

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

NOLVI FRNACISCO BAGGIO FILHO

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM ATUADOR
PLANAR COM ENROLAMENTOS PLANIFICADOS E
NÚCLEO DE MATERIAL FERROMAGNÉTICO COMPÓSITO**

Porto Alegre

2008

NOLVI FRANCISCO BAGGIO FILHO

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM ATUADOR
PLANAR COM ENROLAMENTOS PLANIFICADOS E
NÚCLEO DE MATERIAL FERROMAGNÉTICO COMPÓSITO**

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

Área de concentração: Automação e Instrumentação Eletro-Eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho

Porto Alegre

2008

NOLVI FRANCISCO BAGGIO FILHO

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM ATUADOR
PLANAR COM ENROLAMENTOS PLANIFICADOS E
NÚCLEO DE MATERIAL FERROMAGNÉTICO COMPÓSITO**

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

Orientador: _____

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

PhD pela Cardiff University – Cardiff, País de Gales, GB

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Marília Amaral da Silveira, UFRGS e ULBRA

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Prof. Dr. Renato Machado de Brito, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Marcelo Soares Lubaszewski

Porto Alegre, março de 2008.

DEDICATÓRIA

Aos Meus Pais, Nolvi e Bernardete,

Pessoas que fazem o meu coração sorrir...

Pessoas que quando olho para trás, sinto muitas saudades, não porque estão longe, mas porque é a forma de senti-lo sempre por perto...

Pessoas que riram do meu choro e choraram com meu sorriso....

Pessoas de luz com sorriso doce, meus eternos professores....

Pessoas que amo, que abraço e que me aconselham mesmo quando estou sozinho...

Pessoas que encontro em meus sonhos....

Pessoas de caráter, de fé, de convicção que me apóiam nos acertos e nos desacertos....

Pessoas que realmente fazem a diferença positiva na minha vida...

Pessoas, que com respeito, me viram crescer e que me deixam tomar decisões importantes...

Pessoas que, mesmo distantes, estão todo o tempo presentes, porque sempre sinto suas palavras em meu coração...

Meu Amor Indelével!

AGRADECIMENTOS

Ao Nosso Senhor Jesus Cristo que através do Seu Espírito Santo ilumina minha vida, sendo fonte de luz a todos os passos da minha caminhada.

Aos meus abençoados pais, Bernardete e Nolvi, pela confiança, respeito, amor, incentivo e amizade, sempre transmitindo-me carinho de uma forma tão presente e especial.

À minha irmã, Engenheira Tamara, por ser tolerante, conselheira e, acima de tudo, amiga. Ao meu irmão, Lucas, por me fazer sentir o carinho que transmite.

A todos os meus familiares e amigos por serem incentivadores e compreensivos.

Ao Professor Ály Ferreira Flores Filho pela maneira incentivadora que conduziu a orientação deste trabalho, fazendo-a de forma atenciosa, dedicada, com sabedoria e percepção.

À Professora Marília Amaral da Silveira, minha eterna orientadora, por auxiliar-me muito em meus estudos, desde a graduação, de forma prestativa, amiga, solidária, profissional e ética.

A todos os colegas do LMEAE, em especial aos Professores Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro e Roberto Petry Homrich, pelas sugestões, contribuições, solidariedade e amizade.

Ao PPGEE da UFRGS por apoiar e patrocinar a realização deste trabalho de pesquisa. Também à CAPES pela provisão da bolsa de Mestrado.

À empresa sueca Höganäs AB, por ter doado os blocos de SMC - Somaloy 500.

RESUMO

O presente trabalho trata do estudo, análise, construção e teste de uma nova configuração para um atuador planar. O dispositivo é composto de um núcleo de armadura ferromagnético plano, estático e sem ranhuras sobre o qual são montados dois conjuntos de enrolamentos planares, ortogonais entre si, com quatro bobinas cada, eletricamente independentes entre si. A parte móvel consiste de um carro equipado com ímãs permanentes de alto produto energético responsáveis pela produção de fluxo magnético de excitação. A movimentação bidirecional sobre o plano se dá pela interação entre esse fluxo e a corrente elétrica adequadamente aplicada aos enrolamentos. O atuador apresenta uma distribuição espacial da densidade de fluxo magnético em toda a sua estrutura. Este trabalho preocupa-se em analisar numérica e experimentalmente os fenômenos eletromagnéticos envolvidos, tanto em regime estático como dinâmico. O emprego de dois diferentes materiais utilizados separadamente no núcleo da armadura é investigado: o aço maciço (caso 1) e um compósito magneticamente macio de grão isolado (caso 2). Devido à movimentação do carro e conseqüentemente do fluxo magnético de excitação, uma força eletromotriz induzida aparecerá no núcleo da armadura, sendo responsável pelo estabelecimento de correntes elétricas induzidas no mesmo. Essas correntes, que também dependem da condutividade do material do núcleo, produzem um efeito de frenagem sobre o carro do atuador que afeta a sua dinâmica. Produzem ainda perdas Joule no núcleo da armadura. A redução desses efeitos pode ser obtida com a utilização de um material magnético isotrópico de alta resistividade, caso 2, que possibilita ainda a distribuição tridimensional da densidade de fluxo magnético na estrutura do atuador. Uma análise dinâmica a partir do método dos elementos finitos tornou possível a verificação da distribuição da densidade de corrente elétrica induzida no núcleo da armadura, bem como a obtenção dos seus valores em função da velocidade do carro e do material utilizado. Ainda, o efeito de frenagem foi quantificado em ensaios práticos, propondo-se então um coeficiente de atrito total, k , para cada um dos dois casos em estudo. Nessa caracterização, obteve-se que o coeficiente de atrito eletromagnético, devido às correntes induzidas, de 1,74469 Ns/m para o caso 1, enquanto que para o caso 2 esse valor fica em 0,261285 Ns/m. Os resultados numéricos e experimentais apontam que existem diferenças significativas na utilização dos dois materiais propostos, indicando que o caso 2, quando utilizado de maneira adequada no sistema, reduz as correntes elétricas induzidas minimizando seus efeitos.

Palavras chaves: Atuador planar, compósito magneticamente macio de grão isolado, corrente elétrica induzida por efeito de velocidade, bobinas planares.

ABSTRACT

The present work deals with the study, analysis, construction and testing of a new configuration of a planar actuator. The device comprehends a static ferromagnetic slotless core in form of slab, on which two sets of planar windings are assembled. They are orthogonal with respect to each other and have four independent coils. The moving part consists of a car, equipped with high energy product permanent magnets that deliver the excitation magnetic flux. The bidirectional movement on the plan is a result of the interaction between the excitation magnetic flux and the electric currents that fed the armature windings properly. The actuator features a spatial distribution of the magnetic flux density throughout its structure. This work is concerned with the numerical and experimental analyses of the electromagnetic effects involved in terms of static and dynamic behavior of the actuator. These effects are investigated for two different materials employed separately in the core of the armature: solid steel (case 1) and a grain isolated soft magnetic composite (case 2). Owing to the movement of the car and so the excitation magnetic flux, an induced electromotive force appears on the core of the armature and is responsible for the establishment of induced electrical currents in there. These currents, that also depend on the conductivity of the material of the armature core, produce a braking effect on the car that affects the dynamics of the actuator. It also produces Joule losses on that core. The reduction of those effects can be obtained with the use of an isotropic ferromagnetic material with high resistivity, case 2, that allows the 3d distribution of magnetic flux density on the structure of the actuator. A dynamic analysis by means of the finite element method made possible to verify the distribution of the induced electrical current density in the core of the armature, and to compute its value according to the speed of the car and to the material employed. Still, the effect of the braking force was quantified experimentally; as a result, a total friction coefficient, k , is proposed in order to take into account that force. By doing that, a resulting coefficient of electromagnetic friction due to the induced currents is 1.74469 Ns/m for case 1, while for case 2 it is 0.261285 Ns/m. The numerical and experimental results indicate that exist significant differences in the use of the two materials proposed, indicating that the case 2, when used in an appropriate manner, reduces the induced electrical currents minimizing its effects.

Keywords: Planar actuator, grain isolated soft magnetic composite, velocity-induced electric current, planar coils.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	26
1.1 O ATUADOR PLANAR	29
1.2 VISÃO GERAL DO TRABALHO	31
2 ATUADORES PLANARES.....	33
2.1 PRODUÇÃO DE MOVIMENTO LINEAR - ATUADORES LINEARES.....	33
2.1.1 Motores Lineares.....	33
2.1.1.1 Tipos de Motores Lineares.....	36
2.2 PRODUÇÃO DE MOVIMENTO SUPERFICIAL - ATUADORES PLANARES	39
2.3 O ATUADOR PLANAR COM BOBINAS PLANIFICADAS E NÚCLEO DE MATERIAL FERROMAGNÉTICO COMPÓSITO	48
2.3.1 Estrutura Básica.....	48
2.3.2 Princípio de Funcionamento	53
2.3.3 Circuito Magnético.....	58
2.3.4 Exemplo de Operação	60
2.3.5 Diferencial do Atuador Planar em Estudo	62
3 MATERIAIS MAGNÉTICOS.....	64
3.1 AÇO MACIÇO	64
3.2 MATERIAIS COMPÓSITOS.....	67
3.2.1 Metalurgia do Pó.....	68
3.2.1.1 Metalurgia do Pó Aplicada a Materiais Compósitos.....	69
3.2.2 Materiais Metálicos Compósitos Magneticamente Macios.....	74
3.2.2.1 Somaloy 500	78
3.2.2.2 Ancorsteel	89
3.2.2.3 Nanocon	92
3.3 ÍMÃS PERMANENTES	95
3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS UTILIZADOS NO ATUADOR PLANAR	95

3.4.1	Determinação da Resistividade Elétrica do Somaloy 500	95
3.4.2	Determinação da Resistividade Elétrica do Aço 1020.....	98
3.4.3	Determinação do Peso Específico do Somaloy 500.....	100
4	ANÁLISE DO ATUADOR PLANAR	103
4.1	CORRENTES ELÉTRICAS INDUZIDAS	103
4.1.1	Efeito das Correntes Elétricas Induzidas	106
4.1.2	Fundamentação Teórica.....	107
4.1.2.1	Equacionamento para Campos Variáveis Penetrando em Meios Condutores..	107
4.1.3	Efeito Pelicular	110
4.1.3.1	Comparação Entre o Aço 1020 e o Somaloy 500.....	111
4.2	O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)	112
4.2.1	O Pacote Computacional MEGA.....	113
4.2.2	Modelo Numérico do Atuador Planar	115
4.3	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	117
4.3.1	Simulações Numéricas Estáticas.....	117
4.3.1.1	Simulação da Densidade de Fluxo Magnético	118
4.3.1.2	Simulação da Força Planar de Propulsão e da Força Normal.....	124
4.3.2	Simulação Numérica Dinâmica.....	127
4.3.2.1	Simulação das Correntes Elétricas Induzidas no Núcleo da Armadura	128
4.3.2.2	Simulação da Densidade de Fluxo Magnético	140
5	TESTES EXPERIMENTAIS E RESULTADOS.....	145
5.1	ENSAIO EM REGIME ESTÁTICO	145
5.1.1	Medição da Densidade de Fluxo Magnético	145
5.1.2	Medição das Forças Planar e Normal.....	148
5.1.2.1	Medição da Força Normal	148
5.1.2.2	Medição da Força Planar de Propulsão Linear	152
5.2	ENSAIO EM REGIME DINÂMICO	160
5.2.1	Medição das Forças de Frenagem.....	160
5.2.1.1	Estudo Teórico – Metodologia de Ensaio	161
5.2.1.2	Experimento Prático	164
5.2.1.3	Análise dos Resultados Teóricos e Práticos.....	172
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	175
	REFERÊNCIAS.....	181

