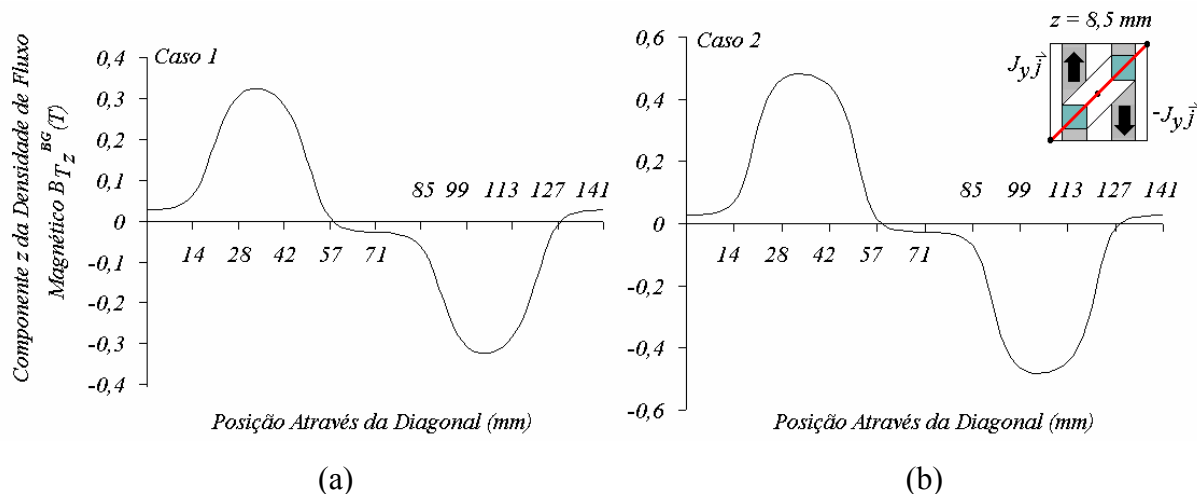


Figura 4. 22 - Gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total, obtidos pela equação (4.111), calculados através da diagonal sob o carro, para  $z = 8,5$  mm, considerando que apenas as fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, são percorridas por uma corrente de 3 A: em (a) o gráfico refere-se ao caso 1 e, em (b), ao caso 2.

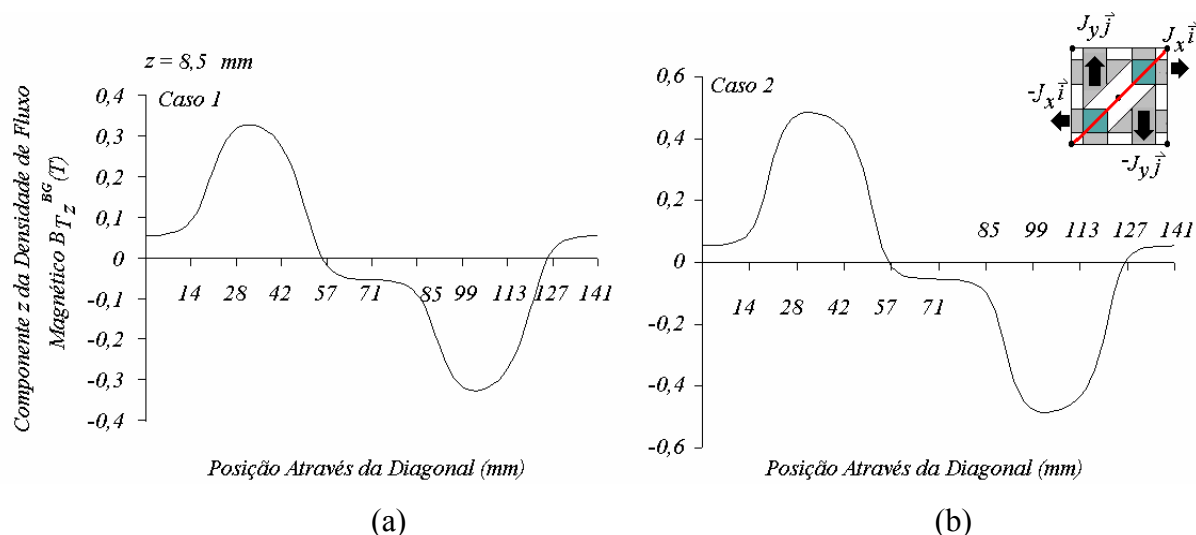


Figura 4. 23 - Gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total, obtidos pela equação (4.111), calculados através da diagonal sob o carro, para  $z = 8,5$  mm, considerando que as duas fases do enrolamento  $x$  e as duas fases do enrolamento  $y$ , que estão localizadas sob os ímãs permanentes, sejam percorridas por 3,0 A: em (a) o gráfico refere-se ao caso 1 e, em (b), ao caso 2.

As figuras 4.24 e 4.25 apresentam os gráficos tridimensionais da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro entre as fronteiras  $B$  e  $G$  medida sob um ímã permanente, em função de  $x$  e  $y$ , no plano  $z = 8,5$  mm, resultantes da interpolação dos pontos gerados pela equação (4.111).

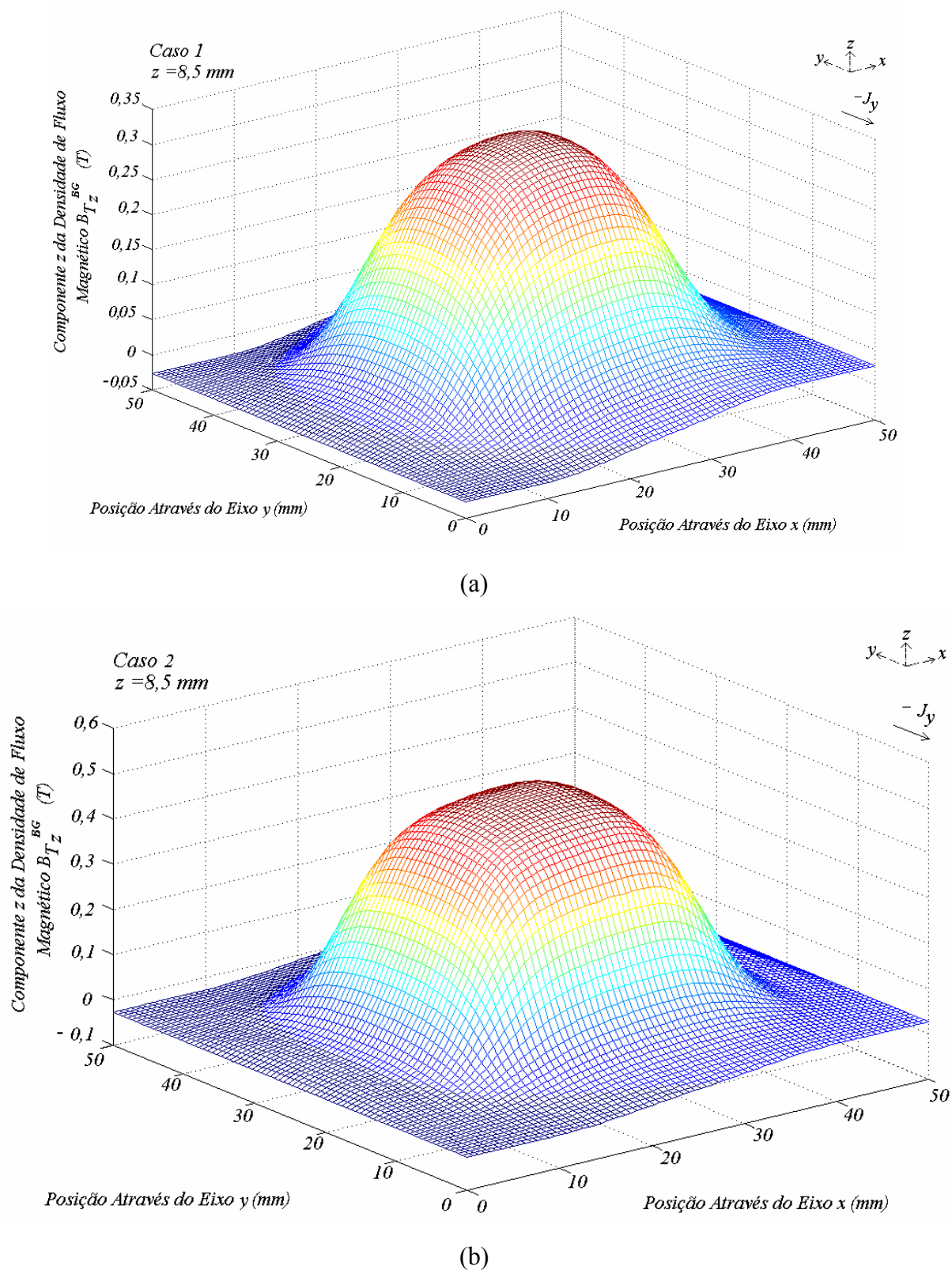


Figura 4. 24 - Gráficos tridimensionais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro medida sob um ímã permanente no plano  $z = 8,5 \text{ mm}$ , em função de  $x$  e  $y$ . Em (a) e (b) os gráficos referem-se aos casos 1 e 2, respectivamente, com as fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes percorridas por uma corrente de  $3,0 \text{ A}$ .

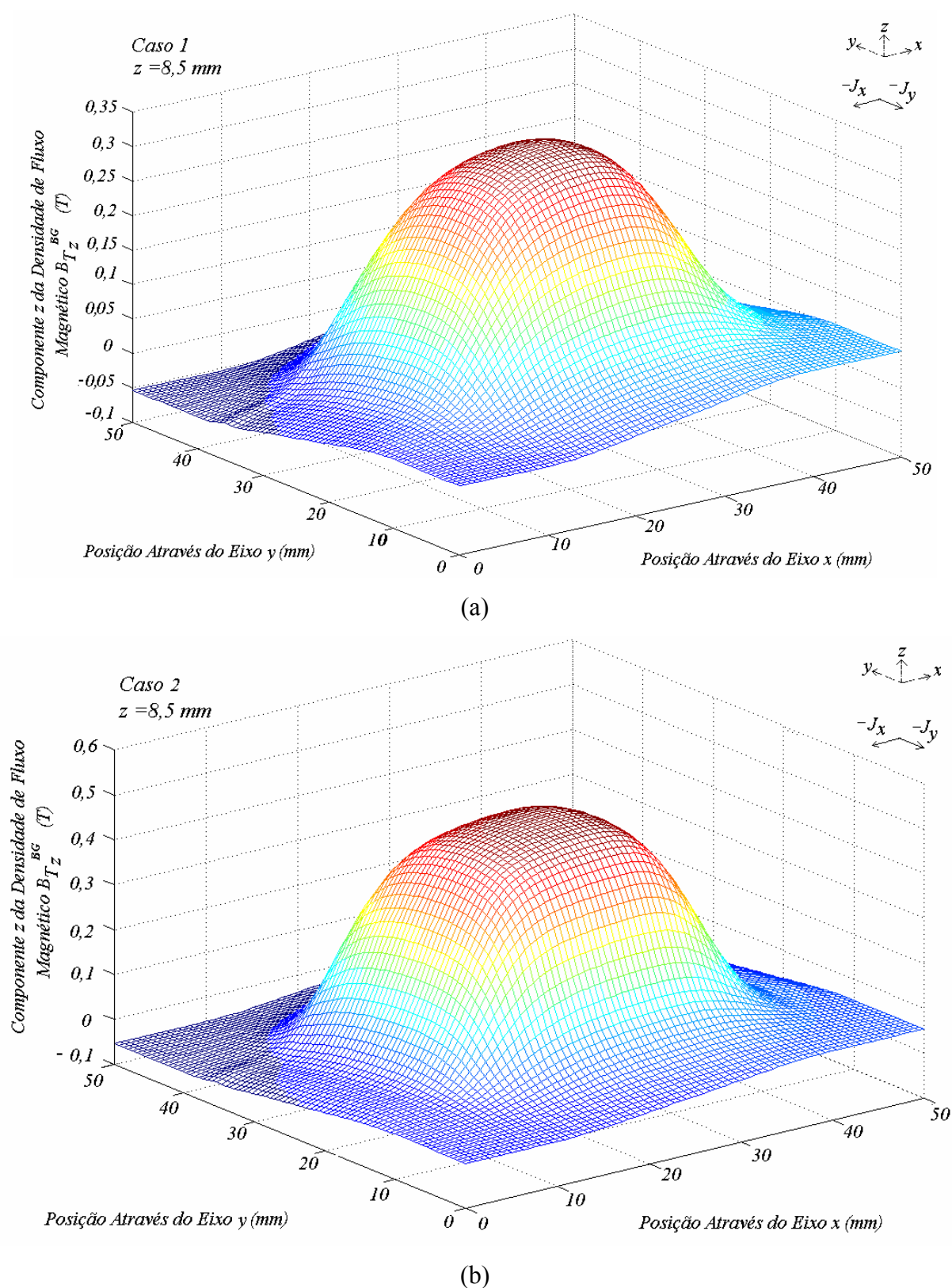


Figura 4. 25 - Gráficos tridimensionais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro medida sob um ímã permanente no plano  $z = 8,5 \text{ mm}$ , em função de  $x$  e  $y$ . Em (a) e (b) os gráficos referem-se aos casos 1 e 2, respectivamente, com as fases dos enrolamentos  $x$  e  $y$  localizadas sob os ímãs permanentes, percorridas por uma corrente de  $3,0 \text{ A}$ .

### 4.3 ANÁLISE DAS FORÇAS ESTÁTICAS QUE ATUAM SOBRE O CARRO DO ATUADOR PLANAR

No estudo do comportamento estático do atuador planar, dois tipos principais de força foram considerados: a força planar de propulsão, que provoca o deslocamento do carro sobre o plano formado pela armadura e a força normal, que é uma força de atração entre o carro e o núcleo da armadura. A força planar de propulsão pode ter apenas uma componente, o que resultará no movimento do carro através do eixo  $x$  ou  $y$ , ou duas componentes, provocando o deslocamento do carro diagonalmente.

#### 4.3.1 Força Planar de Propulsão

No capítulo 2 deste trabalho discutiu-se a origem da força planar de propulsão. Conforme visto, a força planar de propulsão produzida sobre o carro, considerando apenas um ímã permanente, é dada por:

$$\begin{aligned}\vec{F}_N &= \int_{V_N} \vec{B}_{gN} \times \vec{J}_N dV_N = \int_{V_N} B_{gzN} \vec{k} \times (J_{xN} \vec{i} + J_{yN} \vec{j}) dV_N \\ &= \int_{V_N} B_{gzN} (-J_{yN} \vec{i} + J_{xN} \vec{j}) dV_N\end{aligned}\quad (4.113)$$

Na equação (4.113), a componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético é aquela produzida pelos ímãs permanentes. Sob o ponto de vista matemático, a integração sobre a componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético produzida pelas correntes no enrolamento da armadura sob o entreferro de um ímã permanente é nula, porque sua distribuição é cossenoidal em relação ao plano  $x = 0$ . Sob o ponto de vista eletromagnético, um condutor percorrido por corrente não poderá provocar uma força eletromagnética sobre si mesmo. Introduzindo-se a equação (4.45) na equação (4.113), obtém-se:

$$\begin{aligned}\vec{F}_N &= \int_{V_N} \mu_o \frac{8M_o}{\pi^2} \left[ \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} (e^{\gamma z} + e^{-\gamma z}) \frac{(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m + l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m + l_g)} - 1)} \right. \\ &\quad \left. \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{nm} \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \right] (-J_{yN} \vec{i} + J_{xN} \vec{j}) dV_N\end{aligned}\quad (4.114)$$

Introduzindo-se as equações (4.57) e (4.93) na equação (4.114) tem-se:[62]:



$$\begin{aligned} \bar{F}_N = \mu_o \frac{32 M_o J_o}{\pi^3} \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{nm} \\ \left[ - \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t)}{n} \int_0^{l_g} \int_0^{\frac{l_t}{2}} \int_0^{\frac{l_t}{2}} \text{sen}^2\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) (e^{\gamma z} + e^{-\gamma z}) \bar{i} dx dy dz \right. \\ \left. + \frac{\cos(2\pi m l_d / l_t)}{m} \int_0^{l_g} \int_0^{\frac{l_t}{2}} \int_0^{\frac{l_t}{2}} \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \text{sen}^2\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) (e^{\gamma z} + e^{-\gamma z}) \bar{j} dx dy dz \right] \end{aligned} \quad (4.115)$$

Efetuada a integração, obtém-se:

$$\begin{aligned} \bar{F}_N = \mu_o 8 l_t^3 M_o J_o \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\text{senh}(\gamma l_g)}{\pi^5 n^2 m^2 \sqrt{n^2 + m^2}} \frac{(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \\ \cdot \cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t) (\cos(2\pi n l_d / l_t) \bar{i} - \cos(2\pi m l_d / l_t) \bar{j}) \\ = -F_{x_N} \bar{i} + F_{y_N} \bar{j} \end{aligned} \quad (4.116)$$

A força planar total é obtida através da equação (4.117):

$$\begin{aligned} \bar{F} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2 = -(F_{x_1} + F_{x_2}) \bar{i} + (F_{y_1} + F_{y_2}) \bar{j} \\ = \mu_o 16 l_t^3 M_o J_o \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\text{senh}(\gamma l_g)}{\pi^5 n^2 m^2 \sqrt{n^2 + m^2}} \frac{(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \\ \cdot \cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t) (\cos(2\pi n l_d / l_t) \bar{i} - \cos(2\pi m l_d / l_t) \bar{j}) \end{aligned} \quad (4.117)$$

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

$$\begin{aligned} \bar{F} = \mu_o 16 l_t^3 M_o \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\text{senh}(\gamma l_g)}{\pi^5 n^2 m^2 \sqrt{n^2 + m^2}} \frac{(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \\ \cdot \cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t) (J_{o_y} \cos(2\pi n l_d / l_t) \bar{i} - J_{o_x} \cos(2\pi m l_d / l_t) \bar{j}) \end{aligned} \quad (4.118)$$

onde  $J_{oy}$  é o valor de pico da componente  $y$  do vetor densidade de corrente e  $J_{ox}$  é o valor de pico da componente  $x$  do vetor densidade de corrente. A figura 4.26 apresenta os gráficos da componente  $x$  da força planar total, igual a  $F_{x1} + F_{x2}$ , calculada pela equação (4.118) em função da corrente que percorre as duas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes. Esta força provoca o movimento do carro através do eixo  $x$ . A figura 4.27 apresenta os gráficos da força planar total  $F$  que atua diagonalmente sobre o carro do atuador planar, em função da corrente através das fases do enrolamento  $x$  e do enrolamento  $y$  localizadas sob os ímãs permanentes.

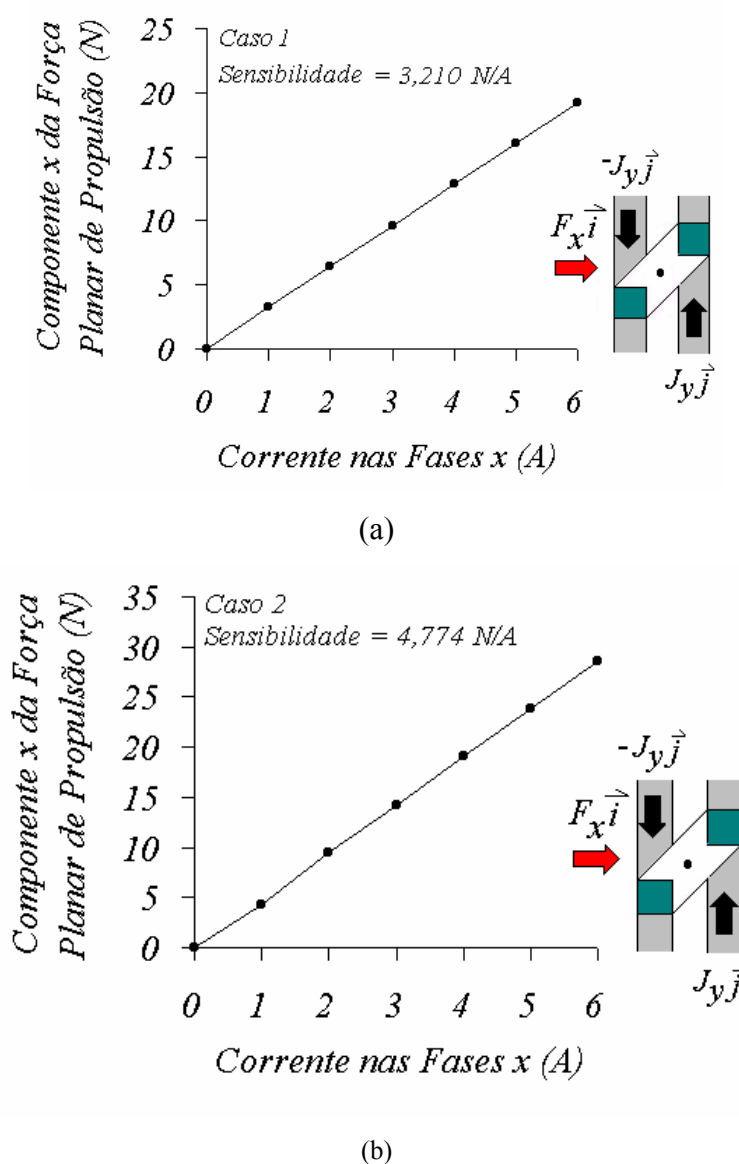


Figura 4. 26 - Gráfico da componente  $x$  da força planar total,  $F_{x1} + F_{x2}$ , calculado pela equação (4.118) em função da corrente que percorre as duas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes. Esta força provoca o movimento do carro através do eixo  $x$ . Em (a), a força é calculada para o caso 1, e em (b), para o caso 2.

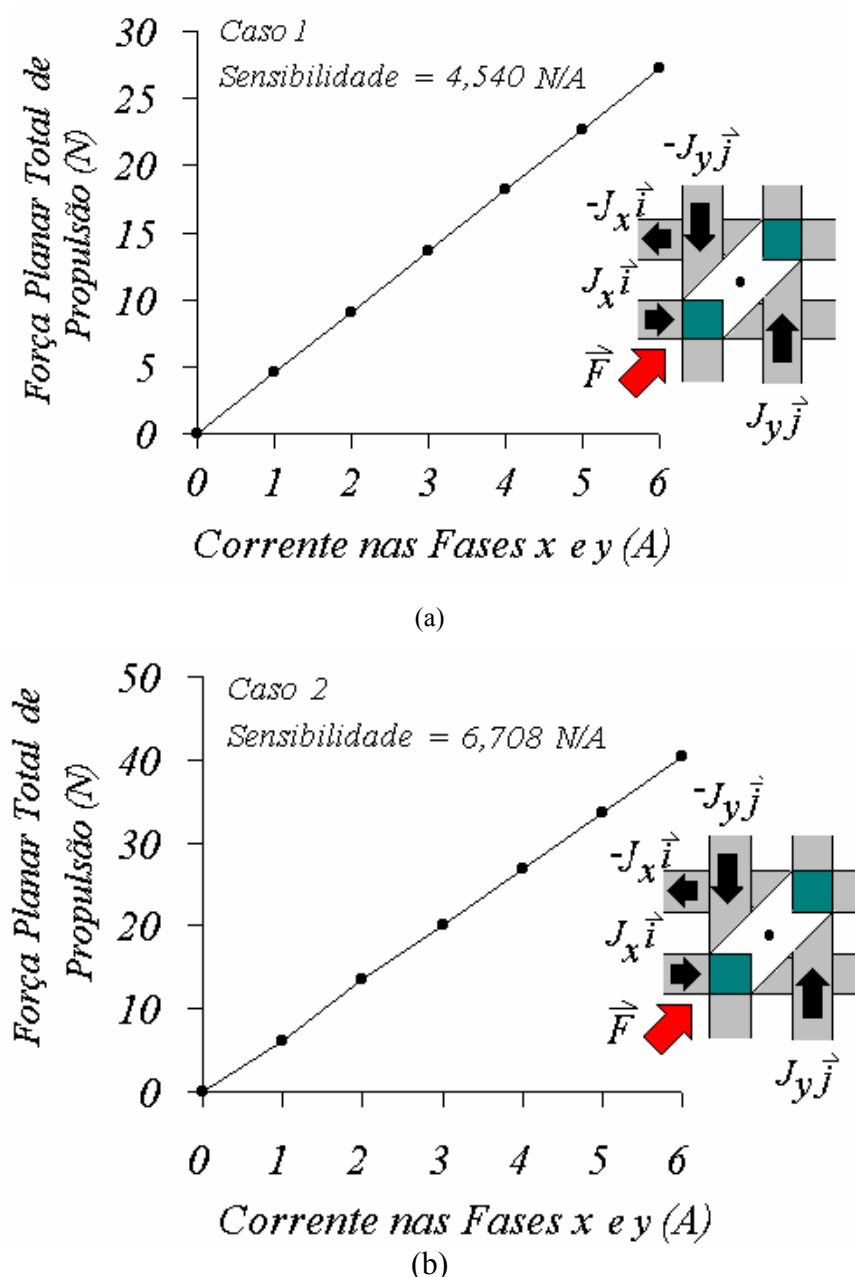
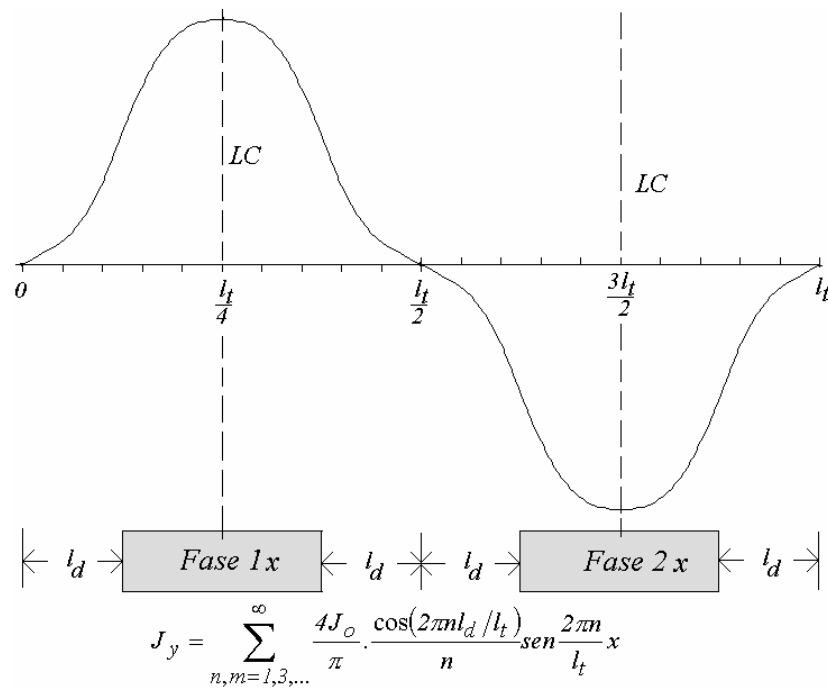


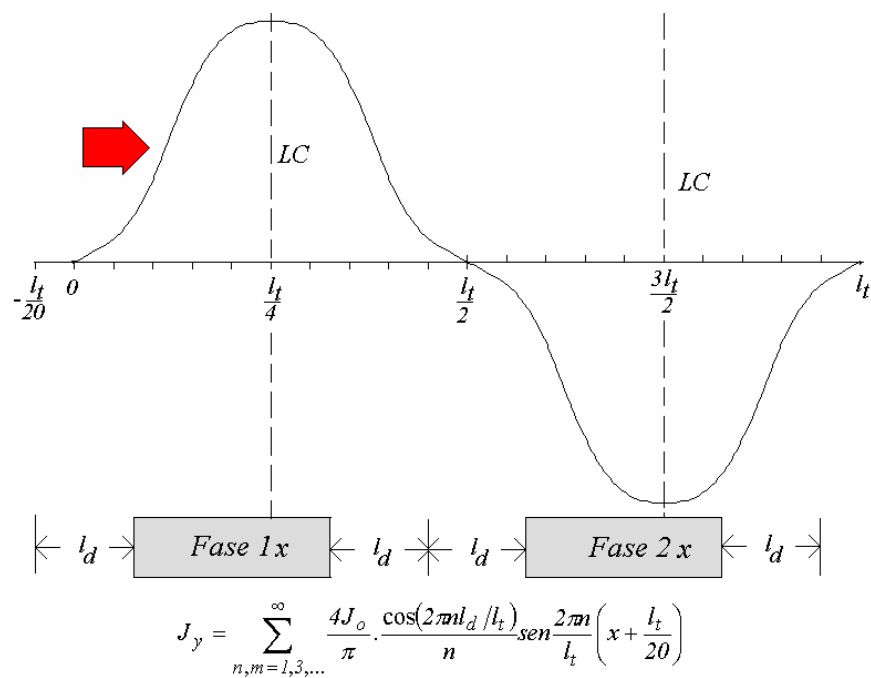
Figura 4. 27 - Gráfico da força planar total  $F$  que atua diagonalmente sobre o carro do atuador planar, em função da circulação de corrente através das fases do enrolamento  $x$  e do enrolamento  $y$  localizadas sob os ímãs permanentes. Em (a) a força é calculada para o caso 1, e em (b), para o caso 2.

Os gráficos das figuras 4.26 e 4.27 foram obtidos considerando que a linha central de uma fase  $x$  com corrente coincide com a linha central de um ímã permanente, conforme mostra a figura 4.28(a). As figuras 4.28(b), 4.28(c) e 4.28(d) mostram a posição relativa de duas fases do enrolamento da armadura em relação à distribuição do fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes, em função do deslocamento do carro através do eixo  $x$ .

O gráfico da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro apresentado nas figuras 4.28(a), (b), (c) e (d), é apenas qualitativo e tem por objetivo mostrar a posição das fases excitadas por corrente em relação à distribuição de fluxo magnético no entreferro. Em (b), os ímãs permanentes deslocaram-se de 5 mm a partir da posição zero, em (c), de 12,5 mm e em (d) de 20 mm.



(a)



(b)

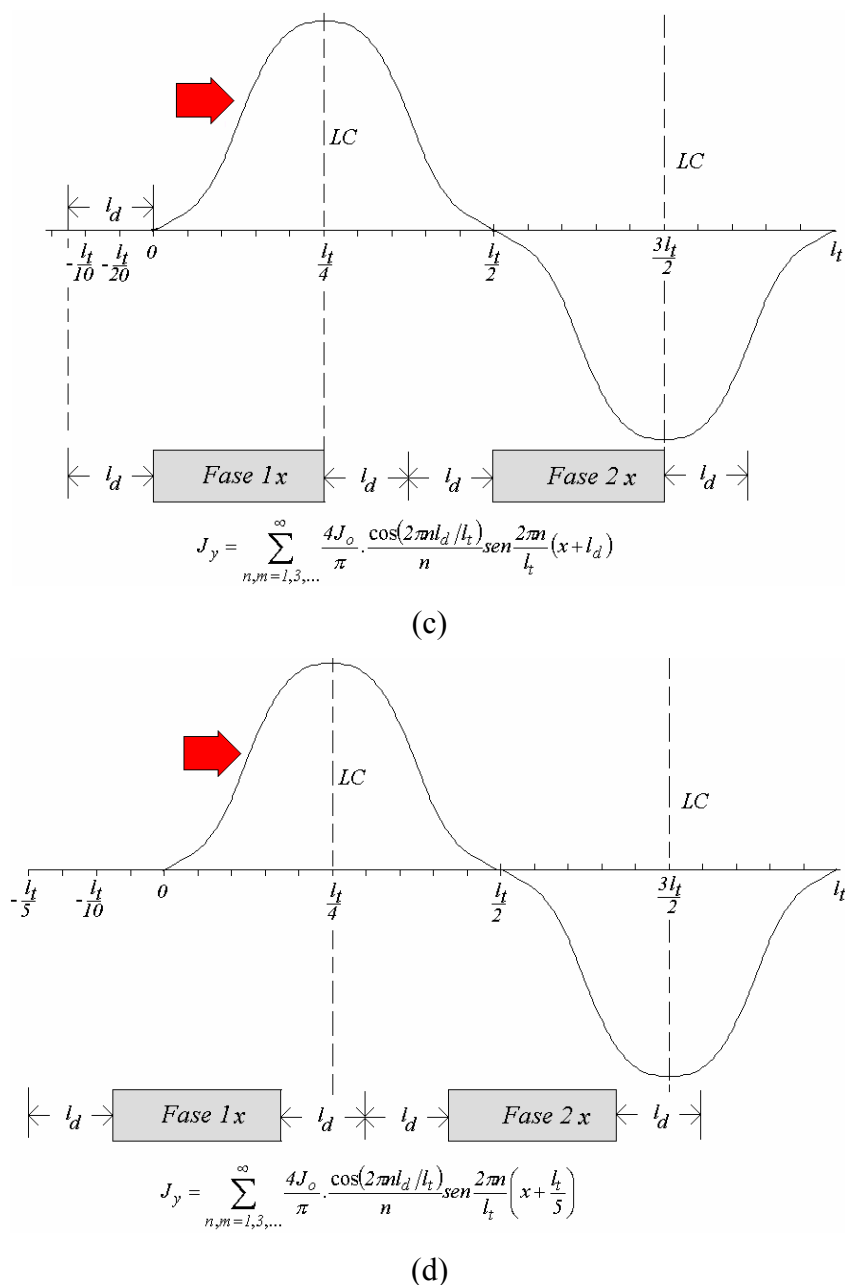


Figura 4. 28 - (a) Posição relativa de duas fases  $x$  do enrolamento da armadura em relação à distribuição do fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes: (a) o carro está posicionado de forma que as duas fases estão localizadas exatamente sob os ímãs permanentes, em (b) o carro deslocou-se de 5 mm, em (c), de 12,5 mm e em (d) de 20 mm.

Em todas as quatro figuras anteriores, o valor de pico da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético permanece constante e é dependente do valor da coordenada  $z$ . A mudança de posição do carro em relação às fases consideradas não afeta a distribuição do fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes, pois não há variação do entreferro.

Quando o carro estiver deslocado com relação às fases do enrolamento  $x$ , que estão com corrente, a componente  $y$  do vetor densidade de corrente pode ser representada por:

$$J_y = \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4J_o}{\pi} \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t)}{n} \text{sen} \left( \frac{2\pi n}{l_t} (x \pm \Delta_x) \right) \quad (4.119)$$

E, quando o carro estiver deslocado com relação às fases do enrolamento  $y$ , que estão com corrente, a componente  $x$  do vetor densidade de corrente pode ser representada por:

$$J_x = \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4J_o}{\pi} \cdot \frac{\cos(2\pi m l_d / l_t)}{m} \text{sen} \left( \frac{2\pi m}{l_t} (y \pm \Delta_y) \right) \quad (4.120)$$

onde  $\Delta_x$  e  $\Delta_y$  correspondem ao deslocamento do carro em relação às fases excitadas com corrente do enrolamento  $x$  e do enrolamento  $y$ , respectivamente. Por exemplo, a força planar de propulsão que atua sobre um ímã permanente, considerando um deslocamento  $\Delta_x$  do carro, será calculada por:

$$\begin{aligned} \bar{F}_N = \mu_o \frac{32 M_o J_o}{\pi^3} \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{nm} \\ \left[ \left( -\frac{\cos(2\pi n l_d / l_t)}{n} \int_0^{l_g} \int_0^{\frac{l_t}{2}} \int_0^{\frac{l_t}{2}} \text{sen} \left( \frac{2\pi n}{l_t} (x \pm \Delta_x) \right) \text{sen} \left( \frac{2\pi n}{l_t} x \right) \right. \right. \\ \left. \left. \text{sen} \left( \frac{2\pi m}{l_t} y \right) (e^{\gamma z} + e^{-\gamma z}) \bar{i} dx dy dz \right) \right. \\ \left. + \left( \frac{\cos(2\pi m l_d / l_t)}{m} \int_0^{l_g} \int_0^{\frac{l_t}{2}} \int_0^{\frac{l_t}{2}} \text{sen} \left( \frac{2\pi n}{l_t} x \right) \text{sen}^2 \left( \frac{2\pi m}{l_t} y \right) (e^{\gamma z} + e^{-\gamma z}) \bar{j} dx dy dz \right) \right] \quad (4.121) \end{aligned}$$

Efetuada a integração, obtém-se:

$$\begin{aligned} \bar{F}_N = \mu_o 8 l_t^3 M_o J_o \sum_{n,m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\text{senh}(\gamma l_g)}{\pi^5 n^2 m^2 \sqrt{n^2 + m^2}} \frac{(e^{\gamma l_g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \\ \cdot \cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t) \left( \cos(2\pi n l_d / l_t) \cos \left( \frac{2\pi n}{l_t} \Delta_x \right) \bar{i} - \cos(2\pi m l_d / l_t) \bar{j} \right) \quad (4.122) \end{aligned}$$

Os gráficos da componente  $x$  da força planar total calculados em função da corrente nas duas fases consideradas e do deslocamento do carro, são mostrados na figura 4.29(a), (b) e (c), todos para o caso 1.

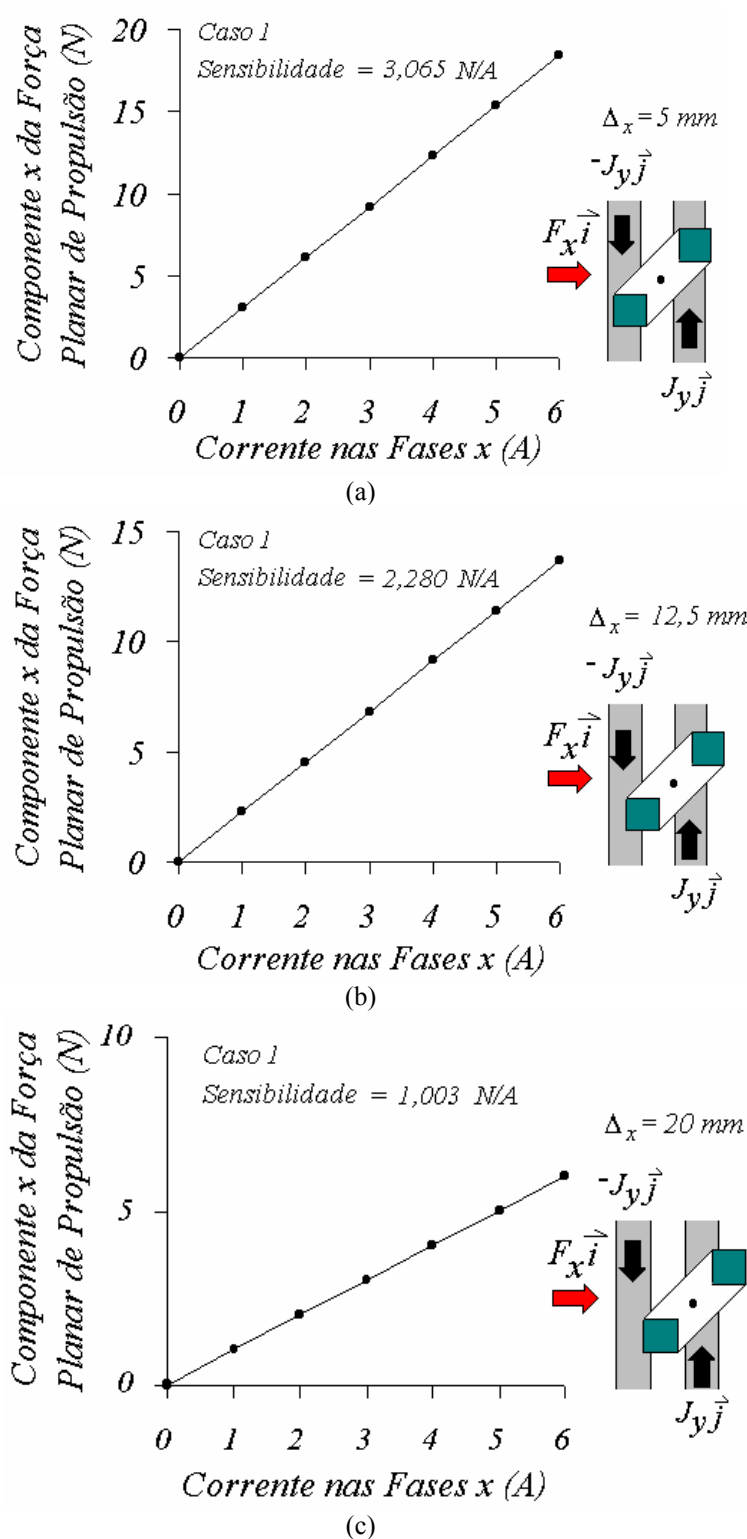


Figura 4. 29 - Gráficos da componente  $x$  da força planar total calculados em função da corrente nas duas fases consideradas e do deslocamento do carro, todos para o caso 1.

Os gráficos da figura 4.30 apresentam o comportamento da componente  $x$  da força planar total em função do deslocamento do carro a partir da origem, para os casos 1 e 2, para 3 A e 6 A.