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Translator bidirecional acionado por dois motores rotativos.....	26
Figura 2	Translator bidirecional acionado por dois motores lineares.....	27
Figura 3	Fotografia do atuador planar com bobinas planificadas e núcleo de material ferromagnético compósito desenvolvido.....	29
Figura 4	Vista esquemática da estrutura do atuador planar com bobinas planificadas, destacando a região do carro.....	30
Figura 5	Transformação básica de um motor rotativo em motor linear [2].....	34
Figura 6	Força produzida pela interação entre corrente elétrica e campo magnético.....	36
Figura 7	Motor Linear de corrente contínua <i>brushless</i> com dupla armadura [12] [14].....	38
Figura 8	Estrutura de um Motor de Superfície [15].....	40
Figura 9	No carro do Motor de Superfície, destaque para a disposição das bobinas com os núcleos ferromagnéticos [15].....	40
Figura 10	Vista esquemática para um motor planar baseado no Motor de Sawyer [16].....	41
Figura 11	Vista da parte móvel do motor planar baseado no Motor de Sawyer [16].	41
Figura 12	Estator de material ferromagnético para o motor planar baseado no Motor de Sawyer: (a) estator ranhurado; (b) interação entre a parte móvel e a parte estatórica [16].....	41
Figura 13	Motor planar feito a partir de dois motores lineares tipo <i>voice coil</i> [19]....	42
Figura 14	Configuração de um sistema magnético de levitação [17].....	42
Figura 15	Motor Planar com Levitação: (a) plataforma sem a parte móvel; (b) plataforma com a parte móvel, indicando os sensores de posição [17].....	43
Figura 16	Atuador planar com enrolamento envolvente [10].....	44

Figura 17	Exemplo de produção de movimento bidirecional: (a) carro em repouso; (b) movimento devido à excitação simultânea das fases dos enrolamentos x e y [10].....	45
Figura 18	Estrutura de um motor linear com bobinas planificadas [28].....	46
Figura 19	Enrolamento planificado: (a) vista de apenas uma bobina; (b) vista de três bobinas colocadas de forma entrelaçada, formando uma única peça [28].....	46
Figura 20	Estrutura básica de um atuador eletromagnético sendo utilizado para produção de movimento rotativo [20].....	47
Figura 21	Fotografia do protótipo do atuador eletromagnético utilizado para produção de movimento rotativo [20].....	48
Figura 22	Ilustração do Atuador Planar com Bobinas Planificadas e Núcleo de Material Ferromagnético Compósito.....	49
Figura 23	Detalhe dos enrolamentos ortogonais, montados em camadas intercaladas, na sua forma planificada.....	50
Figura 24	Detalhe do carro, com a culatra e os dois ímãs permanentes de NdFeB: vista frontal e vista de topo.....	51
Figura 25	Estrutura montada para o translator do Atuador Planar: carro; estrutura de sustentação; núcleo ferromagnético e base.....	51
Figura 26	Núcleo ferromagnético do Atuador Planar.....	52
Figura 27	Vista esquemática bidimensional do atuador planar.....	53
Figura 28	Vista frontal da posição relativa á fase do enrolamento x da bobina planar que está sendo excitada com corrente elétrica e imersa no campo [10].....	55
Figura 29	Vista do atuador planar, focando apenas a um enrolamento x das bobinas planificadas, mostrando os vetores que interagem para a produção de força no eixo x	57
Figura 30	(a) Circuito magnético simplificado do Atuador Planar (b) seu análogo elétrico.....	59
Figura 31	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 diagonal devido à excitação simultânea das fases dos enrolamentos x e y	61

Figura 32	Exemplo de produção de movimento na diagonal do plano de trabalho devido à excitação simultânea das fases dos enrolamentos x e y , com os ímãs permanentes alinhados em diferentes bobinas planares.....	62
Figura 33	Circuito magnético com permeabilidade relativa não constante [10] [52].	65
Figura 34	Gráfico de ensaio para a obtenção da indução de saturação [52].....	66
Figura 35	Curva de magnetização normal do aço 1020 [10].....	67
Figura 36	Etapas do processo de metalurgia do pó para a produção de materiais compostos metálicos [39].....	74
Figura 37	Correntes elétricas induzidas em um núcleo laminado quando há presença de um campo magnético [52].....	76
Figura 38	Somaloy 500: (a) Partícula e (b) Estrutura de Somaloy 500 [44].....	79
Figura 39	Processo de produção do Somaloy 500 [42].....	79
Figura 40	Efeito de três diferentes lubrificantes, utilizados na composição do Somaloy 500, quanto à variabilidade da força transversal de ruptura[42].	80
Figura 41	Efeito da adição de Kenolube, quanto à densidade do Somaloy 500, para a segunda compactação sobre pressão de 800 MPa [44].....	81
Figura 42	Comparação entre Somaloy 500 + 0,5% Kenolube e Somaloy 500 + 0,6% LB1 [44].....	82
Figura 43	Relação entre o peso específico e a indução a 100kA/m para materiais magnéticos compostos do tipo Somaloy 500 + 0,5% Kenolube [44].....	83
Figura 44	Curva de magnetização do Somaloy 500 + 0,5% Kenolube, com tratamento térmico a 500°C por 30 minutos no ar [44].....	85
Figura 45	Curva de desmagnetização do Somaloy 500 + 0,6% LB1, submetida a tratamento térmico a 275°C por 60 minutos no ar [44].....	85
Figura 46	Efeito de diferentes lubrificantes e pesos específicos na (a) indução máxima e na (b) indução residual, quando os materiais são tratados a 500° C por 30 minutos no ar [43].....	86
Figura 47	Efeito de lubrificantes na permeabilidade DC do material tratado termicamente a 500° C por 30 minutos [43].....	87
Figura 48	Bloco de Somaloy 500 + 0,5% de Kenolube medindo 30mm x 30mm x 115mm.....	88
Figura 49	Curva de histerese do Somaloy 500 + 0,5% de Kenolube em regime DC e AC [44].....	88

Figura 50	Perdas magnéticas totais no núcleo de Somaloy 500 em função da indução magnética e frequência [44].....	89
Figura 51	Efeito de compactação no peso específico do Ancorsteel SC 120 [45].....	90
Figura 52	Efeito da temperatura sobre a permeabilidade magnética relativa do Ancorsteel SC 120 recozido [45].....	91
Figura 53	Curva de histerese quasi-estática, comparando o aço laminado e o material compósito recozido [45].....	92
Figura 54	Permeabilidade magnética relativa do material Nanocon em função da frequência [46].....	93
Figura 55	Curva de desmagnetização normal do ímã permanente de NdFeB de comprimento axial de 8,0mm [49].....	94
Figura 56	Esquema de medição de resistência elétrica para o bloco de Somaloy 500.....	96
Figura 57	Esquema para determinação da massa do bloco de Somaloy 500.....	100
Figura 58	Esquema para determinação da massa do bloco de Somaloy 500 quando submerço em água.....	100
Figura 59	Bobina induzindo corrente elétrica em um meio condutor [54].....	104
Figura 60	Meio condutor elétrico sendo movimentado em direção a uma região com densidade de fluxo magnético B [54].....	105
Figura 61	Ímã permanente sendo deslocado paralelamente a uma placa condutora [52].....	105
Figura 62	Elemento finito tridimensional: (a) forma quadrada e (b) forma triangular.....	113
Figura 63	Malha de elementos finitos para a formação do domínio a ser analisado..	113
Figura 64	Detalhe da vista bidimensional e frontal do modelo virtual.....	116
Figura 65	Malha 3D do modelo virtual do Atuador Planar.....	116
Figura 66	Mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético quando não existem regiões condutoras de corrente elétrica no modelo e a armadura é de manufaturada com Aço 1020: (a) vista superior com a localização do corte CC'; (b) detalhe do mapeamento 2D da densidade de fluxo magnético no modelo, (c) mapa 2D do caminho do fluxo magnético representado através de vetores de B	119

Figura 67	Valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético sobre a linha vermelha como indicada, quando o núcleo ferromagnético é composto de Aço 1020, sem regiões condutoras de corrente elétrica.....	120
Figura 68	Gráfico de valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro, quando o núcleo ferromagnético é composto de Aço 1020 e não há regiões condutoras de corrente elétrica.....	120
Figura 69	Mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético quando não existem regiões condutoras de corrente elétrica no modelo e a armadura é de manufaturada com Somaloy 500: (a) vista superior com a localização do corte CC', (b) detalhe do mapeamento 2D do fluxo magnético no modelo, (c) mapa 2D do caminho do fluxo magnético representado através de vetores.....	121
Figura 70	Gráfico de valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na extremidade transversal dos ímãs permanentes, quando o núcleo ferromagnético é composto de Somaloy 500.....	122
Figura 71	Gráfico de valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro, quando o núcleo ferromagnético é composto de Somaloy 500.....	122
Figura 72	Gráfico do módulo da diferença do valor da densidade de fluxo magnético pontual da componente z , na extremidade transversal dos ímãs permanentes, considerando-se B do aço menos B do Somaloy.....	123
Figura 73	Gráfico do módulo da diferença do valor da densidade de fluxo magnético pontual da componente z , na região central do entreferro, considerando-se B do aço menos B do Somaloy.....	123
Figura 74	Gráfico da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro para $i = 5$ A, calculado através da diagonal sob o carro, para os núcleos de Aço 1020 e Somaloy 500.....	124

Figura 75	Gráficos da simulação da força planar de propulsão em função da corrente elétrica aplicada na fase do enrolamento x localizada em perfeito alinhamento com os ímãs permanentes, para os dois núcleos ferromagnéticos.....	125
Figura 76	Gráficos da simulação da força normal em função da corrente elétrica aplicada na fase do enrolamento x localizada em perfeito alinhamento com os ímãs permanentes, para os dois núcleos ferromagnéticos.....	126
Figura 77	Gráfico da simulação da força planar de propulsão em função da corrente elétrica aplicada na fase do enrolamento x e enrolamento y	127
Figura 78	Distribuição da densidade de corrente elétrica na superfície da armadura estatórica, com o núcleo ferromagnético de Aço 1020, quando a movimentação do carro se dá na direção xy com velocidades de (a) 0,05m/s, (b) 0,10m/s e (c) 0,15m/s.....	129
Figura 79	Distribuição da densidade de corrente elétrica na superfície da armadura estatórica, com o núcleo ferromagnético de Somaloy 500, quando a movimentação do carro se dá na direção xy com velocidades de (a) 0,05m/s, (b) 0,10m/s e (c) 0,15m/s.....	130
Figura 80	Gráfico 3D da distribuição da densidade de corrente elétrica induzida no núcleo da armadura composto de Aço 1020 em uma área abaixo do carro, considerando toda a espessura do núcleo ferromagnético, para as velocidades de (a) 0,05m/s, (b) 0,10m/s e (c) 0,15m/s.....	131
Figura 81	Gráfico 3D da distribuição da densidade de corrente elétrica induzida no núcleo da armadura composto de Somaloy 500 em uma área abaixo do carro, considerando toda a espessura do núcleo ferromagnético, para as velocidades de (a) 0,05m/s, (b) 0,10m/s e (c) 0,15m/s.....	133
Figura 82	Gráfico 2D da distribuição da densidade de corrente elétrica induzida em função da diagonal analisada, relacionando diferentes posições da profundidade de penetração ao longo da espessura do núcleo ferromagnético de Aço 1020 para as velocidades de (a) 0,05m/s, (b) 0,10m/s e (c) 0,15m/s.....	135