### 4.3.2 A Força Normal

Na seção 2.3.3 deste trabalho, na análise do princípio de funcionamento do atuador planar, está descrito que uma força normal está presente e é resultado da atração entre os ímãs permanentes do carro e o núcleo da armadura. Esta força tende a produzir um efeito de frenagem sobre o carro, e pode ser deduzida a partir do método que envolve o cálculo da energia armazenada em um determinado meio, conhecido por trabalho virtual [23]. No entanto, para o modelo analítico desenvolvido, a aplicação desse método mostra-se bastante complexa. O método do Tensor de Força de Maxwell mostra-se mais simples porque, para o cálculo das forças envolvidas, é necessário apenas conhecer o campo nas superfícies, enquanto que no método do trabalho virtual deve-se conhecer o campo através do volume que as superfícies delimitam.

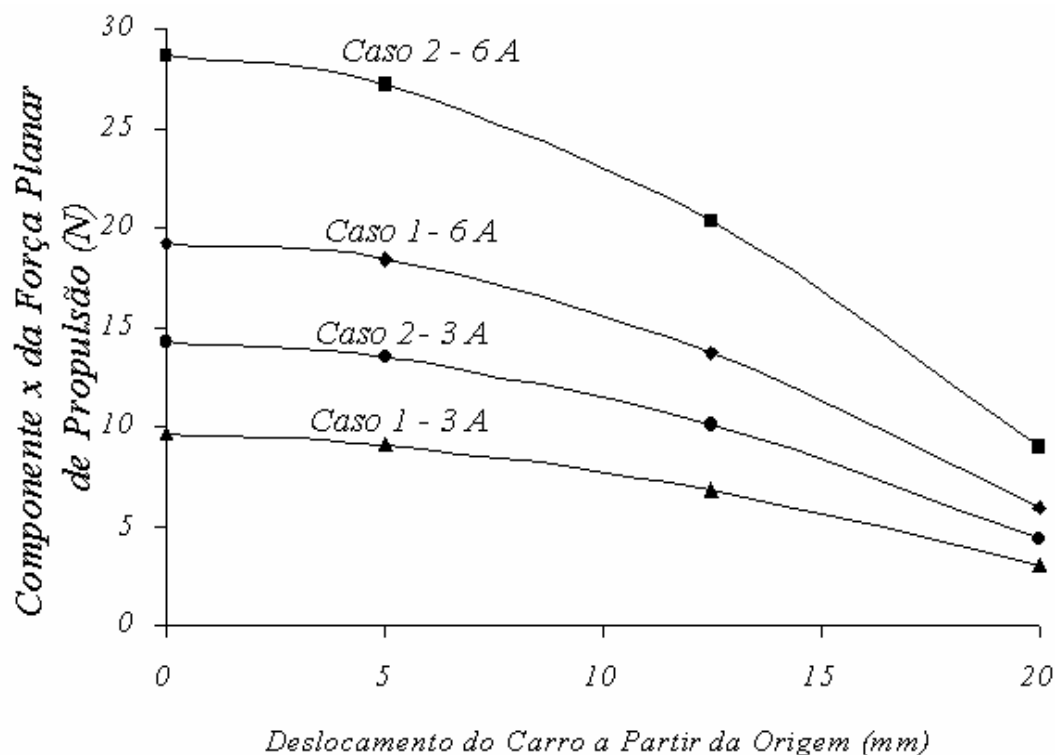


Figura 4.30 – Gráficos da componente  $x$  da força planar total em função do deslocamento do carro a partir da origem, para os casos 1 e 2, para 3 A e 6 A.



A tensão é definida como a força atuando sobre uma área unitária [19]. A força calculada está relacionada ao Tensor de Força de Maxwell através da seguinte expressão [31]:

$$\vec{F} = \frac{1}{\mu_V} \int \text{div} \vec{T} dV \quad (4.123)$$

O tensor  $\vec{T}$  é conhecido como o Tensor de Força de Maxwell, definido pela matriz abaixo:

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} B_x^2 - \frac{1}{2}|B|^2 & B_x B_y & B_x B_z \\ B_y B_x & B_y^2 - \frac{1}{2}|B|^2 & B_y B_z \\ B_z B_x & B_z B_y & B_z^2 - \frac{1}{2}|B|^2 \end{bmatrix} \quad (4.124)$$

em que cada termo do Tensor é dado em  $\text{Nm}^{-2}$ , ou seja, tem a dimensão de força por unidade de área [19]. Aplicando o Teorema da Divergência à equação (4.123), tem-se:

$$\vec{F} = \frac{1}{\mu_S} \oint \vec{T} dS \quad (4.125)$$

onde  $dS$  é um elemento diferencial da superfície  $S$  que envolve inteiramente o corpo sobre o qual as forças estão atuando. Na matriz apresentada na equação (4.124),  $B_x$  representa a componente  $x$  do vetor densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$ ,  $B_y$ , a componente  $y$  e  $B_z$ , a componente  $z$  do mesmo vetor. O diferencial de força que atua na direção  $z$ ,  $dF_z$ , é calculado por:

$$dF_z = \frac{1}{\mu} (T_{zx} dydz + T_{zy} dzdx + T_{zz} dxdy) \quad (4.126)$$

onde  $T_{zx}$  é igual a  $B_z B_x$ ,  $T_{zy}$  a  $B_z B_y$  e  $T_{zz}$  é igual a  $B_z^2 - \frac{1}{2}|B|^2$ . Através da equação anterior pode ser obtida uma expressão que descreva o comportamento da força normal que age como uma força de atração entre o núcleo da armadura e os ímãs permanentes. Para isso, é definida uma superfície de integração que envolve inteiramente o carro, como uma caixa fechada [27]. A superfície inferior da caixa corresponde à área da fronteira  $G$ , onde estão localizadas as superfícies polares dos ímãs permanentes. A superfície superior está localizada

em  $z = +\infty$ , onde o campo magnético é igual a zero. As forças que atuam nas paredes laterais da caixa cancelam-se entre si. Desta forma, os resultados de força obtidos pela integração dos termos  $T_{zx} dydz$  e  $T_{zy} dzdx$  cancelam-se entre si e a força normal será resultado da integração do termo  $T_{zz} dx dy$  através de uma superfície localizada na fronteira  $G$  sob os ímãs permanentes. Como o fluxo magnético no entreferro tem uma distribuição simétrica, a equação da força normal foi obtida considerando apenas os efeitos de um ímã permanente. A força normal pode ser obtida calculando-se a força que age sobre uma superfície situada na fronteira  $G$  (onde  $z = l_g$ ), posicionada sob um ímã permanente [27] [28], através da seguinte equação:

$$F_z = \frac{l}{\mu_o} \iint T_{zz} dx dy \quad (4.127)$$

A figura 4.31 mostra a localização da superfície utilizada para o cálculo da força normal. A figura 4.31(a) mostra a vista frontal do modelo e a figura 4.31(b), a vista superior. Assim, a força normal que age sobre um ímã permanente é calculada por:

$$\begin{aligned} F_z &= \frac{l}{\mu_o} \iint \left( B_z^2 - \frac{l}{2} |B|^2 \right) dx dy \\ &= \frac{l}{\mu_o} \int_0^{l_t} \int_0^{l_t} \left\langle B_z^2 - \frac{l}{2} \left( \sqrt{(B_z^2 + B_x^2 + B_y^2)} \right)^2 \right\rangle_{xy} dx dy \\ &= \frac{l}{2\mu_o} \int_0^{l_t} \int_0^{l_t} \left\langle (B_z^2 - B_x^2 - B_y^2) \right\rangle_{xy} dx dy \end{aligned} \quad (4.128)$$

onde o símbolo  $\langle \rangle_{xy}$  indica operação da média espacial sobre  $x$  e  $y$  [27]. Para o cálculo da integral anterior, é necessário determinar as componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total na fronteira  $G$ , resultante da ação combinada do campo produzido pelos ímãs permanentes e do campo produzido pelas correntes nos condutores do enrolamento da armadura. As componentes  $x$  e  $y$  do vetor densidade de fluxo magnético total da equação (4.128), respectivamente  $B_x$  e  $B_y$ , são iguais a  $B_{T_x}^{BG}$  e  $B_{T_y}^{BG}$ , que correspondem às componentes  $x$  e  $y$  do vetor densidade de fluxo magnético total na região do espaço do entreferro, delimitada pelas fronteiras  $B$  e  $G$ . Elas são calculada respectivamente por:

$$B_{T_x}^{BG} = B_{g_x} + B_{gb_x} = B_{g_x}(x, y, z) + B_{gy_x}(x, z) \quad (4.129)$$

e

$$B_{T_y}^{BG} = B_{g_y} + B_{gb_y} = B_{g_y}(x, y, z) + B_{gx_y}(y, z) \quad (4.130)$$

A componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total,  $B_z$ , da equação (4.128) é igual a  $B_{T_z}^{BG}$ , que corresponde à componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total na região do entreferro, delimitada pelas fronteiras  $B$  e  $G$ . Ela é calculada por:

$$B_{T_z}^{BG} = B_{g_z} + B_{gb_z} = B_{g_z}(x, y, z) + B_{gy_z}(x, z) + B_{gx_z}(y, z) \quad (4.131)$$

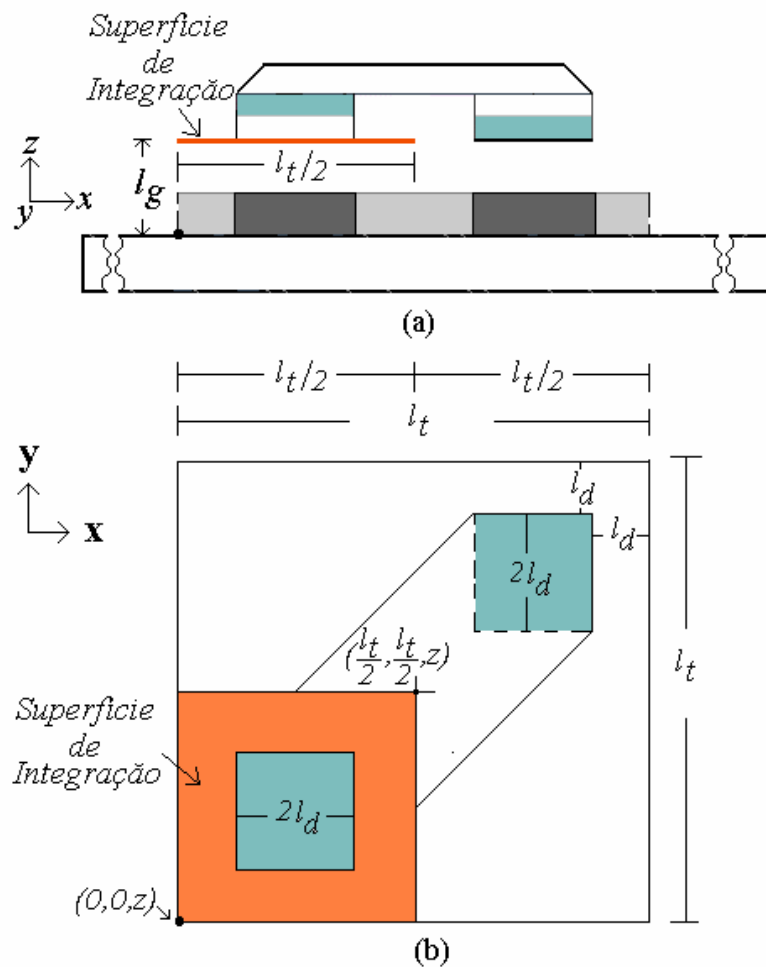


Figura 4. 31 – Localização da superfície de integração utilizada para o cálculo da força normal: (a) vista frontal e (b) vista superior.

As equações (4.43), (4.44) e (4.45) definem  $B_{gx}$ ,  $B_{gy}$  e  $B_{gz}$ , respectivamente as componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético entre as fronteiras  $O$  e  $G$  produzidas pelos ímãs permanentes. As equações (4.107), (4.108) e (4.109) definem  $B_{gb_x}$ ,  $B_{gb_y}$  e  $B_{gb_z}$ , respectivamente as componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético entre as fronteiras  $B$  e  $G$  produzidas pelas correntes nos enrolamentos da armadura. Na fronteira  $G$  o valor de  $z$  é igual a  $l_g$ . Assim, após algumas operações, a componente  $x$  do vetor densidade de fluxo magnético total na fronteira  $G$  é calculada por:

$$B_{Tx}^{BG} = \mu_o \sum_{n,m=1,3,..}^{\infty} \left\{ \left[ \frac{16M_o}{\pi l_t} (e^{\lambda g} - e^{-\lambda g}) \frac{(e^{\lambda g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{\gamma m} \cos\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \right] \right. \\ \left. + \left[ \frac{J_o l_t^2}{2(\pi m)^3} \cos(2\pi n l_d / l_t) \frac{(e^{\lambda b} - e^{-\lambda b})}{(e^{2\lambda(l_m+l_g)} - 1)} \lambda \left( e^{\lambda(2(l_m+l_g)-z)} - e^{\lambda z} \right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} x\right) \right] \right\} \quad (4.132)$$

A componente  $y$  do vetor densidade de fluxo magnético é calculada pela equação (4.133):

$$B_{Ty}^{BG} = \mu_o \sum_{n,m=1,3,..}^{\infty} \left\{ \left[ \frac{16M_o}{\pi l_t} (e^{\lambda g} - e^{-\lambda g}) \frac{(e^{\lambda g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \cdot \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{\gamma m} \text{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \cos\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \right] \right. \\ \left. + \left[ \frac{J_o l_t^2}{2(\pi m)^3} \cos(2\pi n l_d / l_t) \frac{(e^{\delta b} - e^{-\delta b})}{(e^{2\delta(l_m+l_g)} - 1)} \delta \left( e^{\delta(2(l_m+l_g)-z)} - e^{\delta z} \right) \text{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \right] \right\} \quad (4.133)$$

E, finalmente, a componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético é definida por:

$$\begin{aligned}
B_{T_z}^{BG} = \mu_o \sum_{n,m=1,3,..}^{\infty} & \left\{ \frac{8M_o}{\pi^2} (e^{\lambda g} + e^{-\lambda g}) \frac{(e^{\lambda g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \right. \\
& \cdot \left. \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t)}{nm} \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \right\} \\
& + \frac{J_o l_t}{\pi^2} \left\{ \left[ \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t)}{n^2} \frac{(e^{\lambda b} - e^{-\lambda b})}{(e^{2\lambda(l_m+l_g)} - 1)} \left( e^{\lambda z} + e^{\lambda(2(l_m+l_g)-z)} \right) \cos\left(\frac{2\pi n}{l_t} x\right) \right] \right. \\
& \left. + \left[ \frac{\cos(2\pi m l_d / l_t)}{m^2} \frac{(e^{\delta b} - e^{-\delta b})}{(e^{2\delta(l_m+l_g)} - 1)} \left( e^{\delta z} + e^{\delta(2(l_m+l_g)-z)} \right) \cos\left(\frac{2\pi m}{l_t} y\right) \right] \right\} \quad (4.134)
\end{aligned}$$

Substituindo-se as equações (4.132), (4.133) e (4.134) na equação (4.128), após efetuar-se as operações indicadas, obtém-se a fórmula para o cálculo da força normal que atua sobre um ímã permanente do atuador planar. Para a obtenção da força total que atua sobre o carro,  $F_{A_z}$ , a expressão resultante da força normal sobre um ímã permanente foi multiplicada por dois. A força normal total é definida por:

$$\begin{aligned}
F_{A_z} = \sum_{n,m=1,3,..}^{\infty} & \left\{ \left[ \left( l_t^2 M_o \frac{(e^{\lambda g} - e^{\gamma(2l_m+l_g)})}{(e^{2\gamma(l_m+l_g)} - 1)} \cos(2\pi n l_d / l_t) \cos(2\pi m l_d / l_t) \right)^2 \right. \right. \\
& \left. \left( - \left( \frac{1}{2\pi^2 n m} (e^{\lambda g} + e^{-\lambda g}) \right)^2 + \left( \left( \frac{1}{\pi l_t \gamma} (e^{\lambda g} - e^{-\lambda g}) \right) \left( \frac{1}{n^2} + \frac{1}{m^2} \right) \right) \right) \right] \right\} \\
& + \left[ \left( \frac{J_o l_t^2}{4\pi^2} \right)^2 \left[ \left[ \left( \frac{\cos(2\pi n l_d / l_t)}{n^2} \cdot \frac{(e^{\lambda b} - e^{-\lambda b})}{(e^{2\lambda l_t} - 1)} \right)^2 \left( - \left( e^{\lambda g} + e^{\lambda(2l_t-l_g)} \right)^2 + \right. \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left. \left( e^{\lambda g} - e^{\lambda(2l_t-l_g)} \right)^2 \right) \right] + \left[ \left( \frac{\cos(2\pi m l_d / l_t)}{m^2} \cdot \frac{(e^{\delta b} - e^{-\delta b})}{(e^{2\delta l_t} - 1)} \right)^2 \right. \right. \\
& \left. \left. \cdot \left( - \left( e^{\delta g} + e^{\delta(2l_t-l_g)} \right)^2 + \left( e^{\delta g} - e^{\delta(2l_t-l_g)} \right)^2 \right) \right] \right] \right\} \quad (4.135)
\end{aligned}$$

A figura 4.32(a) apresenta o gráfico da força normal em função da corrente aplicada às fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes para o caso 1. A figura 4.32(b) apresenta o mesmo gráfico para o caso 2.

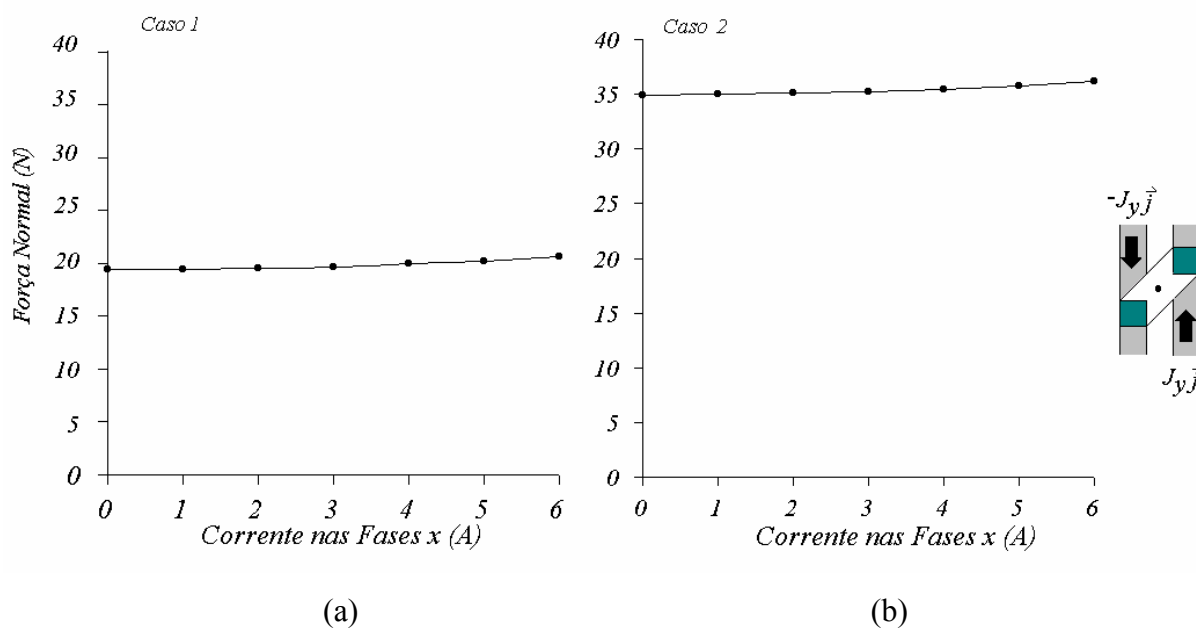


Figura 4. 32 – Gráficos da força normal que atua sobre o carro do atuador planar em função da corrente nas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes: (a) para o caso 1 e (b) para o caso 2.

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO ESTUDADO

Neste capítulo foi apresentado o método analítico desenvolvido com o objetivo de prever o comportamento estático do atuador planar com relação à distribuição de fluxo magnético no entreferro e com relação às forças desenvolvidas sobre o carro.

As equações dos potenciais magnéticos permitem calcular os valores das componentes do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro em qualquer ponto da região do entreferro delimitada pelo modelo, com corrente e sem corrente nos condutores das fases dos enrolamentos  $x$  e  $y$ .

A força mecânica planar de origem eletromagnética que atua sobre o carro depende da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético estabelecida pelos ímãs permanentes e das correntes nas fases dos enrolamentos da armadura. Assim, através da equação da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, foi possível

prever o comportamento da força de propulsão planar como função da densidade de corrente nos enrolamentos da armadura.

A equação da força normal foi obtida a partir da expressão do Tensor de Força de Maxwell. No cálculo da força normal, foram levados em conta os efeitos dos campos produzidos pelos ímãs permanentes e pelas correntes nos enrolamentos da armadura. Assim, foram empregadas as equações das componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético total no entreferro para a determinação da força normal existente entre o carro e o núcleo da armadura.

## 5 ANÁLISE NUMÉRICA DO ATUADOR PLANAR PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A análise numérica de dispositivos eletromagnéticos constitui-se em uma ferramenta poderosa, pois permite que seja previsto, com boa margem de segurança, o comportamento de campos eletromagnéticos e das forças relacionadas com esses campos. A técnica de análise numérica envolve a utilização de pacotes computacionais, através dos quais uma grande quantidade de informações pode ser armazenada e processada em altas velocidades. O Método dos Elementos Finitos vem sendo utilizado nos principais pacotes computacionais para análise numérica. Ele foi desenvolvido na década de cinquenta, para solucionar problemas de Engenharia Mecânica [25].

### 5.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

A análise numérica eletromagnética de um modelo virtual requer um conhecimento das propriedades físicas dos materiais utilizados no modelo real, como suas curvas de magnetização, condutividade elétrica, permeabilidade magnética relativa, condutividade térmica e capacidade térmica, estas duas últimas utilizadas para análise de campos térmicos acoplados a campos magnéticos.

O princípio do Método dos Elementos Finitos consiste da divisão do domínio em estudo em pequenos subdomínios, denominados de elementos finitos [32]. Se existir um campo magnético em determinada região onde não estão definidos ímãs permanentes, nem correntes elétricas, as condições de fronteira, através das quais são impostas diferenças de potenciais magnéticos, representam a fonte desse campo. Se a malha que caracteriza a região é tridimensional, então cada elemento finito que a constitui é também tridimensional. Na figura 5.1 é mostrado um elemento tridimensional. Se a formulação utilizada pelo pacote computacional é a do potencial escalar magnético, então a equação de Laplace, em coordenadas retangulares, assume a seguinte forma:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0 \quad (5.1)$$



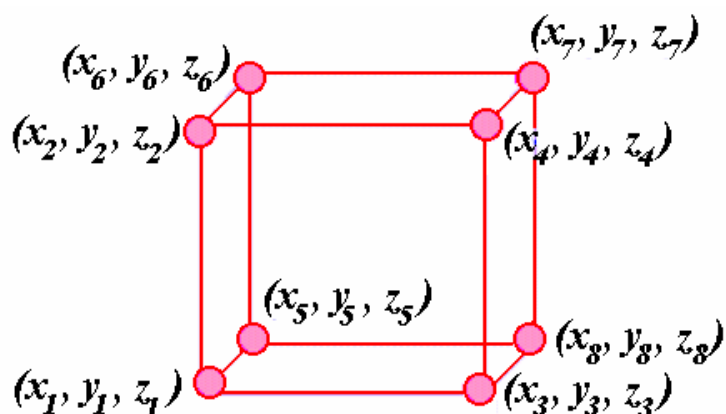


Figura 5.1 - Elemento finito tridimensional.

Se o elemento finito é considerado linear, então o potencial escalar magnético  $\psi$  varia linearmente de acordo com a equação:

$$\psi(x, y, z) = ax + by + cz + k \quad (5.2)$$

onde  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $k$  são constantes. As coordenadas de cada nó correspondem ao ponto  $(x_i, y_i, z_i)$  e o potencial correspondente a esse nó é calculado pela seguinte equação:

$$\psi(x_i, y_i, z_i) = ax_i + by_i + cz_i + k \quad (5.3)$$

Através do Método dos Elementos Finitos serão determinadas as constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $k$  de todos os elementos finitos através das equações (5.3) e (5.1), das condições de fronteira e das características elétricas, magnéticas e geométricas do modelo [12]. Assim, através da obtenção da equação de cada nó, será possível determinar, por exemplo, os valores das componentes do vetor de densidade de fluxo magnético em cada nó.

O emprego de técnicas de análise numérica através do Método dos Elementos Finitos envolve, normalmente, as três etapas apresentadas na figura 5.2 [12] [29]. Na etapa de pré-processamento é definido o modelo para a análise. Como condições iniciais, deve-se ter um conhecimento aproximado da forma da distribuição dos campos eletromagnéticos através do dispositivo. Uma vez definido o tipo de análise em termos de dimensão, a próxima etapa corresponde à construção da malha que representa o dispositivo em estudo.

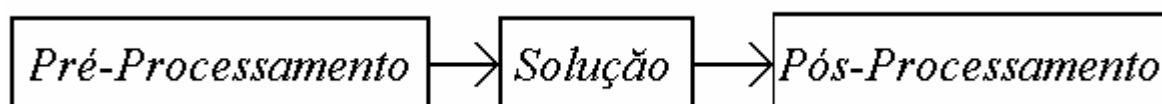


Figura 5.2 – Etapas envolvidas na técnica de análise numérica pelo MEF [12] [29].

Um modelo será então gerado a partir de nós e elementos, que formarão uma malha. Um elemento resulta da união de nós. Uma malha é composta por todos os elementos do modelo, ou seja, por todos os elementos finitos. Em modelos onde haja mais de uma região, a interface entre dois materiais deve coincidir com a fronteira dos elementos. Por fim, são definidas as fontes de excitação do campo e as condições de fronteira [29]. Praticamente todos os pacotes computacionais para análise numérica de dispositivos eletromagnéticos representam fisicamente problemas magnéticos e eletromagnéticos em termos de potenciais elétricos ou magnéticos. Regiões não condutoras de corrente podem ser modeladas através do emprego do potencial escalar magnético. Em regiões condutoras de corrente, será empregado o potencial vetor magnético ou o potencial escalar reduzido. A escolha prende-se ao tipo de análise a ser realizada e às características do pacote empregado.

Na etapa de solução é utilizado um pacote computacional denominado de processador ou *solver*. *Solvers* são programas que resolvem o sistema de equações criado quando o modelo é definido. O produto de um *solver* é um conjunto de potenciais descrevendo o comportamento do campo eletromagnético no modelo inteiro [25].

O pós-processamento fornece uma série de ferramentas para a análise da solução produzida pelo *solver*, tais como manipulação matemática para tratamento dos dados e ferramentas gráficas para a visualização dos resultados, seja através do mapeamento das grandezas empregando cores e/ou linhas, ou através de gráficos.

## 5.2 ANÁLISE NUMÉRICA DO ATUADOR PLANAR

O atuador planar foi analisado numericamente através do Método dos Elementos Finitos, utilizando o pacote computacional MEGA 3D, versão 6.29, desenvolvido pelo Applied Electromagnetic Research Centre da Universidade de Bath, Inglaterra.

### 5.2.1 Pacote Computacional MEGA 3D

O pacote computacional MEGA consiste de dois programas: MEGAVIEW é o pré e o pós-processador: ele fornece ao usuário um ambiente para definir e editar modelos e para ler e analisar a solução para esses modelos, gerada através do *solver*. O MEGASOLVER é o *solver*. O MEGASOLVER resolverá o sistema de equações criado pelo MEGAVIEW para o modelo em estudo. O MEGA permite a análise de dispositivos eletromagnéticos em duas ou três dimensões (2D e 3D). Em análises 3D, as regiões não condutoras de corrente são modeladas através do potencial escalar magnético,  $\psi$  e a equação empregada para a solução do potencial nessas regiões é a (5.1). Ímãs permanentes são tratados como uma distribuição de momento magnético  $M$ . A densidade de fluxo magnético é, desta forma, definida por [70]:

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (5.4)$$

alternativamente, em termos da densidade de fluxo remanente  $\vec{B}_r$ :

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} + \vec{B}_r \quad (5.5)$$

Aplicando a equação anterior à equação de Poisson para ímãs permanentes, obtém-se:

$$\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r \nabla \psi) = \nabla \cdot \vec{B}_r \quad (5.6)$$

Em problemas 3D há dois tipos de fontes de corrente: bobinas sem correntes parasitas e condutores com efeito pelicular (*skin affect*). No primeiro caso, a distribuição de corrente é uniforme através da seção do condutor e não existem correntes parasitas. A corrente é representada por um parâmetro simples. A bobina não é criada a partir de uma malha de elementos finitos, ela é gerada a partir de uma biblioteca que contém fragmentos de bobinas. Através das coordenadas fornecidas ao editor, a bobina é inserida na malha de elementos finitos do modelo. Como etapa final, uma região de potencial escalar magnético reduzido é criada no espaço da malha ocupada pela bobina. No processo de solução através do potencial escalar magnético reduzido, o campo magnético total, na região onde foram definidas correntes, é resultante da soma entre o campo magnético produzido pela distribuição de corrente conhecida e o campo desconhecido. Assim, o vetor intensidade de campo magnético  $\vec{H}$  pode ser dividido em duas partes, o vetor intensidade campo magnético gerado pelas correntes conhecidas  $\vec{H}_s$  e outro,  $\vec{H}_{mg}$  produzido pelo magnetismo induzido nos materiais ferromagnéticos [61]. Assim,

$$\vec{H} = \vec{H}_{mg} + \vec{H}_s \quad (5.7)$$

Uma vez que não estão sendo considerados os efeitos de correntes parasitas nos materiais ferromagnéticos,  $\nabla \times \vec{H}_{mg} = 0$ , e  $\vec{H}_{mg}$  é gerado a partir do gradiente negativo de um potencial escalar  $\phi_r$ , denominado de potencial escalar reduzido. Assim, a equação (5.7) transforma-se em:

$$\vec{H} = -\nabla \phi_r + \vec{H}_s \quad (5.8)$$

e o vetor intensidade de campo magnético produzido pelas correntes conhecidas na região de volume  $V$ , onde foi definida uma densidade de corrente  $\vec{J}_s$ , é calculado pela lei de Biot-Savart, definida por:

$$\vec{H}_s = \frac{1}{4\pi} \iiint \frac{\vec{J}_s \times \vec{r}}{r^2} dV \quad (5.9)$$

onde  $\vec{r}$  é o vetor unitário na direção do raio, e  $r$  é o raio vetor de um elemento de volume  $dV$  com densidade de corrente  $\vec{J}_s$  até o ponto  $P$ , onde há um campo magnético produzido pela ação de  $\vec{J}_s$ . A figura 5.3 apresenta um condutor com uma densidade de corrente  $\vec{J}_s$  e a posição do ponto  $P$  em relação a um elemento de volume  $dV$ .

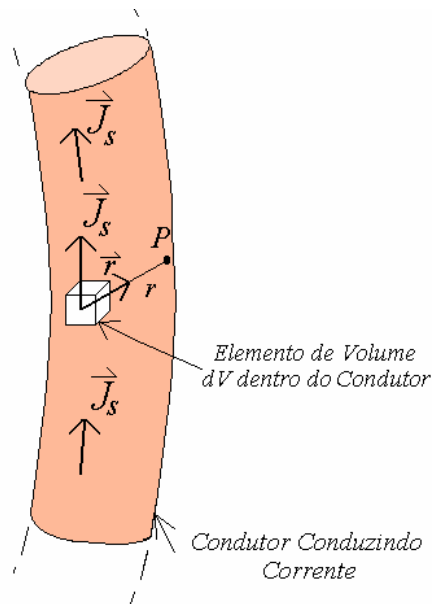


Figura 5.3 – Condutor com uma densidade de corrente  $\vec{J}_s$  e a posição do ponto  $P$  em relação a um elemento de volume  $dV$  do mesmo condutor[19].

Em termos da densidade de fluxo magnético,  $\vec{B}$ , a equação (5.8) transforma-se em:

$$\vec{B} = -\mu\nabla\phi_r + \mu\vec{H}_s \quad (5.10)$$

Aplicando o teorema da divergência à equação anterior, obtém-se:

$$\nabla \cdot (\mu\nabla\phi_r) = \nabla \cdot \mu\vec{H}_s \quad (5.11)$$

A equação (5.11) é uma forma da equação de Poisson. Em materiais que possuam valores de permeabilidade magnética muito elevada, as duas partes do campo  $\vec{H}$  tendem a ser iguais em módulo, porém com sentidos opostos. Assim, a aplicação do potencial escalar reduzido está limitada às regiões em que a permeabilidade magnética é igual à do ar e a condutividade do material é nula [61].

No segundo caso, quando está presente o efeito pelicular, a distribuição das correntes é desconhecida antes da solução do problema. O condutor é criado a partir da malha de elementos finitos do modelo em estudo, e uma condutividade é definida na região ocupada pelos elementos que compõe este condutor.

No pacote MEGA 3D uma malha 3D pode ser criada somente pela extrusão de uma malha 2D formada por elementos triangulares e/ou quadrilaterais. Este método de construção requer que a malha 2D contenha a topologia do modelo inteiro. O primeiro passo para a construção da malha 2D é a criação de um superelemento, cujas dimensões podem corresponder às dimensões da malha inteira, ou de parte da malha. Um superelemento retangular é normalmente criado a partir da definição de quatro nós, sendo que cada nó corresponde a um vértice deste superelemento. Dois nós, que correspondem a dois vértices adjacentes, definem uma aresta deste superelemento. Dependendo do grau de discretização desejada, posteriormente é definido um certo número de nós entre cada dois vértices do superelemento.

Uma certa região de um modelo é caracterizada por uma cor, que possui um número identificador (ID). A cada região corresponde um material ao qual estão associadas características, tais como permeabilidade relativa e condutividade elétrica. É

possível, durante a construção da malha, definir as regiões e suas propriedades elétricas e magnéticas. A cor, cujo ID é igual a dois, possui, por definição, permeabilidade relativa igual à unidade. Em 3D, a inserção das regiões normalmente é feita após o processo de criação da malha tridimensional. A malha 2D, denominada de plano base, é extrudada através do eixo  $z$  para gerar a malha 3D. Para isso, é feita a definição do número de níveis que caracterizam o modelo tridimensional. Todos os níveis são idênticos no que diz respeito ao formato da malha, ou seja, cada um deles é uma reprodução do plano base. Uma vez criada a malha 3D, a próxima etapa é inserir as regiões nos elementos que compõem o modelo.

O MEGA pode solucionar problemas em regime permanente, em corrente contínua e em corrente alternada e problemas em regime transitório. Tanto em regime permanente, quanto em regime transitório, o problema pode ser linear ou não linear. No primeiro caso, os materiais do modelo possuem permeabilidade magnética relativa constante. No segundo caso, há a presença de pelo menos um material ao qual está associada uma curva de magnetização não linear. Após a definição do problema, são definidas as condições de fronteira e as fontes de campo magnético. No caso de ímãs permanentes em 2D e 3D, e de condutores percorridos por correntes conhecidas em modelos 2D, sua definição é feita durante a caracterização das regiões. A fonte de campo pode também ser um potencial fixado em uma das fronteiras do modelo, ou condutores percorridos por corrente em 3D.

### **5.2.2 Implementação do Modelo do Atuador Planar**

A distribuição de fluxo magnético através do volume do atuador planar é tridimensional e não apresenta simetria que poderia reduzir a análise a um problema bidimensional. Assim, foi feita uma análise tridimensional. Como as forças que agem sobre o carro estão relacionadas com o comportamento da densidade de fluxo no entreferro, os dados numéricos obtidos permitiram prever a performance do atuador planar com relação às forças de propulsão e normal. Também foi possível analisar, através do mapeamento da densidade de fluxo magnético, o grau de saturação do material ferromagnético que compõe a culatra e o núcleo da armadura.

Um dos pontos fundamentais na análise de um modelo pelo MEF está relacionado com o grau de discretização da malha. Uma malha pode reproduzir fielmente um modelo quanto a sua geometria, dimensões e materiais, mas pode fornecer resultados distantes

daqueles que seriam obtidos em medições com um modelo real. Assim, para o estudo numérico do atuador planar, foi desenvolvida uma malha 2D básica. A partir desta malha 2D, foram gerados cinco modelos tridimensionais diferentes, que reproduzem a geometria tridimensional completa do atuador planar. Os modelos diferem entre si apenas pela discretização da malha na região dos ímãs permanentes.

A malha básica ou plano base do atuador planar foi gerada a partir de elementos triangulares e quadrilaterais. A partir desta malha, foram criados cinco modelos tridimensionais. Antes do processo de extrusão que gerou cada modelo, a malha básica foi refinada na região correspondente ao carro, para aumentar sua discretização. A tabela 5.1 apresenta os modelos que foram desenvolvidos para avaliar a sensibilidade das malhas e suas características. Após o processo de geração da malha 3D, as regiões correspondentes aos materiais empregados na construção do atuador planar foram inseridas nos elementos. O núcleo da armadura e a culatra foram definidos como regiões não lineares e, através do editor de regiões do MEGA 3D, foram inseridos os pontos das coordenadas *BH* do aço 1045 que definem sua curva de magnetização. Os ímãs permanentes, considerados idênticos, foram caracterizados por seus valores de permeabilidade relativa e de densidade de fluxo remanente. A densidade de fluxo remanente foi definida como tendo apenas componente em *z*. Nesta etapa da análise, não foram definidas regiões condutoras de corrente, pois o campo magnético produzido pela reação da armadura é pequeno, quando comparado com o campo produzido pelos ímãs permanentes. Desta forma, o campo magnético foi gerado unicamente pelos ímãs permanentes, e em todas as cinco malhas estudadas, as medições de densidade de fluxo magnético foram feitas com corrente nula nas fases do enrolamento da armadura. As condições de fronteira foram definidas considerando todo o fluxo magnético normal a elas.

A figura 5.4 apresenta o detalhe da vista frontal da malha tridimensional M 2, com 4 elementos por nível na região de cada ímã permanente. A linha representada no entreferro corresponde à posição dos pontos medidos de densidade de fluxo magnético no plano *z*, localizados 7,5 mm acima da superfície do núcleo da armadura. Nas outras quatro malhas (M 3 a M6), os valores de densidade de fluxo magnético foram medidos em pontos equivalentes àqueles mostrados na figura 5.4. A tabela 5.2 apresenta os resultados das medições da componente *z* do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro nas cinco malhas estudadas. Os gráficos apresentados na figura 5.5 referem-se às medições da componente *z* do vetor de densidade de fluxo magnético nos pontos mostrados na figura 5.4,

para cada uma das malhas relacionadas na tabela 5.1. Conforme pode ser verificado pela tabela 5.2 e pelos gráficos da figura 5.5, à medida que o número de elementos por nível na região dos ímãs permanentes aumentou, o valor médio da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético na região do entreferro convergiu para 0,146 T.

Tabela 5.1 - Modelos utilizados para avaliar a sensibilidade da malha.

Malha	Nós	Elementos	Elementos por Nível	Níveis	Elementos por Nível na Região de cada Ímã Permanente
M 2	50.450	49.920	2.080	25	4 (2x2)
M 3	110.075	108.384	4.516	25	9 (3x3)
M 4	146.775	144.432	6.018	25	16 (4x4)
M 5	172.725	170.112	7.088	25	25 (5x5)
M 6	182.223	180.908	6.958	27	36 (6x6)

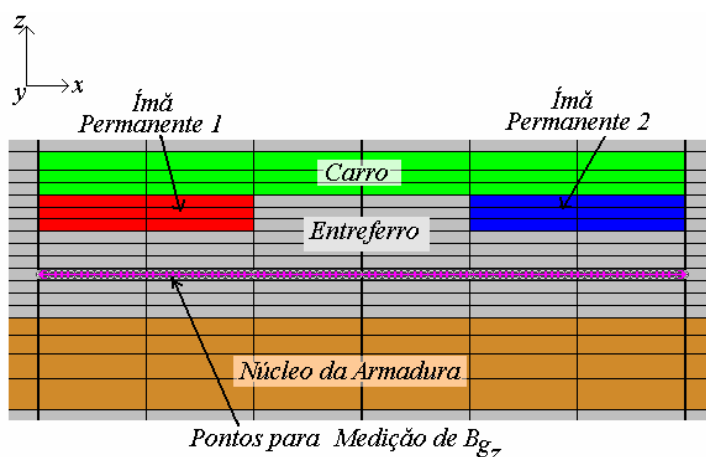


Figura 5.4 - Detalhe da vista frontal da malha M2, com 4 elementos por nível na região dos ímãs permanentes.

Tabela 5.2 - Valores da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético medidos na diagonal sob o carro, para avaliar a sensibilidade da malha.

Malha	Valor Médio de $B_{gz}$ (T)	Valor de Pico de $B_{gz}$ (T)
M 2	0,136	0,318
M 3	0,143	0,269
M 4	0,145	0,2879
M 5	0,146	0,280
M 6	0,146	0,280



Em função dos resultados obtidos pela análise dos modelos listados na tabela 5.2, adotou-se a malha M 5 como padrão para as simulações do atuador planar. Com vistas a garantir uma melhor discretização dos elementos na região do entreferro, foram adicionados mais três níveis nesta região no modelo correspondente à malha M 5. O número de elementos por nível na região de cada ímã permanente foi mantido igual a 25. As características finais do modelo estão listadas na tabela 5.3. Após a escolha da malha 3D, as simulações efetuadas posteriormente tiveram por objetivo caracterizar o comportamento estático do atuador planar em regime permanente. Os resultados permitiram avaliar as características estáticas de funcionamento do atuador planar, com vistas a verificar o comportamento da distribuição da densidade de fluxo magnético através da geometria do atuador planar e das forças envolvidas.

A figura 5.6 mostra a malha 3D do atuador planar, com apenas duas fases do enrolamento  $x$  representadas. Pela figura, pode ser verificado que os elementos que formam a malha possuem dimensões diferentes. Próximo às fontes de campo magnético, na região do carro, a malha possui maior quantidade de elementos, que são menores em relação aos elementos que estão mais afastados do carro. Assim, à medida que um elemento está afastado do carro, ele é maior e a malha torna-se menos densa no que se refere ao número de elementos. Tanto para o caso 1, como para o caso 2, o atuador planar foi analisado numericamente considerando as situações descritas na tabela 5.4. O objetivo foi caracterizar o comportamento estático do atuador planar em os ambos casos.

O modelo tridimensional foi representado com apenas duas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes. Cada fase foi gerada a partir de uma biblioteca que contém fragmentos de bobinas. No momento da edição das bobinas, informou-se o número total de condutores por fase. Através das coordenadas fornecidas ao editor, cada fase foi inserida na malha de elementos finitos. Não foi definida uma condutividade elétrica para os condutores dessas fases. Assim, uma região de potencial escalar magnético reduzido,  $\phi_r$ , foi criada no espaço da malha ocupada pelas duas fases do enrolamento  $x$  da armadura.[38] [39]. Para cada fase foi criada uma porta de corrente. Uma porta está caracterizada por dois terminais. Cada porta foi então conectada a uma fase, que, desta forma, foi excitada com valores de corrente adequados. A tabela 5.4 descreve todas as simulações que foram efetuadas através do pacote MEGA 3D com o objetivo de caracterizar estaticamente o atuador planar. Conforme pode ser verificado, para cada caso, foram

realizadas 17 simulações, totalizando 34 simulações, uma vez que foram dois casos em estudo para cada tipo de análise. As simulações de 8 a 17 tiveram por objetivo calcular o valor da força planar de propulsão desenvolvida, com o carro deslocado de passos fixos em relação às fases do enrolamento da armadura. Desta forma, houve um deslocamento da posição relativa de duas fases do enrolamento da armadura em relação à distribuição do fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes. O processo é similar aquele apresentado no Capítulo 4, e que resultou nos gráficos da figura 4.30. Para esta etapa das simulações, a malha do atuador planar foi dividida em duas malhas: uma é a malha do carro, e a outra, a malha do estator. Cada malha foi criada separadamente a partir da malha 2D que corresponde ao plano base. O primeiro nível da malha do estator corresponde ao plano  $z = 0$ , ou seja, à fronteira inferior do modelo do atuador planar, e o último, coincide com o plano que corresponde à metade do comprimento do entreferro. A malha do carro contém a outra metade do comprimento do

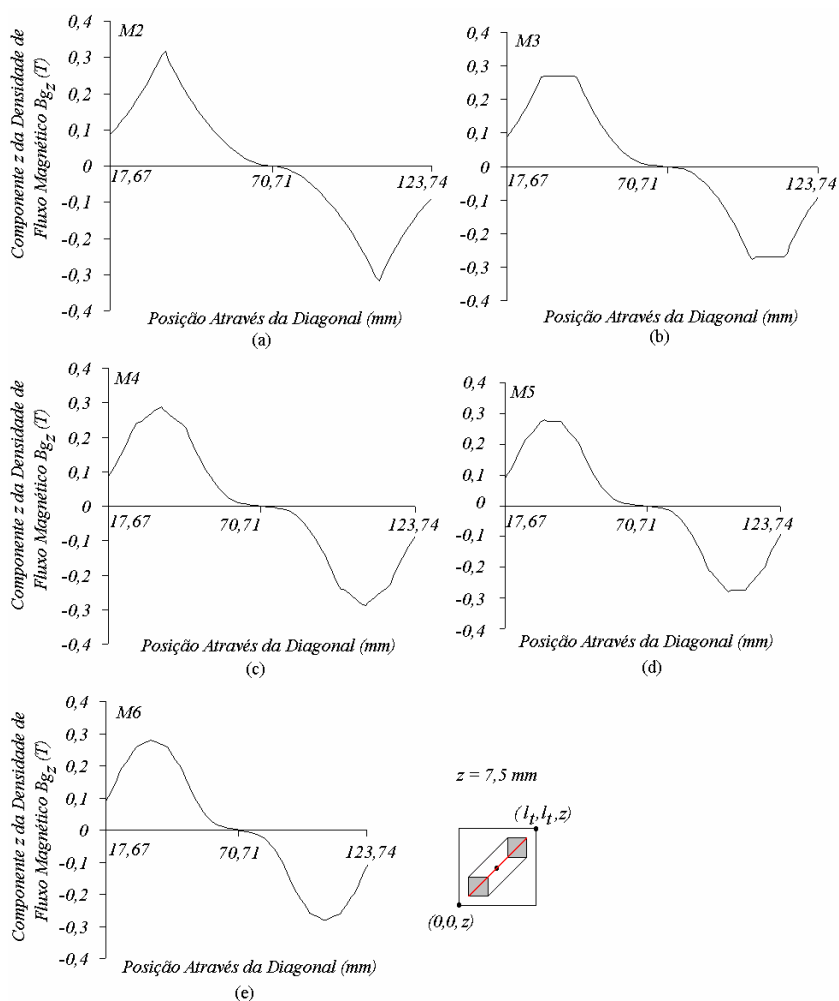


Figura 5.5 - Gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético em função de  $x$ , medidos nos pontos do plano  $z$  localizado 7,5 mm acima da superfície do núcleo da armadura, para as malhas (a) M 2, (b) M 3, (c) M 4, (d) M 5 e (e) M 6.

Tabela 5.3– Características finais do modelo utilizado para as simulações do atuador planar, que correspondem à malha M 5, com três níveis adicionais em relação à malha apresentada na tabela 5.1.

Malha	Nós	Elementos	Elementos por Nível	Níveis	Elementos na Região dos Ímãs Permanentes por Nível
M 5	193.452	191.376	7.088	28	25 (5x5)

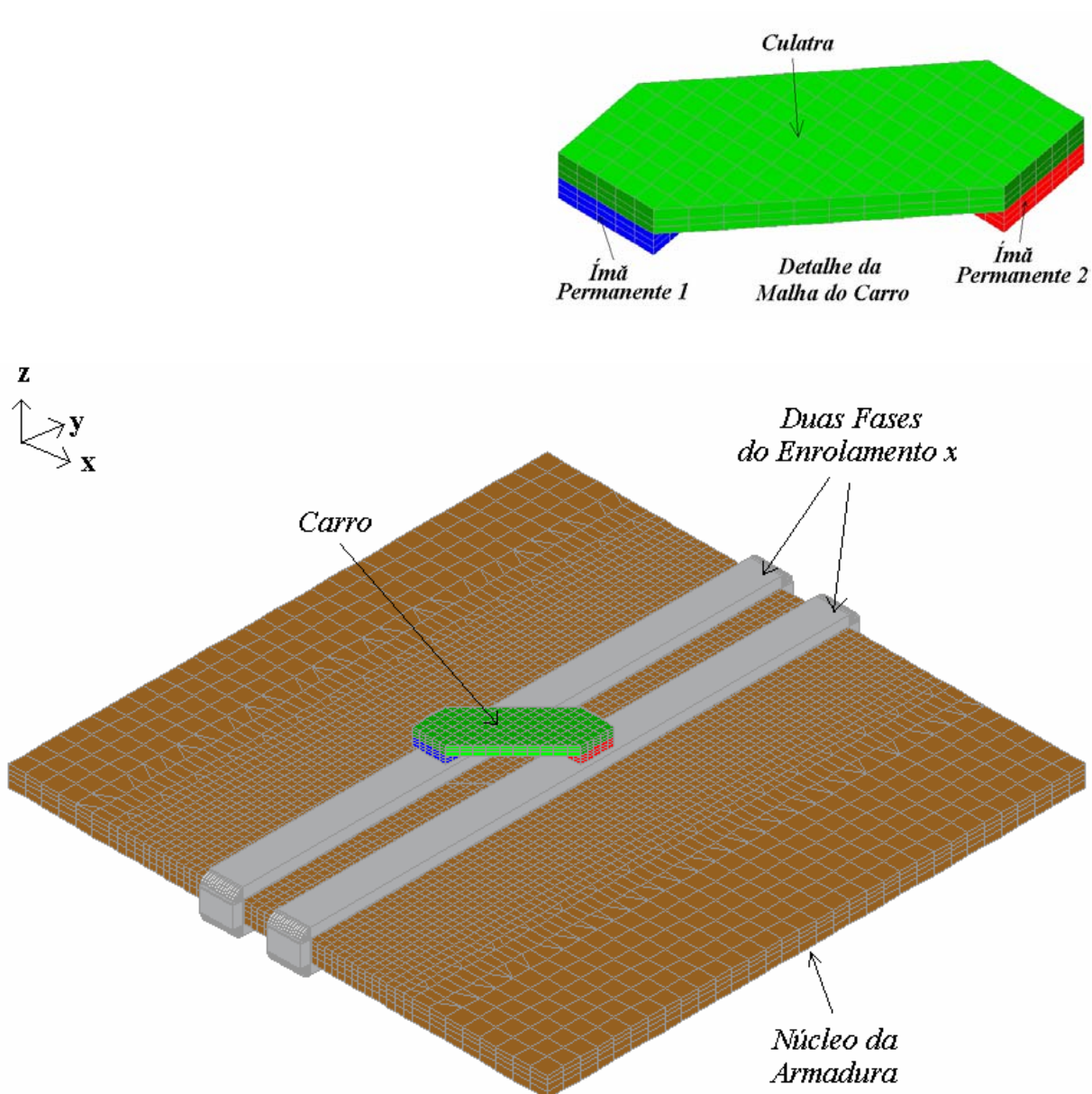


Figura 5.6 - Malha 3D do modelo virtual do atuador planar.

entreferro: seu primeiro nível coincide com o plano que corresponde à metade do comprimento do entreferro e seu último nível corresponde à fronteira superior do modelo do atuador planar. As duas malhas foram combinadas através das superfícies que correspondem à metade do entreferro através de coordenadas prefixadas. Uma superfície de Lagrange une as duas malhas. O MEGA 3D permite que sejam definidos os deslocamentos da malha do carro em relação à malha do estator. Para cada posição, o *solver* fornecerá uma solução.

Tabela 5.4 - Descrição das análises realizadas com o protótipo virtual do atuador planar, tanto para o caso 1, como para o caso 2.

Simulação	Descrição
1	Armadura com corrente $I_a = 0$
2	Armadura com corrente $I_a = 1$ A nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes
3	Armadura com corrente $I_a = 2$ A nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes
4	Armadura com corrente $I_a = 3$ A nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes
5	Armadura com corrente $I_a = 4$ A nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes
6	Armadura com corrente $I_a = 5$ A nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes
7	Armadura com corrente $I_a = 6$ A nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes
8	Armadura com corrente $I_a = 3$ A nas fases do enrolamento $x$ . O carro foi deslocado 5 mm em relação à linha central das fases.
9	Armadura com corrente $I_a = 3$ A nas fases do enrolamento $x$ . O carro foi deslocado 10 mm em relação à linha central das fases.
10	Armadura com corrente $I_a = 3$ A nas fases do enrolamento $x$ . O carro foi deslocado 15 mm em relação à linha central das fases.
11	Armadura com corrente $I_a = 3$ A nas fases do enrolamento $x$ . O carro foi deslocado 20 mm em relação à linha central das fases.
12	Armadura com corrente $I_a = 3$ A nas fases do enrolamento $x$ . O carro foi deslocado 25 mm em relação à linha central das fases.
13	Armadura com corrente $I_a = 6$ A nas fases do enrolamento $x$ . O carro foi deslocado 5 mm em relação à linha central das fases.
14	Armadura com corrente $I_a = 6$ A nas fases do enrolamento $x$ . O carro foi deslocado 10 mm em relação à linha central das fases.
15	Armadura com corrente $I_a = 6$ A nas fases do enrolamento $x$ . O carro foi deslocado 15 mm em relação à linha central das fases.
16	Armadura com corrente $I_a = 6$ A nas fases do enrolamento $x$ . O carro foi deslocado 20 mm em relação à linha central das fases.
17	Armadura com corrente $I_a = 6$ A nas fases do enrolamento $x$ . O carro foi deslocado 25 mm em relação à linha central das fases.

Todos os modelos relacionados na tabela anterior possuem as seguintes características:

- todas as malhas são tridimensionais;
- as regiões não condutoras de corrente foram modeladas através do potencial escalar magnético  $\psi$  ;
- em nenhuma região foi definida uma condutividade elétrica;
- as regiões condutoras de corrente foram modeladas através do potencial escalar reduzido,  $\phi_r$  ;
- as simulações foram feitas em regime permanente;
- a frequência das correntes nas fases do enrolamento da armadura é igual a zero;
- o potencial nas fronteiras do modelo foi definido como sendo nulo;
- o material do núcleo da armadura e da culatra foi definido como sendo não linear;
- todas as análises avaliaram as características estáticas de operação do atuador planar.

### 5.3 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Um dos objetivos da análise numérica estática foi o de verificar o comportamento da distribuição da densidade de fluxo magnético no atuador planar, principalmente na região compreendida entre o carro e o estator. Para cada uma das simulações, foram obtidos os mapeamentos do módulo da densidade de fluxo magnético através da geometria do atuador planar e os valores das forças planar e normal que atuam sobre o carro.

A partir das informações geradas pelas simulações foram elaborados gráficos que relacionam a densidade de fluxo magnético e as forças envolvidas com a corrente nas fases do enrolamento  $x$ . Estes resultados são apresentados a seguir. As simulações de 8 a 17 tiveram por objetivo avaliar o comportamento da força planar de propulsão em função da posição do carro em relação às fases do enrolamento da armadura excitadas por corrente.

No MEGA 3D, os valores do vetor densidade de fluxo magnético são expressos através de suas componentes  $B_x$ ,  $B_y$  e  $B_z$ , ou através de seu módulo calculado pela seguinte equação:

$$B_{mod} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (5.12)$$

Os valores de força podem ser calculados através do MEGA 3D por dois métodos: 1) Tensor de Força de Maxwell e 2) a força de Lorentz. Em função da geometria do modelo do atuador planar e das características das forças envolvidas, foi utilizado o Tensor de Força de Maxwell para o cálculo das forças planar e normal, definindo uma superfície de integração em torno do carro. Para o uso do Tensor de Força de Maxwell, as seguintes condições devem ser satisfeitas: [25]:

- o campo magnético na superfície do corpo deve ser conhecido;
- a superfície que envolve o campo magnético deve estar localizada no ar ou em uma região em que  $\mu = \mu_o$ , e a integração deve ser realizada ao redor do corpo;
- a força deve ser calculada por integração do Tensor de Força de Maxwell através da superfície ou contorno que envolve total ou parcialmente o corpo sobre o qual a força é produzida, de acordo com a equação (4.125).

### 5.3.1 Simulação 1 para o Caso 1

Através desta simulação, verificou-se o comportamento do módulo da densidade de fluxo magnético no circuito magnético do atuador planar, considerando que não havia regiões condutoras de corrente. A figura 5.7 mostra um conjunto de mapas do módulo da densidade de fluxo magnético. Na figura 5.7(a) são mostradas, de forma esquemática, uma vista superior do modelo utilizado para a análise do atuador planar e a localização do corte C-C'. A figura 5.7(b) mostra o detalhe do mapeamento 3D do módulo da densidade de fluxo magnético no carro do atuador planar. Na figura 5.7(c) apresenta-se o mapa 2D do módulo da densidade de fluxo magnético através da geometria do atuador planar e, na figura 5.7(d), o correspondente mapa dos vetores da densidade de fluxo magnético, ambos obtidos através do corte C-C'.

Através da análise dos mapas, verifica-se que o fluxo magnético distribui-se de forma simétrica e uniforme através do circuito magnético do atuador planar. Conforme pode ser verificado pela figura 2.12 do Capítulo 2 deste trabalho, a culatra possui dois chanfros, um em cada uma de suas extremidades superiores, que não estão representados no modelo virtual, onde a culatra tem espessura constante através do eixo  $z$ . Na figura 5.7(b), observa-se que as extremidades da culatra do modelo virtual apresentam baixos valores de densidade de fluxo magnético, entre zero e 0,045 T, o que permitiu adotar a geometria apresentada na figura 2.12 para o protótipo construído do atuador planar.

Através da figura 5.7(c) foi possível verificar que a espessura definida para a culatra é suficiente para evitar a saturação do material ferromagnético. O mesmo pode ser constatado com relação ao núcleo da armadura. Desta forma, a análise numérica permitiu validar as características geométricas de projeto definidas para a construção do atuador planar. O gráfico da figura 5.8 está relacionado com a figura 5.7(c) e representa o comportamento da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro medida na diagonal sob o carro, no plano  $z$  localizado 8,5 mm acima da superfície do núcleo da armadura.

A figura 5.9 apresenta um mapeamento bidimensional obtido através do corte que passa pela linha central de um dos ímãs permanentes. A figura 5.9(a) apresenta o mapeamento 2D do módulo do vetor densidade de fluxo magnético através da geometria do atuador planar, e a figura 5.9(b), o correspondente mapa dos vetores da densidade de fluxo magnético, ambos calculados através do corte A-A'. A figura 5.9(c) mostra, de forma esquemática, uma vista superior do modelo do atuador planar com a localização do corte A-A'. Os gráficos da figura 5.10 estão relacionados aos cortes da figura 5.9 e representam o comportamento da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o ímã permanente  $I$  em função de  $x$ . Em (a) os pontos foram tomados no plano  $z = 14,5$  mm acima da superfície do núcleo da armadura, e em (b), no plano  $z = 13,5$  mm.

A figura 5.11 apresenta duas vistas 3D do mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético do carro do atuador planar, para  $I_a$  igual a zero, destacando a culatra em (a) e em (b) o carro completo. Estas figuras permitiram verificar o grau de saturação magnética da culatra na sua fronteira com os ímãs permanentes.

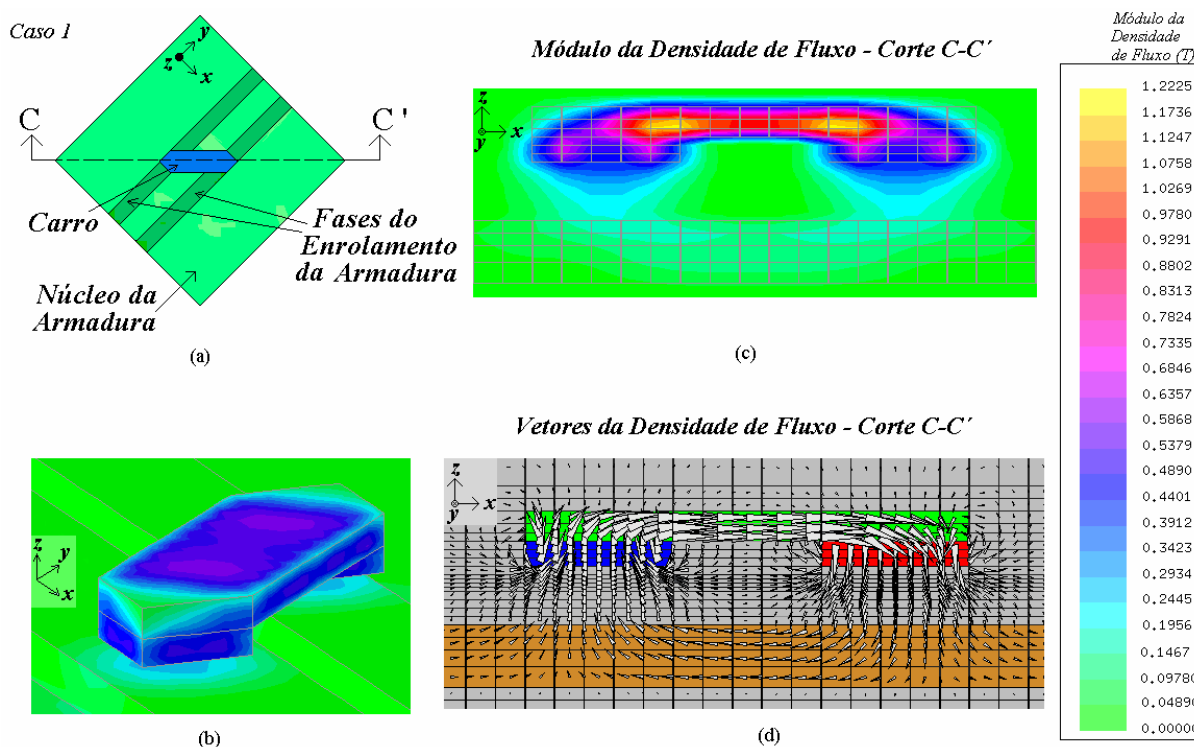


Figura 5.7 – Mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético para corrente nula nas fases do enrolamento da armadura: (a) vista superior com a localização do corte C-C', (b) detalhe do mapeamento 3D do carro do atuador planar, (c) mapa 2D e (d) mapa 2D correspondente dos vetores.

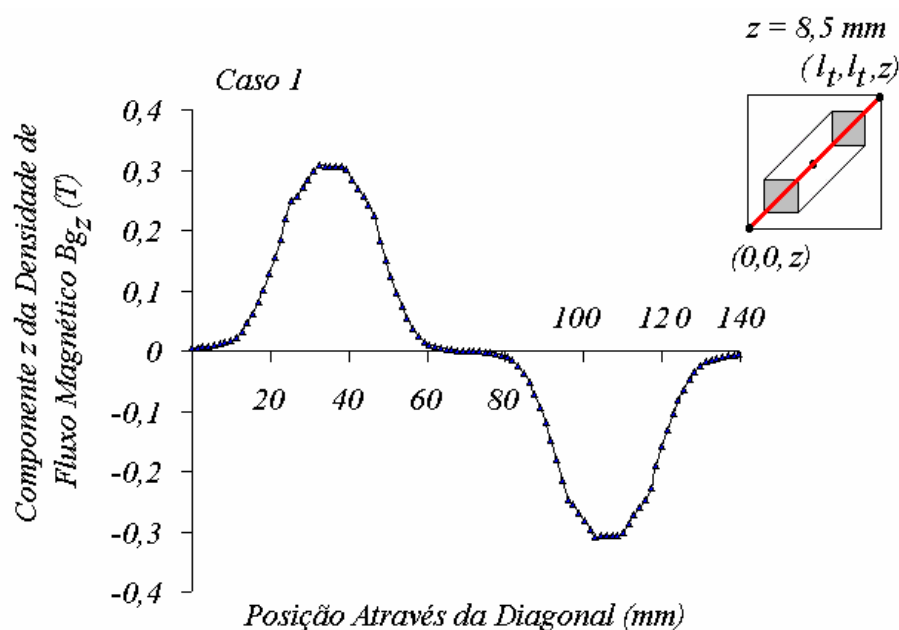


Figura 5.8 - Gráfico da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro para  $I_a = \text{zero}$ , calculado através da diagonal sob o carro, no plano  $z = 8,5 \text{ mm}$  acima da superfície do núcleo da armadura.



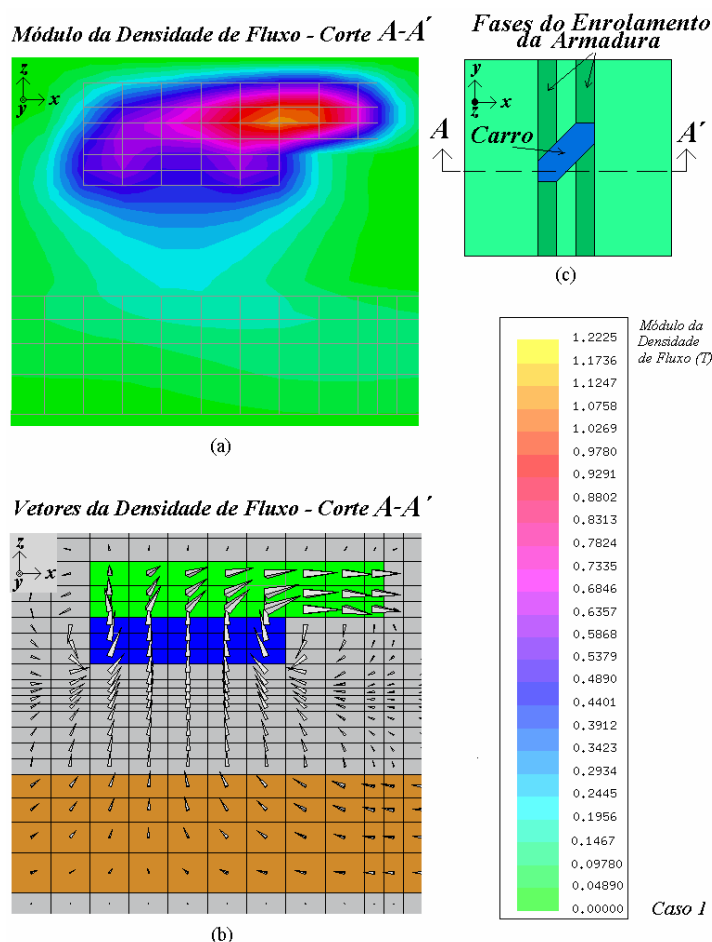


Figura 5.9 - (a) Mapeamento 2D da distribuição da densidade de fluxo magnético através da geometria do atuador planar para  $I_a = \text{zero}$ , (b) mapa correspondente dos vetores e (c) vista superior do modelo do atuador planar com a localização do corte A-A'.

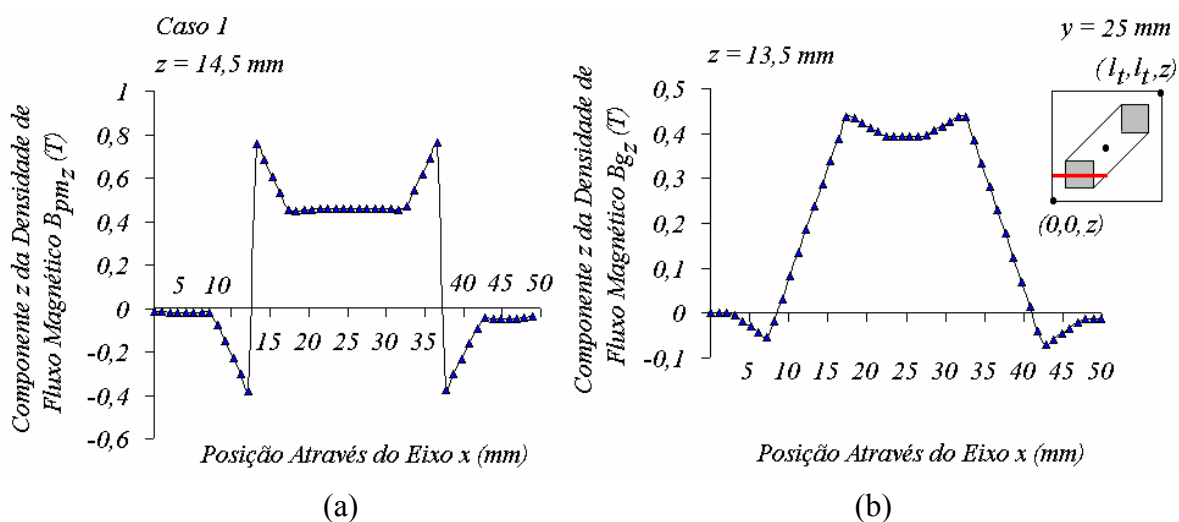


Figura 5.10 - Gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o ímã permanente  $l$  em função de  $x$ , para  $I_a = \text{zero}$ : em (a) os pontos foram tomados no plano  $z = 14,5 \text{ mm}$  acima do núcleo da armadura e em (b), no plano  $z = 13,5 \text{ mm}$ .

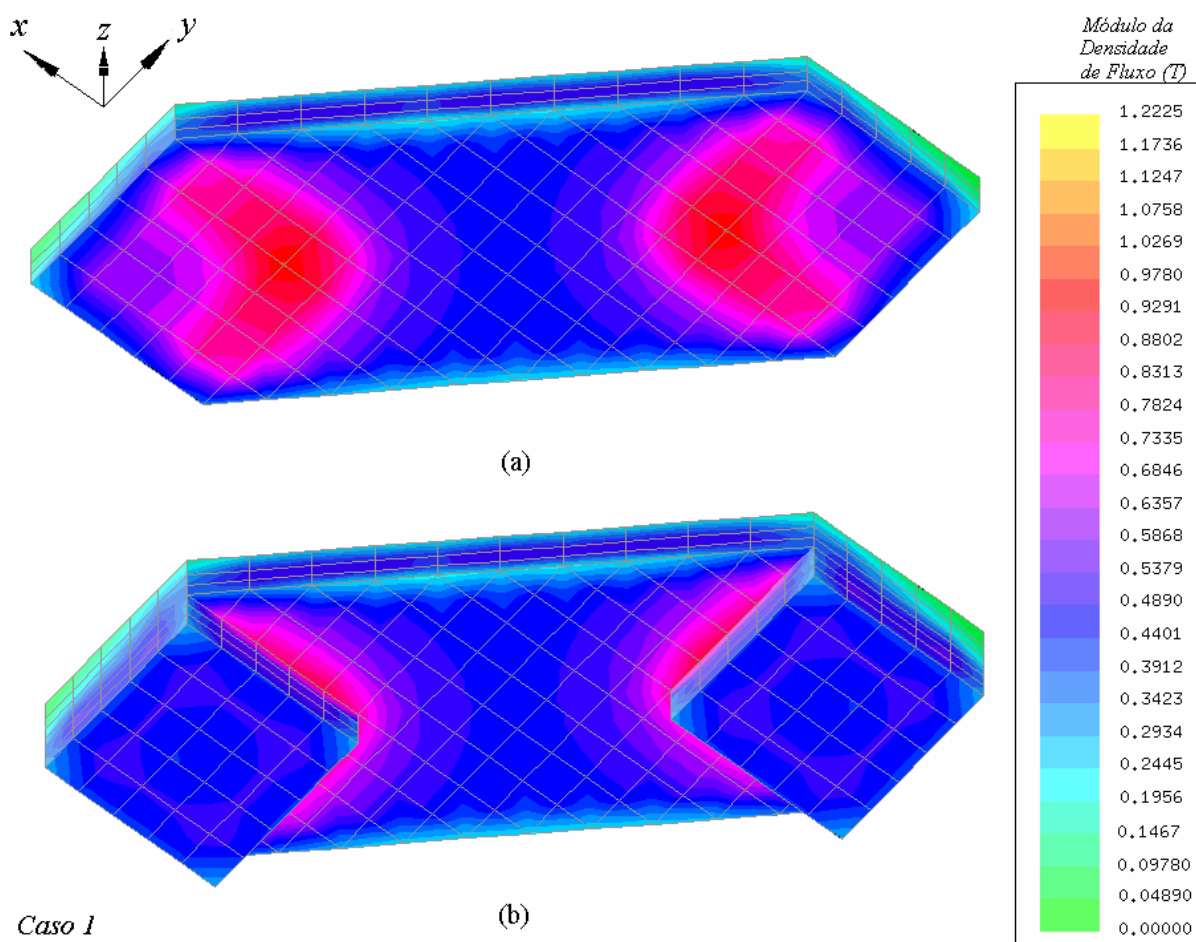


Figura 5.11 - Vistas 3D do mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético do carro do atuador planar, para  $I_a$  igual a zero, destacando a culatra em (a) e em (b) o carro completo. Este mapa permitiu verificar o grau de saturação magnética da culatra na sua fronteira com os ímãs permanentes.

### 5.3.2 Simulação 7 para o Caso 1

Na simulação 7 as duas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, foram excitadas com  $I_a = 6$  A, com o objetivo de avaliar o efeito de reação da armadura sobre a distribuição do fluxo magnético através do atuador planar. O resultado da força planar de propulsão obtido através dessa simulação e das simulações 2, 3, 4, 5 e 6 permitiu calcular o valor da sensibilidade média do atuador planar. A faixa de operação escolhida para o atuador planar, em termos de corrente, varia de 0 a 6,0 A. Assim, a análise

numérica do comportamento do atuador planar foi realizada para os valores de corrente que estão dentro dessa faixa.

A figura 5.12 apresenta o mapa bidimensional do módulo do vetor densidade de fluxo magnético para  $I_a = 6$  A. O gráfico da figura 5.13 está relacionado com a figura 5.12 e apresenta o comportamento da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, medida na diagonal sob o carro, no plano  $z = 8,5$  mm acima da superfície do núcleo da armadura, para  $I_a = 6$  A.

Esta etapa das simulações teve por objetivo avaliar o efeito de reação da armadura sobre a distribuição do fluxo magnético através do atuador planar, quando as fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, estão excitadas por corrente. Através da figura 5.13, verifica-se de forma clara que, quando as fases do enrolamento da armadura são percorridas por corrente, o fluxo magnético no entreferro não possuirá uma distribuição uniforme e simétrica. O mapeamento para  $I_a = 6$  A foi escolhido, porque representa uma situação extrema de funcionamento em termos de corrente em cada fase do enrolamento da armadura. A figura 5.14 apresenta os mapas bidimensionais do módulo do vetor densidade de fluxo magnético obtidos através do corte que passa pela linha central de um dos ímãs permanentes, para  $I_a = 6$  A.

Os gráficos da figura 5.15 estão relacionados aos cortes da figura 5.14 e apresentam o comportamento da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob um ímã permanente em função de  $x$ . Em (a) os pontos foram tomados no plano  $z = 14,5$  mm acima da superfície do núcleo da armadura, e em (b), no plano  $z = 13,5$  mm. A figura 5.16 apresenta duas vistas 3D do mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético do carro do atuador planar, destacando a culatra em (a) e em (b) o carro completo, para  $I = 6,0$  A.

Os valores da força planar de propulsão e da força normal que atuam sobre o carro do atuador planar foram obtidos, conforme já citado, através do Tensor de Força de Maxwell. Os respectivos gráficos em função da corrente nas fases do enrolamento  $x$  da armadura são apresentados nas figuras 5.17 e 5.18, respectivamente.

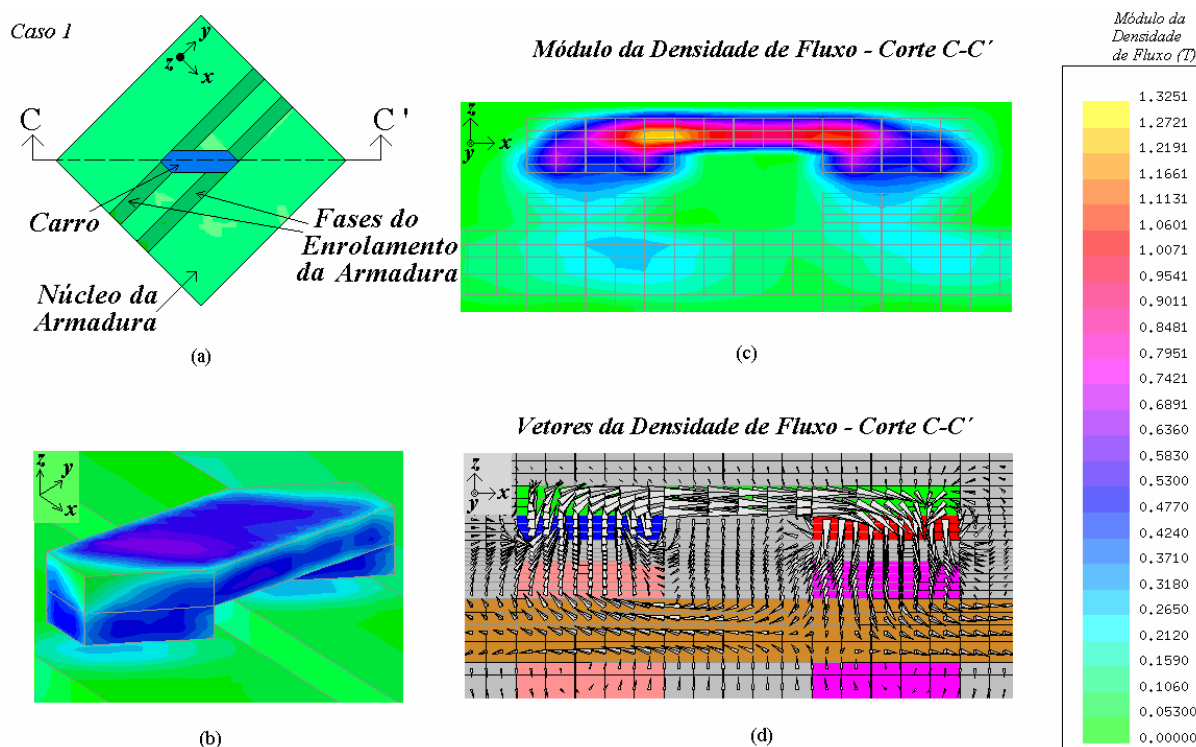


Figura 5.12 - Mapeamento do módulo da densidade de fluxo para  $I_a = 6$  A nas fases do enrolamento da armadura: (a) vista superior com a localização do corte C-C', (b) detalhe do mapeamento 3D do carro do atuador planar, (c) mapa 2D e (d) mapa 2D correspondente dos vetores.

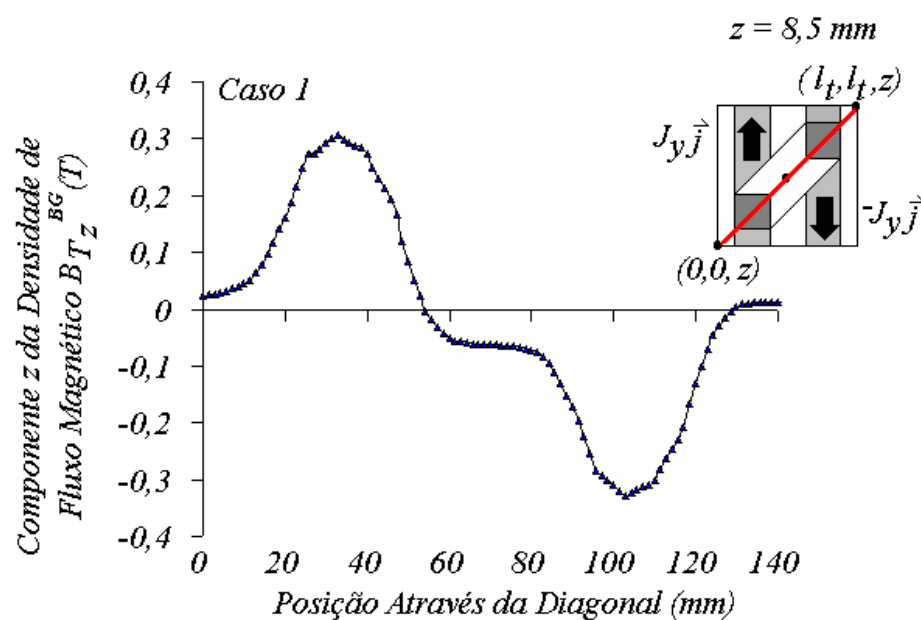


Figura 5.13 - Gráfico da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro para  $I_a = 6$  A, calculado através da diagonal sob o carro, no plano  $z = 8,5$  mm acima da superfície do núcleo da armadura.

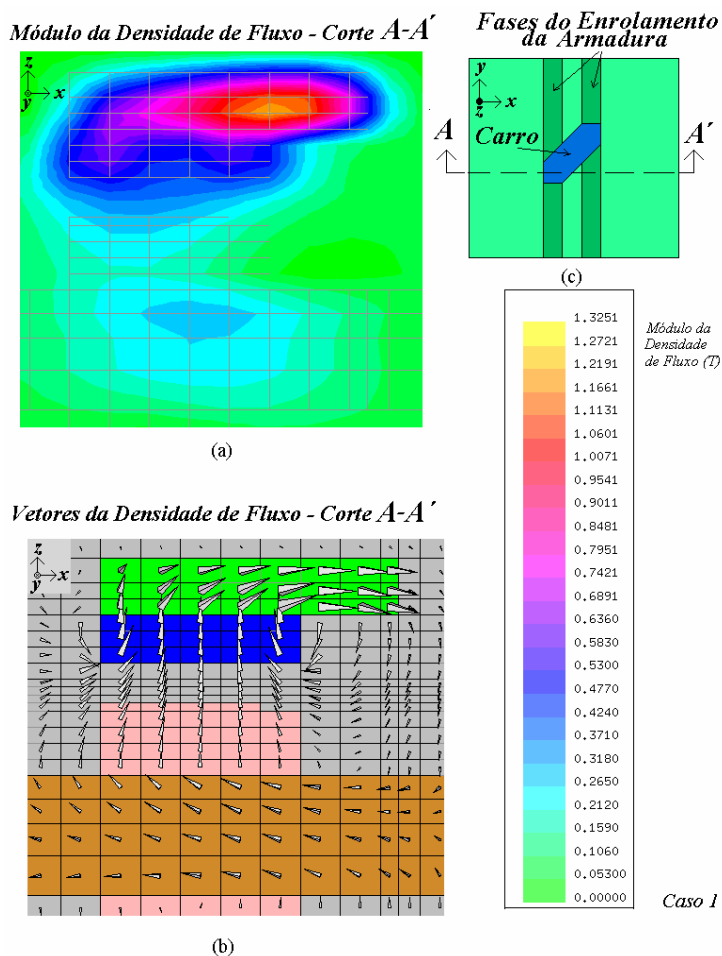


Figura 5.14 - (a) Mapeamento 2D da distribuição da densidade de fluxo magnético através da geometria do atuador planar para  $I_a = 6$  A, (b) mapa correspondente dos vetores e (c) vista superior do modelo do atuador planar com a localização do corte A-A'.