Figura 83	Gráfico 2D da distribuição da densidade de corrente elétrica induzida em função da diagonal analisada, relacionando diferentes posições da profundidade de penetração ao longo da espessura do núcleo ferromagnético de Somaloy 500 para as velocidades de (a) 0,05m/s, (b) 0,10m/s e (c) 0,15m/s.....	136
Figura 84	Gráficos do valor máximo, em módulo, da densidade de corrente elétrica induzida em função da profundidade de penetração no núcleo ferromagnético para as três velocidades, com núcleo ferromagnético de (a) Aço 1020 e (b) Somaloy 500.....	137
Figura 85	Distribuição da densidade de corrente elétrica na base do núcleo ferromagnético de Aço 1020 quando o carro percorre uma velocidade de 0,10 m/s em regime permanente.....	138
Figura 86	(a) Desenho explicativo da região de monitoramento da corrente elétrica induzida; (b) Gráfico da corrente elétrica induzida no núcleo ferromagnético da armadura em função da velocidade de translação do carro, em uma área transversal sob o carro.....	139
Figura 87	Distribuição da densidade de corrente elétrica na superfície do núcleo da armadura quando uma das bobinas é excitada com corrente elétrica constante de amplitude 2 A e frequência 2 Hz, em regime permanente, considerando os núcleos de (a) Aço 1020 e (b) Somaloy 500.....	140
Figura 88	Gráfico da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro medida na diagonal sob o carro, quando este se movimenta com velocidade constante de 0,05m/s na direção x sobre o núcleo ferromagnético.....	141
Figura 89	Gráfico da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro medida na diagonal sob o carro, quando este se movimenta com velocidade constante de 0,10m/s na direção x sobre o núcleo ferromagnético.....	142
Figura 90	Gráfico da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro medida na diagonal sob o carro, quando este se movimenta com velocidade constante de 0,15m/s na direção x sobre o núcleo ferromagnético.....	142

Figura 91	Mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético para armadura manufaturada com Aço 1020: (a) vista superior com a localização do corte CC'; detalhe do mapeamento 2D da densidade de fluxo magnético no modelo quando o carro desloca-se com velocidade constante de (b) 0,05m/s e (c) 0,10m/s.....	143
Figura 92	Mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético para armadura manufaturada com Somaloy 500: (a) vista superior com a localização do corte CC'; detalhe do mapeamento 2D da densidade de fluxo magnético no modelo quando o carro desloca-se com velocidade constante de (b) 0,05m/s e (c) 0,10m/s.....	144
Figura 93	Gráfico de valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético medidos a 0,5 mm da face polar de um dos ímãs permanentes, quando o núcleo ferromagnético é composto de Aço 1020, caso simulado e caso experimental.....	146
Figura 94	Gráfico de valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético medidos a 0,5 mm da face polar de um dos ímãs permanentes, quando o núcleo ferromagnético é composto de Somaloy 500, caso simulado e caso experimental.....	147
Figura 95	Gráfico de valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético, obtidos de forma experimental, medidos a 0,5 mm da face polar de um dos ímãs permanentes, considerando os núcleos de Aço 1020 e Somaloy 500.....	148
Figura 96	Fotografia da montagem feita para a medição de força normal.....	149
Figura 97	Gráfico da força normal atuante sobre o carro em função da corrente elétrica aplicada no enrolamento x da bobina planar, quando o núcleo ferromagnético da armadura é de Aço 1020.....	150
Figura 98	Gráfico da força normal atuante sobre o carro em função da corrente elétrica aplicada no enrolamento x da bobina planar, quando o núcleo ferromagnético da armadura é de Somaloy 500.....	151
Figura 99	Força normal, obtida através de testes experimentais, para os núcleos de Aço 1020 e Somaloy 500, quando corrente elétrica é introduzida na fase que se encontra em perfeito alinhamento com os ímãs permanentes do carro.....	151

Figura 100	Figura da estrutura montada para o ensaio de força planar de propulsão linear.....	152
Figura 101	Fotografia do esquema montado para a medição da força planar de propulsão quando a fase x é energizada.....	153
Figura 102	Aparato montado para o controle e geração da corrente elétrica aplicada à bobina.....	154
Figura 103	Gráficos da força planar de propulsão linear em função corrente elétrica aplicada no enrolamento x , em alinhamento com os ímãs permanentes do carro: (a) quando o núcleo é de Aço 1020 e (b) quando o núcleo é de Somaloy 500.....	155
Figura 104	Força planar de propulsão linear, obtida através de testes experimentais, para os núcleos de Aço 1020 e Somaloy 500, quando corrente elétrica é introduzida na fase x que se encontra em alinhamento com os ímãs permanentes do carro.....	156
Figura 105	Montagem para a medição da força planar de propulsão quando a fase x e a fase y são energizadas.....	157
Figura 106	Gráficos da força planar de propulsão linear em função corrente elétrica aplicada no enrolamento x e no enrolamento y , em alinhamento com os ímãs permanentes do carro, (a) quando o núcleo é de Aço 1020 e (b) quando o núcleo é de Somaloy 500.....	158
Figura 107	Força planar de propulsão linear, obtida através de testes experimentais, para os núcleos de Aço 1020 e Somaloy 500, com corrente elétrica na fase x e na fase y , que se encontram em alinhamento com os ímãs permanentes do carro.....	159
Figura 108	Diagrama esquemático de forças no Atuador Planar.....	162
Figura 109	Esquema montado para o ensaio de força de frenagem devida às correntes induzidas pelo efeito da velocidade.....	164
Figura 110	Fotografias do esquema montado para verificação do efeito das correntes elétricas induzidas nos dois diferentes núcleos ferromagnéticos: (a) vista geral; (b) destaque para a régua reticulada e o sensor óptico.....	165
Figura 111	Gráfico relacionando dados pontuais de velocidade em função do tempo obtidas pelos testes 1, 2 e 3.....	169

Figura 112	Gráfico relacionando dados pontuais de velocidade em função do tempo obtidas pelos testes 4,5 e 6.....	169
Figura 113	Gráfico relacionando dados pontuais de velocidade em função do tempo obtidas pelos testes 7, 8 e 9.....	170
Figura 114	Gráfico relacionando dados pontuais de velocidade em função do tempo obtidas pelos testes 10, 11, 12.....	170
Figura 115	Gráfico da força de atrito total em função da velocidade para três situações de núcleo ferromagnético.....	173
Figura 116	Gráfico da força de frenagem puramente eletromagnética em função da velocidade para dois diferentes núcleos ferromagnéticos.....	174

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Características do Atuador Planar.....	50
Tabela 2	Propriedades do Aço Maciço AISI 1020 [65].....	67
Tabela 3	Comparação do peso específico antes e depois do tratamento de calor a 500 °C por 30 minutos no ar – 800MPa [43].....	84
Tabela 4	Comparação da permeabilidade relativa máxima do Somaloy 500 em função do aditivo utilizado, tratamento térmico e pressão de compactação [44].....	86
Tabela 5	Propriedades do Somaloy 500 + 0,5% Kenolube [35] [41].....	88
Tabela 6	Dados magnéticos nominais e comerciais de três tipos básicos do compósito Ancorsteel [45].....	90
Tabela 7	Dados magnéticos dos ímãs permanentes N35H [59].....	94
Tabela 8	Resultados relacionados à resistividade elétrica do bloco 1.....	97
Tabela 9	Resultados relacionados à resistividade elétrica do bloco 2.....	97
Tabela 10	Resultados relacionados à resistividade elétrica do bloco 3.....	97
Tabela 11	Resultados relacionados à resistividade elétrica do bloco 4.....	98
Tabela 12	Resultados relacionados à resistividade elétrica do bloco 5.....	99
Tabela 13	Resultados relacionados à resistividade elétrica do bloco 6.....	99
Tabela 14	Resultados relacionados ao Peso Específico do Somaloy 500 nos ensaios de 13 a 18.....	102
Tabela 15	Dados relacionados aos testes 1 até 12 destacando o coeficiente de atrito médio total para cada configuração do Atuador Planar.....	171
Tabela 16	Valores médios, numéricos e experimentais, comparativos, para os dois casos, da densidade de fluxo magnético, sobre a face polar de um dos ímãs permanentes, em regime estático, destacando as diferenças percentuais.....	177

Tabela 17	Valores de sensibilidade, numéricos e experimentais, comparativos, para os dois casos, da força planar de propulsão linear, em regime estático, destacando as diferenças percentuais.....	177
Tabela 18	Valores, numéricos e experimentais, comparativos, para os dois casos, da força normal, em regime estático, destacando as diferenças percentuais.....	177

LISTA DE ABREVIATURAS

a	Aceleração (m/s^2)
B	Densidade de fluxo magnético (T)
\vec{B}	Vetor densidade de fluxo magnético (T)
\vec{B}_{gN}	Componente da densidade de fluxo magnético no entreferro produzida pelo ímã permanente N (T)
$B_{gT_{z1}}$	Componente z do vetor densidade de fluxo magnético total no entreferro (T)
$B_{g_{zN}}$	Componente z do vetor densidade de fluxo magnético no entreferro produzida pelos ímãs permanentes, medida sob o ímã permanente N (T)
$(BH)_{\max}$	Máximo produto energético de um ímã permanente (J/m^3)
\vec{B}_{int}	Indução magnética oriunda da movimentação de uma placa contendo uma fonte constante de campo magnético (T)
B_{mod}	Módulo da densidade de fluxo magnético (T)
B_r	Indução remanente ou remanência (T)
B_x	Componente x do Módulo da densidade de fluxo magnético (T)
B_y	Componente y do Módulo da densidade de fluxo magnético (T)
B_z	Componente z do Módulo da densidade de fluxo magnético (T)
\vec{E}	Vetor intensidade de campo elétrico (V/m)
f	Frequência (Hz)
F	Força (N)
\vec{F}_{At}	Força de atrito (N)
F_{AZ}	Força magnética de atração normal ou força normal (N)
\vec{F}_N	Força eletromagnética planar de propulsão sobre o ímã permanente N (N)
F_R	Força resultante (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)
g	Aceleração gravitacional, 9,806 m/s ²
H	Campo magnético (A/m)
\vec{H}	Vetor intensidade de campo magnético (A/m)
H_c	Força coercitiva (A/m)
i	Corrente elétrica (A)
J	Densidade de corrente elétrica (A/m ²)
\vec{J}	Vetor densidade de corrente elétrica (A/m ²)
\vec{J}_N	Vetor densidade de corrente elétrica na fase do enrolamento planar localizado sob o ímã permanente N (A/m ²)
J_{xN}	Componente x do vetor densidade de corrente em uma fase do enrolamento y , localizada sobre o ímã permanente N (A/m ²)
J_{yN}	Componente y do vetor densidade de corrente em uma fase do enrolamento x , localizada sobre o ímã permanente N (A/m ²)
k	Coefficiente de atrito (Ns/m ou kg/s)
k_{em}	Coefficiente de atrito relacionando à força de frenagem eletromagnética oriundo das correntes induzidas (Ns/m ou kg/s)
k_m	Coefficiente de atrito mecânico (Ns/m ou kg/s)
l	Comprimento (m)
m	Massa do bloco (g)
m_{pp}	Massa padrão (g)
n	número de espiras de uma bobina
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
$P_{fora\ da\ água}$	Massa do bloco de Somaloy 500 (g)
$P_{na\ água}$	Massa do bloco de Somaloy 500, quando introduzido em água (g)
R	Resistência elétrica (Ω)
R	Força de frenagem (N)
s_{af}	área da seção de um condutor (m ²)
sg	Área da superfície transversal ao fluxo magnético em cada um dos entreferros (m ²)

SMC	Compósito magneticamente macio (<i>Soft Magnetic Composites</i>)
t	tempo (s)
\bar{T}	Tensor de Maxwell (N/m ²)
\bar{v}	Vetor velocidade (m/s)
V	Diferença de potencial elétrico
V_N	Volume do condutor com corrente elétrica, que está imerso no fluxo magnético do ímã permanente N (m ³)
$\beta_{Somaloy}$	Peso específico do Somaloy 500 (g/cm ³)
$\beta_{Água}$	Peso específico da água (g/cm ³)
δ	Profundidade de penetração (m)
$\delta_{Somaloy}$	Profundidade de penetração no núcleo de Somaloy 500 (m)
$\delta_{Aço}$	Profundidade de penetração no núcleo de Aço 1020 (m)
μ	Permeabilidade magnética de um determinado material (H/m)
$\mu_{Aço}$	Permeabilidade magnética do Aço 1020 (H/m)
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo (H/m)
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
$\mu_{Somaloy}$	Permeabilidade magnética do Somaloy 500 (H/m)
ρ	Resistividade elétrica ($\Omega.m$)
σ	Condutividade elétrica do material ($1/\Omega.m$)
$\sigma_{Aço}$	Condutividade elétrica do Aço 1020 ($1/\Omega.m$)
$\sigma_{Somaloy}$	Condutividade elétrica do Somaloy 500 ($1/\Omega.m$)
ϕ_m	Fluxo magnético (Wb)
\mathfrak{R}_{eq}	Relutância equivalente do circuito (Ae/Wb)
\mathfrak{R}_{g1}	Relutância do entreferro localizada sob o ímã permanente 1 (Ae/Wb)
\mathfrak{R}_{g2}	Relutância do entreferro localizada sob o ímã permanente 2 (Ae/Wb)
\mathfrak{R}_{nf}	Relutância do núcleo ferromagnético (Ae/Wb)
\mathfrak{R}_{cf}	Relutância da culatra ferromagnética (Ae/Wb)
\mathfrak{S}_m	Força magnetomotriz total (Ae)
\mathfrak{S}_{m1}	Força magnetomotriz gerada pelo ímã permanente 1 (Ae)

\mathfrak{S}_{m2}	Força magnetomotriz gerada pelo ímã permanente 2 (Ae)
ω	pulsção associada ao campo magnético imposta pelo deslocamento do carro e pela excitação pulsada das bobinas nos enrolamentos planares (Hz)
∇^2	Operador Laplaciano

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais muitos processos de manufatura industrial requerem movimentação bidirecional sobre o plano. Esta prática é muito usada principalmente em cortes e usinagem. Usualmente é feito um arranjo com uma estrutura mecânica acoplada a dois motores rotativos: um responsável pela movimentação no eixo x e o outro pela acionamento dos motores são feitos através de métodos digitais de controle conectados a circuitos eletrônicos. Uma das formas construtivas desta estrutura é apresentada na figura 1, onde o carro se desloca sobre o plano através do acionamento combinado de dois motores rotativos.