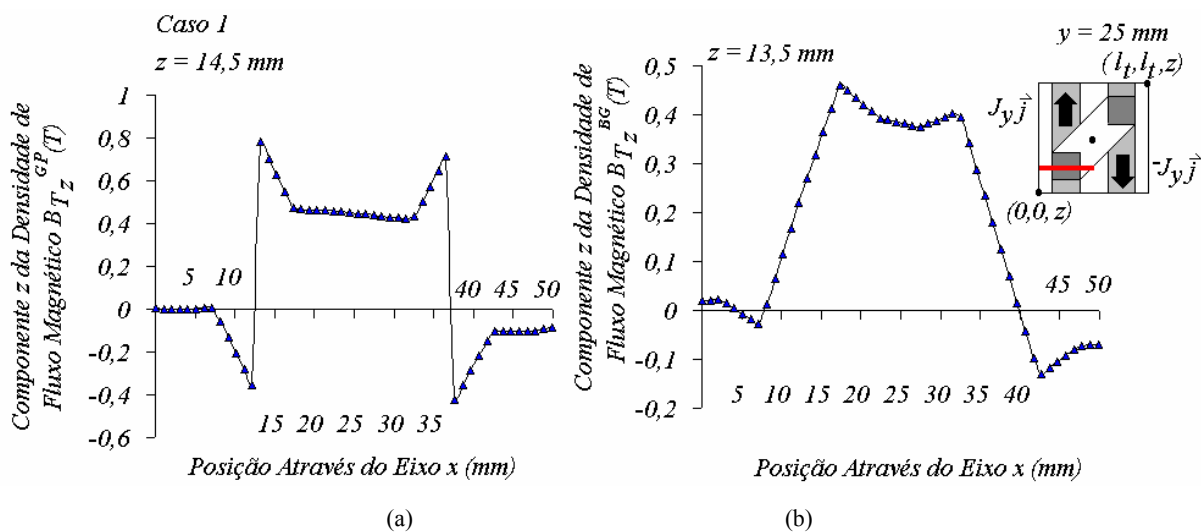


Figura 5.15 – Gráficos da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o ímã permanente  $l$  em função de  $x$ , para  $I_a = 6$  A: em (a) os pontos foram tomados no plano  $z = 14,5$  mm acima do núcleo da armadura e em (b), no plano  $z = 13,5$  mm.

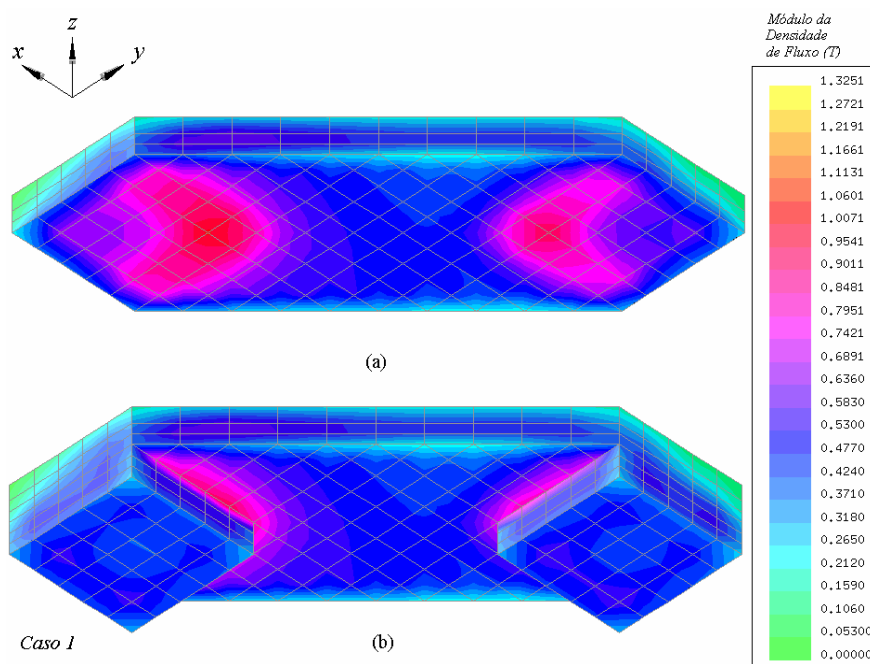


Figura 5.16 - Vistas 3D do mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético do carro do atuador planar para  $I_a = 6,0$  A, destacando a culatra em (a) e em (b) o carro completo.

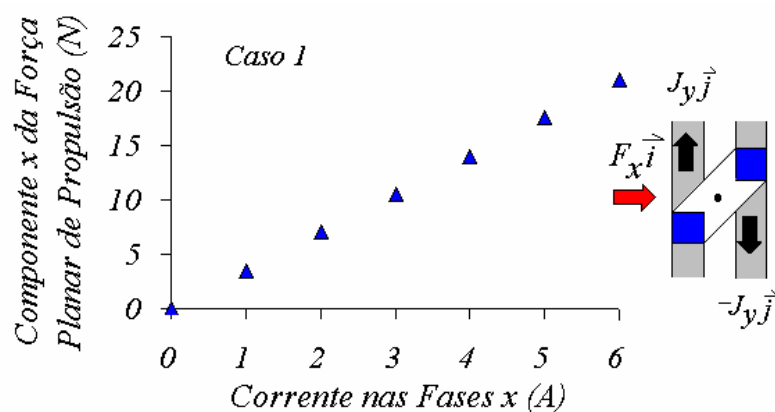


Figura 5.17 – Gráfico da força planar de propulsão em função da corrente nas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, para o caso 1.

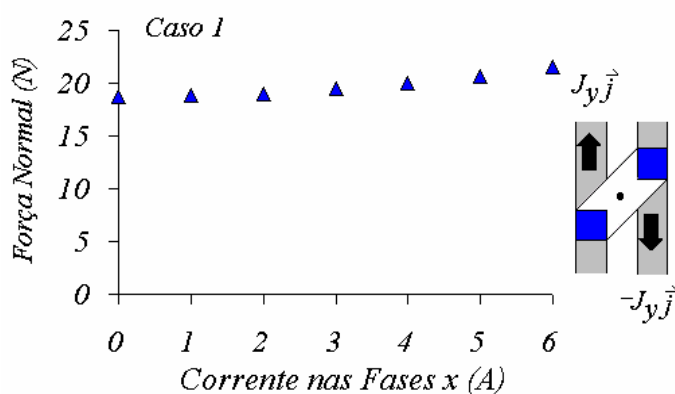


Figura 5.18 – Gráfico da força normal em função da corrente nas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, para o caso 1.

### 5.3.3 Simulação 1 para o Caso 2

Nesta etapa das simulações, verificou-se o comportamento da distribuição da densidade de fluxo magnético no circuito magnético do atuador planar para o caso 2, considerando que não havia nenhuma região condutora de corrente. Em todas as análises para o caso 2, foi dada principal atenção ao comportamento da distribuição da densidade de fluxo magnético através da geometria do atuador planar, devido ao aumento do volume dos ímãs permanentes e a conseqüente redução do comprimento do entreferro.

A figura 5.19 mostra o conjunto de mapas do módulo da densidade de fluxo magnético gerados para o caso 2. A figura 5.19(b) mostra o detalhe do mapeamento 3D do módulo da densidade de fluxo magnético no carro do atuador planar. Na figura 5.19(c) apresenta-se o mapa 2D do módulo da densidade de fluxo magnético através da geometria do atuador planar e, na figura 5.19(d), o correspondente mapa dos vetores, ambos obtidos através do corte C-C'. O gráfico equivalente é mostrado na figura 5.20 e representa o comportamento da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro medida na diagonal sob o carro, no plano  $z = 8,5$  mm acima da superfície do núcleo da armadura. Assim como pode ser verificado através do modelo analítico, apresentado no Capítulo 4 deste trabalho, o gráfico da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, calculado no plano  $z = 8,5$  mm acima da superfície do núcleo da armadura, possui um topo mais achatado, resultante da proximidade dos pontos medidos com a superfície polar dos ímãs permanentes.

A figura 5.21 apresenta o mapeamento bidimensional obtido através do corte que passa pela linha central de um dos ímãs permanentes. A figura 5.21(a) apresenta o mapeamento 2D do módulo do vetor densidade de fluxo magnético através da geometria do atuador planar, e a figura 5.21(b), o correspondente mapa dos vetores, ambos calculados através do corte A-A'. A figura 5.21(c) mostra, de forma esquemática, uma vista superior do modelo do atuador planar com a localização do corte A-A'. Os gráficos da figura 5.22 estão relacionados aos cortes da figura 5.21 e representam o comportamento da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o ímã permanente  $I$  em função de  $x$ . Em (a) os pontos foram tomados no plano  $z = 12,5$  mm acima da superfície do núcleo da armadura, e em (b), no plano  $z = 11,5$  mm. A figura 5.23 apresenta duas vistas 3D do mapeamento do módulo da densidade de fluxo magnético do carro do atuador planar, destacando a culatra em (a) e em (b) o carro completo.

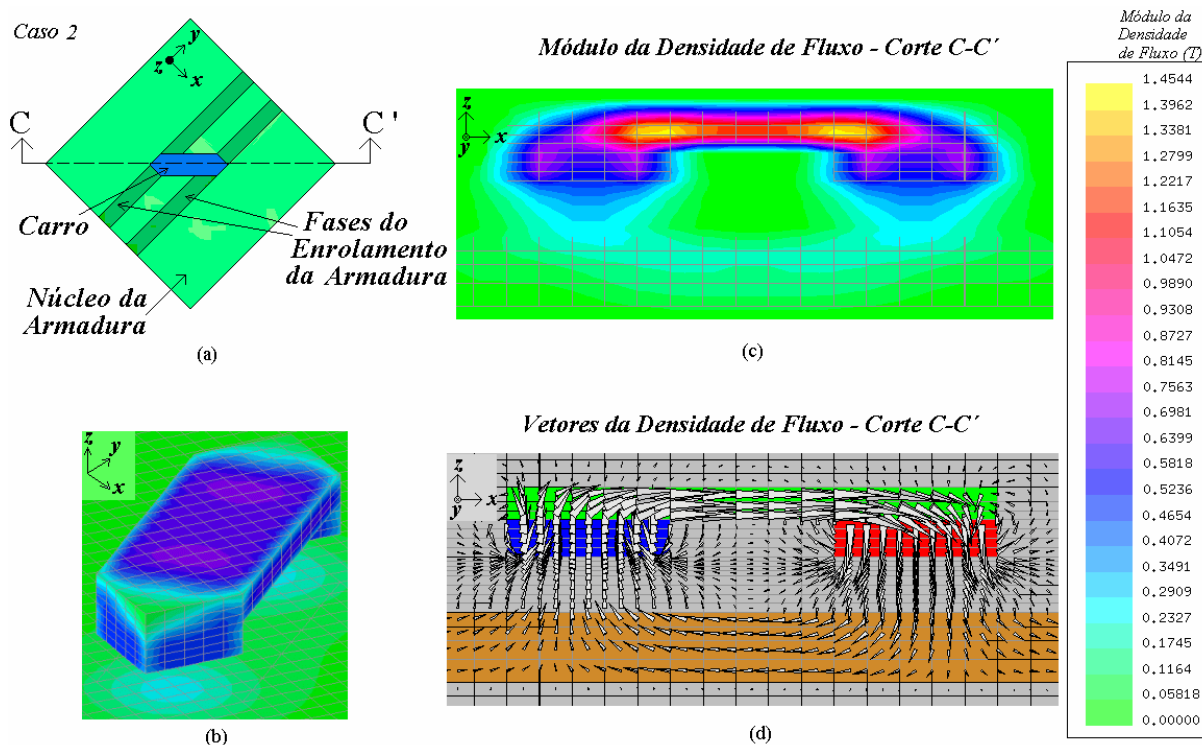


Figura 5.19 - Mapeamento do módulo da densidade de fluxo para corrente nula nas fases do enrolamento da armadura: (a) vista superior com a localização do corte C-C', (b) detalhe do mapeamento 3D do carro do atuador planar, (c) mapa 2D e (d) mapa 2D correspondente dos vetores.

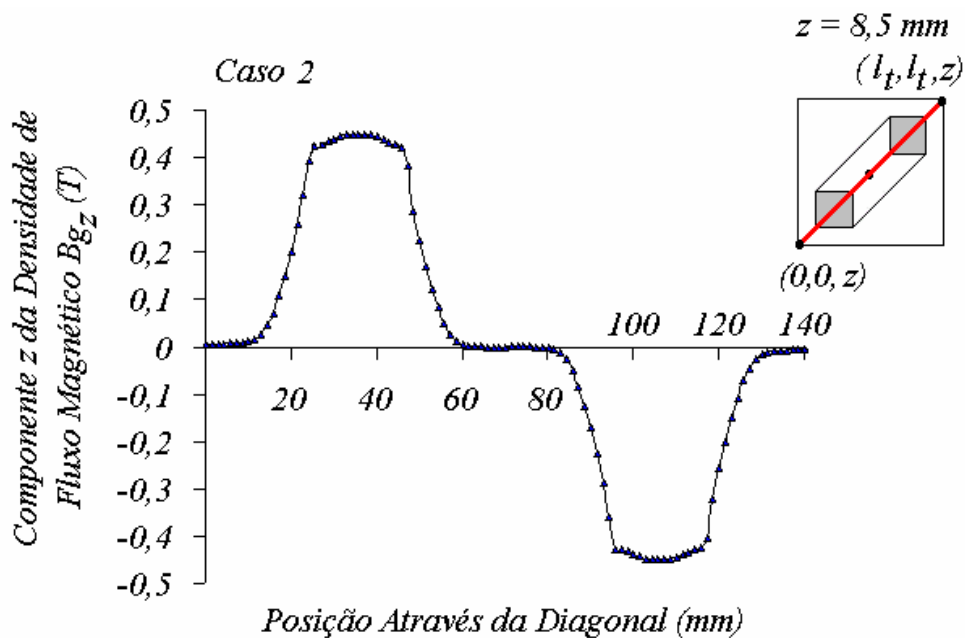


Figura 5.20 - Gráfico da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro para  $I_a = \text{zero}$ , calculado através da diagonal sob o carro, no plano  $z = 8,5 \text{ mm}$  acima da superfície do núcleo da armadura.



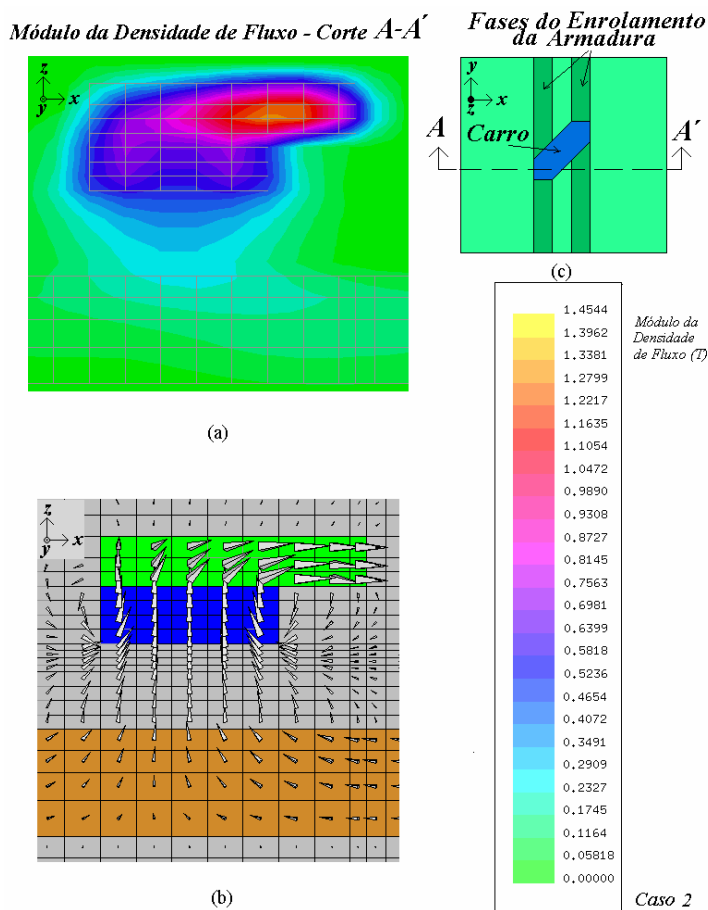


Figura 5.21 - (a) Mapa 2D da distribuição da densidade de fluxo magnético através da geometria do atuador planar, (b) vista superior do modelo utilizado para a análise do atuador planar e a localização do corte A-A' e (c) correspondente mapa dos vetores da densidade de fluxo magnético.

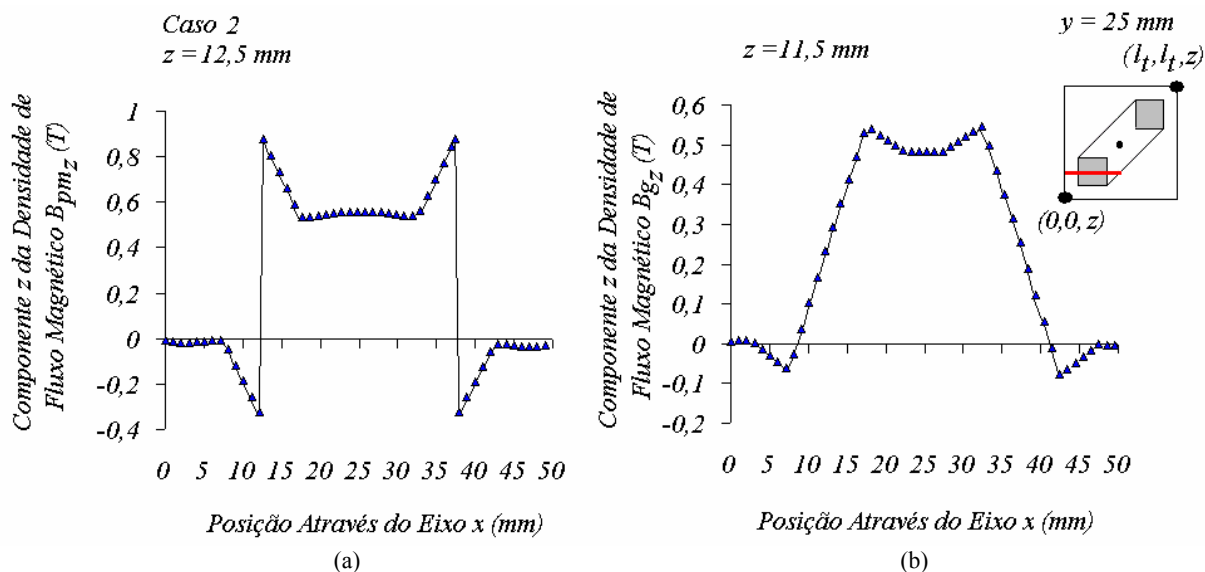


Figura 5.22 - Gráficos da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o ímã permanente  $I$  em função de  $x$ , para  $I_a = \text{zero}$ : em (a) os pontos foram tomados no plano  $z = 12,5 \text{ mm}$  acima do núcleo da armadura e em (b), no plano  $z = 11,5 \text{ mm}$ .

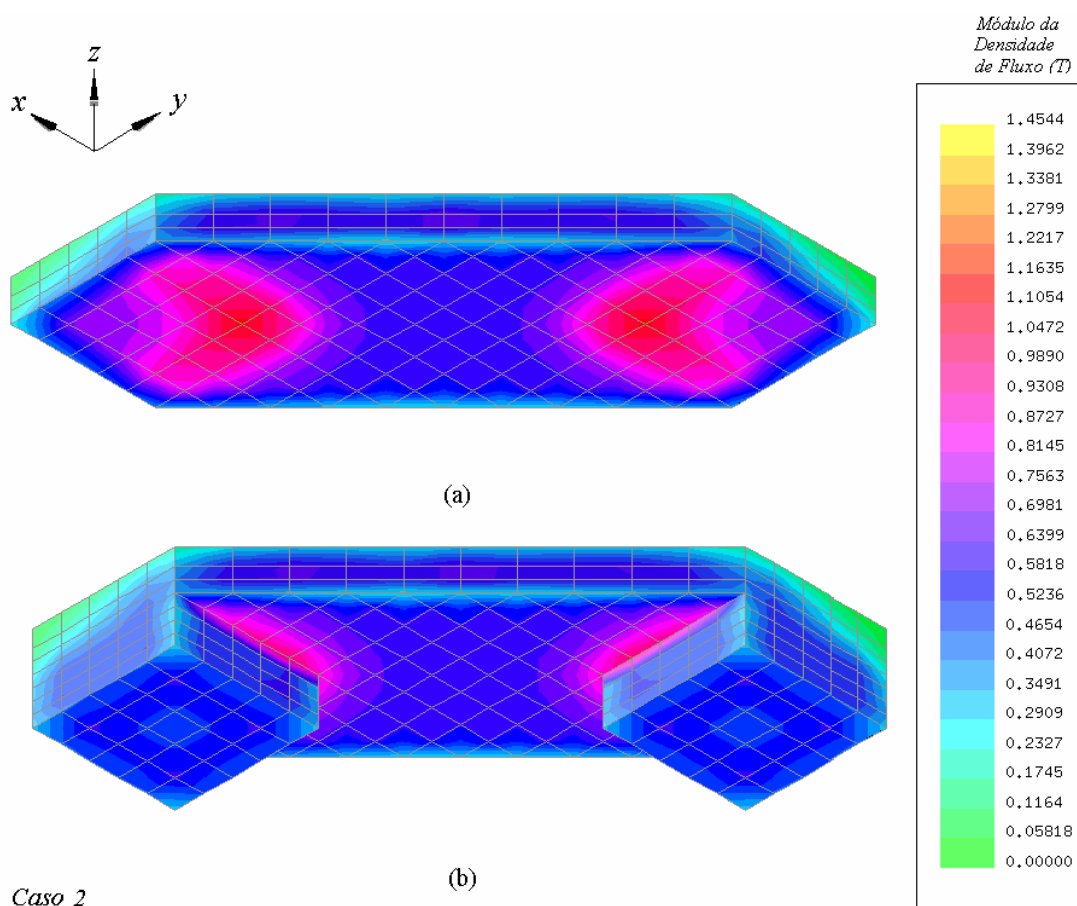


Figura 5.23 - Vistas 3D do mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético do carro do atuador planar, destacando a culatra em (a) e em (b) o carro completo. Este mapa permitiu verificar o grau de saturação magnética da culatra na fronteira entre ela e os ímãs permanentes.

#### 5.3.4 Simulação 7 para o Caso 2

De forma idêntica ao caso 1, o caso 2 também foi analisado numericamente através das simulações de 2 a 7, com vistas a determinar a sensibilidade do atuador planar. Estas simulações permitiram que fossem obtidas maiores informações sobre o estado de saturação magnética do atuador planar. Na simulação 7 as duas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, foram excitadas com  $I_a = 6$  A, com o objetivo de avaliar o efeito de reação da armadura sobre a distribuição do fluxo magnético através do atuador planar, agora para o caso 2.

A malha do modelo virtual utilizada para analisar numericamente o caso 2 não possui o chanfrado na culatra, assim como no caso 1. Através do mapeamento gerado pelas simulações, verificou-se que os valores do módulo do vetor densidade de fluxo magnético nos elementos em ferro localizados nas extremidades da culatra do modelo virtual apresentam baixos valores de densidade de fluxo magnético, entre zero e 0,062 T. Estes resultados demonstram que é possível empregar a culatra apresentada na figura 2.12 também para o caso 2, uma vez que os resultados da análise numérica demonstram que as extremidades da culatra possuem baixos valores de densidade de fluxo magnético. Em todas as simulações feitas para o caso 2, constatou-se que não houve efeito de saturação magnética apreciável nas regiões onde foram definidos materiais ferromagnéticos.

A figura 5.24 apresenta os mapas bidimensionais do módulo do vetor densidade de fluxo magnético para  $I_a = 6$  A. O gráfico da figura 5.25 está relacionado com a figura 5.24 e apresenta o comportamento da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, medida na diagonal sob o carro, no plano  $z = 8,5$  mm acima da superfície do núcleo da armadura, para  $I_a = 6$  A.

A figura 5.26 apresenta os mapas bidimensionais do módulo do vetor densidade de fluxo magnético obtido através do corte que passa pela linha central de um dos ímãs permanentes, para  $I_a = 6$  A. Os gráficos da figura 5.27 estão relacionados aos cortes da figura 5.26 e apresentam o comportamento da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob um ímã permanente em função de  $x$ . Em (a) os pontos foram tomados no plano  $z = 12,5$  mm acima da superfície do núcleo da armadura, e em (b), no plano  $z = 11,5$  mm. A figura 5.28 apresenta duas vistas 3D do mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético do carro do atuador planar, destacando a culatra em (a) e em (b) o carro completo, para  $I = 6,0$  A.

Os valores da força planar de propulsão e da força normal que atuam sobre o carro do atuador planar foram obtidos, conforme já citado, através do Tensor de Força de Maxwell. Os respectivos gráficos em função da corrente nas fases do enrolamento  $x$  da armadura são apresentados nas figuras 5.29 e 5.30, respectivamente.

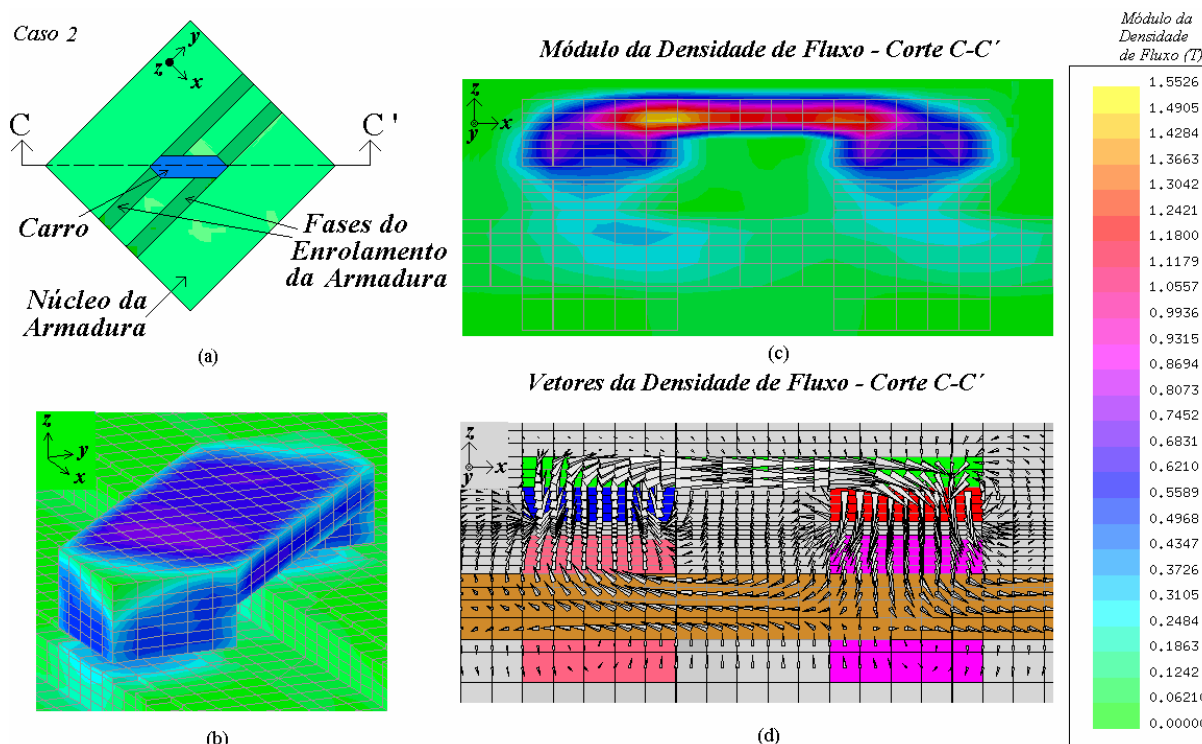


Figura 5.24 - Mapeamento do módulo da densidade de fluxo para  $I_a = 6$  A nas fases do enrolamento da armadura: (a) vista superior com a localização do corte C-C', (b) detalhe do mapeamento 3D do carro do atuador planar, (c) mapa 2D e (d) mapa 2D correspondente dos vetores.

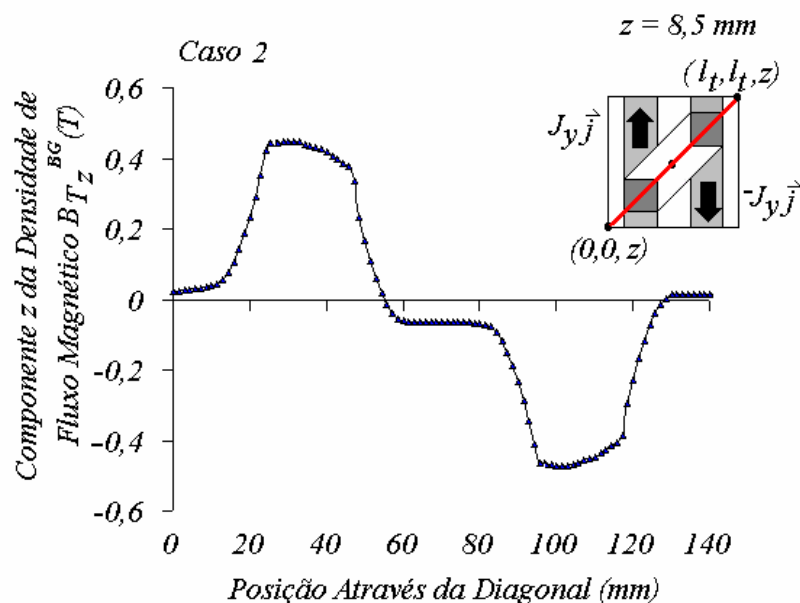


Figura 5.25 - Gráfico da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro para  $I_a = 6$  A, calculado através da diagonal sob o carro, no plano  $z = 8,5$  mm acima da superfície do núcleo da armadura.

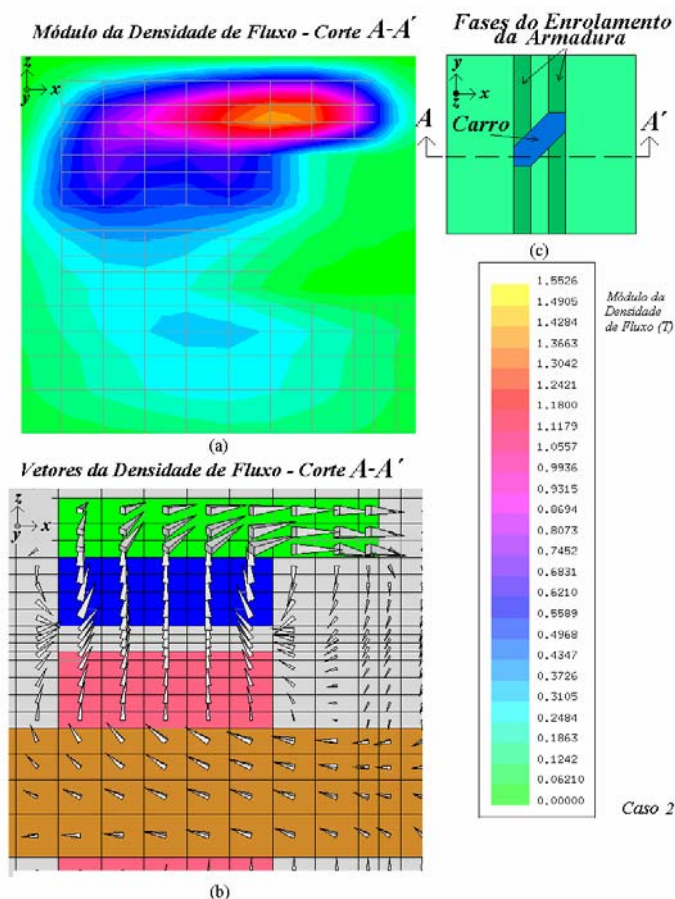


Figura 5.26 - (a) Mapeamento 2D da distribuição da densidade de fluxo magnético através da geometria do atuador planar para  $I_a = 6$  A, (b) mapa correspondente dos vetores e (c) vista superior do modelo do atuador planar com a localização do corte A-A'.

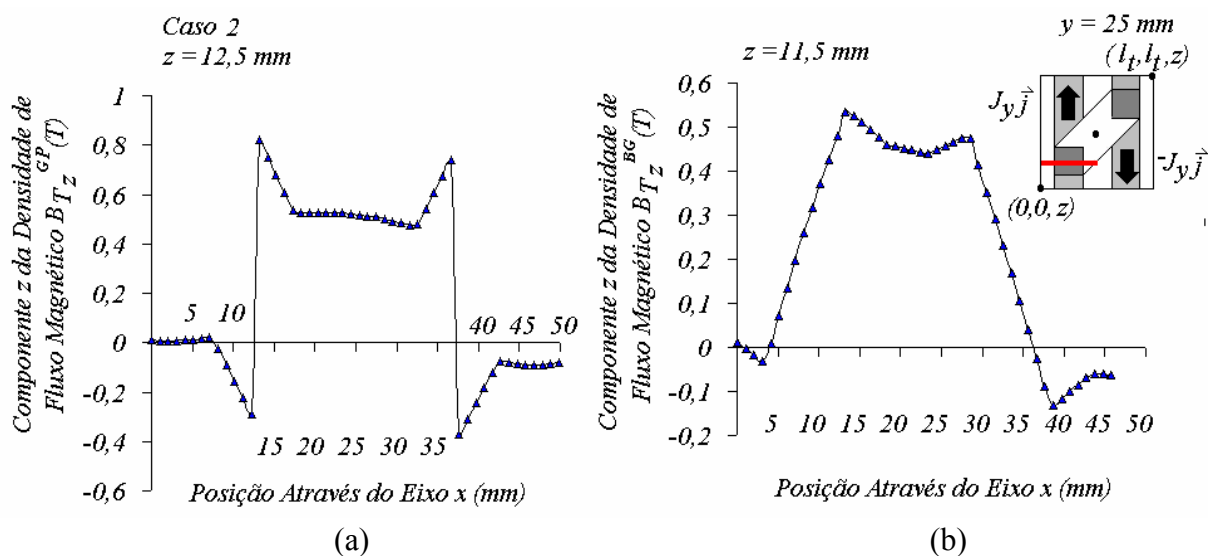


Figura 5.27 - Gráficos da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o ímã permanente  $l$  em função de  $x$ , para  $I_a = 6$  A: em (a) os pontos foram tomados no plano  $z = 12,5$  mm acima do núcleo da armadura e em (b), no plano  $z = 11,5$  mm.

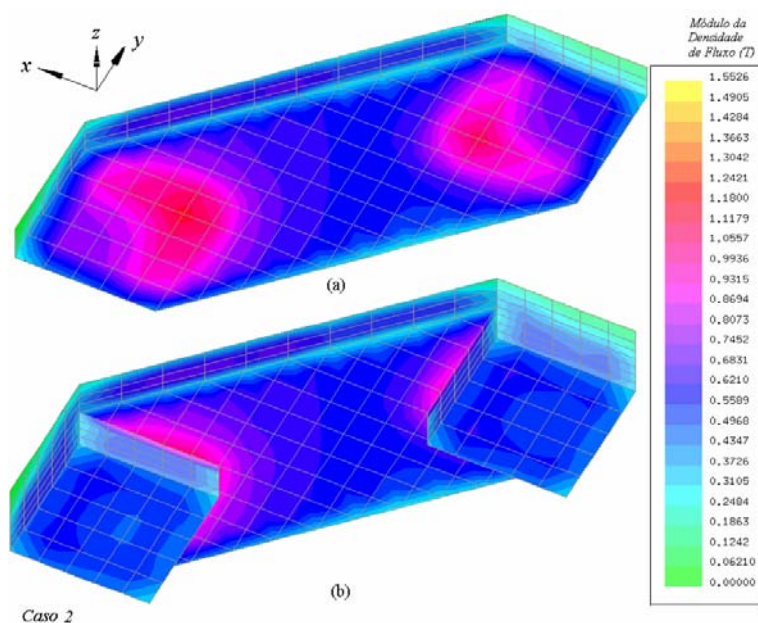


Figura 5.28 - Vistas 3D do mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético do carro do atuador planar, destacando a culatra em (a) e em (b) o carro completo, para  $I_a = 6,0$

A.

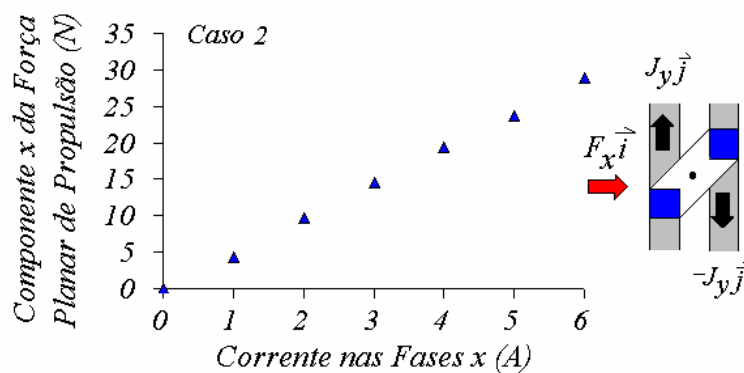


Figura 5.29 - Gráfico da força planar de propulsão em função da corrente nas fases do enrolamento  $x$  da armadura para o caso 2.

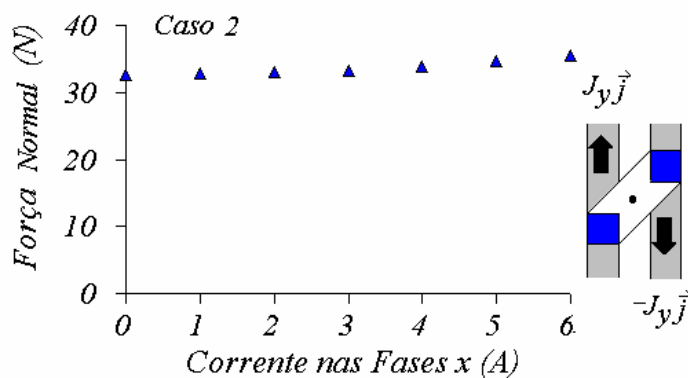


Figura 5.30 – Gráfico da força normal em função da corrente nas fases do enrolamento  $x$  da armadura para o caso 2.

### 5.3.5 Simulações de 8 a 14 para os Casos 1 e 2

Estas simulações tiveram por objetivo calcular o valor da força planar de propulsão com o carro deslocado de passos fixos em relação às fases do enrolamento  $x$  da armadura. Desta forma, houve um deslocamento da posição relativa das duas fases do enrolamento  $x$  da armadura em relação à distribuição do fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes. O processo é similar aquele apresentado no Capítulo 4, e que resultou nos gráficos da figura 4.30.

Para esta etapa das simulações, o modelo virtual do atuador planar foi dividido em duas malhas: uma é a malha do carro, e a outra, a malha do estator. Para cada uma das posições do carro em relação às fases do enrolamento  $x$ , as duas malhas foram unidas através de coordenadas pré-fixadas. Uma superfície de Lagrange une as duas malhas e pode permitir, ainda, simulações do comportamento dinâmico do atuador.

O gráfico da figura 5.31 apresenta o comportamento da componente  $x$  da força planar de propulsão em função do deslocamento do carro a partir da origem, para os casos 1 e 2, para 3 A e 6 A. Os valores gerados pelo método analítico são apresentados também, para fins de comparação.

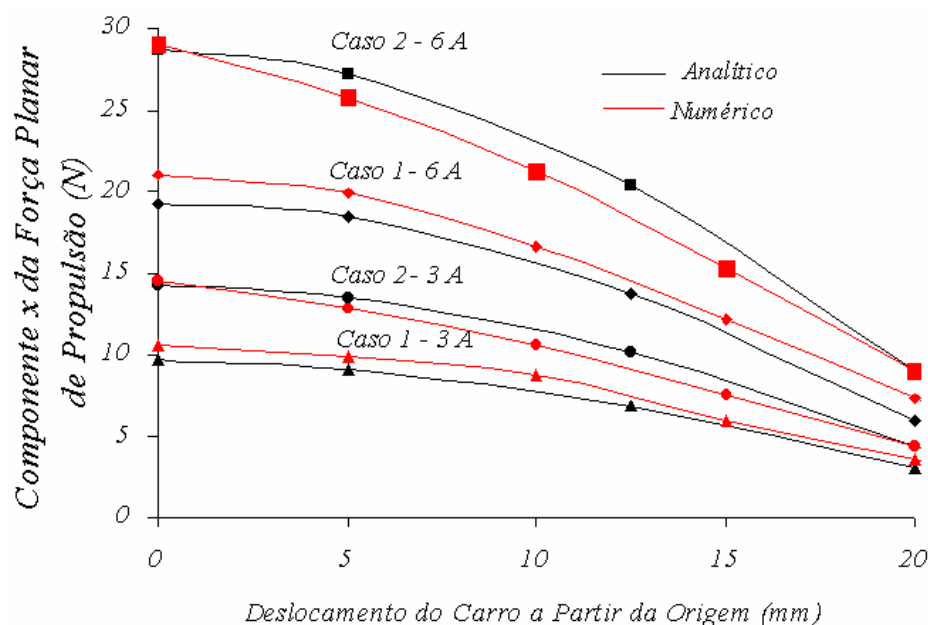


Figura 5.31 - Gráficos da componente  $x$  da força planar de propulsão em função do deslocamento do carro a partir da origem, para os casos 1 e 2, para 3 A e 6 A.

#### 5.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE NUMÉRICA

Em todos os mapas gerados, tanto para o caso 1, como para o caso 2, o maior valor de densidade de fluxo magnético ocorreu na culatra, na camada central de elementos. Nas simulações referentes ao caso 1, o valor máximo do módulo da densidade de fluxo magnético é igual a 1,2225 T para corrente nula nas fases do enrolamento da armadura. Com  $I_a = 6,0$  A, o valor máximo é de 1,3251 T. Para o caso 2, o valor máximo do módulo da densidade de fluxo magnético é igual a 1,4544 T para corrente nula nas fases do enrolamento da armadura. Com  $I_a = 6,0$  A, o valor máximo é de 1,5526 T. No Capítulo 6 deste trabalho são apresentados os gráficos e as tabelas com os valores de força e de densidade de fluxo magnético, obtidos através da análise numérica, juntamente com os respectivos valores obtidos pelo método analítico e pelas medições realizadas no primeiro protótipo construído.



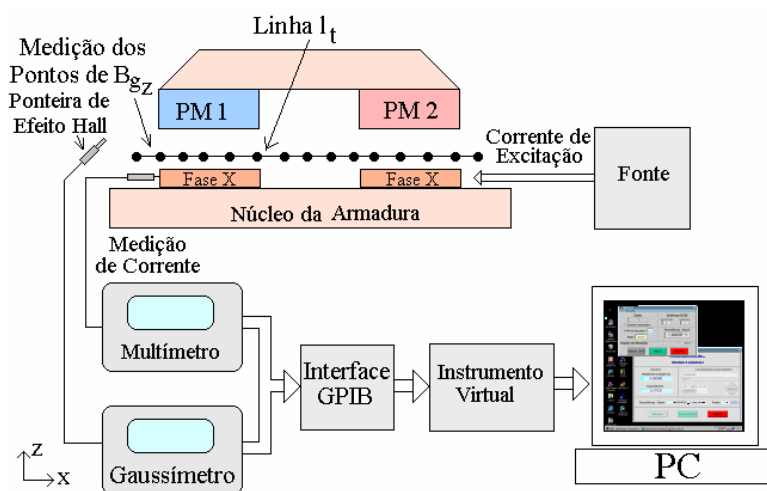
## 6 TESTES DO ATUADOR PLANAR

O atuador planar foi testado com o objetivo de verificar sua performance e validar os resultados provenientes da análise numérica e do modelo analítico. Os testes permitiram analisar o comportamento estático do dispositivo em relação à distribuição de fluxo magnético no entreferro e aos valores das forças planar de propulsão e normal que atuam sobre o carro. Os teste foram feitos para o caso 1 e para o caso 2. Apenas para o caso 2 foi feita a medição de deslocamento do carro a partir da excitação das fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes. Os gráficos resultantes dos ensaios para caracterização estática do atuador planar são apresentados conjuntamente com os gráficos produzidos pelos modelos teóricos em situações equivalentes, para facilitar a comparação entre os mesmos.

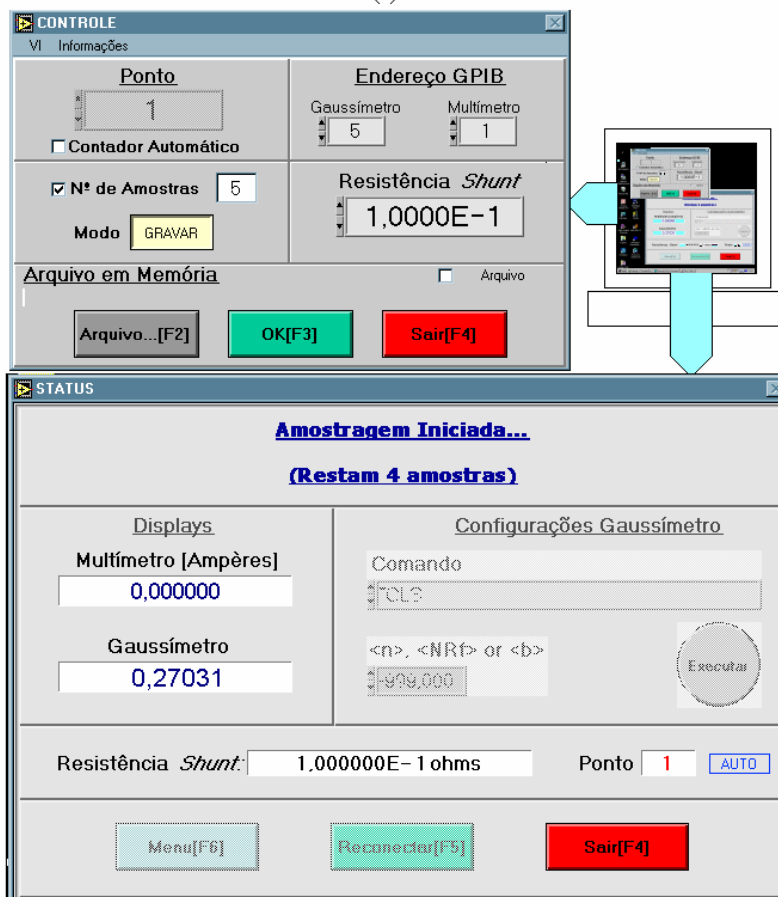
### 6.1 MEDIÇÃO DA DENSIDADE DE FLUXO MAGNÉTICO NO ENTREFERRO

Para a medição da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro foram empregados um Gaussímetro e uma ponteira de efeito Hall. Os valores de corrente nas fases do enrolamento  $x$  da armadura foram obtidos por meio de um multímetro digital. Para garantir uma exata correlação na aquisição das grandezas, foi empregado um sistema de aquisição de dados controlado por um instrumento virtual, que propiciou a automatização e a simultaneidade da medição dos valores de densidade de fluxo magnético no entreferro e das respectivas correntes no enrolamento da armadura. A figura 6.1(a) mostra a montagem para a medição da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético em pontos pré-definidos do entreferro do atuador planar. Todos os pontos foram medidos no entreferro sob o carro no plano localizado 8,5 mm acima da superfície do núcleo da armadura (plano  $z = 8,5$  mm). A figura 6.1(b) mostra as telas do instrumento virtual desenvolvido para aquisição dos valores de densidade de fluxo magnético e das respectivas correntes. A figura 6.2(a) mostra a ponteira de efeito Hall utilizada para a medição dos valores de densidade de fluxo magnético. A figura 6.2(b) mostra a fotografia do atuador planar, destacando o gabarito utilizado para medir a componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro. O gabarito possui uma matriz de 625 pontos (25 por 25 pontos) distribuídos simetricamente no plano  $xy$ . As fronteiras do gabarito delimitam uma área equivalente àquela do modelo analítico utilizado no Capítulo 4 e que é mostrada na figura 4.1(b). Durante o ensaio, o carro

foi posicionado sobre o gabarito e mantido rigidamente fixado a uma estrutura que impediu seu deslocamento.

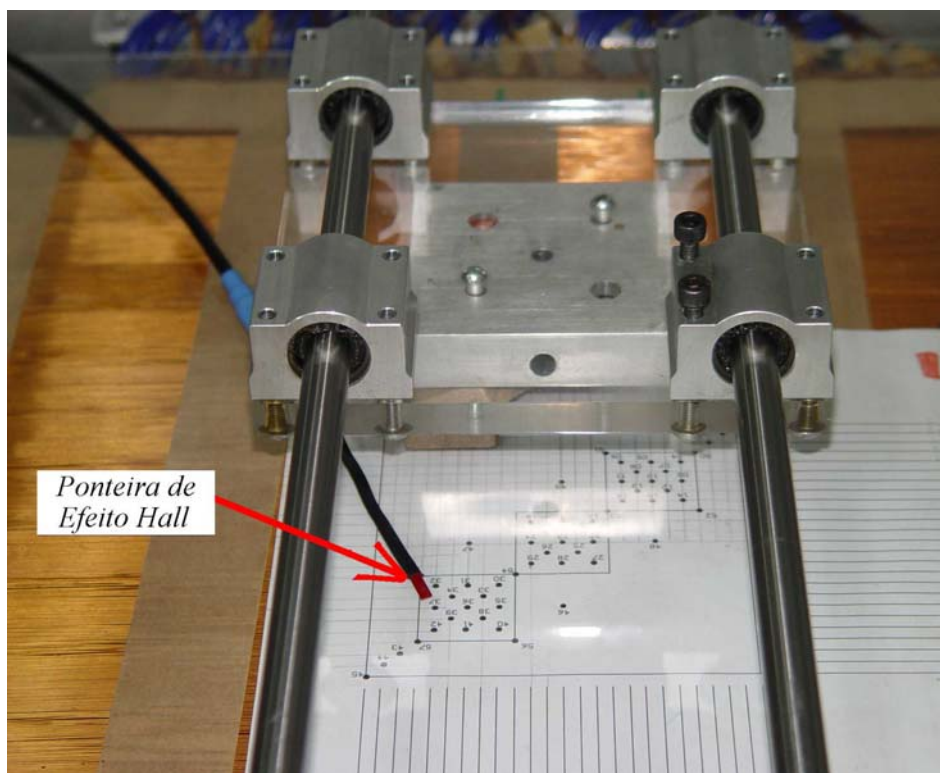


(a)

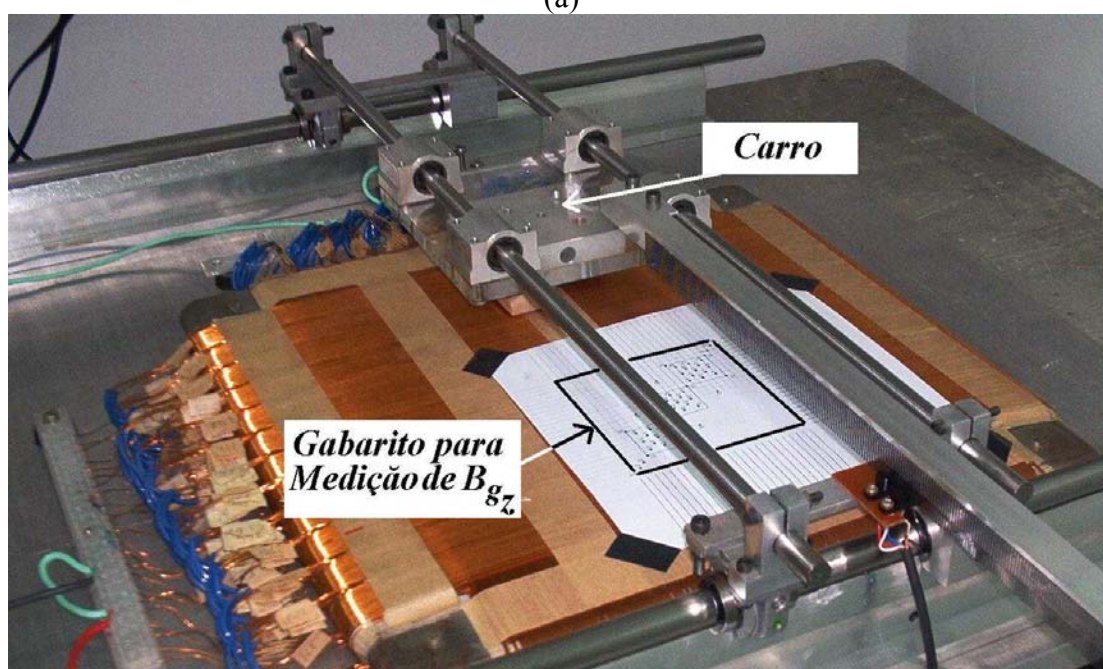


(b)

Figura 6.1 – (a) Montagem para a medição da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético em pontos pré-definidos no entreferro do atuador planar e (b) telas do instrumento virtual desenvolvido para aquisição dos valores de densidade de fluxo magnético e das respectivas correntes.



(a)



(b)

Figura 6.2 - (a) Ponteira de efeito Hall utilizada para a medição dos valores de densidade de fluxo magnético. (b) Fotografia do atuador planar, destacando o gabarito utilizado para medir a componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro. O gabarito possui uma matriz de 625 pontos (25 por 25 pontos) distribuídos simetricamente no plano  $xy$ . As fronteiras do gabarito, marcadas com a linha preta cheia, delimitam uma área equivalente àquela do modelo analítico utilizado no Capítulo 4.

Para avaliar o comportamento da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro do atuador planar, foram realizados os ensaios descritos na tabela 6.1. O valor de 3,0 A foi escolhido por duas razões. Valores superiores a 3,0 A produziram aquecimento significativo nos condutores dos enrolamentos da armadura durante os ensaios. Correntes inferiores a 3,0 A produziram valores de densidade de fluxo magnético que não permitiriam uma avaliação clara do efeito do campo de reação da armadura.

### 6.1.1 Medição da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro para o Caso 1

O ensaio 1 gerou um total de 625 pontos que correspondem aos valores medidos da componente  $z$  do vetor da densidade de fluxo magnético no plano  $xy$ , localizado 8,5 mm acima do núcleo da armadura. A interpolação destes pontos produziu o gráfico 3D mostrado na figura 6.3. A figura 6.4 mostra o detalhe de um dos quadrantes deste gráfico. Os pontos medidos neste ensaio referem-se unicamente à componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético,  $B_{g_z}$ , estabelecida pelo campo magnético dos ímãs permanentes, uma vez que as fases do enrolamento da armadura estão com  $I_a$  igual a zero. O ensaio 2 também gerou 625 pontos referentes à componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético. Durante este ensaio, as fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, foram excitadas com  $I_a = 3,0$  A. Assim, a densidade de fluxo magnético é estabelecida no entreferro pela ação combinada do campo dos ímãs permanentes e do campo de reação da armadura. A figura 6.5 mostra o gráfico 3D resultante da interpolação dos 625 pontos medidos no ensaio 2, e a figura 6.6, o quadrante com predominância de pontos positivos obtidos no mesmo ensaio.

Tabela 6.1 - Descrição dos ensaios para a medição da densidade de fluxo magnético no entreferro do atuador planar.

Ensaio	Descrição
1	Medição de $B_{g_z}$ para o caso 1, com corrente $I_a = 0$
2	Medição de $B_{g_z}$ para o caso 1, com corrente $I_a = 3$ A nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes
3	Medição de $B_{g_z}$ para o caso 2, com corrente $I_a = 0$
4	Medição de $B_{g_z}$ para o caso 2, com corrente $I_a = 3$ A nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes
5	Medição de $B_{g_z}$ através da diagonal sob o carro para o caso 2, com $I_a = 3$ A nas fases dos enrolamentos $x$ e $y$ , localizadas sob os ímãs permanentes

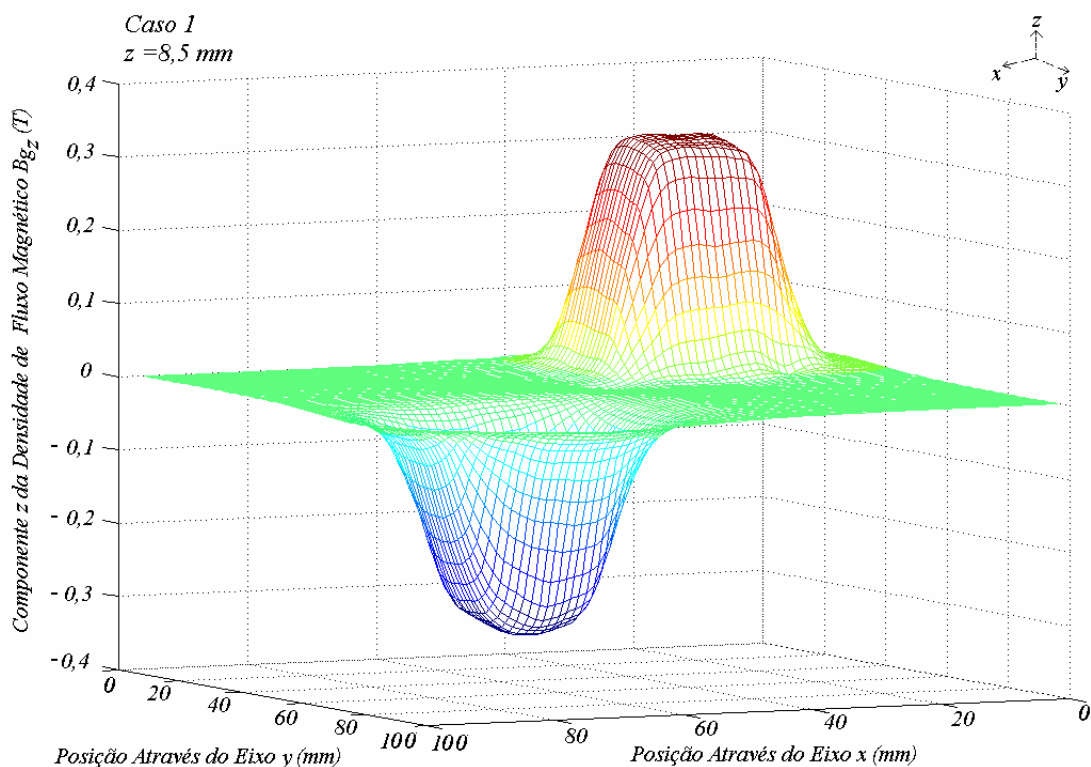


Figura 6.3 - Gráfico 3D resultante da interpolação dos pontos medidos da componente z do vetor densidade de fluxo no entreferro sob o carro no plano  $z = 8,5 \text{ mm}$ , com corrente nula nos enrolamentos da armadura, obtido através do ensaio 1, para o caso 1.

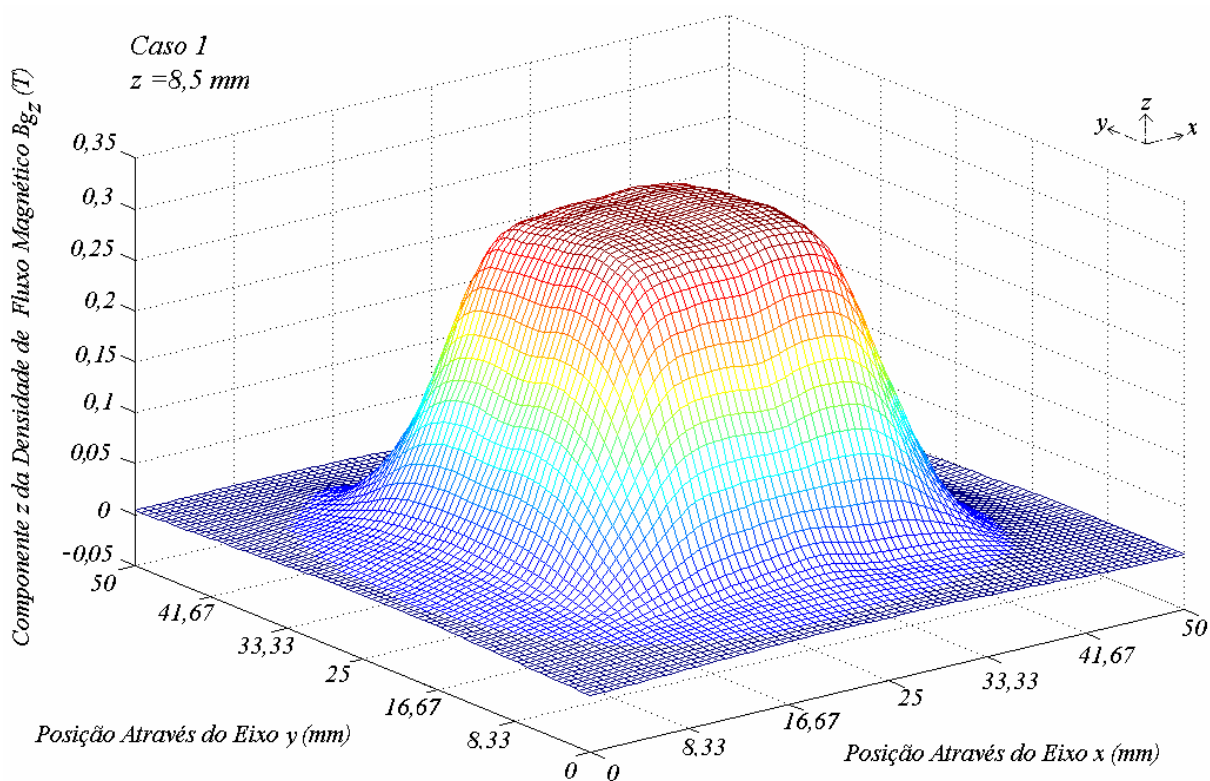


Figura 6.4 – Quadrante positivo do gráfico 3D da figura 6.3.

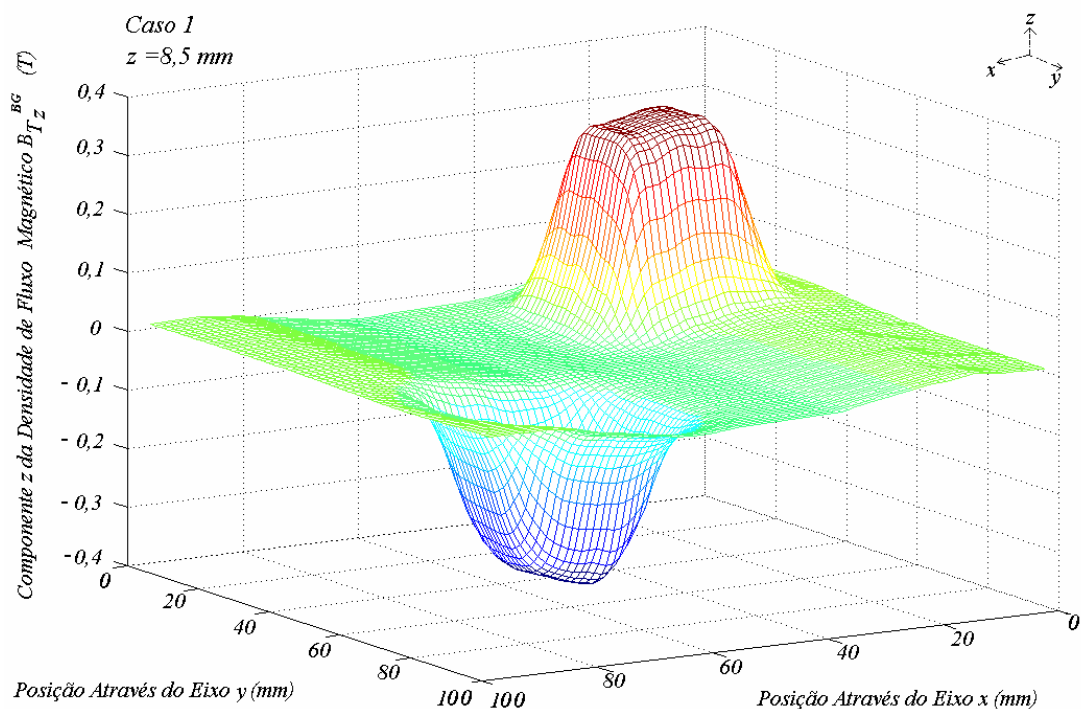


Figura 6.5 - Gráfico 3D resultante da interpolação dos pontos medidos da componente z da densidade de fluxo no entreferro sob o carro no plano  $z = 8,5 \text{ mm}$ , com  $I_a = 3,0 \text{ A}$  nas fases do enrolamento x localizadas sob os ímãs permanentes, obtido através do ensaio 2, para o caso 1.

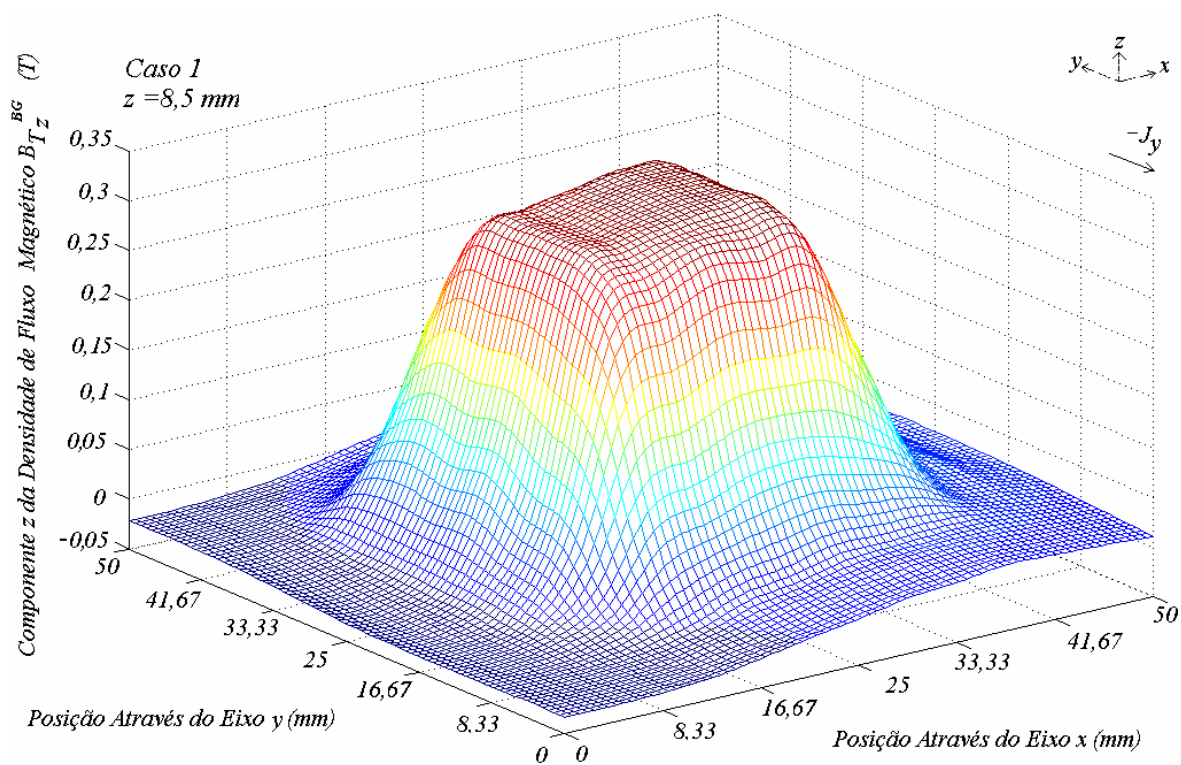


Figura 6.6 – Quadrante predominantemente positivo do gráfico 3D da figura 6.5.

A comparação entre as figuras anteriores permite verificar os efeitos do campo de reação da armadura. Enquanto nos gráficos das figuras 6.3 e 6.4 o fluxo magnético distribui-se sob o entreferro de forma simétrica e uniforme, nos gráficos das figuras 6.5 e 6.6 o fluxo magnético distribui-se de forma não simétrica, apresentando-se distorcido devido ao efeito de reação da armadura.

Os gráficos 2D apresentados a seguir são resultantes dos ensaios 1 e 2. O gráfico da figura 6.7(a) apresenta a componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético, medida através da diagonal sob o carro no plano  $z = 8,5$  mm acima do núcleo da armadura, com  $I_a$  igual a zero. A figura 6.7(b) apresenta o mesmo gráfico, obtido com  $I_a = 3,0$  A nas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes. Verifica-se que a linha diagonal divide o circuito magnético do atuador planar em duas partes simetricamente idênticas sob o ponto de vista geométrico. Os gráficos da figura 6.8 apresentam os pontos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético, medidos ao longo da linha  $l_t / 2$  sob o carro ( $0 \leq x \leq l_t / 2$ ), no plano  $z = 8,5$  mm, com  $y$  igual a 25 mm (linha central do ímã permanente  $l$ ). Em (a), a corrente  $I_a$  é igual a zero e em (b),  $I_a$  é igual a 3,0 A nas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes. A figura 6.9 apresenta os mesmos gráficos da figura 6.8, com  $y$  fixado em 17 mm. Em todos os seis gráficos anteriores também são mostrados os valores gerados através do método analítico descrito no Capítulo 4 e da análise numérica apresentada no Capítulo 5 deste trabalho. Nos modelos teóricos, os valores de densidade de fluxo magnético foram calculados em situações de corrente e de posição equivalentes às daquelas dos ensaios [35] [39] [40].

A tabela 6.2 apresenta os valores da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, obtidos através dos testes, pelo método analítico e pela análise numérica. São apresentados, em cada caso, os valores obtidos na linha central dos ímãs permanentes e os valores médios. A diferença percentual também é apresentada, comparada aos valores medidos. Através da tabela, verifica-se que, com relação aos valores médios, a maior diferença percentual ocorreu entre os valores numéricos e medidos, apresentados no gráfico 6.9(a), sendo igual a 10%. Com relação aos valores medidos na linha central dos ímãs permanentes, a maior diferença percentual ocorreu entre os valores analíticos e medidos apresentados no gráfico 6.8(b), sendo igual a  $-4,87\%$ .

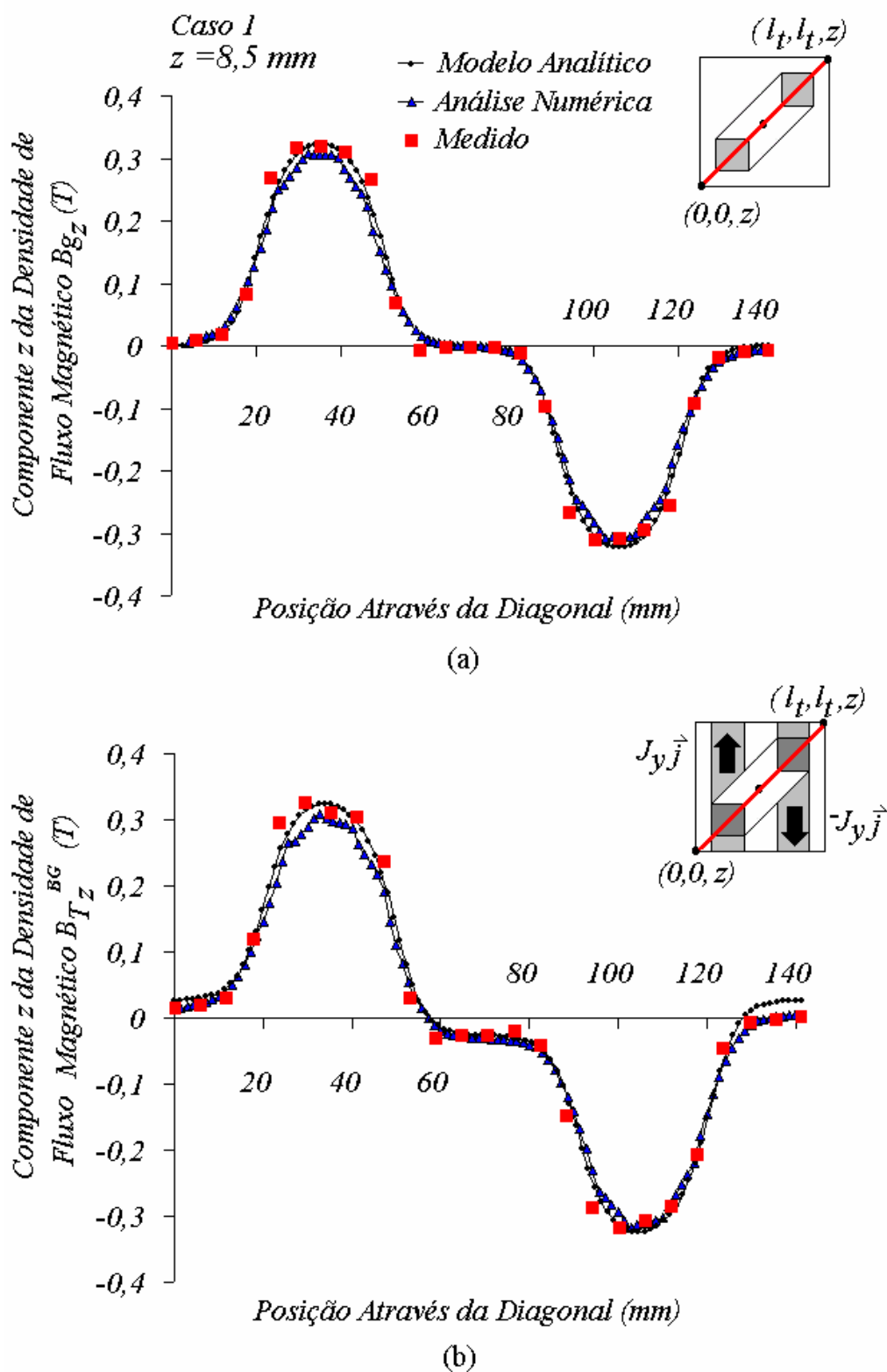


Figura 6.7 –Gráfico da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro vs. a posição através da diagonal sob o carro no plano  $z = 8,5 \text{ mm}$  acima do núcleo da armadura, com (a) corrente nula nas fases dos enrolamentos da armadura e (b) com  $I_a = 3,0 \text{ A}$  nas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, para o caso 1.



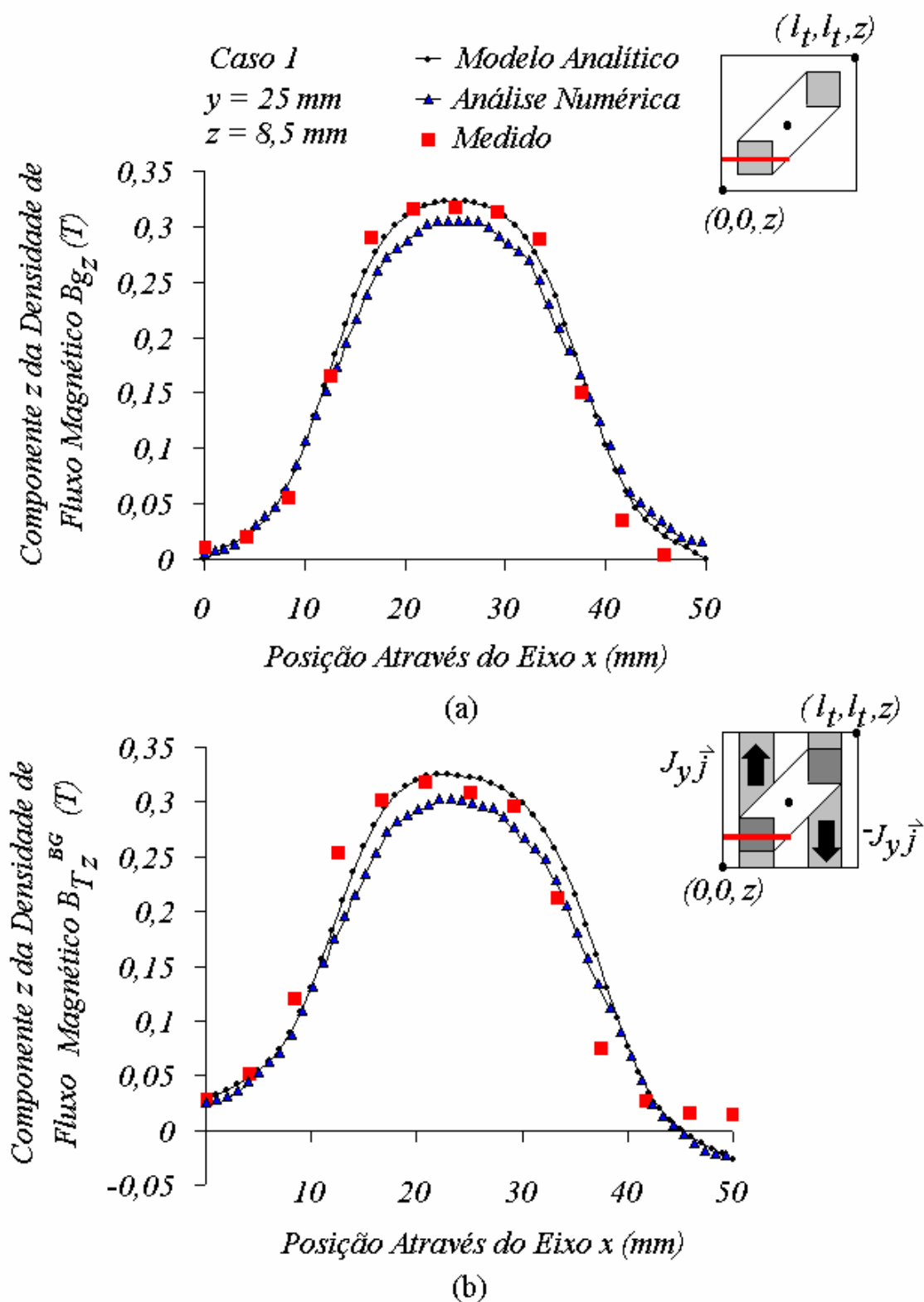


Figura 6.8 - Gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético, medidos ao longo da linha  $l_t/2$  sob o carro ( $0 \leq x \leq l_t/2$ ), no plano  $z = 8,5 \text{ mm}$ , com  $y$  igual a  $25 \text{ mm}$  (linha central do ímã permanente  $I$ ), para o caso 1. Em (a), a corrente  $I_a$  é igual a zero e em (b),  $I_a = 3,0 \text{ A}$  nas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes.

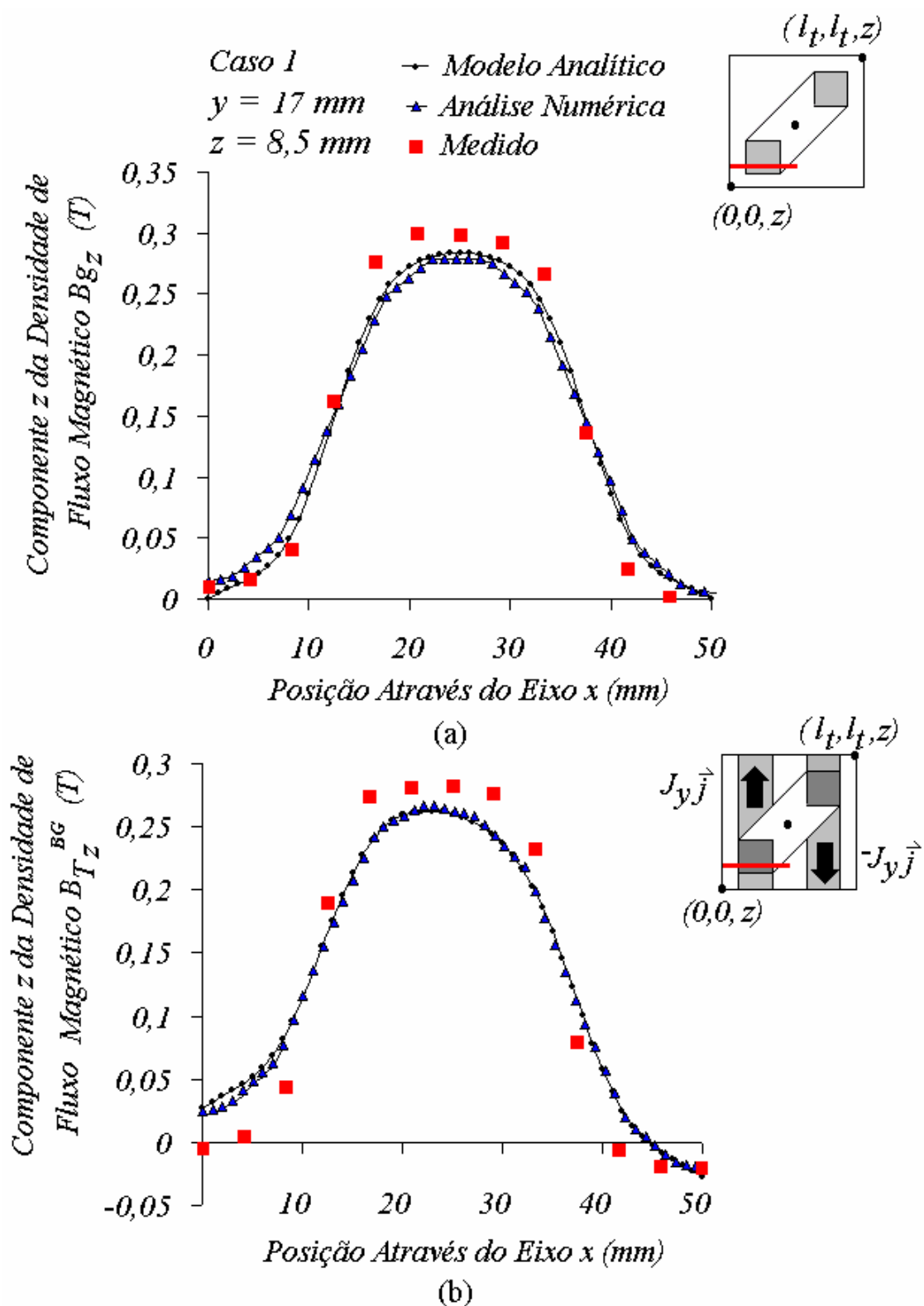


Figura 6.9 - Gráficos da componente z do vetor densidade de fluxo magnético, medidos ao longo da linha  $l_t / 2$  sob o carro ( $0 \leq x \leq l_t / 2$ ), no plano  $z = 8,5 \text{ mm}$ , com  $y$  igual a  $17 \text{ mm}$ ,

para o caso 1. Em (a), a corrente  $I_a$  é igual a zero e em (b),  $I_a = 3,0 \text{ A}$  nas fases do enrolamento x localizadas sob os ímãs permanentes.