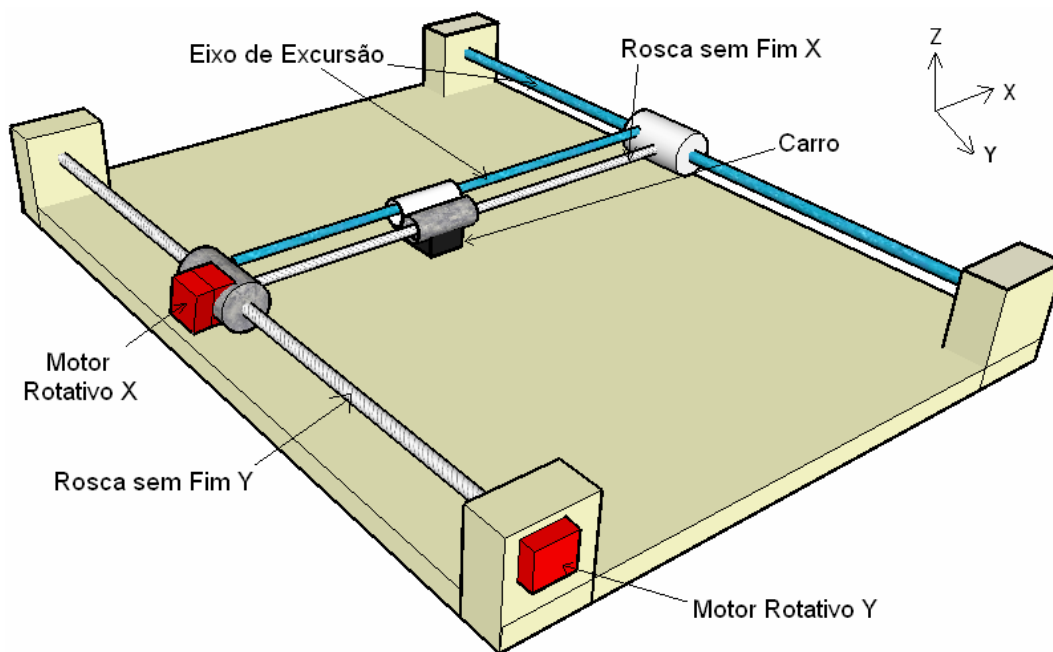


Figura 1 Translator bidirecional acionado por dois motores rotativos.

Outra estrutura também usada, porém com menos ênfase, para a produção de movimentação bidirecional, é a montagem de um sistema mecânico utilizando dois motores lineares, um aplicado a cada eixo. Novamente, a excursão sobre o plano se dá pelo acionamento controlado dos dois motores. Na figura 2 é apresentada uma possível estrutura para esta configuração.

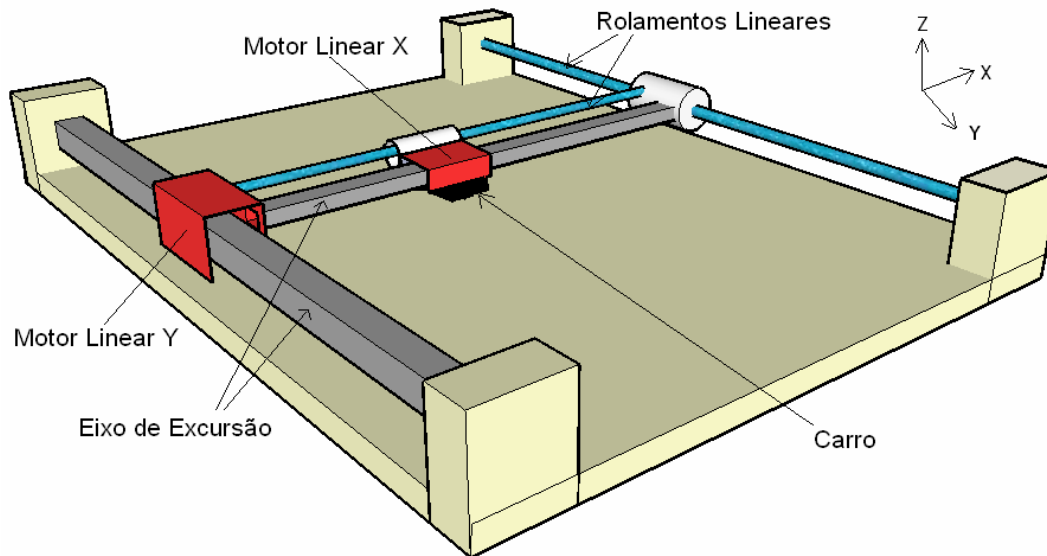


Figura 2 Translador bidirecional acionado por dois motores lineares.

É importante perceber que nas duas estruturas apresentadas nas figuras 1 e 2 a movimentação sobre o plano é feita através da combinação de dois dispositivos de tração, a saber, dois motores rotativos ou dois motores lineares. Já em Motores Planares, também conhecidos como Motores de Superfície, Motores XY ou ainda Atuadores Planares, a movimentação bidirecional sobre o plano é feita através de um único dispositivo de tração geralmente de tipo eletromagnético.

Pesquisas vêm explorando este tema e estudando diferentes formas de construção e análise para motores de superfície, principalmente por, em geral, estes apresentarem melhor desempenho quando comparados aos sistemas com um motor por eixo. Esta tecnologia tem-se beneficiado do uso de materiais magnéticos especiais, como, por exemplo, os ímãs permanentes de terras raras e os materiais compósitos magneticamente macios (*soft magnetic composites* - SMC).

A reduzida necessidade de sistemas mecânicos auxiliares, como engrenagens, polias, correias e conversores de movimentação rotativos para lineares possibilitam que os acionamentos mecânicos industriais, a partir de Atuadores Planares, possam ser utilizados com maior frequência e vantagem. A melhora na precisão de posicionamento também é um fator determinante para a utilização desta categoria de motores, e isso é possibilitado pela ausência de engrenagem e correias, essas responsáveis por folgas e respostas mecânicas mais lentas.

A combinação de levitação eletromagnética com Atuadores Planares é uma forte tendência em aplicações como o transporte de cargas, devido à capacidade de produzir energia cinética com o mínimo de contato mecânico entre o estator e o transator, reduzindo o atrito, e, conseqüentemente, buscando um melhor desempenho dinâmico. Contudo, a aplicação deste tipo de dispositivo deve ser específica e compatível com grandezas como carga, velocidade e força que devem ser previamente determinadas.

O estudo do Atuador Planar com Bobinas Planificadas e Núcleo de Material Ferromagnético Compósito foi inteiramente desenvolvido no Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O resultante é aqui apresentado, tratando do desenvolvimento, do estudo, da análise, da construção e dos testes desse dispositivo eletromagnético, visando:

- estudar uma proposta de um atuador planar para o desenvolvimento de movimentação sobre o plano com dois graus de liberdade a partir de um único dispositivo de tração, sendo possível a substituição do material do núcleo ferromagnético da armadura;

- modelar numericamente o comportamento estático e dinâmico do novo atuador planar; para o caso estático, a análise se dá no que diz respeito à distribuição de fluxo magnético, força planar estática de propulsão linear e força normal; já em caracterização dinâmica, a análise fundamenta-se no estudo de correntes parasitas induzidas no núcleo ferromagnético bem como na distribuição do campo magnético resultante no sistema; as mesmas são realizadas, considerando o uso de dois materiais diferentes no núcleo ferromagnético da armadura, ou seja, aço maciço e um compósito magneticamente macio;

- projetar e construir o atuador planar em estudo, definindo-se suas características de topologia e operacionalidade, ainda que em estágio de protótipo;

- testar, de forma experimental, os desempenhos estático e dinâmico do atuador planar desenvolvido, para os dois possíveis núcleos ferromagnéticos empregados na armadura estacionária; em características estáticas, as forças planar e normal envolvidas, bem como a distribuição espacial do vetor densidade de fluxo magnético são obtidas experimentalmente também; em condições dinâmicas, a força de atrito é medida, bem como são feitas simulações operacionais;

- validar os resultados obtidos com as simulações numéricas e considerações teóricas mediante a comparação com os resultados experimentais extraídos nos ensaios

do protótipo do atuador planar com bobinas planificadas desenvolvido, buscando conclusões a cerca do que é apresentado.

1.1 O ATUADOR PLANAR

Visando a construção de uma estrutura alternativa, na forma de protótipo, para um novo dispositivo eletromagnético, surge o atuador planar com bobinas planificadas e núcleo de material ferromagnético compósito, apresentando características especiais na construção e disposição dos enrolamentos das bobinas e do núcleo da armadura, além de um estudo à cerca dos fenômenos eletromagnéticos, estáticos e dinâmicos, envolvidos. Este atuador possui o mesmo princípio de funcionamento e características construtivas similares ao atuador planar apresentado em [10], tendo, por conseguinte, uma topologia semelhante a daquele.

A figura 3 mostra o atuador planar desenvolvido. Ele apresenta uma estrutura externa de material não ferromagnético responsável pela sustentação do núcleo ferromagnético e dos trilhos lineares. Sobre esses são montados rolamentos lineares na direção dos eixos x e y .

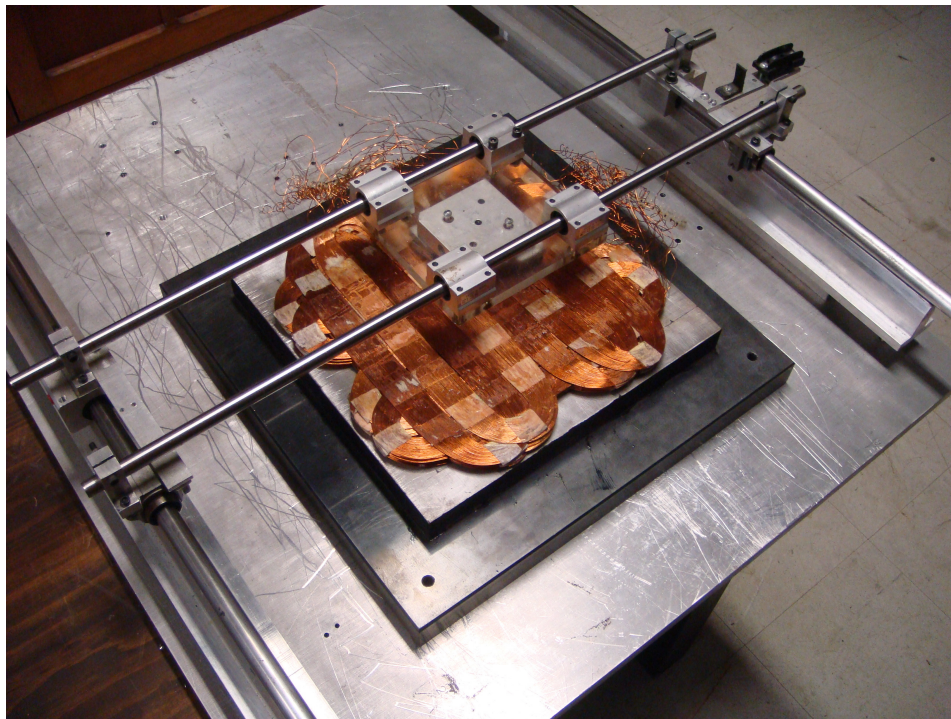


Figura 3 Fotografia do atuador planar desenvolvido com bobinas planificadas e núcleo de material ferromagnético compósito.

Sobre o núcleo ferromagnético não ranhurado e plano são montados dois enrolamentos planares ortogonais entre si, chamados de x e y . Cada enrolamento é formado por 4 bobinas planares entrelaçadas entre si de modo que possam formar um conjunto estatórico rígido. O carro, também chamado de translator, possui dois ímãs permanentes de NdFeB, de alto produto energético, responsáveis pela produção de campo magnético e montados em antiparalelo. Estes ímãs são unidos por um material ferromagnético, chamado de culatra, possibilitando um caminho de baixa relutância magnética para os ímãs e dando sustentação mecânica à montagem com os ímãs permanentes. O sistema de suspensão para o carro é formado por dois trilhos e quatro rolamentos lineares, que permitem a movimentação sobre a extensão do plano. A figura 4 ilustra esta estrutura.

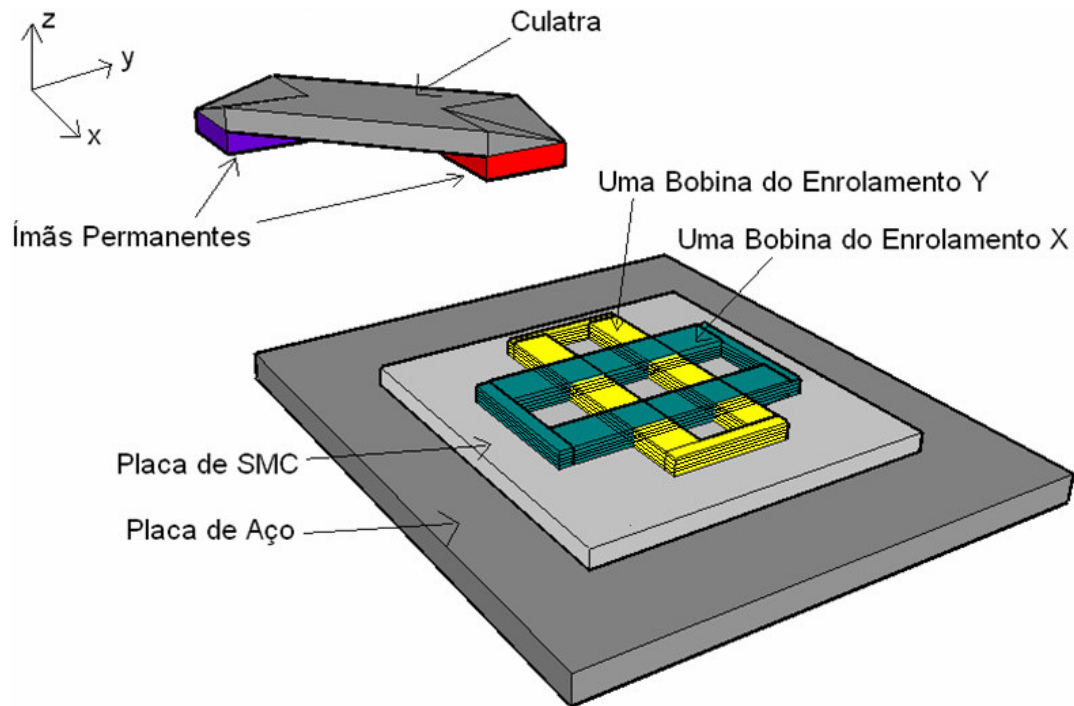


Figura 4 Vista esquemática da estrutura do atuador planar com bobinas planificadas, destacando a região do carro.

A movimentação do carro sobre o plano e a conseqüente mudança de posição é causada pela adequada excitação das bobinas planares dos enrolamentos x e y . Isso se dá pela interação do campo magnético produzido pelos ímãs permanentes e a corrente elétrica aplicada. Este fenômeno é conhecido como força de Laplace ou ainda também conhecido como força de Lorentz, que demonstra o aparecimento de uma força, de

origem eletromagnética, quando correntes elétricas estiverem imersas em um campo magnético.

O atuador planar foi investigado analisando-se os resultados numéricos obtidos através da sua modelagem pelo Método dos Elementos Finitos e confrontado-os com os valores obtidos através de testes realizados com o protótipo montado. A topologia de análise do dispositivo prevê duas situações: caso 1) o atuador planar é testado, ensaiado e simulado com um núcleo ferromagnético de Aço maciço AISI 1020 na sua armadura; caso 2) o atuador planar agora é estudado considerando que o material do seu núcleo de armadura é um compósito magneticamente macio de grão isolado, o Somaloy 500. Por apresentarem características magnéticas e elétricas diferentes, principalmente em relação à resistividade e à permeabilidade magnética, os dois materiais empregados no núcleo ferromagnético são analisados em função do comportamento e efeito que geram sobre a força planar de propulsão, força normal, densidade de fluxo magnético e correntes parasitas induzidas, sendo estas últimas produzidas por efeito de velocidade e pelo chaveamento de corrente elétrica nos enrolamentos.

1.2 VISÃO GERAL DO TRABALHO

Para uma melhor apresentação dos estudos, análises, resultados, conclusões e recomendações, o presente trabalho está dividido em seis capítulos.

No segundo capítulo é feita uma exposição à cerca de motores lineares e planares, destacando o estado da arte, características construtivas e tópicos operacionais para atuadores planares. Finaliza-se com a apresentação de características construtivas e de funcionamento do Atuador Planar em estudo.

O terceiro capítulo trás uma revisão de conceitos sobre matérias magnéticos, destacando assuntos relacionados aos materiais utilizados na confecção do protótipo em estudo, enfatizando a caracterização dos mesmos.

A análise apresentada no quarto capítulo fundamenta-se pela utilização do Método dos Elementos Finitos, onde são verificados fenômenos elétricos e magnéticos em regime estático e dinâmico na estrutura do protótipo virtual do atuador planar, isso é feito através da obtenção das distribuições de densidade de fluxo magnético e de corrente elétrica induzida no núcleo da armadura, da força normal e da força planar de propulsão linear. Ainda neste capítulo são apresentadas equações teóricas a respeito das correntes induzidas e dos efeitos correlacionados.

Já no quinto capítulo são apresentadas as metodologias de testes experimentais realizados no protótipo físico do Atuador Planar bem como os resultados obtidos. Estes testes limitam-se à verificação da densidade de fluxo magnético e forças envolvidas de forma estática, além de destacar a força de frenagem sofrida pelo translator, quando em movimento, devido ao aparecimento de corrente elétrica induzida no núcleo ferromagnético.

O sexto capítulo apresenta conclusões a respeito das informações geradas, estudadas e apresentadas nos capítulos 2, 3, 4 e 5, finalizando com recomendações e sugestões para trabalhos futuros envolvendo o Atuador Planar estudado.

2 ATUADORES PLANARES

Ao se tratar de atuadores planares, há que se considerar que estão baseados em atuadores lineares. Por essa razão, esses últimos servirão como base inicial para se entender os primeiros.

2.1 PRODUÇÃO DE MOVIMENTO LINEAR – ATUADORES LINEARES

Motores que desenvolvem movimentação sobre uma trajetória linear, com apenas um grau de liberdade, são conhecidos como motores lineares. Já aqueles que desenvolvem movimentação sobre o plano, com dois graus de liberdade, são conhecidos como motores planares, motores de superfície, motores XY ou ainda atuadores planares [1]. Geralmente, esses motores apresentam uma parte estacionária, o estator, e uma parte móvel, também conhecida por carro ou translator, cujo objetivo é a movimentação sobre o núcleo linear ou planar.

Neste trabalho será feita a apresentação de diferentes dispositivos eletromagnéticos relacionados à produção de movimento linear direto. Isso inclui tópicos básicos acerca de motores lineares e possíveis configurações de atuadores planares, dando-se enfoque em suas características construtivas e de operação. Assim, será apresentado o estado da arte relativo a esses atuadores.

2.1.1 Motores Lineares

A grande maioria dos motores elétricos é construída para produzir movimentos mecânicos rotativos em resposta a uma excitação elétrica. Geralmente, a partir deles, movimentos lineares são possíveis pela associação de conversores mecânicos tais como: engrenagens, correias, polias, eixos sem fim e outros. Estes conversores geram perdas que diminuem o rendimento, dificultam o controle, afetam o desempenho do sistema do qual façam parte além de requererem, em geral, uma manutenção periódica e muitas vezes onerosa.

Com a utilização de motores lineares, estes movimentos de translação podem ser obtidos diretamente, sem o uso de conversores mecânicos. Em muitos casos, o único contato mecânico existente é o suporte entre o translator e o trilho, a fim de manter um curso linear e a sustentação. Contudo, uma alternativa aplicada em muitos casos é a

levitação magnética do translator, como é o caso, por exemplo, do veículo MAGLEV, onde nenhum contato mecânico é estabelecido entre o estator e o translator enquanto ocorre o movimento linear [10].

Um motor linear pode ser definido como um transdutor eletromagnético que converte uma excitação elétrica em um movimento de translação. Estes motores podem ser melhor explicados e entendidos como sendo um motor rotativo tradicional que é aberto sobre o plano, possibilitando a realização de um movimento em linha, conforme ilustrado na figura 5. Ao contrário dos motores rotativos, onde os parâmetros de referência são a velocidade angular e o conjugado, nos motores lineares as componentes do movimento são referenciadas como força e velocidade de translação [4] [10].

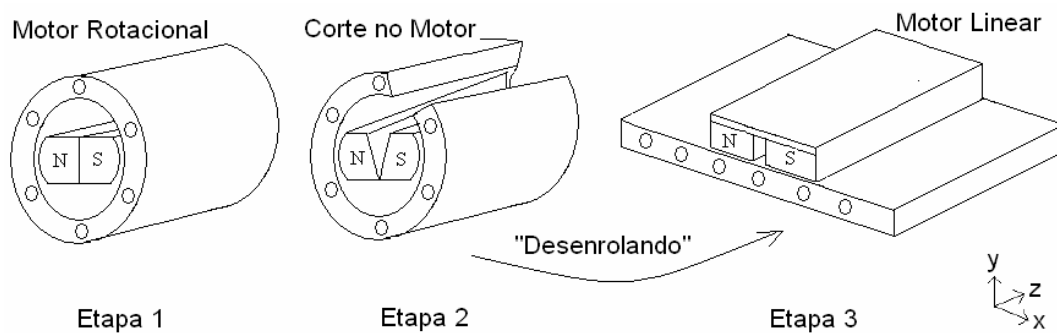


Figura 5 Transformação básica de um motor rotativo em motor linear [2].

Apesar dessa tecnologia ser mais moderna, já no final do século XIX havia referências, ainda que teóricas, sobre motores lineares [3]. No entanto, só mais recentemente seu uso começou realmente a ganhar aplicações importantes e mais corriqueiras. Isso se deu, pois os motores lineares apresentam, de modo geral, um grande entreferro entre estator e translator, em comparação a máquinas rotativas. Tal característica intrínseca exige uma considerável força magnetomotriz de excitação, o que reduziria a eficiência ou mesmo tornaria inviável o dispositivo. Ou seja, considerando uma relação custo-benefício, produzir movimento linear a partir de movimento rotativo ainda seria mais interessante do que fazê-lo diretamente através de um motor linear. Mas isso começou a mudar a partir do surgimento de fontes de elevada força magnetomotriz, de alta quantidade de energia armazenável por unidade de volume e custos relativos mais palatáveis. Um exemplo são os ímãs permanentes de elevado produto energético.