Tabela 6.2 - Valores da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, obtidos pelas medições (ensaios 1 e 2), pelo método analítico e pela análise numérica.

Componente z do Vetor Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro Medida no Plano $z = 8,5$ mm – Caso 1												
Valor Médio (T)				Diferença (%)			Valor Medido na Linha Central do Ímã Permanente (T)			Diferença (%)		
				$\frac{B_{Med} - B_{Ana}}{B_{Med}} \cdot 100$	$\frac{B_{Med} - B_{Num}}{B_{Med}} \cdot 100$	$\frac{B_{Med} - B_{Med}}{B_{Med}} \cdot 100$				$\frac{B_{Med} - B_{Ana}}{B_{Med}} \cdot 100$	$\frac{B_{Med} - B_{Num}}{B_{Med}} \cdot 100$	$\frac{B_{Med} - B_{Med}}{B_{Med}} \cdot 100$
Gráfico	Analítico	Numérico	Medido	Analítico	Numérico	Medido	Analítico	Numérico	Medido	Analítico	Numérico	Medido
6.7(a)*	0,1317	0,1274	0,1271	<b>-3,62</b>	<b>-0,23</b>	<b>0</b>	0,323	0,305	0,319	<b>-1,25</b>	<b>4,39</b>	<b>0</b>
6.8(a)	0,1648	0,1595	0,1513	<b>-8,92</b>	<b>-5,41</b>	<b>0</b>	0,323	0,3050	0,3173	<b>-1,79</b>	<b>3,87</b>	<b>0</b>
6.9(a)	0,1438	0,126	0,140	<b>-2,71</b>	<b>10,0</b>	<b>0</b>	-	-	-	-	-	-
6.7(b)*	0,1317	0,1187	0,1232	<b>-6,9</b>	<b>3,65</b>	<b>0</b>	0,323	0,298	0,3115	<b>-3,69</b>	<b>4,33</b>	<b>0</b>
6.8(b)	0,1648	0,153	0,1557	<b>-5,84</b>	<b>1,73</b>	<b>0</b>	0,323	0,301	0,308	<b>-4,87</b>	<b>2,72</b>	<b>0</b>
6.9(b)	0,1483	0,153	0,142	<b>-4,43</b>	<b>-7,75</b>	<b>0</b>	-	-	-	-	-	-

\* Valores médios calculados através de um semicírculo.

### 6.1.2 Medição da Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro para o Caso 2

Os ensaios 3 e 4 geraram, cada um, 625 pontos que correspondem aos valores medidos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no plano  $xy$ , localizado a 8,5 mm acima do núcleo da armadura, para o caso 2. A interpolação dos pontos resultantes do ensaio 3 produziu o gráfico 3D mostrado na figura 6.10. A figura 6.11 mostra o detalhe de um dos quadrantes deste gráfico. Os pontos medidos neste ensaio referem-se unicamente à componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético,  $B_{gz}$ , estabelecida pelo campo magnético dos ímãs permanentes, uma vez que as fases dos enrolamentos da armadura estão com  $I_a$  igual a zero.

A interpolação dos pontos do ensaio 4 gerou o gráfico da figura 6.12. Aqui, os valores medidos referem-se à componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético, estabelecida no entreferro pela ação combinada do campo dos ímãs permanentes e do campo de reação da armadura. Durante este ensaio, as fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, foram excitadas com  $I_a = 3,0$  A. A figura 6.13 mostra o quadrante com predominância de pontos positivos referentes ao mesmo ensaio.

Novamente, a comparação entre as figuras 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13 permite verificar os efeitos do campo de reação da armadura. Enquanto nos gráficos das figuras 6.10 e 6.11 o fluxo magnético distribui-se sob o entreferro de forma simétrica e uniforme, nos gráficos das figuras 6.12 e 6.13 o fluxo magnético distribui-se de forma não simétrica, apresentando-se distorcido devido ao efeito de reação da armadura.

A comparação dos gráficos produzidos pelos ensaios 3 e 4 com aqueles produzidos pelos ensaios 1 e 2 mostra os efeitos da redução do entreferro do atuador planar pelo emprego de ímãs de maior comprimento. Nos gráficos 3D referentes ao caso 2, os valores de pico da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético são mais elevados e sua distribuição tem um formato mais achatado no topo. Este comportamento já tinha sido evidenciado pelos gráficos bidimensionais teóricos apresentados no Capítulo 4 deste trabalho. Os valores medidos confirmaram as tendências quanto ao formato da distribuição da densidade de fluxo magnético do atuador planar, tanto para o caso 1, como para o caso 2. Os gráficos bidimensionais produzidos pelos ensaios 3 e 4 possuem, conforme já mencionado, um topo mais achatado em relação àqueles gerador pelos ensaios 1 e 2.

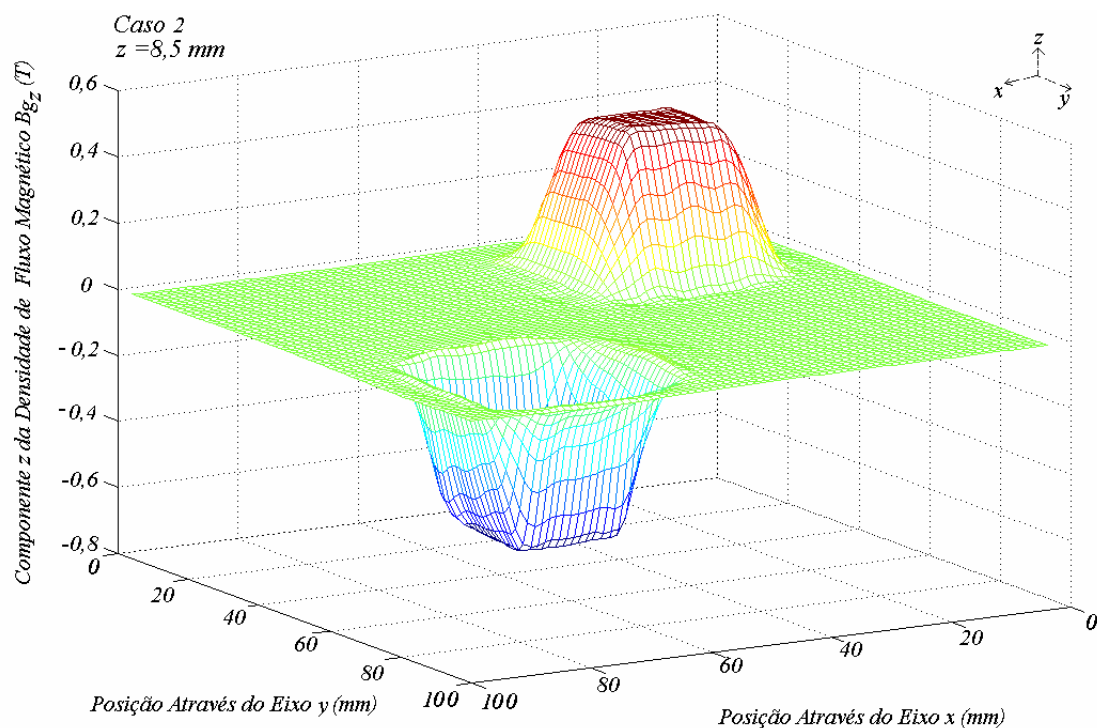


Figura 6. 10 - Gráfico 3D resultante da interpolação dos pontos medidos da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o carro no plano  $z = 8,5 \text{ mm}$  acima do núcleo da armadura, com corrente nula nos enrolamentos da armadura, obtido através do ensaio 3, para o caso 2.

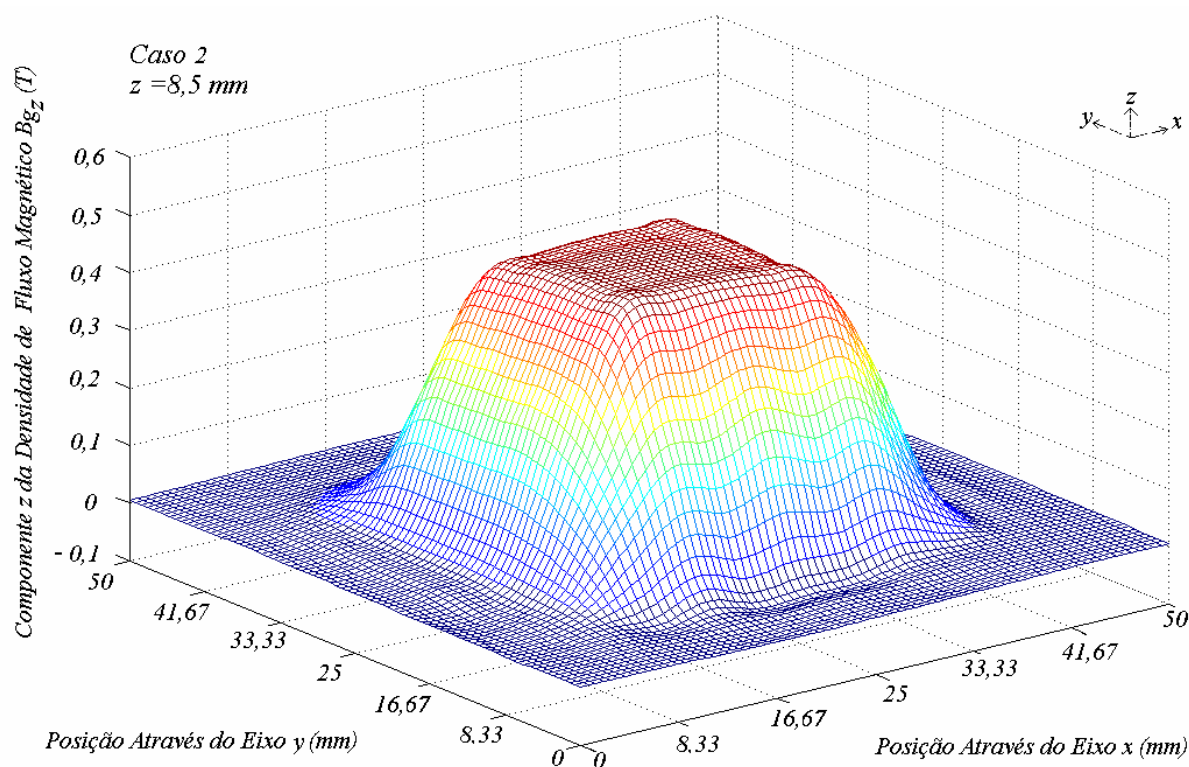


Figura 6.11 – Quadrante positivo do gráfico 3D da figura 6.10.

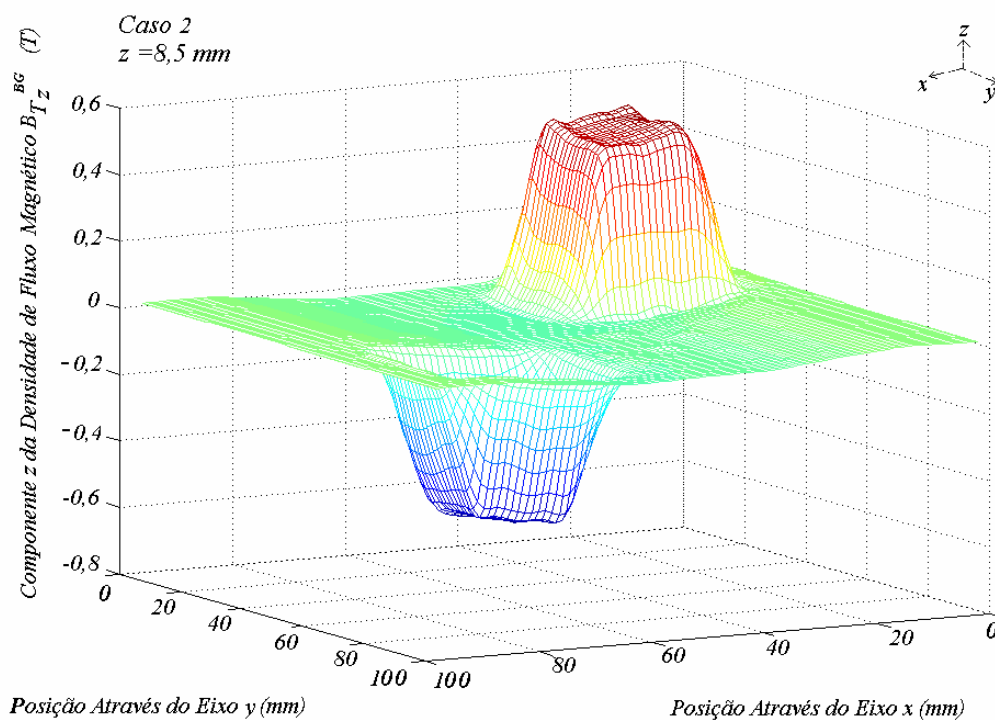


Figura 6.12 - Gráfico 3D resultante da interpolação dos pontos medidos da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro sob o carro no plano  $z = 8,5 \text{ mm}$  acima do núcleo da armadura, com  $I_a = 3,0 \text{ A}$  nas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, obtido através do ensaio 4, para o caso 2.

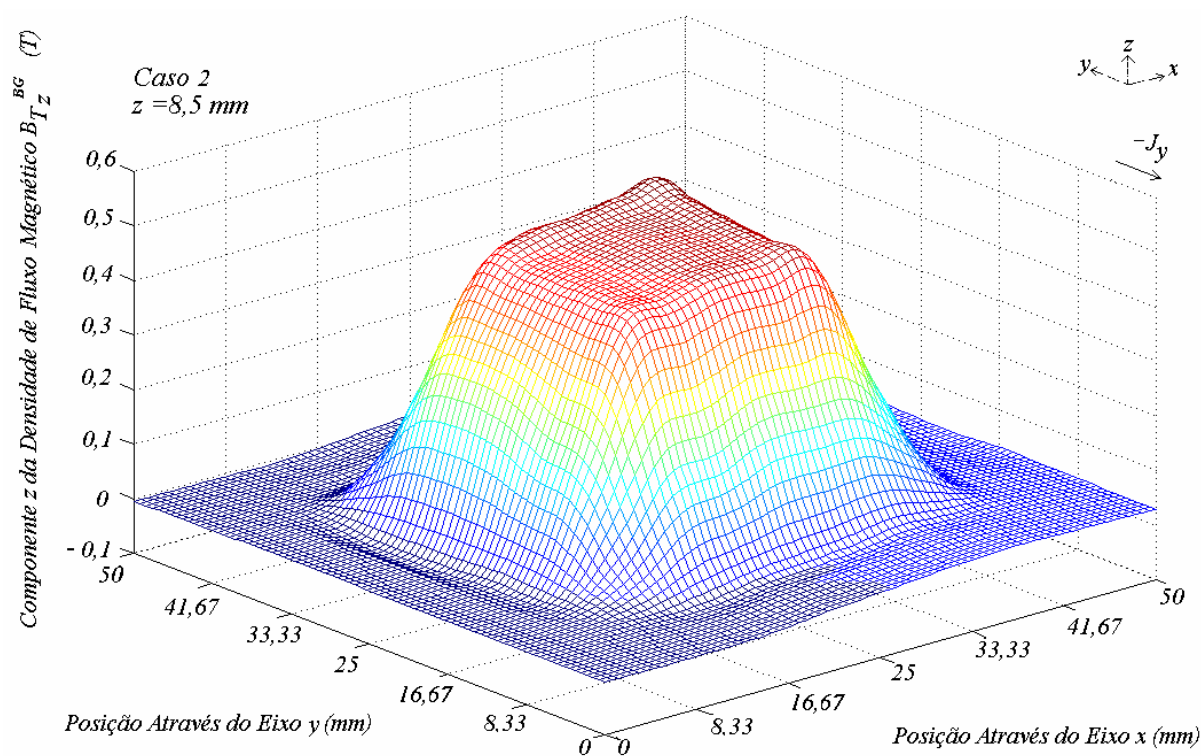


Figura 6.13 - Quadrante positivo do gráfico 3D da figura 6.12.

Os gráficos 2D apresentados a seguir são resultantes dos ensaios 3 e 4. O gráfico da figura 6.14(a) apresenta os pontos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético, medidos através da diagonal sob o carro no plano  $z = 8,5$  mm acima do núcleo da armadura, com  $I_a$  igual a zero. A figura 6.14(b) apresenta o mesmo gráfico, obtido com  $I_a = 3,0$  A nas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes.

Os gráficos da figura 6.15 apresentam os pontos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético, medidos ao longo da linha  $l_t / 2$  sob o carro ( $0 \leq x \leq l_t / 2$ ), no plano  $z = 8,5$  mm, com  $y$  igual a 25 mm (linha central do ímã permanente  $I$ ). Em (a), a corrente  $I_a$  é igual a zero e em (b),  $I_a$  é igual a 3,0 A nas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes. A figura 6.16 apresenta os mesmos gráficos da figura 6.15, com  $y$  fixado em 17 mm. Novamente, em todos os seis gráficos anteriores também são apresentados os valores gerados através do método analítico descrito no Capítulo 4 e da análise numérica apresentada no Capítulo 5 deste trabalho. Nos modelos teóricos, os valores de densidade de fluxo magnético foram calculados em situações de corrente e posição equivalentes àquelas dos ensaios [35] [39] [40].

Adicionalmente aos ensaios 3 e 4, foi realizado o ensaio 5 para a medição da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético através da diagonal sob o carro, com as fases dos enrolamentos  $x$  e  $y$ , localizadas sob os ímãs permanentes, percorridas por 3 A. Neste ensaio, foram gerados 25 pontos que correspondem aos valores da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no plano  $z = 8,5$  mm. A figura 6.17 apresenta o gráfico correspondente ao ensaio 5. Neste gráfico são também apresentados os valores analíticos.

A tabela 6.3 apresenta os valores da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, obtida através dos ensaios, pelo método analítico e pela análise numérica, para o caso 2. São apresentados, em cada caso, os valores medidos na linha central dos ímãs permanentes e os valores médios. A diferença percentual também é apresentada, comparada aos valores medidos. Através da tabela, verifica-se que, com relação aos valores médios, a maior diferença percentual ocorreu entre os valores numérico e medido no gráfico do gráfico 6.16(b), sendo igual a -12,06 %. Com relação aos valores obtidos na linha central dos ímãs permanentes, a maior diferença percentual ocorreu entre os valores numérico e medido apresentados no gráfico 6.14(b), sendo igual a 8,59 %.

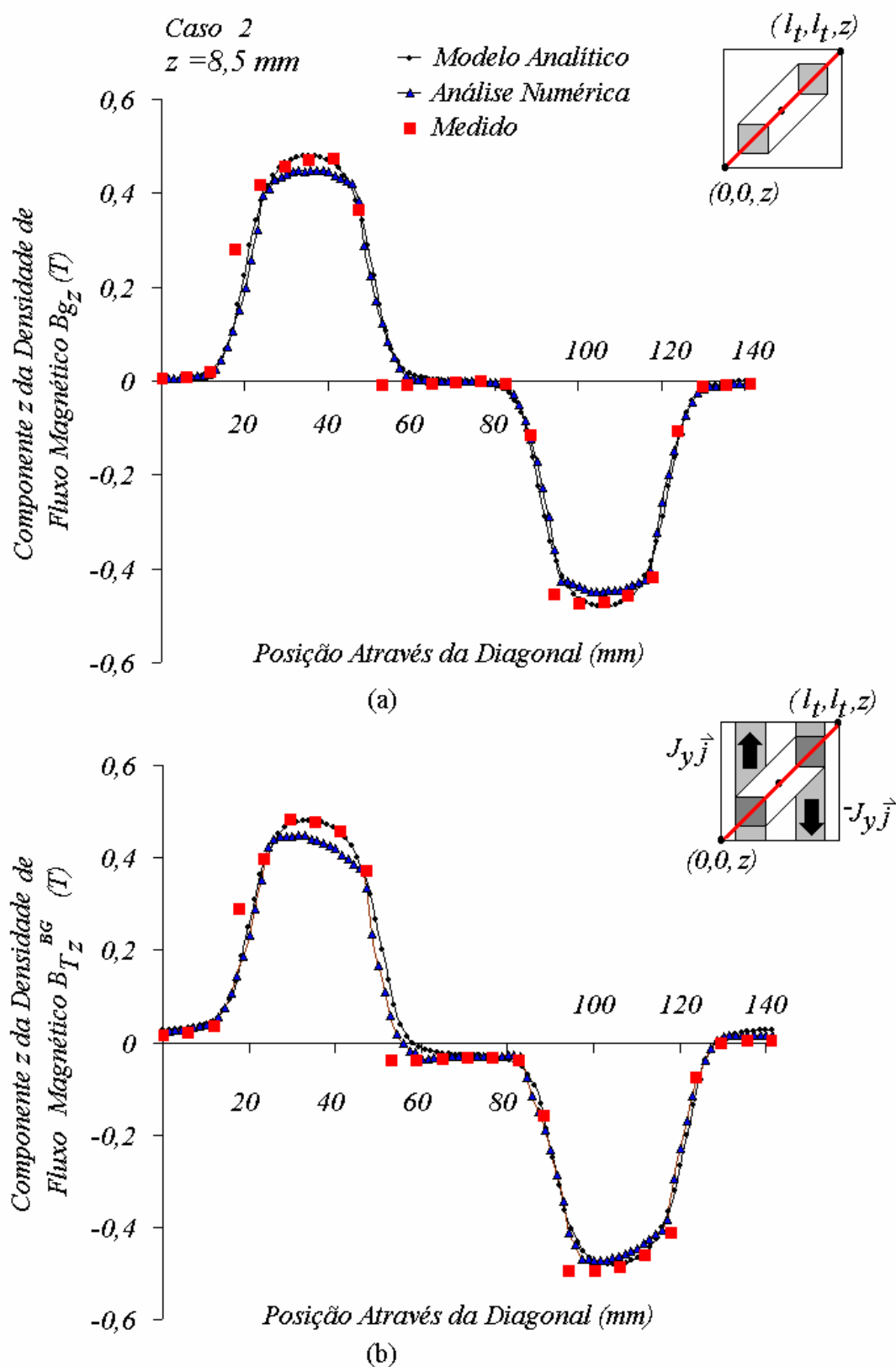


Figura 6.14 –Gráfico da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro vs. a posição através da diagonal sob o carro no plano  $z = 8,5 \text{ mm}$ , para o caso 2, com (a) corrente nula nas fases dos enrolamentos da armadura e (b) com  $I_a$  igual a 3,0 A nas fases de enrolamento x localizadas sob os ímãs permanentes.



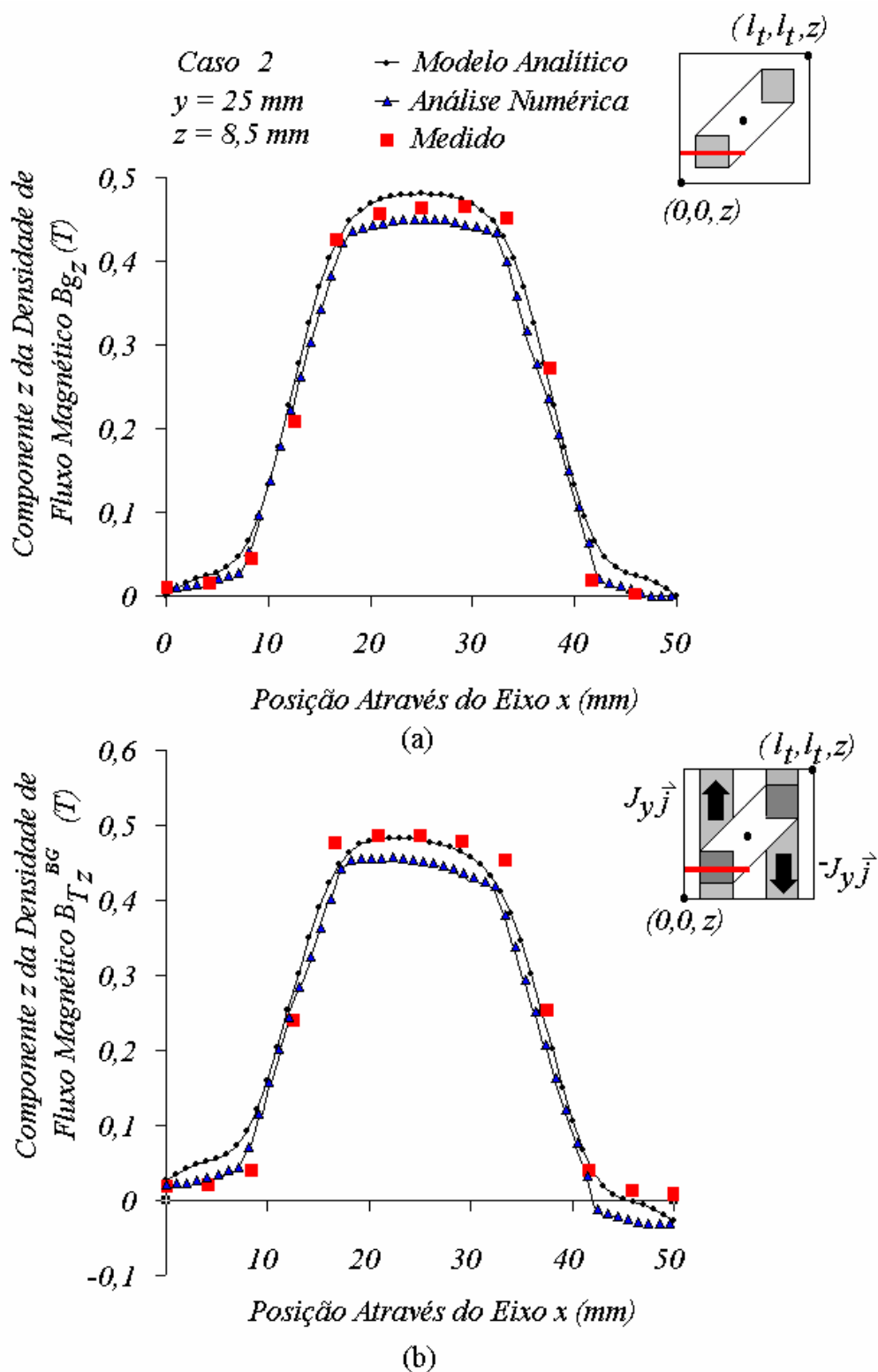


Figura 6.15 - Gráficos da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético, medidos ao longo da linha  $l_t / 2$  sob o carro ( $0 \leq x \leq l_t / 2$ ), no plano  $z = 8,5 \text{ mm}$ , com  $y$  igual a  $25 \text{ mm}$  (linha central do ímã permanente  $l$ ), para o caso 2. Em (a), a corrente  $I_a$  é igual a zero e em (b),  $I_a$  é igual a  $3,0 \text{ A}$  nas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes.

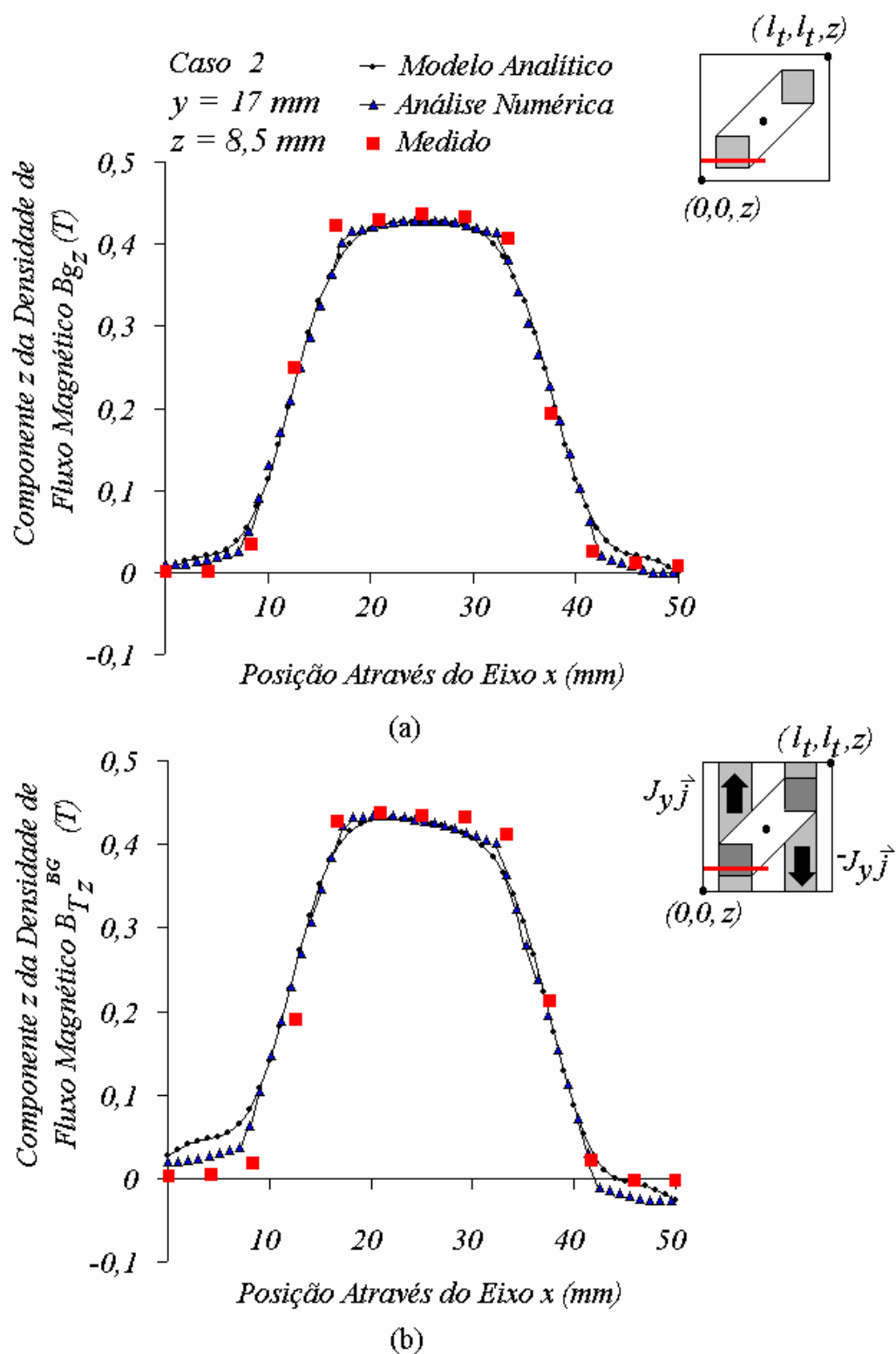


Figura 6.16 - Gráficos da componente z do vetor densidade de fluxo magnético, medidos ao longo da linha  $l_t/2$  sob o carro ( $0 \leq x \leq l_t/2$ ), no plano  $z = 8,5 \text{ mm}$ , com  $y$  igual a  $17 \text{ mm}$ , para o caso 2. Em (a), a corrente  $I_a$  é igual a zero e em (b),  $I_a = 3,0 \text{ A}$  nas fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes.

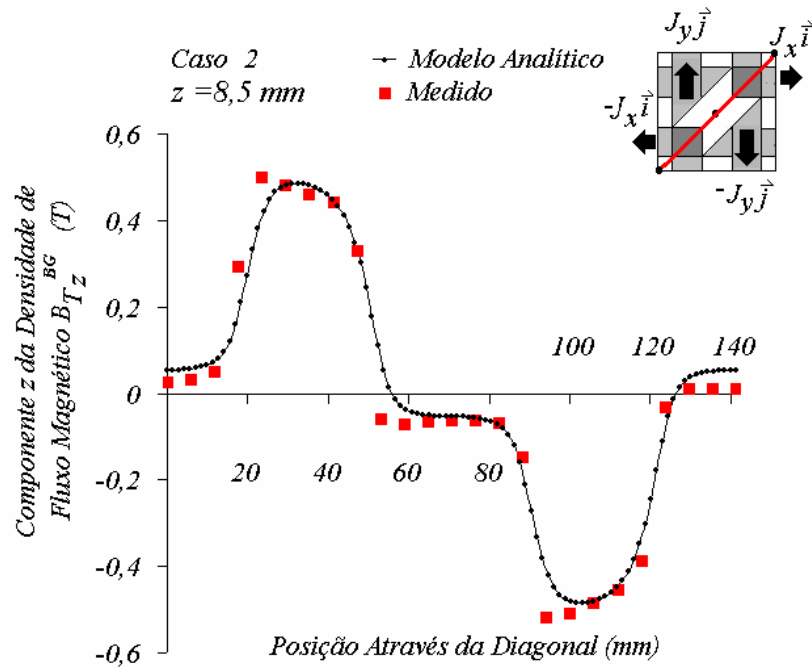


Figura 6.17 – Gráfico da componente  $z$  do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro vs. a posição através da diagonal sob o carro no plano  $z = 8,5$  mm, para o caso 2, com  $I_a = 3,0$  A nas fases do enrolamento  $x$  e do enrolamento  $y$  localizadas sob os ímãs permanentes.

## 6.2 MEDIÇÃO DAS FORÇAS QUE ATUAM SOBRE O CARRO

Este ensaio teve por objetivo caracterizar o comportamento estático do atuador planar com relação às forças que atuam sobre seu carro. Para a medição dos valores da força normal e da força planar de propulsão, foram empregadas células de carga. As medições foram feitas com e sem corrente aplicada às fases do enrolamento  $x$  do atuador planar localizadas sob os ímãs permanentes do carro.

### 6.2.1 Medição da Força Planar de Propulsão

Os valores de força planar de propulsão foram obtidos através da medição das forças que atuaram sobre as células de carga dispostas conforme mostra a figura 6.18. A célula de carga  $F_x$  foi utilizada para a medição da força planar desenvolvida sobre o carro, quando as fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, foram excitadas por corrente, ou seja, para medir a componente  $F_x$  da equação (4.118). A célula de carga  $F_y$  foi utilizada para a medição da componente  $F_y$  da mesma equação, e que resulta da excitação por corrente das fases do enrolamento  $y$ , que estão localizadas sob os ímãs permanentes.

Tabela 6.3 - Valores da componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro, obtidos pelas medições (ensaios 3, 4 e 5), pelo método analítico e pela análise numérica.

Componente z do Vetor Densidade de Fluxo Magnético no Entreferro Medida no Plano z = 8,5 mm – Caso 2												
Gráfico	Valor Médio (T)			Diferença (%)			Valor Medido na Linha Central do Ímã Permanente (T)			Diferença (%)		
				$\frac{B_{Med} - B_{Ana}}{B_{Med}} \cdot 100$	$\frac{B_{Med} - B_{Num}}{B_{Med}} \cdot 100$	$\frac{B_{Med} - B_{Med}}{B_{Med}} \cdot 100$				$\frac{B_{Med} - B_{Ana}}{B_{Med}} \cdot 100$	$\frac{B_{Med} - B_{Num}}{B_{Med}} \cdot 100$	$\frac{B_{Med} - B_{Med}}{B_{Med}} \cdot 100$
	Analítico	Numérico	Medido	<b>Analítico</b>	<b>Numérico</b>	<b>Medido</b>	Analítico	Numérico	Medido	<b>Analítico</b>	<b>Numérico</b>	<b>Medido</b>
6.14(a)*	0,2011	0,192	0,190	<b>-5,84</b>	<b>-1,05</b>	<b>0</b>	0,4802	0,447	0,469	<b>-2,39</b>	<b>4,69</b>	<b>0</b>
6.15(a)	0,2433	0,227	0,218	<b>-11,61</b>	<b>-4,12</b>	<b>0</b>	0,4802	0,449	0,464	<b>-3,49</b>	<b>3,23</b>	<b>0</b>
6.16(a)	0,2161	0,214	0,205	<b>-5,41</b>	<b>-4,39</b>	<b>0</b>	-	-	-	-	-	-
6.14(b)*	0,2011	0,2057	0,185	<b>-8,7</b>	<b>-11,19</b>	<b>0</b>	0,4802	0,436	0,477	<b>-0,67</b>	<b>8,59</b>	<b>0</b>
6.15(b)	0,2433	0,246	0,232	<b>-4,87</b>	<b>-6,03</b>	<b>0</b>	0,4802	0,451	0,487	<b>1,39</b>	<b>7,39</b>	<b>0</b>
6.16(b)	0,2161	0,223	0,199	<b>-8,59</b>	<b>-12,06</b>	<b>0</b>	-	-	-	-	-	-
6.17*	0,2011	-	0,181	<b>-11,10</b>	-	<b>0</b>	0,4802	-	0,461	<b>-4,16</b>	-	<b>0</b>

\* Valores médios calculados através de um semicírculo.

Através da figura 6.18 pode ser verificado que cada uma das células de carga está fixada a um suporte. Cada célula de carga é mantida com seu eixo na horizontal, fixada entre o suporte e uma das laterais do carro. Quando as fases localizadas sob os ímãs permanentes são excitadas por corrente, uma força mecânica de origem eletromagnética atuará sobre o carro. O carro está fixado às células de carga, que sofrem deformações transformadas em variações de resistência elétrica em extensômetros de resistência elétrica. Estes extensômetros estão colados às células de carga. Durante o ensaio, um condicionador recebe o sinal de tensão proveniente das células de carga e o condiciona para um nível adequado à leitura de força. Novamente, através do emprego de um instrumento virtual, é possível obter os valores de força planar de propulsão e da respectiva corrente aplicada às fases dos enrolamentos da armadura de forma simultânea. Durante o ensaio, quando está sendo medida apenas uma das componentes da força planar total, o carro é fixado apenas à célula de carga utilizada nessa medição. A outra célula de carga não é removida de seu suporte, no entanto, o carro não é fixado a ela, para evitar interferências durante as medições.

Por exemplo, para a medição da componente  $x$  da força planar de propulsão, o carro é fixado à célula de carga  $F_x$  através de sua parede lateral. As fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes são excitadas com valores de corrente adequados. Conforme o sentido da força eletromagnética produzida entre os condutores do enrolamento da armadura e o campo magnético dos ímãs permanentes, a célula de carga tipo  $s$  sofrerá compressão ou tração. A intensidade da força depende também do valor da corrente aplicada às fases do enrolamento. Para cada valor de corrente, é feita a aquisição simultânea do valor respectivo da força. A figura 6.19 mostra as telas do instrumento virtual empregado para a aquisição dos valores de força e de corrente.

A fotografia apresentada na figura 6.20 mostra o atuador planar, destacando a localização das duas células de carga utilizadas para a medição das duas componentes da força planar de propulsão. Como pode ser verificado pela fotografia, durante o ensaio, para a caracterização estática da força planar, o carro foi mantido estático. Para a caracterização estática da força planar de propulsão, o atuador planar foi ensaiado para os casos 1 e 2. A tabela 6.4 relaciona os ensaios realizados.