A tecnologia de motores lineares a ímãs permanentes ganhou impulso na década de 1980 com o surgimento dos ímãs permanentes de terras raras de alto produto energético, por exemplo, os ímãs permanentes de Neodímio-Ferro-Boro e de Samário-Cobalto, também conhecidos popularmente como “Super-Ímãs” [13]. A partir daí, a produção de considerável densidade de fluxo magnético em grandes entreferros passou a ser mais viável técnica e economicamente.

Outro aspecto interessante e prático, quanto se trata de motores lineares, é que sua manutenção é, em geral, mais fácil do que em motores rotativos, causando um menor custo sob o ponto de vista de recolocação de peças e também em paralisação do processo produtivo ou transporte. A evolução das técnicas de controle, detecção de posicionamento e acionamento elétrico também contribui para o crescente aumento da aplicação de tais motores [11].

Toda a máquina rotativa pode ter seu princípio de funcionamento convertido para máquina de propulsão linear, porém a recíproca não é verdadeira. Contudo, o mesmo tipo de máquina rotativa pode ser empregada em diversas funções, propiciando a fácil implementação em outra atividade, enquanto que máquinas de movimentação linear são fabricadas para uma determinada e específica tarefa, em função especificamente da questão de seu curso e tamanho.

Motores lineares são desenvolvidos baseados em dois princípios fundamentais: (1) alinhamento de fluxo magnético; (2) princípio da menor relutância. Para o caso de um fluxo magnético interagindo com uma corrente elétrica, a força de origem magnética resultante é expressa em função do comprimento ativo do condutor que está imerso neste campo magnético, podendo a sua equação ser escrita como proposto por Laplace, equação 2.1.

$$\vec{F} = i\vec{l} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

Nela, i é a corrente elétrica através do condutor com comprimento ativo l imerso no campo magnético com densidade de fluxo magnético B e F é a força produzida sobre o condutor. A figura 6 ilustra a sua aplicação. É importante notar que a equação 2.1 faz referência a apenas um condutor, podendo o dispositivo eletromagnético apresentar mais condutores. Neste caso, a resultante da força é a soma

das forças que cada condutor produz em resposta ao campo magnético e à corrente elétrica.

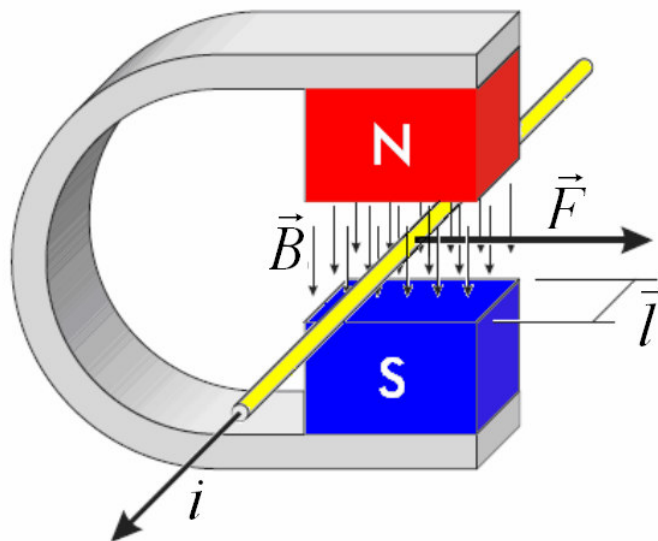


Figura 6 Força produzida pela interação entre corrente elétrica e campo magnético [49].

2.1.1.1 Tipo de Motores Lineares

As topologias para motores lineares são inúmeras e limitadas, na maioria das vezes, pela criatividade do projetista. Elas são obtidas a partir do princípio de funcionamento de máquinas elétricas rotativas. A seguir são apresentados os modelos mais usuais de motores lineares para desenvolvimento de movimentação em linha reta.

Nos últimos anos tem-se verificado um crescente aumento na utilização de Motor Linear de Indução (MLI) pela indústria, principalmente para deslocamentos horizontais de alta velocidade [2][3]. Da mesma forma que em seu análogo rotativo, o acionamento geralmente é feito com excitação trifásica, e a movimentação do translator, geralmente confeccionado de material metálico com boa condutividade elétrica, sobre o plano se dá pela associação de fases de forma a ordenar o campo magnético viajante no sentido de movimento pretendido de modo que o estator induza corrente no translator ou vice-versa [6][7][18].

No MLI, quando um campo magnético alternado atravessa um material eletricamente condutor, uma corrente elétrica é induzida no material em resposta a esta variação. Da interação desse campo com esta corrente induzida resulta o aparecimento de uma força no sentido de propagação do campo. Se o elemento gerador do campo se encontrar fixo no espaço então a peça condutora tende a deslocar-se. Inversamente, se a

peça condutora se encontrar bloqueada, será o elemento gerador do campo a deslocar-se. Dentre as principais vantagens do MLI, comparadas com seu análogo rotativo, podem ser citadas: silencioso, econômico, de fácil manutenção, rápido e considerável redução de perdas por atrito.

Já o Motor Linear Síncrono (MLS) possui a montagem do núcleo ferromagnético e a disposição das bobinas do estator idêntica a do MLI, cujo objetivo é igualmente produzir um campo magnético viajante quando as bobinas são excitadas com corrente elétrica alternada. Entretanto, a parte secundária é distinta daquela do MLI, seja por suas características de operação e montagem.

No MLS, assim como nas máquinas rotativas síncronas, o secundário é formado por, basicamente, uma fonte de fluxo magnético contínuo, que pode ser produzido por um enrolamento de campo ao qual se aplica corrente contínua, ou por um conjunto de ímãs permanentes [2]. O movimento mecânico está em sincronismo com o movimento do campo magnético, isto é a velocidade mecânica é a mesma que a velocidade do campo magnético viajante. A ação de movimentação é dada pela interação entre os pólos Norte e Sul, dispostos alternadamente no translator, e o campo magnético produzido pelo enrolamento trifásico no núcleo ferromagnético.

O MLS é aplicado especialmente para transportes que exijam uma elevada força de translação. A velocidade é diretamente proporcional à frequência e inversamente proporcional ao número de pares de pólos do enrolamento. Dentre as principais características do MLS podem ser citadas: elevada eficiência; simplicidade mecânica; fácil controle de velocidade e de força [8].

O Motor Linear de Corrente Contínua (MLCC) possui o enrolamento de armadura excitado por corrente contínua. Novamente, o MLCC é similar a motores rotativos de corrente contínua sob o ponto de vista de que têm um enrolamento de armadura e campo de excitação, porém, no caso do motor linear, geralmente a armadura é estacionária e o de campo está na parte móvel [2].

Em geral, a armadura é constituída de um núcleo de material ferromagnético e um enrolamento colocado em ranhuras do primeiro ou na superfície junto ao entreferro. A comutação se dá pelo uso de teclas dispostas ao longo da trajetória da parte móvel que, por sua vez carrega um conjunto de escovas. Alternativamente, um sistema de comutação eletrônico sem uso de escovas pode ser empregado; isso demandará o uso de um sistema que determine a posição relativa entre a armadura e a parte móvel ao longo da excursão para que a comutação possa se dar de forma apropriada.

Existem muitas formas construtivas dos MLCC, dentre elas, o motor de corrente contínua homopolar, com dupla armadura e sem escovas [12]. Este motor é constituído, em sua parte móvel por duplo enrolamento de armadura, onde cada bobina é disposta em torno de uma barra de material ferromagnético, sem ranhuras. As bobinas são excitadas eletricamente de forma independente. A parte móvel, produtora do campo magnético de excitação é constituída de uma culatra de sustentação para cinco ímãs permanentes de elevado produto energético, responsáveis pelo fluxo de excitação [5]. A figura 7 ilustra este tipo de motor.

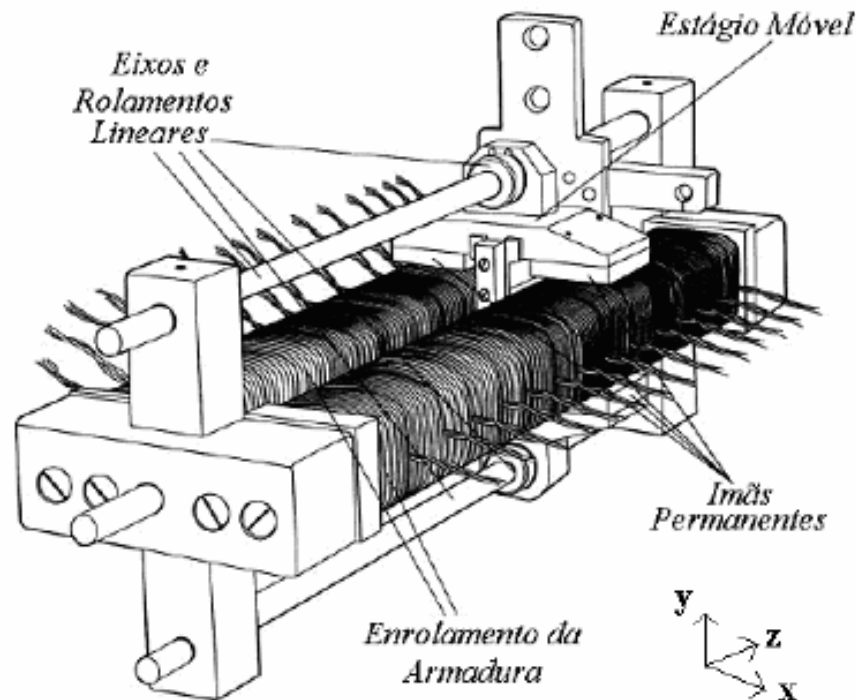


Figura 7 Motor Linear de corrente contínua *brushless* com dupla armadura [12][14].

Motores Lineares de Passo (MLP) são dispositivos eletromagnéticos que convertem pulsos elétricos de entrada em movimentos lineares de saída em forma de passos. São comparáveis a motores de passo rotativo quanto ao princípio de operação. Geralmente, em operação, o número de passos lineares é igual ao número de pulsos de entrada. São utilizados para realização de movimentos lineares em pequenos deslocamentos, sendo que o passo mínimo pode chegar a valores de medidas inferiores a 0,1mm; mesmo assim o sistema pode ser robusto mecanicamente e ser parado repetidas vezes sem, contudo, causar danos significativos ao equipamento. Além disso, quando controlado corretamente, não apresenta erros cumulativos de posicionamento na

operação, fator este de bastante importância em equipamento de precisão [2][7][11]. No entanto, o MLP apresenta uma baixa eficiência com sistemas de controle simplificados, ou ainda certas configurações apresentam uma grande força normal, que pode vir a prejudicar o desempenho.

O Motor Linear Voice Coil (MLVC) é assim conhecido devido ao seu princípio de funcionamento ser muito parecido com o do alto-falante. Neste tipo de motor linear, a bobina é móvel, enquanto que os ímãs permanentes de excitação são estáticos. A interação entre o campo magnético e a corrente elétrica que circula pelos enrolamentos é responsável pela produção da força mecânica axial que produz o deslocamento.

No MLVC a velocidade e a força de deslocamento linear são proporcionais à corrente elétrica, que pode ser alternada ou contínua, e ao campo magnético de excitação. Este motor é dirigido à produção de pequenos deslocamentos com pouca carga mecânica, contudo é bastante rápidos. Um inconveniente que deve ser observado é que a alimentação da bobina pode ser móvel.

2.2 PRODUÇÃO DE MOVIMENTO SUPERFICIAL – ATUADORES PLANARES

Dispositivos eletromagnéticos que desenvolvem movimentação sobre o plano, podem ser denominados de atuadores ou motores planares. Estes dispositivos surgem num cenário industrial de necessidade de equipamentos de precisão no posicionamento bidirecional e alta velocidade de excursão. Podem desenvolver elevada precisão de posicionamento, fomentando assim um campo bastante importante de processos de fabricação modernos. Para isso, a combinação de princípios de motores lineares é uma estratégia usada do seu desenvolvimento [10] [16].