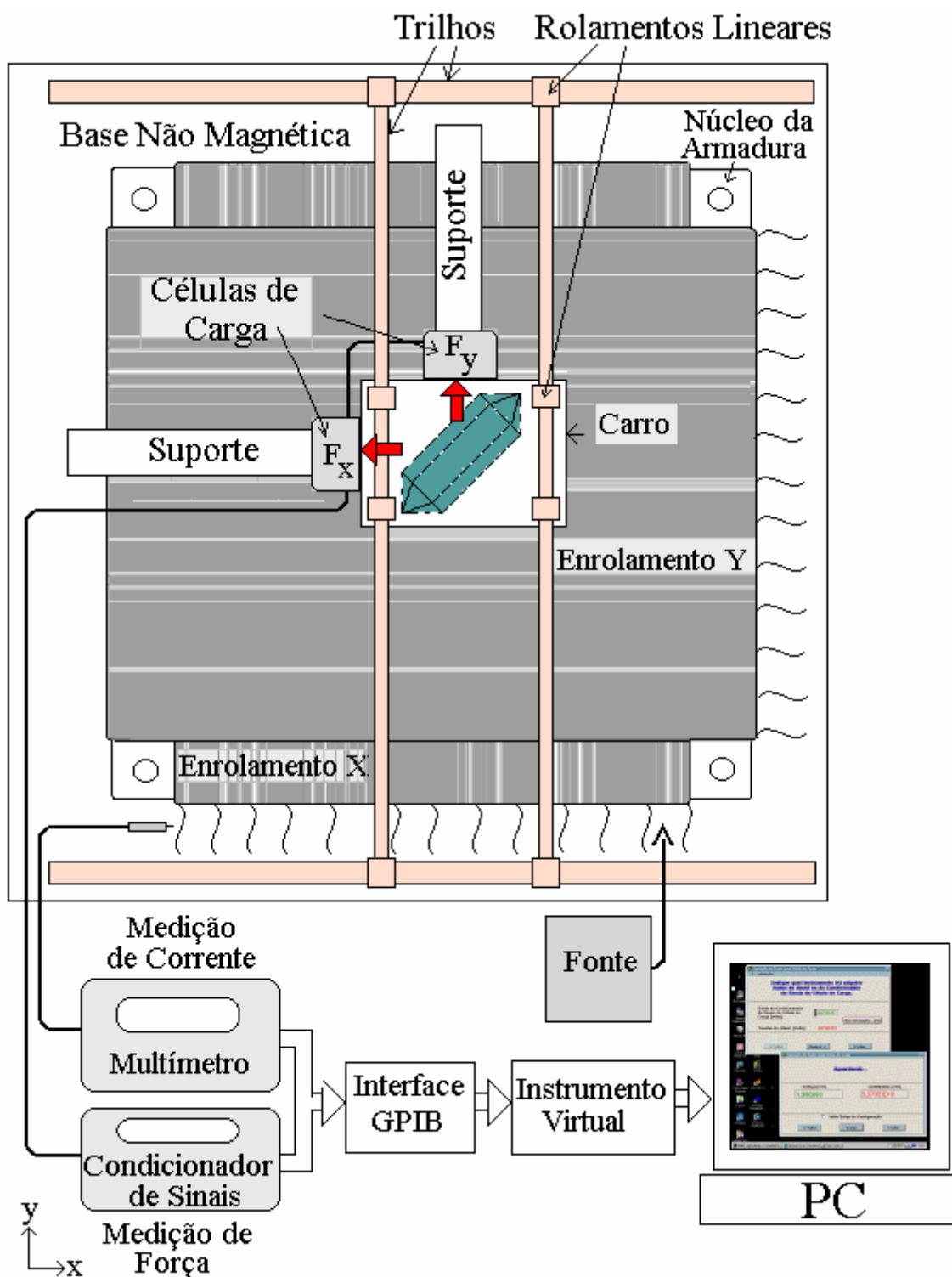


Figura 6.18 - Montagem para a medição da força planar de propulsão que atua sobre o carro do atuador planar. A célula de carga  $F_x$  é utilizada para a medição da componente  $F_x$ , produzida pela excitação das fases do enrolamento x, que estão localizadas sob os ímãs permanentes. A célula de carga  $F_y$  é utilizada para a medição da componente  $F_y$ , produzida pela excitação das fases do enrolamento y, que estão localizadas sob os ímãs permanentes.

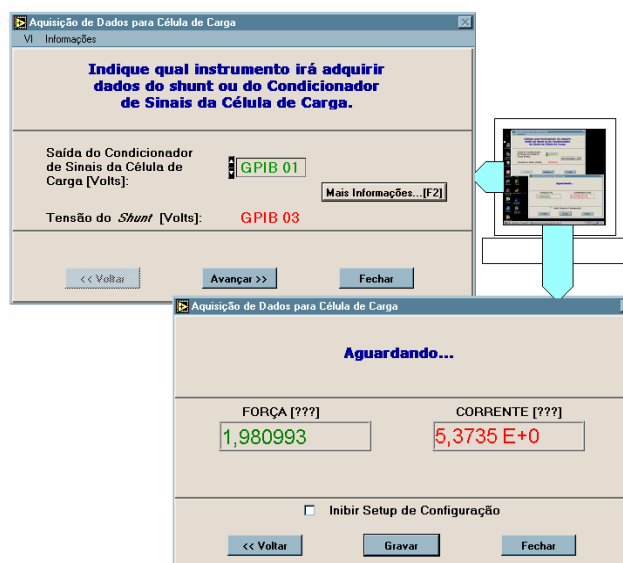


Figura 6.19 - Telas do instrumento virtual empregado para a aquisição dos valores de força e de corrente.

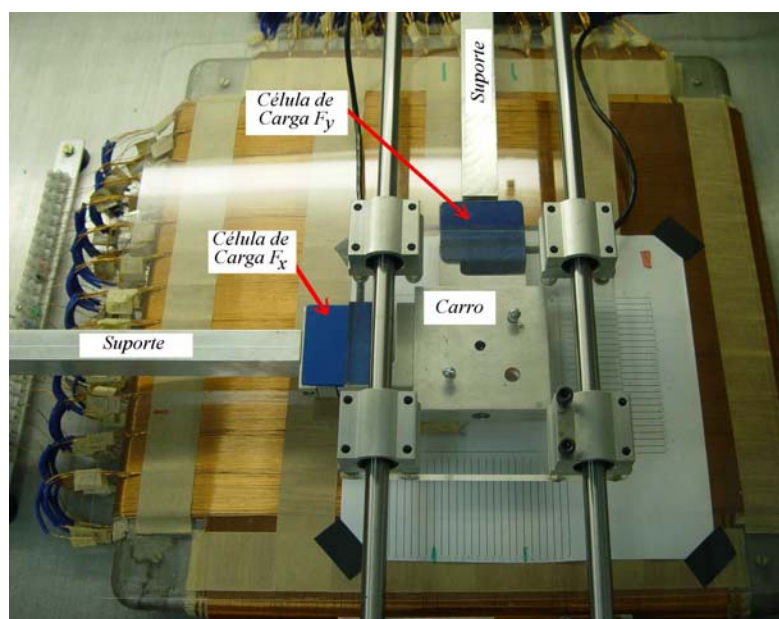


Figura 6.20 - Fotografia da montagem para a medição da força planar de propulsão.

Tabela 6.4 –Descrição dos ensaios para a medição da força estática planar de propulsão.

Ensaio	Descrição
1	Medição da força planar para o caso 1, com corrente nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes.
2	Medição da força planar para o caso 1, com corrente nas fases dos enrolamentos $x$ e $y$ localizadas sob os ímãs permanentes.
3	Medição da força planar para o caso 2, com corrente nas fases do enrolamento $x$ localizadas sob os ímãs permanentes.
4	Medição da força planar para o caso 2, com corrente nas fases dos enrolamentos $x$ e $y$ localizadas sob os ímãs permanentes.

O gráfico apresentado na figura 6.21(a), refere-se ao ensaio 1, resultante da medição da componente  $x$  da força planar de propulsão,  $F_x$ , em função da corrente aplicada a cada uma das fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, para o caso 1. O gráfico da figura 6.21(b) apresenta os valores da força total que atua diagonalmente sobre o carro, como resultado da excitação por corrente das fases dos enrolamentos  $x$  e  $y$  localizadas sob os ímãs permanentes também para o caso 1. No primeiro gráfico também são apresentados os valores da força planar de propulsão obtidos através das simulações, empregando o Tensor de Força de Maxwell, e os valores analíticos calculados pela equação (4.118). No segundo gráfico são apresentados os valores medidos e os valores analíticos. Na figura 6.22 são mostrados os mesmos gráficos para o caso 2.

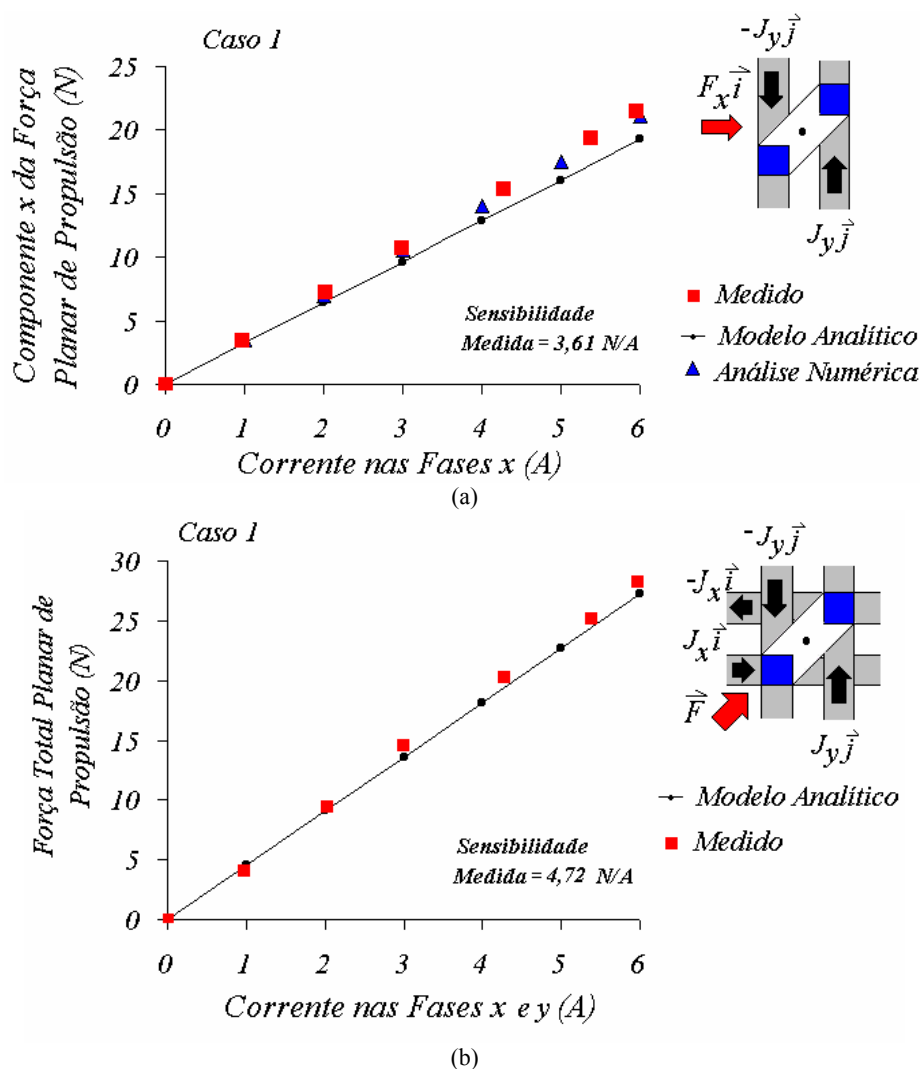
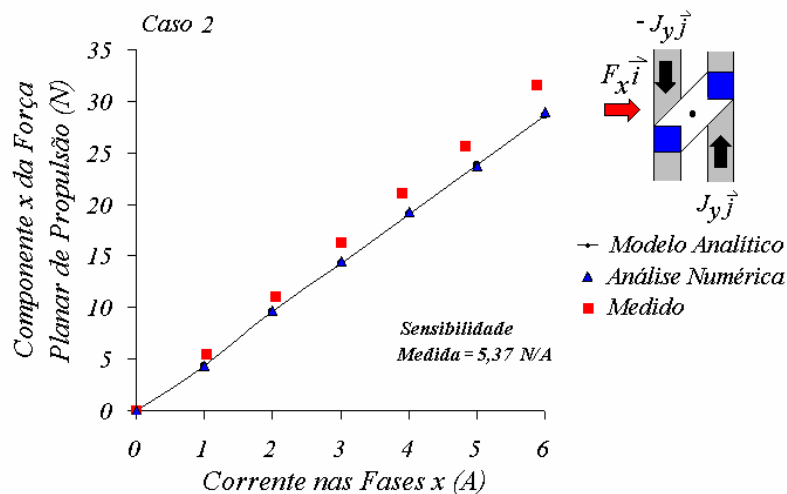


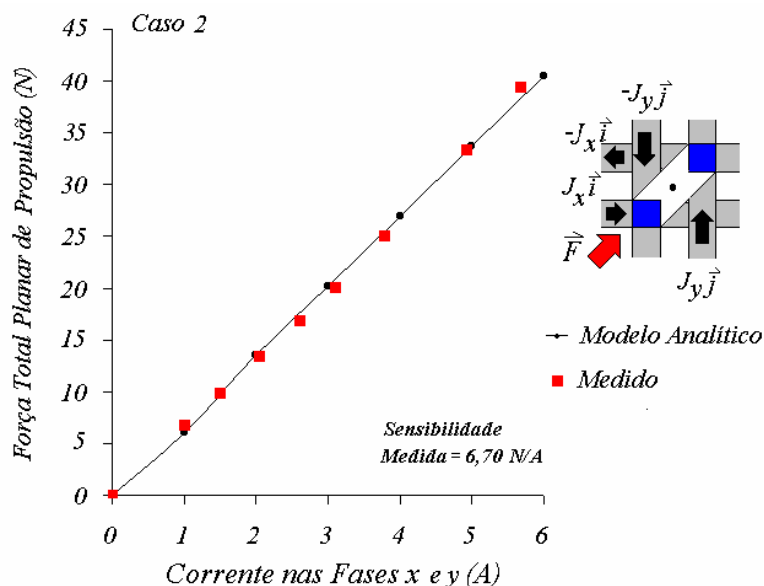
Figura 6.21 – (a) Gráfico da componente  $x$  da força planar de propulsão,  $F_x$ , em função da corrente aplicada a cada uma das fases do enrolamento  $x$  e (b) gráfico da força que atua sobre o carro, resultante da excitação por corrente das fases dos enrolamentos  $x$  e  $y$ .

Ambos os gráficos referem-se ao caso 1.





(a)



(b)

Figura 6.22 – (a) Gráfico da componente  $x$  da força planar de propulsão,  $F_x$ , em função da corrente aplicada a cada uma das fases do enrolamento  $x$  e (b) gráfico da força planar que atua sobre o carro, resultante da excitação por corrente das fases dos enrolamentos  $x$  e  $y$ . Ambos os gráficos referem-se ao caso 2.

A tabela 6.5 apresenta os valores da sensibilidade média da força planar de propulsão, obtidos através das medições, do modelo analítico e da análise numérica. Através desta tabela, verifica-se que, com relação à sensibilidade, os valores medidos e os valores gerados pelos modelos teóricos possuem pequenas diferenças. A maior diferença ocorreu entre os valores analíticos e os valores medidos apresentados no gráfico 6.22(a), sendo igual a  $-11,73\%$ .

Tabela 6.5 – Valores da sensibilidade média da força planar obtidos através da análise numérica (Tensor de Força de Maxwell), através da equação da Força de Lorentz (4.118) e através das medições.

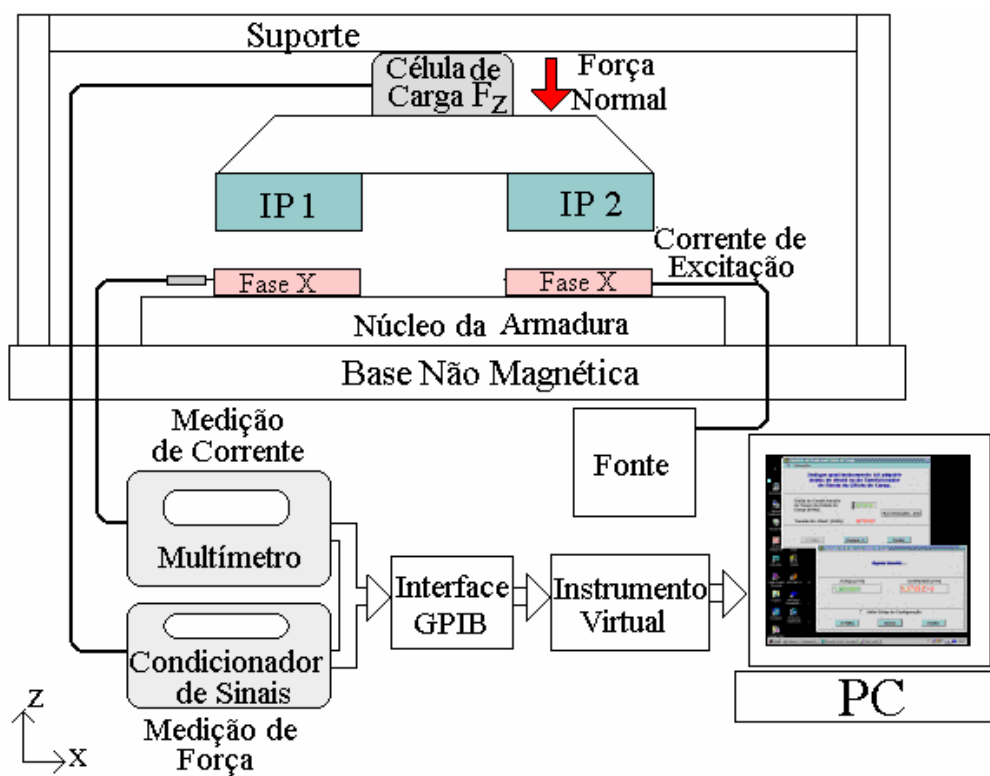
Gráfico	Sensibilidade Média (N/A)			Diferença (%)		
	Analítico	Numérico	Medido	Analítico	Numérico	Medido
6.21(a)	3,21	3,51	3,61	<b>11,1</b>	<b>2,77</b>	<b>0</b>
6.21(b)	4,54	-	4,72	<b>3,81</b>	-	<b>0</b>
6.22(a)	4,74	4,78	5,37	<b>11,73</b>	<b>10,99</b>	<b>0</b>
6.22(b)	6,71	-	6,70	<b>-0,15</b>	-	<b>0</b>

### 6.2.2 Medição da Força Normal

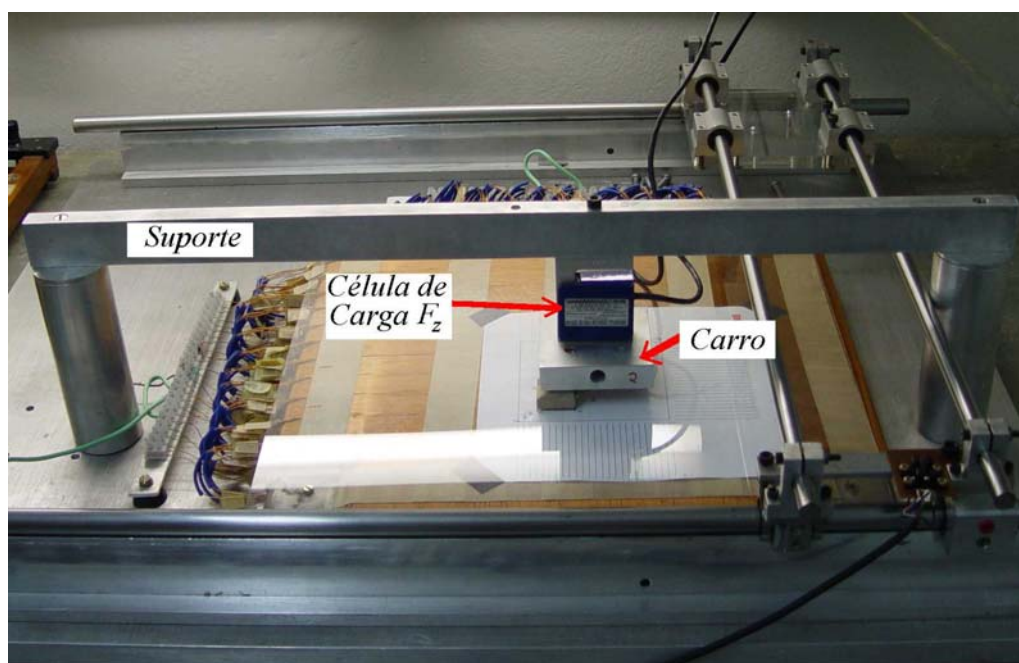
Os valores de força normal foram obtidos através da medição da força de tração que atuou sobre a célula de carga  $F_z$ , disposta conforme mostra o esquema da figura 6.23(a). A fotografia da figura 6.23(b) mostra a montagem para medição da força normal. Durante o ensaio, o carro foi mantido fixado à estrutura que aparece nesta figura. A célula de carga tipo  $s$  é mantida na vertical, fixada ao suporte estático através de sua superfície superior. A superfície inferior da célula de carga é fixada à superfície superior do carro. Com o carro posicionado conforme mostra a figura 6.23(a), a célula de carga será submetida à tração, devido à força de atração que existe entre os ímãs permanentes e o núcleo da armadura. Com a aplicação de corrente às fases dos enrolamentos localizadas sob os ímãs permanentes, esta força aumenta, em função do aumento da densidade de fluxo magnético no entreferro.

Durante os ensaios foram medidos os valores de força que atuaram sobre o carro em função da corrente aplicada às fases do enrolamento  $x$  da armadura localizadas sob os ímãs permanentes. Nos testes foi utilizado o mesmo instrumento virtual empregado para a caracterização da força planar de propulsão. Assim, os valores da força normal e os respectivos valores de corrente foram adquiridos de forma automática e simultânea. Novamente, os ensaios foram realizados para os casos 1 e 2. A figura 6.24 mostra o gráfico da força normal que atuou sobre o carro, em função da corrente aplicada às fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, para o caso 1, e a figura 6.25, o mesmo tipo de gráfico para o caso 2. Para o caso 1, os testes indicaram que uma força normal de 17,73 N atuará sobre o carro quando a corrente no enrolamento da armadura for igual a zero. Quando as fases do enrolamento  $x$  localizadas sob os ímãs permanentes, foram alimentadas por uma corrente de 6,24 A, a força normal medida foi igual a 21,27 N. Com relação ao caso

2, os testes indicaram que uma força normal de 40,13 N atuará sobre o carro, quando a corrente for igual a 6,0 A. Com corrente nula, a força normal medida é igual a 34,21 N.



(a)



(b)

Figura 6.23 – (a) Montagem para a medição da força normal e (b) fotografia da montagem para medição da força normal.

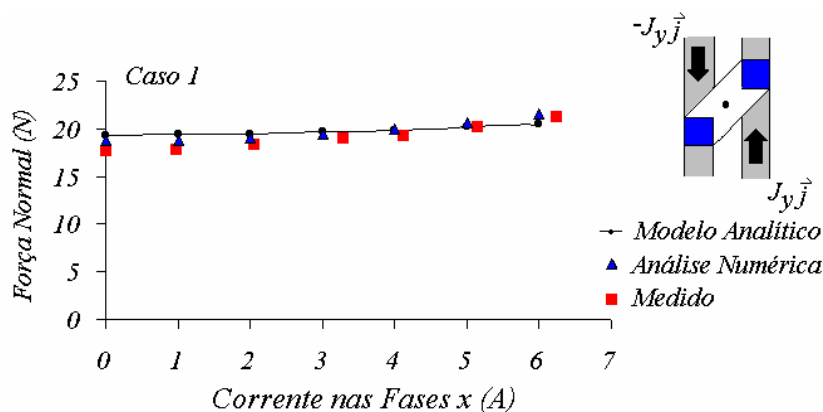


Figura 6.24 - Gráfico da força normal que atua sobre o carro, em função da corrente aplicada às fases do enrolamento  $x$  da armadura localizadas sob os ímãs permanentes, para o caso 1.

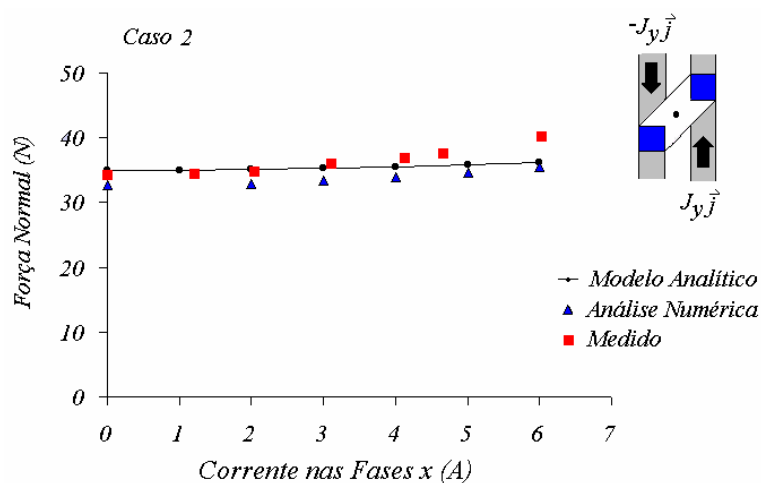


Figura 6.25 - Gráfico da força normal que atua sobre o carro, em função da corrente aplicada às fases do enrolamento  $x$  da armadura localizadas sob os ímãs permanentes, para o caso 2.

### 6.3 MEDIÇÃO DE DESLOCAMENTO DO CARRO

Neste ensaio, o carro do atuador planar foi mantido livre para deslocar-se a partir da excitação das fases do enrolamento  $y$  localizadas sob os ímãs permanentes. O objetivo foi o de verificar qual a nova posição assumida pelo carro sobre o plano, em função da corrente aplicada às fases do enrolamento  $y$  e em função da duração do pulso de tensão aplicado às mesmas. Este ensaio foi realizado apenas para o caso 2. Para a execução deste ensaio, foi utilizado um sensor de posição, que permitiu a aquisição do tempo de deslocamento do carro e o valor deste deslocamento sobre o eixo  $y$ . A figura 6.26 mostra o esquema de montagem para a medição de deslocamento do atuador planar. A figura 6.27(a) mostra o detalhe do sensor de posição e a figura 6.27(b) a localização da régua reticulada e do sensor de

posição em relação ao atuador planar. O sistema de detecção de posição do carro é composto por uma régua reticulada com seus retículos espaçados entre si de 1,0 mm, um sensor ótico infravermelho, com sua saída adquirida via porta paralela de um microcomputador, e um software de manipulação dos dados. As informações de posição, adquiridas via porta paralela, são interpretadas e os valores de posição vs. tempo são gravados em um arquivo e mostrados na tela, permitindo ainda a obtenção de valores instantâneos de velocidade e aceleração. A aquisição de corrente foi feita através de um multímetro digital. Primeiramente, regulou-se a duração do pulso de tensão para 180 ms. O módulo deste pulso foi regulado para que produzisse o valor de corrente desejado nas fases envolvidas no ensaio. A partir da aplicação do pulso de tensão às duas fases do enrolamento  $y$  localizadas sob os ímãs permanentes, o carro deslocou-se até uma nova posição. Após, obteve-se o valor do deslocamento do carro através do eixo  $y$  e a respectiva duração deste deslocamento. O ensaio foi repetido para outros valores de corrente. Após, os ensaios foram repetidos com a duração do pulso de tensão fixado em 220 ms. A tabela 6.6 apresenta os resultados das medições de deslocamento do carro.

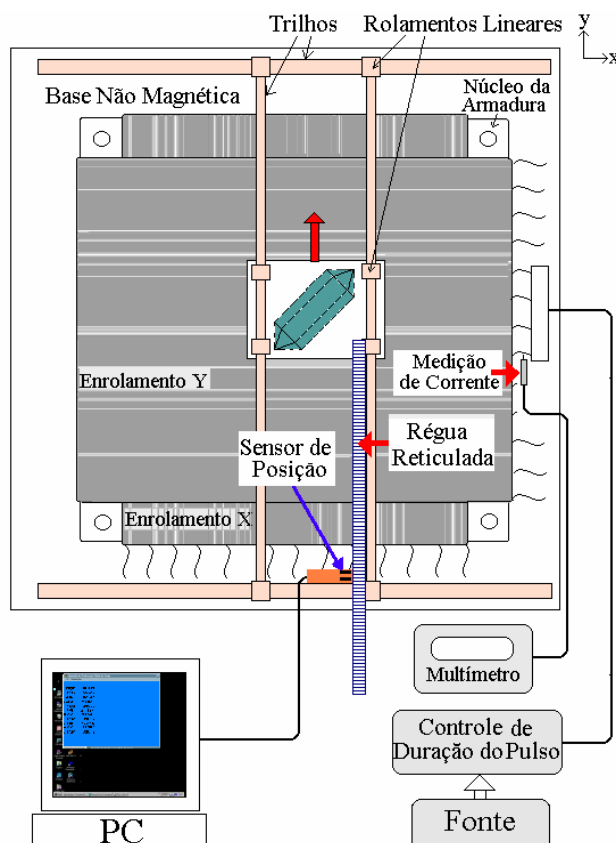
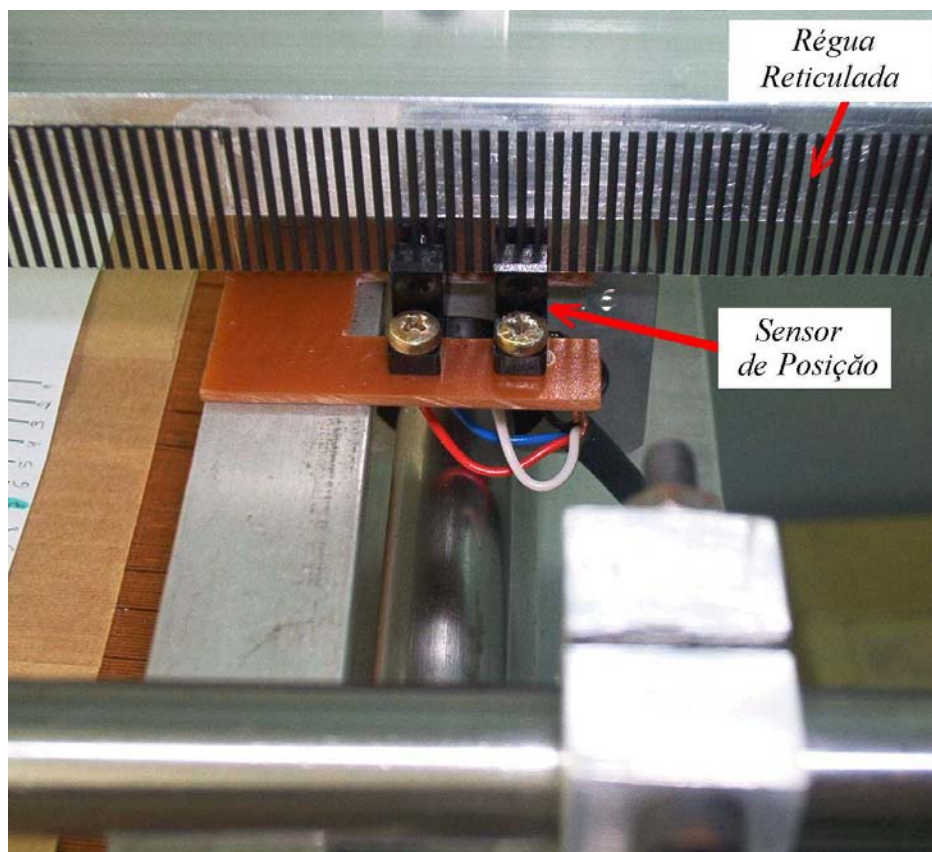
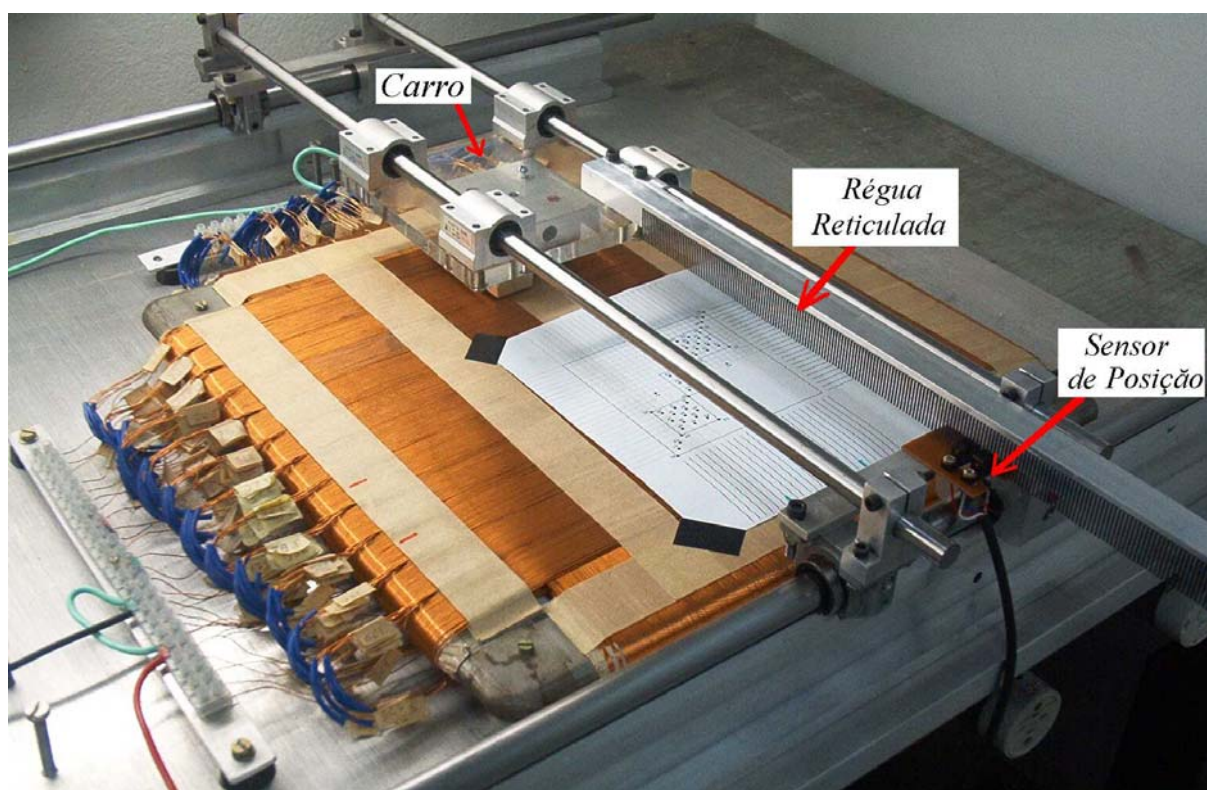


Figura 6.26 - Esquema de montagem para a medição de deslocamento do carro do atuador planar.



(a)



(b)

Figura 6.27 – (a) Detalhe do sistema de detecção de posição do carro e (b) localização da régua reticulada e do sensor de posição em relação ao atuador planar.

Tabela 6.6 - Medidas de deslocamento do carro.

Corrente (A)	Tempo do pulso de excitação [ms]	Tempo de deslocamento do carro [ms]	Deslocamento [mm]	Observações:
1	220	297	76	<b>Tempo de deslocamento mais rápido</b>
1,5	220	512	126	
2	220	335	105	<b>Efeito significativo de frenagem</b>
1	180	400	89	
1,5	180	549	122	
2	180	574	152	
2,5	180	503	120	<b>Efeito significativo de frenagem</b>

Através da tabela 6.6, verifica-se que, com um pulso de duração de 220 ms, a partir de 2 A de corrente, o carro sofre efeito de frenagem significativo. Isto ocorre porque o pulso é suficientemente longo e a força planar de propulsão desenvolvida é maior, fazendo com que um dos ímãs desloque-se sobre a fase que ainda está sendo excitada com corrente oposta àquela da fase sobre a qual o ímã estava inicialmente posicionado. Como a corrente tem polaridade oposta, a força desenvolvida sobre ímã também é oposta àquela que provocou seu deslocamento. Com pulso de menor duração, o efeito frenante é menor. O gráfico da figura 6.28(a) mostra o comportamento do deslocamento do carro em função da corrente aplicada às duas fases localizadas sob os ímãs permanente, para dois tempos de excitação. O gráfico da figura 6.28(b) mostra o tempo de deslocamento em função da corrente.

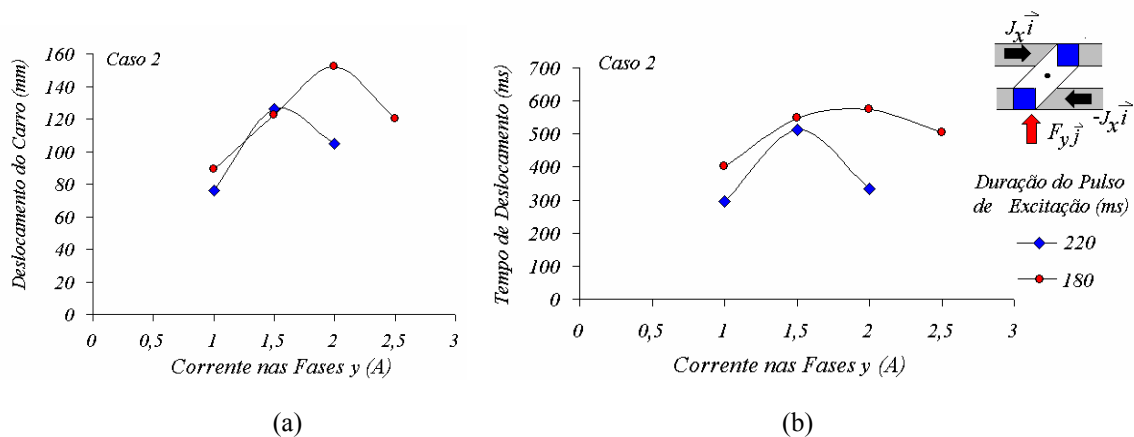


Figura 6.28 – (a) Gráfico do deslocamento do carro em função da corrente aplicada às duas fases localizadas sob os ímãs permanentes, para dois tempos de excitação diferentes. Em (b) o gráfico mostra o comportamento do tempo de deslocamento em função da corrente.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho apresentou-se o estudo de um atuador planar eletromagnético multifase, que desenvolve movimento sobre o plano com dois graus de liberdade a partir de um único dispositivo de tração. Foram apresentados seus aspectos construtivos e de funcionamento, e os resultados da sua análise estática, gerados pelo modelamento analítico proposto, pela análise numérica feita através do Método dos Elementos Finitos e pelos testes realizado com o primeiro protótipo construído. O atuador planar em investigação foi projetado através do processo analítico descrito no Capítulo 3 e no Apêndice A deste trabalho, e suas características construtivas foram validadas a partir das informações geradas pelos modelos teóricos descritos nos Capítulos 4 e 5 deste trabalho.

O modelo analítico desenvolvido e descrito no Capítulo 4 permitiu prever o comportamento da distribuição espacial do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro. Também foi possível prever o comportamento das forças que atuam sobre o carro do atuador planar. Uma das dificuldades em modelar analiticamente o comportamento estático do atuador planar ocorreu em função das características de seu circuito magnético. Usualmente, os modelos analíticos encontrados na bibliografia especializada descrevem o comportamento do vetor densidade de fluxo magnético em duas dimensões. No modelo descrito neste trabalho, as equações do vetor densidade de fluxo magnético nas regiões presentes no modelo analítico e das forças planar de propulsão e normal que atuam sobre o carro foram representadas através de séries duplas de Fourier. Desta forma, foi possível verificar o comportamento espacial dessas grandezas com maior grau de detalhamento. O modelo analítico proposto não contempla o efeito de saturação magnética nos materiais ferromagnéticos presentes no atuador planar. Como não há efeito de saturação magnética apreciável no circuito magnético do atuador planar, esta simplificação não introduziu erro significativo aos resultados. Considerou-se que o comportamento dos campos produzidos pelos ímãs permanentes e pelo efeito de reação da armadura fosse linear. Essa hipótese está sustentada porque são empregados ímãs permanentes de alta força coercitiva e um entreferro bastante largo, o que torna desprezível o efeito da força magnetomotriz dos enrolamentos sobre o ponto de operação dos ímãs permanentes como utilizados. Os modelos analíticos foram elaborados supondo-se distribuição espacial periódica da densidade de fluxo magnético no entreferro. A comparação entre valores medidos e analíticos mostrou que essas considerações empregadas para análise dos campos magnéticos não geraram resultados



distantes da situação real. As diferenças existentes entre valores medidos e modelados são aceitáveis. A análise numérica apresentada no capítulo 5 mostrou que não houve efeito de saturação apreciável nos materiais ferromagnéticos empregados no atuador planar.

A etapa de análise pelo Método dos Elementos Finitos foi extremamente importante e complementou as informações oriundas do modelo analítico. A análise numérica não só confirmou as informações geradas pelo método analítico, como forneceu dados adicionais sobre o comportamento da distribuição de fluxo magnético em outras regiões não contempladas na análise desenvolvida no Capítulo 4. O estado de saturação da culatra e do núcleo da armadura, considerados infinitamente permeáveis no capítulo 4, pode ser previsto através dos mapas do módulo do vetor densidade de fluxo magnético gerados pelo MEF e apresentados no capítulo 5. O efeito de reação da armadura pode ser apreciado e analisado através de toda a geometria do atuador planar. Todos os modelos analíticos e numéricos contemplaram os dois casos em estudo: no caso 1 foram empregados no carro ímãs permanentes de NdFeB de 6 mm de comprimento, que produziram um entreferro de 14 mm de comprimento; no caso 2 foram empregados no carro ímãs permanentes de NdFeB de 8 mm de comprimento, que produziram um entreferro de 12 mm de comprimento.