A seguir serão apresentadas algumas topologias de motores planares. Na figura 8 é possível visualizar a estrutura básica de um motor de superfície. Este motor apresenta um estator de material ferromagnético sobre o qual é disposto um arranjo de ímãs permanentes colocados adjacentes uns aos outros, de modo que ao lado de um pólo sul haverá um pólo norte e vice-versa. A parte móvel do motor é uma estrutura em formato de carro que possibilita o deslocamento tanto na direção x como na direção y . No carro estão montadas oito suportes ferromagnéticos, figura 9, cada um envolvido por uma bobina eletricamente independente das demais, e arrançados de forma a produzir a interação do campo magnético produzidos pelas bobinas e ímãs permanentes [15].

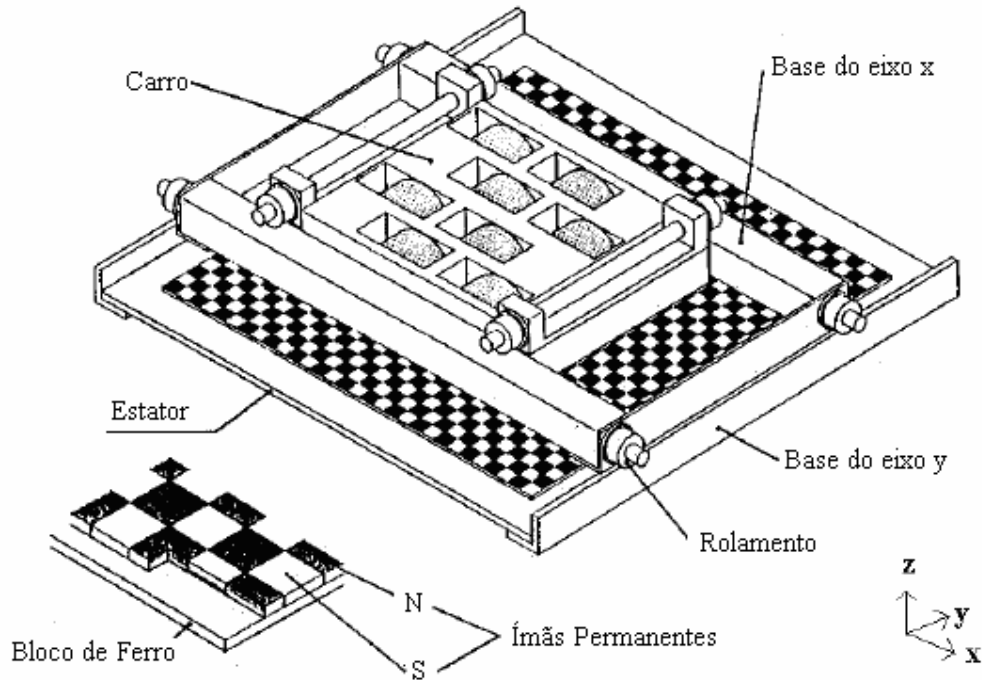


Figura 8 Estrutura de um Motor de Superfície [15].

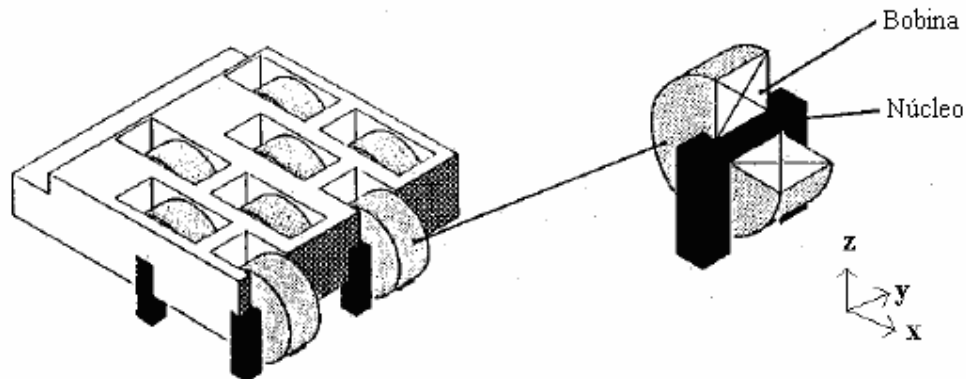


Figura 9 No carro do Motor de Superfície, destaque para a disposição das bobinas com os núcleos ferromagnéticos [15].

Outro modelo de motor planar é apresentado na figura 10. Trata-se de um dispositivo baseado no Motor de Sawyer. Ele apresenta, na parte móvel, um arranjo com quatro motores lineares. Dois destes motores são responsáveis pelo deslocamento no eixo x e os outros dois em y , dispostos conforme indica a figura 11. Cada motor linear é formado por um núcleo de material ferromagnético em forma de E envolvidos, cada um, por duas bobinas eletricamente independentes [16].

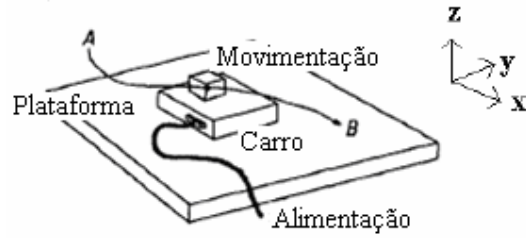


Figura 10 Vista esquemática para um motor planar baseado no Motor de Sawyer [16].

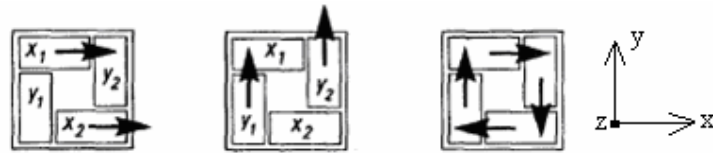


Figura 11 Vista da parte móvel do motor planar baseado no Motor de Sawyer [16].

O estator consiste em uma placa de material ferromagnético em formato ranhurado para que possa interagir com os dentes da parte móvel, mostrado na figura 12(a). A interação entre a parte móvel e a parte estática é mostrada na figura 12(b). A movimentação se dá quando, de forma sincronizada, as bobinas são excitadas, e o seu princípio é baseado no motor de relutância variável, conforme sugere a seqüência de etapas na figura 12(b).

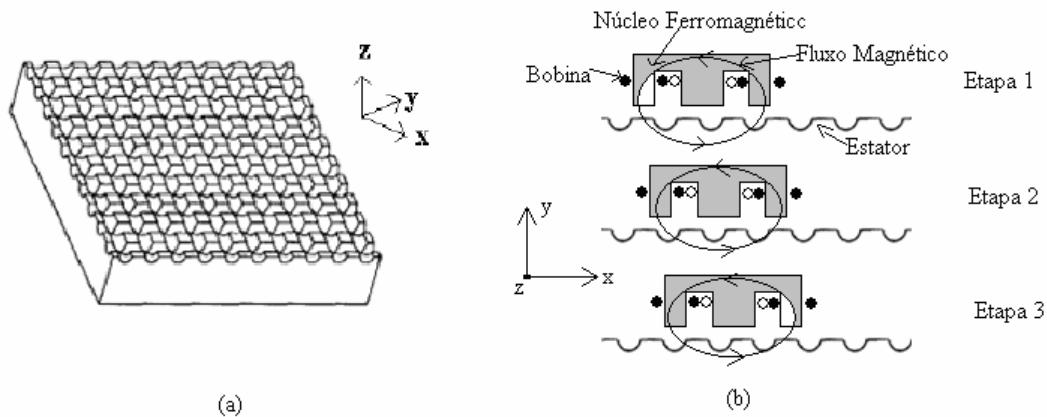


Figura 12 Estator de material ferromagnético para o motor planar baseado no Motor de Sawyer; (a) estator ranhurado; (b) interação entre a parte móvel e a parte estática [16].

Outro modelo de motor planar a partir da associação de motores lineares pode ser feito com motores lineares tipo *voice coil*, tal como o já visto anteriormente. São necessários dois motores tipo *voice coil*, um para o deslocamento linear no eixo x e outro para o deslocamento no eixo y . A combinação de acionamento entre estes dois

motores dará o posicionamento do translator sobre o plano. A figura 13 mostra um esquema de motor planar produzido a partir de dois motores lineares tipo *voice coil*.

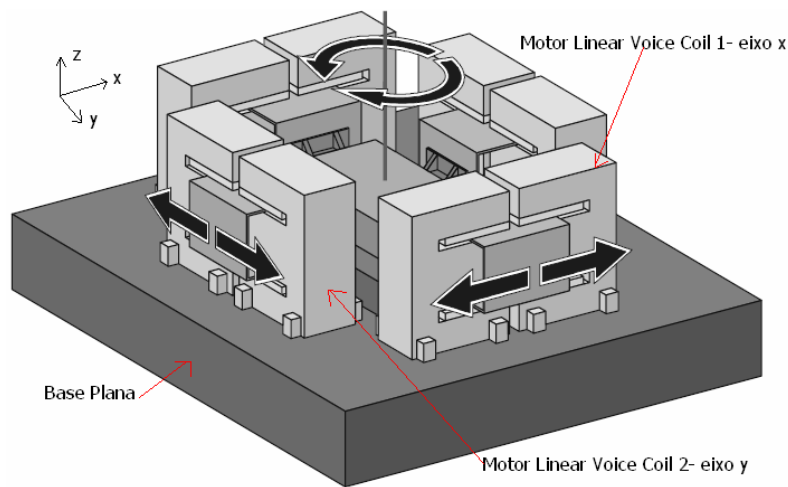


Figura 13 Motor planar feito a partir de dois motores lineares tipo *voice coil* [19].

Alguns estudos demonstram a possibilidade de uso de sistemas de suspensão não mecânica em atuadores planares. O objetivo é reduzir ou eliminar o contato mecânico entre as parte móvel e estática, e com isso buscar um desempenho desejado. A levitação magnética pode assim ser usada. Ela pode apresentar configurações tais que não haja contato mecânico entre as partes móveis e estáticas, quando para a produção de força magnética. Um sistema de levitação magnético é apresentado, envolvendo quatro motores lineares, independentes entre si, para a composição da base estática, quatro ímãs permanentes colados em um estágio móvel de material não ferromagnético e um sistema de controle de posição com elevada precisão [17]. Este esquema é apresentado na figura 14.

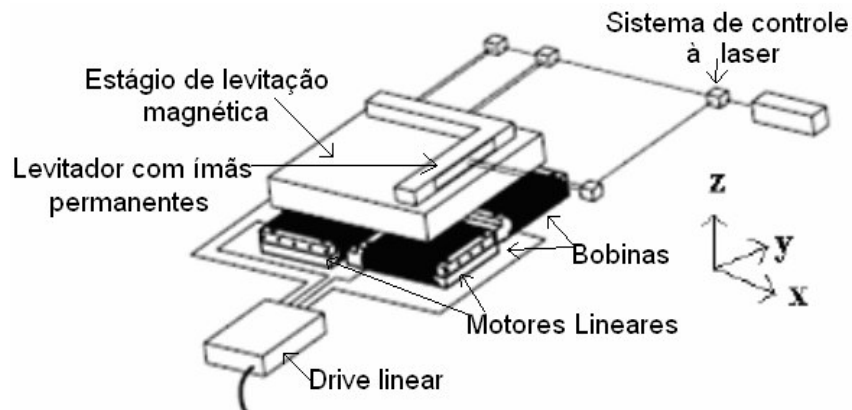


Figura 14 Configuração de um sistema magnético de levitação [17].

O estágio levitador consiste em uma plataforma com quatro ímãs permanentes arranjados de forma paralela, em sentidos verticais e horizontais. Estes blocos de ímãs permanentes são dispostos sobre a parte estática, sem contudo tocá-la cujo objetivo é, também, mostrar os sentidos de deslocamento e força que cada bloco possibilita [17].