Uma das grandes contribuições dos modelos teóricos foi quanto à caracterização dos valores das forças que tendem a atuar sobre o carro. A definição do valor de força planar de propulsão permitiu definir as características construtivas do carro e do estator do atuador planar, de forma que este apresentasse uma performance adequada à faixa de corrente elétrica definida para seu funcionamento. A determinação teórica da força normal foi de extrema importância para o dimensionamento do sistema de suspensão. Esta força normal tende a produzir uma ação frenante sobre o carro. A especificação dos trilhos foi feita com bases nesses valores e os rolamentos lineares especificados possuem um coeficiente de atrito extremamente pequeno, de forma a minimizar os efeitos desta força sobre a operação do atuador planar. O protótipo foi construído e testado e os valores medidos de força estática e de densidade de fluxo magnético no entreferro mostraram-se bastante próximos daqueles resultantes da análise numérica e do modelo analítico. Os ensaios foram realizados para o caso 1 e para o caso 2. Através dos testes, foi possível validar os modelos teóricos e analisar a performance estática do atuador planar. A quase totalidade dos gráficos apresentou os valores teóricos e medidos para os dois casos. Nos modelos teóricos, os valores de densidade de fluxo

magnético foram calculados em situações de corrente e de posição equivalentes àquelas dos ensaios [35] [39] [40]. O resultados medidos e teóricos confirmaram a viabilidade do atuador planar em desenvolver movimento bidirecional sobre o plano. Para o caso 1, com uma corrente de 5,95 A aplicada a cada fase do enrolamento  $x$  localizada sob um ímã permanente, o valor da força planar de propulsão medida foi igual a 21,52 N. Os testes de medição de força planar de propulsão indicaram uma sensibilidade de 3,61 N/A. Para o caso 2, uma força planar de 31,60 N atuará sobre o carro, quando uma corrente de 5,88 A for aplicada às duas fases do enrolamento  $x$  que estão localizadas sob os ímãs permanentes, resultando em uma sensibilidade de 5,37 N/A. As diferenças encontradas entre valores medidos e teóricos, tanto de densidade de fluxo magnético, quanto de força, podem ser justificada pela possível diferença existente entre as características magnéticas dos ímãs permanentes fornecidas pelos fabricantes e aquelas que os mesmos realmente possuem.

A continuidade deste trabalho poderá contemplar o estudo do efeito das correntes parasitas sobre a performance do atuador planar e as medidas para sua redução deverão ser consideradas. As figuras 7.1(a) e 7.1(b) mostram um ímã permanente deslocando-se sobre a superfície de uma chapa de material eletricamente condutor, tendo uma de suas faces polares voltada para ela. O ímã permanente produz um fluxo magnético que atravessa o entreferro em direção à chapa. Haverá indução de correntes parasitas nas regiões desta chapa onde o campo magnético estiver aumentando ou diminuindo. Essas correntes parasitas estabelecerão um campo magnético cujo efeito é o de se opor ao movimento do ímã permanente. Quando o ímã permanente estiver se aproximando da região  $A$ , indicada na figura 7.1(a), o aumento do fluxo magnético nesta região fará com que sejam induzidas correntes parasitas na chapa. O efeito dessas correntes é de se opor ao movimento ímã permanente. Quando o ímã permanente estiver abandonando a região  $A$ , conforme mostrado na figura 7.1(b), a diminuição do campo magnético produz correntes parasitas que também se opõem ao movimento do ímã. No caso específico do atuador planar, durante a sua operação dinâmica, o deslocamento do carro sobre o estator e as correntes pulsadas nas bobinas induzirão correntes parasitas no núcleo da armadura. Elas poderão afetar o desempenho do atuador planar, pois produzem uma força contrária ao movimento do carro. Uma alternativa para a redução dessas correntes indesejáveis seria a utilização de um novo tipo de material ferromagnético isotrópico para a construção do núcleo da armadura, feito a partir de pó de ferro comprimido. Esse material pertence ao grupo dos compósitos magnéticos macios (SMC) e possui isotropia tridimensional e alta resistividade que reduz os efeitos de correntes parasitas.

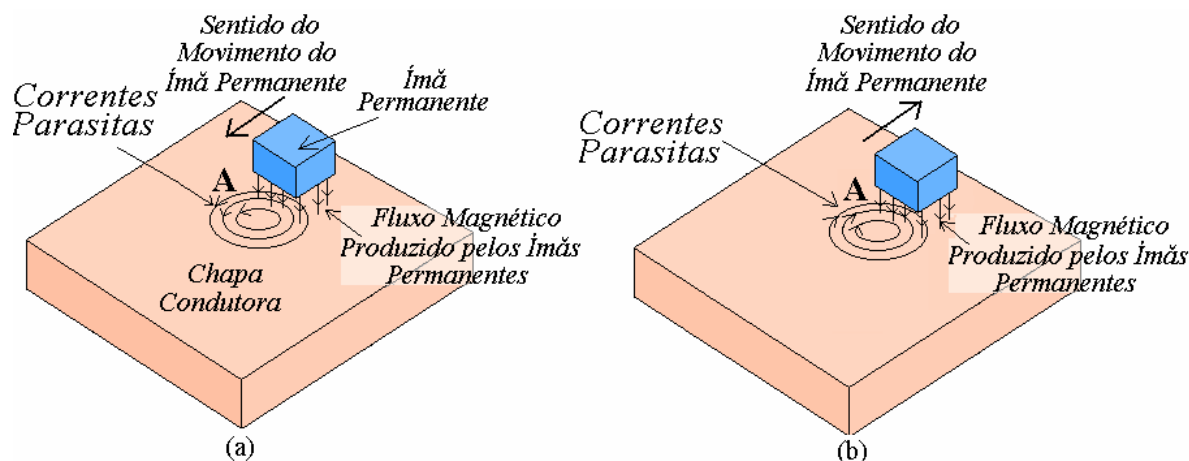


Figura 7.1 – Correntes parasitas em uma chapa de material ferromagnético: (a) ímã permanente aproximando-se da região  $A$  e (b) ímã permanente afastando-se da região  $A$ .

O estudo teórico do comportamento das correntes parasitas no atuador planar poderá ser feito através do MEF. O MEGA 3D permite a análise dinâmica de dispositivos eletromagnéticos. Conforme descrito no capítulo 5 deste trabalho, o comportamento dinâmico de um dispositivo pode ser simulado através de um modelo resultante da união de duas malhas, uma do estator e a outra correspondente a porção que poderá movimentar-se. No modelo do atuador planar, seria possível calcular qual seria o deslocamento do carro e o tempo deste deslocamento a partir da definição de uma excitação por corrente nas fases do enrolamento da armadura e da duração desta excitação. Assim, a partir da distribuição da densidade de fluxo magnético, da caracterização do deslocamento do carro e da condutividade elétrica do material ferromagnético empregado na construção do núcleo da armadura seria possível determinar o comportamento das correntes parasitas. Um estudo comparativo entre o aço 1045 e o material SMC poderia ser realizado, com cálculo de força planar de propulsão, deslocamento e tempo de deslocamento. Uma análise numérica do comportamento dinâmico do atuador planar contemplaria o estudo das correntes parasitas, das forças de frenagem e da força eletromotriz induzida nos enrolamentos como função do deslocamento do carro. Mesmo com o emprego de material SMC, as correntes parasitas ainda estarão presentes no núcleo da armadura, principalmente devido ao movimento do carro. No entanto, o efeito dessas correntes não deve ser considerado inteiramente indesejável. Um estudo futuro poderia contemplar o efeito positivo das correntes parasitas no sentido de contribuir para a frenagem do carro, reduzindo a possibilidade de o mesmo disparar sobre o plano em função de uma excessiva produção de força de propulsão planar.

Outra proposta de otimização das características construtivas do atuador planar está relacionada com o formato dos seus enrolamentos. Um novo atuador planar está sendo proposto, empregando enrolamentos planares, em substituição aos enrolamentos do tipo envolvente. Isto permite uma melhor utilização do cobre, tendo em vista que no modelo envolvente a porção inferior das fases não contribui para a produção de força sobre o plano. A figura 7.2 mostra o desenho do novo atuador planar proposto. Para a construção do núcleo da armadura será empregado material do tipo SMC.

Futuros trabalhos poderão envolver, ainda, as seguintes etapas:

- desenvolvimento do modelo analítico dinâmico do atuador planar, com definição das equações do movimento do campo produzido pelos ímãs permanentes;
- testes para caracterização do comportamento dinâmico do primeiro protótipo construído;
- estudos de um sistema de controle com detecção de posição através dos eixos  $x$  e  $y$ ;
- estudo de um sistema de controle e acionamento do atuador planar.

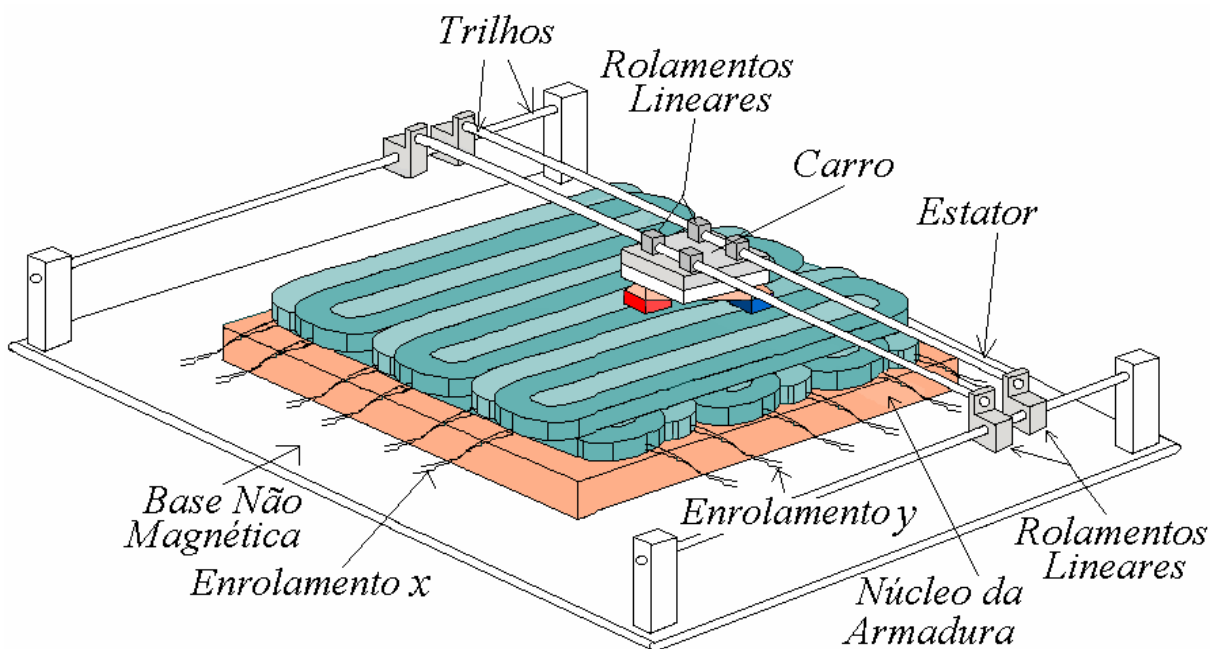


Figura 7.2 – Novo atuador planar proposto, com enrolamento envolvente e núcleo de material SMC.

## REFERÊNCIAS

- 1 - GIERAS, J. Linear induction drives. New York: Oxford University Press, 1994.
- 2 - NASAR, S. A.; BOLDEA, I. Linear electric motors: theory, design, and applications. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987.
- 3 - EBIHARA, D.; WATANOBE, T.; WATADA, M. Characteristic Analysis of Surface Motor. IEEE Transactions on Magnetics, v. 28, n. 5, p. 3033-3035, Sept. 1992.
- 4 - TOMITA, Y.; KOYANAGAWA, Y.; SATOH, F. A surface motor-driven precise positioning system. Precision Engineering, v. 16, n. 3, p. 184-191, Jul. 1994.
- 5 - TOMITA, Y.; KOYANAGAWA, Y. Study on a surface-motor driven precise positioning system. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, v. 117, p. 311-319, Set. 1995.
- 6 - ASTAFÉV, L. I. Surface electric devices. Elektrotehnika, n. 12, p. 8-14, 1993.
- 7 - WONG, F. Y.; SCHULZE-LAUEN, H.; YOUCEF-TOUMI, K. Modelling and digital servo control of a two dimensional linear motors. In: AMERICAN CONTROL CONFERENCE, 1995, Seattle. Proceedings. Seattle: 1995. p. 3659-3663.
- 8 - CRAWFORD, D.; WONG, F. Y.; YOUCEF-TOUMI, K. Modeling and design of a sensor for two dimensional linear motors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 1995. Proceedings. Nagoya: 1995. p. 2367 - 2372.
- 9 - BRENNEMANN, A. E.; HOLLIS, R. L. Magnetic and optical-fluorescence position sensing for planar linear motors. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS, 1995, Piscataway. Proceedings. Piscataway: IEEE/RSJ, 1995. v. 3 , p. 101-107.
- 10 - TRIFA, V.; KOVACS, Z. Numerical simulation of linear stepping motor for x-y plotter. In: NATIONAL CONFERENCE OF ELECTRICAL DRIVES, 3., 1982. Proceedings. Brasov: 1982. p. A17-21.
- 11 - TIPLER, P. A. Física. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1978. v. 2
- 12 - FLORES FILHO, A. F. Investigation of a double armature homopolar brushless d. c. linear motor. Cardiff, 1996. Ph. D. Thesis, University of Wales.

- 13 - FLORES FILHO, A. F.; BASAK, A. Improvement of the force produced by a homopolar Brushless dc linear motor. In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE, 1997, Milwaukee. Proceedings. Milwaukee: IEEE/PES, IEEE-IES, 1997. p. MC1-12.1-MC1-12.3.
- 14 – WEIBERGER, H. F. A First course in partial differential equations. Mineola: Dove Publications, 1995.
- 15 - EBIHARA, D.; WATADA, M. Study of a basic structure of surface actuator. IEEE Transactions on Magnetics, v. 25, n. 5, Set. 1989.
- 16 – QUAID, A.E.; HOLLIS, R.L. 3-DOF closed-loop control for planar linear motors. In: IEEE INT'L. CONFERENCE ON ROBOTICS AND AUTOMATION, 1998, Leuven. Proceedings. Leuven: IEEE ROBOTICS & AUTOMATION SOCIETY, 1998. p. 2488-2493.
- 17 - MORGAN, S. G. Control of multi-axis movement provided by d. c. linear motor. Cardiff, 1995. M. Sc. Dissertation, The Cardiff School of Engineering, University of Wales.
- 18 - MCCAIG, M.; CLEGG, A. G. Permanent magnets in theory and practice. 2ed. London: Pentech Press, 1987.
- 19 – KRAUS, J. D.; CARVER, K. R.. Eletromagnetismo. 2ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.
- 20 - LALL, C. Soft magnetism - fundamentals for powder metallurgy and metal injection molding. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1992.
- 21 - SCHIEFLER FILHO, M. F. O. Tecnologia de fabricação e caracterização de ímã Nd-Fe-B. Florianópolis, 1993. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFSC.
- 22 – FLORES FILHO, A. F. Ímãs permanentes de terras raras: utilização industrial. Porto Alegre, DELET-UFRGS, 1998. (Caderno Técnico)
- 23 - FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, JR.,C.; UMANS, S. D. Electric machinery. 5ed. New York: McGraw-Hill, 1990.
- 24 - SCHWARTZ, M. Principles of electrodynamics. New York: Dover Publications, 1987.

- 25 - BASTOS, J. P. A. Eletromagnetismo e cálculo de campos. 3ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1996.
- 26 – HANITSCH, R. Design and performance of electromagnetic machines based on Nd-Fe-B magnets. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 101, p. 271-275, Oct. 1991.
- 27 - KIM, W. J. High-precision planar magnetic levitation, Cambridge, 1997. Ph. D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- 28 - TRUMPER, D. L.; WILLIAMS, M. E.; NGUYEN, T. H. Magnet arrays for synchronous machines. In: IEEE-IAS ANNUAL MEETING, 28., 1993, USA. Proceedings. Toronto: IEEE-IAS, 1993. p. 216-223.
- 29 – FLORES FILHO, A. F. Aplicação do método dos elementos finitos à análise de dispositivos eletromagnéticos. Porto Alegre, LME/EE/CPGEE/EEUFRGS, 1997. (Caderno Técnico)
- 30 - MELCHER, J. R. Continuum electromechanics. Cambridge: MIT Press, 1981.
- 31 – LOWTHER, D. A.; SILVESTER, P. P. Computer-aided design in magnetics. New York: Springer-Verlag, 1986.
- 32 - IDA, N.; BASTOS, J. P. A. Eletromagnetics and calculations of fields. 2ed. New York: Springer - Verlag New York, 1997.
- 33 – AULER, Fábio R.; SILVEIRA, Marília A.; FLORES FILHO, Ály F. Desenvolvimento de um condicionador de sinais para análise estática de um atuador planar. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRGS, 13., 2001, Porto Alegre. Livro de Resumos. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001. p. 224.
- 34 – PIAZZA, Tiago; SILVEIRA, Marília A.; FLORES FILHO, Ály F. Determinação dos valores de força que agem sobre o estágio móvel de um atuador planar (motor xy). In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRGS, 13., 2001, Porto Alegre. Livro de Resumos. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2001. p. 224.
- 35 - FLORES FILHO, A. F. et al. Estudo e desenvolvimento de um atuador planar (motor xy). Revista Ciência & Engenharia, Uberlândia, v. 10, n. 2, p. 19-27, jul./dez. 2001.
- 36 - FLORES FILHO, A. F. et al. Analysis and development of a new xy actuator based on orthogonal coils. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LINEAR DRIVES FOR

- INDUSTRY APPLICATIONS-LDIA, 3., 2001, Nagano. Proceedings. Nagano: IEEJ, 2001. p. 268-273.
- 37 – FLORES FILHO, Ály F. et al. Produção de movimento bidirecional através de um novo atuador planar. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO - SNCA, 2., 2001, Salvador. Anais. Salvador: AINST/IEEE/UFBA, 2001. TT-041.
- 38 - FLORES FILHO, A. F. et al. Electromagnetic analysis of a bi-directional slotless multiphase planar actuator. In: INTERNATIONAL AEGEAN CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES AND POWER ELECTRONICS – ACEMP, 2001, Kusadasi. Proceedings. Kusadasi: IEEE, 2001. p. 596-601.
- 39 – FLORES FILHO, A. F.; SUZIM, A. A.; SILVEIRA, M. A. Analysis and test of a novel multiphase planar actuator. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED ELECTROMECHANICAL MOTION SYSTEMS – ELECTROMOTION, 4., 2001, Bologna. Proceedings. Bologna: Università degli Studi di Bologna, IEEE/IAS, 2001. v.1, p. 245-250.
- 40 – FLORES FILHO, A. F.; SUZIM, A. A.; SILVEIRA, M. A. Investigation of the forces produced by a new electromagnetic planar actuator. In: IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES AND DRIVES CONFERENCE – IEMDC, 2001, Cambridge. Proceedings. Cambridge: IEEE, 2001. p. 8-13.
- 41 - SILVEIRA, Marília A.; FLORES FILHO, Ály F.; SUZIM, Altamiro A. Análise do comportamento estático de um novo atuador planar. In: FÓRUM DE PESQUISA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA, 1., 2000, Canoas. Resumos. Canoas: PROPPEX/ULBRA, 2000. CD-Rom.
- 42 – FLORES FILHO, A. F. et al. Análise da densidade de fluxo e das forças envolvidas em um novo atuador planar (motor xy). Revista Tecnología : Revista de Tecnologia da ULBRA. Canoas, v. 1, n. 2, p 27-43, nov. 2000.
- 43 – FLORES FILHO, A. F.; SUZIM, A. A.; SILVEIRA, M. A. A novel electromagnetic planar actuator with neodymium-iron-boron permanent magnets. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON RARE-EARTH MAGNETS AND THEIR APPLICATIONS – REM, 16., 2000, Tohoku. Proceedings. Tohoku: The Japan Institute of Metals, 2000. v. 2, p. 973-982.



- 44 – RECKZIEGEL, Adriano et al. Determinação das forças que agem sobre o estágio móvel de um atuador planar eletromagnético. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRGS, 12., 2000, Porto Alegre. Livro de Resumos. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2000. p. 169 - 170.
- 45 – FLORES FILHO, A . F.; SUZIM, A. A.; SILVEIRA, M. A. Determination of the forces in a novel electromagnetic planar actuator. In: IEEE INDUSCON – INDUSTRIAL APPLICATION CONFERENCE, 4., 2000, Porto Alegre. Proceedings. Porto Alegre: PUCRS/IEEE, 2000. v.1, p. 27-31.
- 46 – FLORES FILHO, A . F.; SUZIM, A. A.; SILVEIRA, M. A. Development of a new electromagnetic planar actuator. In: IFAC – CONFERENCE ON MECHATRONICS SYSTEMS, 1., 2000, Darmstadt. Pre-prints. Darmstadt: International Federation of Automatic Control (IFAC)/ VDI/VDE, 2000. v.1, p. 359-364.
- 47 – FLORES FILHO, A. F.; SUZIM, A. A.; SILVEIRA, M. A. 3D Analisis and simulation of a novel planar actuator. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES – ICEM, 2000, Espoo. Proceedings. Espoo: Helsinki University of Techonology, 2000. v.3, p. 1379-1383.
- 48 – 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.
- 49 – FLORES FILHO, A . F.; SUZIM, A. A.; SILVEIRA, M. A. 3D analisys and development of a novel planar actuator with neodymium-iron-boron permanent magnets. In: IEEE INTERNATIONAL MAGNETICS CONFERENCE - INTERMAG, 2000, Toronto. Digest. Toronto: IEEE/The Magnetics Society of the Institute of Electrical and Electronics, 2000. p. DQ-03.
- 50 – FLORES FILHO, Ály F.; SUZIM, Altamiro A.; SILVEIRA, Marilia A. Análise e desenvolvimento de um atuador planar multifase. In: SEMINÁRIO INTERNO DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - SIDI 99, 1999, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: DELET/EE/UFRGS, 1999. p. 36-39.

- 51 – HANITSCH, R. Electromagnetic machines with Nd-Fe-B magnets. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 80, p.119-130, Aug. 1989.
- 52 - 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. Canterbury: The Power Division of the Institution of the electrical Engineers, 1999. p. 268-271.
- 53 – 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, v. 35, n. 5, part II, p. 4034-4036, Set. 1999.
- 54 – SUZIM, A. F.; FLORES FILHO, A. A.; SILVEIRA, M. A. Employment of neodymium-iron-boron permanent magnets on the assembling of a novel planar actuator. In: IEEE INTERNATIONAL MAGNETICS CONFERENCE-INTERMAG, 1999, Kyongju. Digest. Kyongju: IEEE/The Magnetics Society of the Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1999. p. EE-03.
- 55 - SUZIM, Altamiro et al. Desenvolvimento de um novo atuador planar com dois graus de liberdade e armadura com enrolamentos multifases ortogonais. In: SEMINÁRIO INTERNO DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - SIDI 98, 1998, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: DELET/EE/UFRGS, 1998. p. 40-43.
- 56 – PROLA, Daniel D. et al. Análise e simulação de um novo atuador planar. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRGS, 10., 1998, Porto Alegre. Livro de Resumos. Porto Alegre: UFRGS, 1998. p. 171.
- 57 - SUZIM, A. A.; FLORES FILHO, A. F.; SILVEIRA, M. A. A novel planar actuator. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES - ICEM'98, 1998, Istanbul. Proceedings. Ankara: Middle East Technical University, 1998. v. 1, p. 282-285.
- 58 - FLORES FILHO, A . F.; SUZIM, A . A .; SILVEIRA, M. A. Atuador Planar (Motor XY). Pedido de patente, categoria inovação tecnológica, depositado no INPI, sob no. PI 9900945-5, Porto Alegre, RS, Brasil, maio 1999.
- 59 – ASSIS, A. K. T. Eletromecânica de Weber. Campinas: Editora da Unicamp, 1995.
- 60 – MARTINS, N. Introdução à teoria da eletricidade e do magnetismo. São Paulo: Edgard Blücher, 1975.

- 61 – BINNS, K. J.; LAWRENSON, P. J.; TROMBRIDGE, C. W. The Analytical and numerical solution of electric and magnetic fields. Chichester: John Wiley, 1992.
- 62 – SPIEGEL, M. R. Análise de Fourier. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1976.
- 63 - FLORES FILHO, Ály F.; SUZIM, Altamiro A.; SILVEIRA, Marília A. Estudo da distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro de um atuador planar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO – CBMAG 2002, 5., 2002, Gramado. Anais. Gramado: SBM/UFRGS, 2002. CD-Rom.
- 64 – AULER, Fábio R. et al. Desenvolvimento de um condicionador de sinais para análise estática de atuadores lineares. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRGS, 14., 2002, Porto Alegre. Livro de Resumos. Porto Alegre: UFRGS. p. 260.
- 65 – MORETO, Miguel et al. Caracterização estática e dinâmica de um atuador planar. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRGS, 14., 2002, Porto Alegre. Livro de Resumos. Porto Alegre: UFRGS. p. 312.
- 66 – MELLO, Fábio A et al. Criação de um sistema de determinação de posição para um atuador planar. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRGS, 14., 2002, Porto Alegre. Livro de Resumos. Porto Alegre: UFRGS. p. 312.
- 67 - FLORES FILHO, A. F. et al. Assessment of a xy actuator based on orthogonal coils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES – ICEM, 15., 2002, Brugge. Book of Abstracts. Brugge: Technologisch Instituut vzw c/o Ingenieurshuis, 2002. p. 46.
- 68 - FLORES FILHO, A. F. et al. Assessment of a xy actuator based on orthogonal coils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES – ICEM, 15., 2002, Brugge. Proceedings. Brugge: Technologisch Instituut vzw c/o Ingenieurshuis, 2002. CD-Rom.
- 69 - FLORES FILHO, A. F.; SUZIM, A. A. ; SILVEIRA, M. A. Study and development of a xy-positioning based on an electromagnetic planar actuator. In: IEEE/IAS INDUSCON – INDUSTRIAL APPLICATION CONFERENCE, 5., 2002, Salvador. Proceedings. Salvador: IEE/IAS, 2002. p. 364-369. CD-Rom.
- 70 – MEGA V6.24 User Manual. Bath, UK, Applied Electromagnetic Research Centre, Bath University, 1997. (Manual, 143).
- 71 - FLORES FILHO, A. F.; SUZIM, A. A. ; SILVEIRA, M. A. An analytical method to predict the static performance of a planar actuator. In: IEEE INTERNATIONAL MAGNETICS CONFERENCE - INTERMAG, 2003, Boston. Digest CD. Boston:

IEEE/The Magnetics Society of the Institute of Electrical and Electronics, 2003. CD-Rom.

- 72 - FLORES FILHO, A . F.; SUZIM, A . A .; SILVEIRA, M. A. An analytical method to predict the static performance of a planar actuator. IEEE Transactions on Magnetics, v. 39, n. 5, part II, 3p, Set. 2003. p. 3364-3366
- 73 – METALS Handbook. Ohio, EUA, American Society Metals: International Handbook Committee, 1982. (Manual).
- 74 – CAMPBELL, P. Permanent magnet materials and their application. New York, NY: Cambridge University Press, 1994.

## APÊNDICE A - CARACTERÍSTICAS DE PROJETO DO ATUADOR PLANAR

Apresentam-se, a seguir, os dados iniciais de projeto do atuador planar, que resultaram na definição de suas características construtivas. O ponto de operação dos ímãs permanentes do atuador planar foi escolhido após uma análise comparativa entre os valores resultantes de força planar de propulsão e força normal. Nos cálculos apresentados a seguir, o efeito de reação da armadura sobre o ponto de operação dos ímãs permanentes não foi considerado. Para a escolha do ponto de operação do circuito magnético, como função de  $C_f$ ,  $L_f$  e da relação  $l_m/l_g$ , foram levados em conta os seguintes fatores:

AA.1 - valor resultante da densidade de fluxo magnético. A reta de carga foi obtida a partir da estimativa inicial dos coeficientes de espraiamento e de dispersão do fluxo magnético, a saber,  $C_f$  igual a 4,0 e  $L_f$  igual a 1,2. A relação  $l_m/l_g$  utilizada foi igual a 6/14. O ponto de operação foi calculado por:

$$\frac{B_m}{H_m} = -\left(\frac{l_m}{l_g}\right)\mu_o L_f C_f = -(4\pi \times 10^{-7})\left(\frac{6}{14}\right)(4,0)(1,2) = 2,56 \times 10^{-6} \frac{T}{A/m} \quad (\text{AA.1})$$

A equação (AA.1) define a reta de carga do circuito magnético do atuador planar. A figura AA.1 apresenta um gráfico contendo a curva de desmagnetização normal do ímã permanente N35H, a reta de carga do circuito magnético do atuador planar e o ponto de operação de cada ímã permanente, representado pelo par de coordenadas  $H_m = 315.651 \text{ A/m}$  e  $B_m = 0,816 \text{ T}$ . A força magnetomotriz de cada ímã permanente é calculada por  $H_m l_m = (315.651)(6 \times 10^{-3}) = 1.894 \text{ A}$ .

A densidade de fluxo magnético no entreferro é igual a:

$$B_g = \frac{B_m}{C_f L_f} = \frac{0,816}{(4,0)(1,2)} = 0,17 \text{ T} \quad (\text{AA.2})$$

AA.2 – Escolha dos valores de  $l_m$  e  $l_g$ , a partir da relação  $l_m/l_g$ , levando em conta o volume a ser ocupado pelos condutores do enrolamento da armadura no entreferro. O valor do comprimento de cada ímã permanente,  $l_m$ , foi definido como sendo igual a 6 mm e o comprimento de cada entreferro,  $l_g$ , igual a 14 mm.

AA.3 - Valor resultante da força normal que age sobre o carro, a partir da definição da área da superfície polar de cada ímã permanente e dos dados obtidos em AA.1 e AA.2. A área da superfície polar de cada ímã permanente é quadrada, de lado igual a 25 mm. A área da superfície polar de cada ímã permanente é igual a:

$$s_m = (2l_d)^2 = (25 \times 10^{-3})(25 \times 10^{-3}) = 6,25 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (\text{AA.3})$$

A área transversal ao fluxo magnético em cada entreferro,  $s_g$ , está relacionada com a área da superfície polar de cada ímã permanente,  $s_m$ , por:

$$s_g = C_f s_m = (4,0)(625) = 2.500 \text{ mm}^2 \quad (\text{AA.4})$$

Considerando também uma área de seção quadrada transversal ao fluxo no entreferro, então cada um de seus lados é igual a 50 mm. Considerando o efeito dos dois ímãs permanentes na produção de força normal, a equação (2.6) fornece o seguinte resultado:

$$F_{A_z} = \frac{s_g}{2\mu_0} \left( B_{gT_{z1}}^2 + B_{gT_{z2}}^2 \right) = \frac{(50 \times 10^{-3})^2}{(2)(4\pi \cdot 10^{-7})} \left( 0,17^2 + 0,17^2 \right) = 57,50 \text{ N} \quad (\text{AA.5})$$

AA.4 – valor resultante da força eletromagnética planar de propulsão que age sobre o carro. O valor da densidade de fluxo empregado é aquele obtido em AA.1. O valor de força foi calculado considerando apenas duas fases de um mesmo

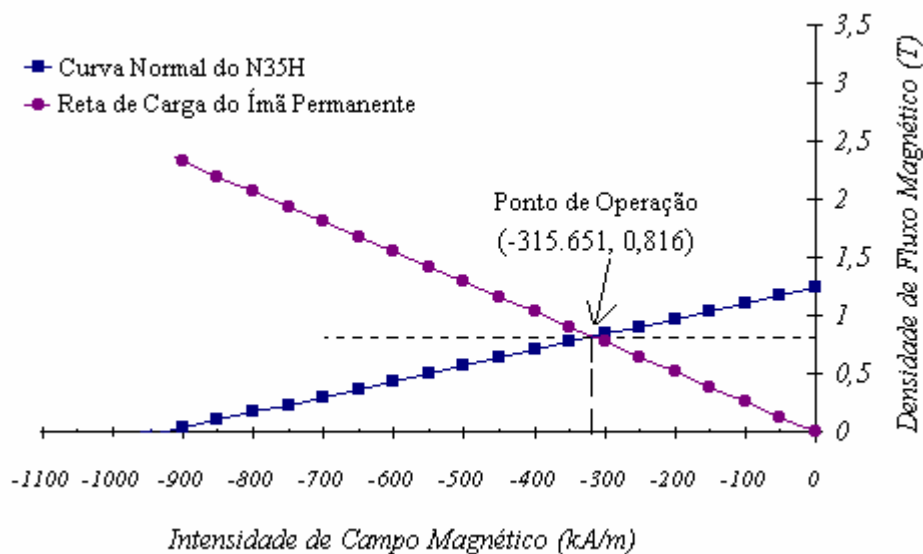


Figura AA.1 – Ponto de operação dos ímãs permanentes do atuador planar, definido pela intercessão entre a curva de desmagnetização normal do ímã permanente N35H e a reta de carga definida pela equação (AA.1).

enrolamento, cada uma delas localizada sob um ímã permanente. As duas fases são excitadas em oposição por corrente contínua. O volume ativo dos condutores do enrolamento da armadura foi definido a partir da área da superfície polar, do comprimento do entreferro e do coeficiente de espraiamento do fluxo magnético no entreferro. O comprimento total ocupado pelos condutores do enrolamento da armadura,  $l_b$ , é igual a 7,5 mm. A área da seção transversal ao fluxo de corrente ocupada pelos condutores de uma fase do enrolamento  $x$ , é igual a:

$$s_a = 2l_d l_b = (25)(7,5) = 187,5 \text{ mm}^2 \quad (\text{AA.6})$$

Como a largura ativa de cada fase, considerando o fluxo de corrente, é igual a 25 mm e o comprimento igual a 50 mm, o volume ativo de cada fase do enrolamento da armadura, considerado aqui como sendo aquele em que há circulação de corrente em condutores imersos no fluxo magnético do entreferro, é igual a:

$$V = s_a l_a = (187,5)(50) = 9.375 \text{ mm}^3 \quad (\text{AA.7})$$

onde  $l_a$  representa a profundidade ativa de uma fase do enrolamento  $x$ . A força planar de propulsão produzida por duas fases do enrolamento  $x$ , excitadas por uma densidade de corrente  $J_y$  de 8,96 A/mm<sup>2</sup> ( $I_a$  igual a 6,0 A em cada fase), é igual a:

$$F_x = 2B_g J_y V = (2)(0,17)(8.960.000)(9,38 \times 10^{-6}) = 28,58 \text{ N} \quad (\text{AA.8})$$

AA.5 – Definição do número de condutores de cada fase de um enrolamento da armadura, a partir do comprimento do entreferro ocupado pelos mesmos e da área em cobre de cada condutor, calculada a partir da faixa de corrente com que o atuador planar operará. O número de condutores por fase do enrolamento  $x$  da armadura é igual a 280, divididos em 7 camadas, de 40 condutores cada uma. Assim, cada enrolamento é composto de 12 fases, e cada fase possui 280 condutores de seção circular n.º 24 AWG, com seção em cobre igual a 0,204 mm<sup>2</sup>, diâmetro do fio nu igual a 0,51 mm e diâmetro do fio esmaltado igual a 0,55 mm.

AA.6 – Correção e comparação do valor de força planar de propulsão em relação ao valor calculado no item AA.4, a partir da correção dos valores da densidade de corrente nas fases do enrolamento  $x$  excitadas por corrente e do volume efetivo de condutores que produzem esta força, em função dos dados obtido em AA.5. A figura AA.2 mostra, esquematicamente, o enrolamento da armadura em corte. Com o auxílio da figura, verifica-se

que o valor corrigido da área da seção transversal ao fluxo de corrente por fase do enrolamento  $x$  da armadura é igual à área da seção de um condutor, multiplicada pelo número de condutores de uma fase:

$$s_{ac} = N_{af} s_{af} = (280)(0,204) = 57,12 \text{ mm}^2 \quad (\text{AA.9})$$

onde  $s_{ac}$  é o valor corrigido da área transversal ao fluxo de corrente no enrolamento da armadura,  $N_{af}$  é o número de condutores de uma fase do enrolamento  $x$  da armadura e  $s_{af}$  é a área da seção de um condutor. Considerando que cada condutor será percorrido por uma corrente máxima por fase,  $I_a$  de 6,0 A, o valor corrigido da densidade de corrente por fase,  $J_{yc}$ , é igual a:

$$J_{yc} = \frac{N_{af} I_a}{s_{ac}} = \frac{(280)(6)}{57,12} = 29,412 \text{ A/mm}^2 \quad (\text{AA.10})$$

O volume corrigido ocupado pelos condutores é igual a:

$$V_c = s_{ac} l_a = (57,12)(50) = 2.856 \text{ mm}^3 \quad (\text{AA.11})$$

O valor corrigido da força planar de propulsão é igual a:

$$F_x = 2B_{g_z} J_{yc} V_c = (2)(0,17)(29.411.764)(2,86 \times 10^{-6}) = 28,58 \text{ N} \quad (\text{AA.12})$$

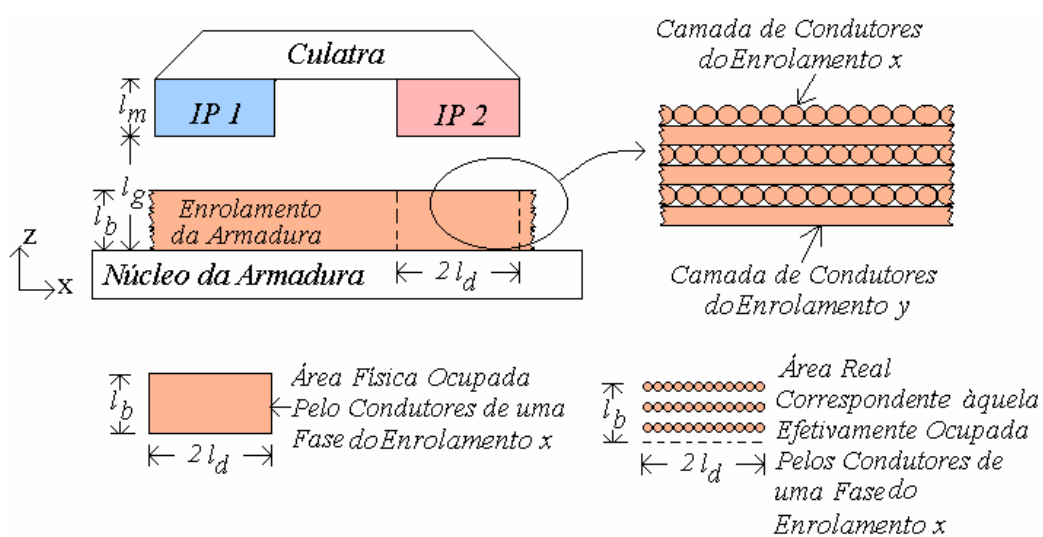


Figura AA.2 – Representação esquemática do circuito magnético principal do atuador planar.

O enrolamento da armadura é formado por camadas intercaladas de condutores do enrolamento  $x$  e do enrolamento  $y$ .



## APÊNDICE B – ESPECIFICAÇÕES DO ATUADOR PLANAR

Tabela AB.1 – Componentes do Estator.

Componente	Dimensões	Quantidade
Base de alumínio	800x700x20 [mm <sup>3</sup> ]	1
Perfil T	700x50x50 [mm <sup>3</sup> ]	2
Núcleo da armadura	400x400x15 [mm <sup>3</sup> ]	1
Enrolamentos	300x300x7,5 [mm <sup>3</sup> ]	2
Pés do estator	17,5 [mm] x45 Ø [mm]	

Tabela AB.2 – Componentes do Sistema de Suspensão.

Componente	Dimensões	Quantidade
Trilhos do Eixo X INA w12	800 [mm] x16Ø [mm]	2
Trilhos do Eixo Y INA w 16	700 [mm] x12Ø [mm]	2
Direção x: THK Linear Bush SC12		4
Direção y: INA KGNO 16B PPAS		2
Direção y: INA xxxx		2

Tabela AB.3 – Componentes do Carro.

Componente	Dimensões	Quantidade	
Culatra	107,3x7,31 [mm <sup>2</sup> ]	1	
Ímãs permanentes	Caso 1	25x25x6 [mm <sup>3</sup> ]	2
	Caso 2	25,4x25,4x8 [mm <sup>3</sup> ]	2
Placa de acrílico	150x150x10 [mm <sup>3</sup> ]	1	
Espaçador de alumínio	75x75x18,5[mm <sup>3</sup> ]	1	

Tabela AB.4 – Especificações Gerais.

Componente	Descrição	Quantidade
Enrolamento x	12 fases, cada fase com 7 camadas de 40 espiras de condutor de cobre esmaltado 24 AWG	1
Enrolamento y	12 fases, cada fase com 7 camadas de 40 espiras de condutor de cobre esmaltado 24 AWG	1
Altura da base de alumínio até a base da placa de acrílico:	78,5 [mm]	
Massa do carro + rolamentos do eixo x	1150 g	
Massa do carro + rolamentos do eixo x + eixos do rolamento x	1973 g	