Cada motor linear é capaz de produzir uma força de levitação no sentido vertical e uma força de translação no sentido horizontal, de x e y . Dois dos motores são orientados no sentido x e dois são orientados no sentido y . Constituindo os quatro motores, cada um com duas forças independentes. A figura 15(a) mostra o jogo de quatro bobinas com o estágio móvel removido; é possível visualizar as bobinas de dois dos motores orientados no eixo x (esquerda-direita) e as bobinas dos dois motores orientados no eixo y (frente - traz), enquanto que na figura 15(b) é possível visualizar o motor planar com a parte móvel e com a parte estática montadas [17].

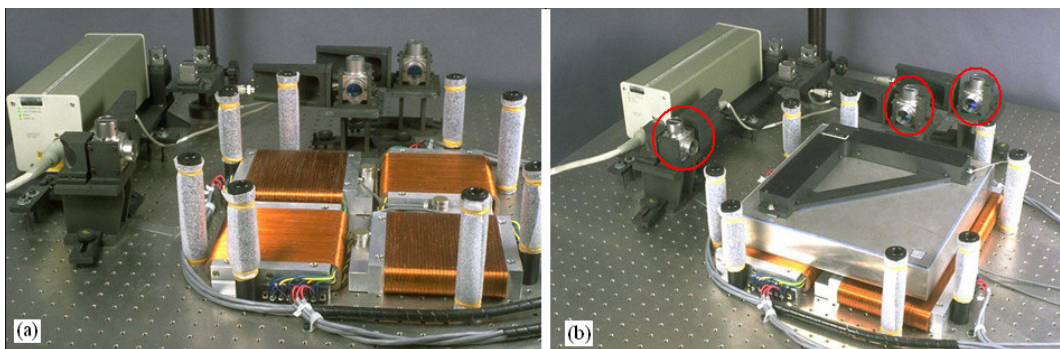


Figura 15 Motor Planar com Levitação: (a) plataforma sem a parte móvel; (b) plataforma com a parte móvel, indicando os sensores de posição [17].

O excitador dos motores lineares consiste em 12 circuitos independentes, dirigidos para os quatro atuadores com três fases cada. O excitador distribui corrente elétrica contínua nas 12 fases em função da necessidade de deslocamento e da resposta de posicionamento dos sensores ópticos de posição. O controle de posicionamento se dá através de três sensores colocados de forma estratégica e em destaque na figura 15(b).

Uma alternativa inovadora e viável para as mesas XY é apresentada em [10]. Essa configuração apresenta uma significativa vantagem uma vez que desenvolve movimentação sobre o plano a partir de apenas um dispositivo de tração. Sua estrutura beneficia-se de uma distribuição tridimensional de densidade de fluxo magnético. A figura 16 apresenta um desenho ilustrativo deste atuador [24][25][26].

Localizado no estator, de material ferromagnético, o enrolamento multifase da armadura está montado de maneira que dois enrolamentos x e y ortogonais entre si, sejam montados: 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 . Na configuração apresentada, cada enrolamento possui 12 fases ou seções 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 [10].

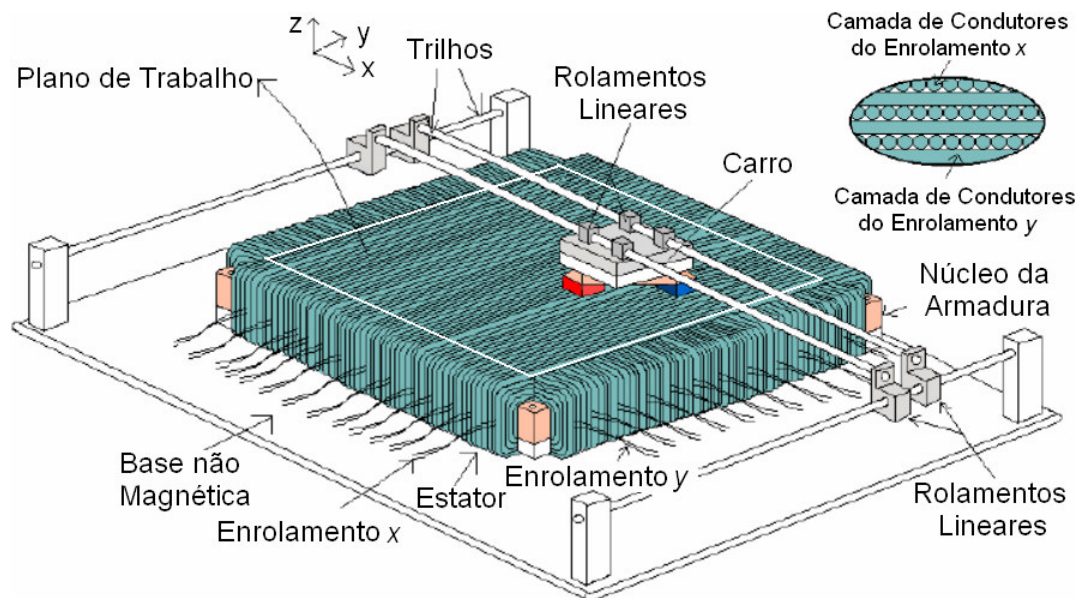


Figura 16 Atuador planar com enrolamento envolvente [10].

O funcionamento deste atuador planar, quanto à geração de excursão planar, está associada ao princípio da Força de Laplace. Quando um ímã permanente estiver sobre uma fase do enrolamento e essa for excitada com corrente, será desenvolvida uma força planar de propulsão sobre o carro que poderá movimentá-lo. Esta força será ortogonal à direção da corrente e da densidade de fluxo magnético de excitação; uma vez que essas duas direções também são ortogonais entre si, esta força de propulsão terá uma direção paralela ao plano de trabalho do atuador planar. Desta forma, 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 [10] [24]. Tendo sido utilizados enrolamentos envolventes, apenas o lado de bobina junto com entreferro é que será responsável pela produção da força de

propulsão. A movimentação com dois graus de liberdade se dá associada à conveniente energização dos enrolamentos. A Figura 17 ilustra parcialmente este comportamento.

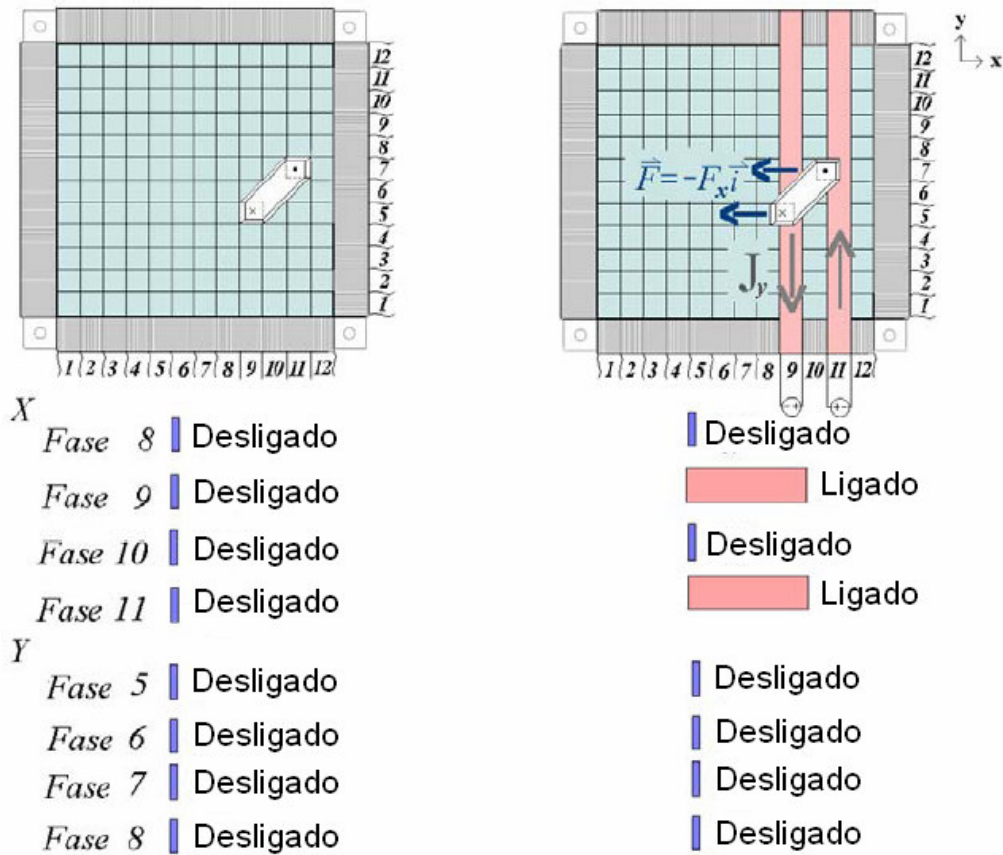


Figura 17 Exemplo de produção de movimento bidirecional: (a) carro em repouso; (b) movimento devido à excitação simultânea das fases dos enrolamentos x e y [10].

Uma das formas construtivas aplicáveis a esse tipo de atuador planar, é aquela que emprega bobinas planares montadas inteiramente no plano de trabalho e junto ao entreferro. Este tipo de montagem destaca-se principalmente por aproveitar os dois lados ativos da bobina para a produção de força e ainda possibilita a fácil substituição e manutenção, uma vez que ela não se encontra envolvida no núcleo, mas sim sobre ele.

Na figura 18 é mostrado um modelo de motor linear com enrolamento trifásico e bobinas planares. A haste móvel é confeccionada de material elétrico condutor. O estator é fabricado com material ferromagnético, com uma alta permeabilidade magnética relativa, contém dois ímãs permanentes, colocados em paralelo, responsáveis pela geração de um campo magnético. Ainda no estator são colocadas seis bobinas planificas, arranjadas numa ligação trifásica alternada, de maneira que, quando energizadas, provocam o surgimento de um segundo campo magnético, esse viajante ou

de translação. Os ímãs permanentes são colocados de forma a gerar um campo magnético que atue sobre a haste móvel, fazendo com que esta levite. Seguindo o princípio do motor de indução, quando as bobinas são acionadas, um campo magnético é percebido pela haste, fazendo com que sejam induzidas correntes elétricas na haste condutora, pelo princípio da Lei de Lenz. Estas correntes elétricas são perpendiculares ao campo magnético que as produziu, e da interação de ambas é produzida uma força de origem eletromagnética.

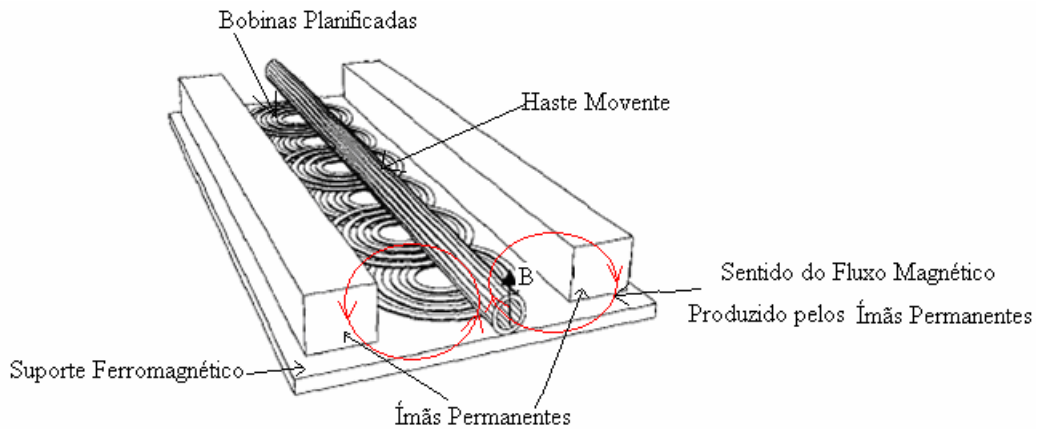


Figura 18 Estrutura de um motor linear com bobinas planificadas [21].

Uma alternativa para a confecção de enrolamento planificado é apresentada na figura 19, onde as bobinas são entrelaçadas uma às outras, sobrepondo-se e formando uma só estrutura [22] [23].

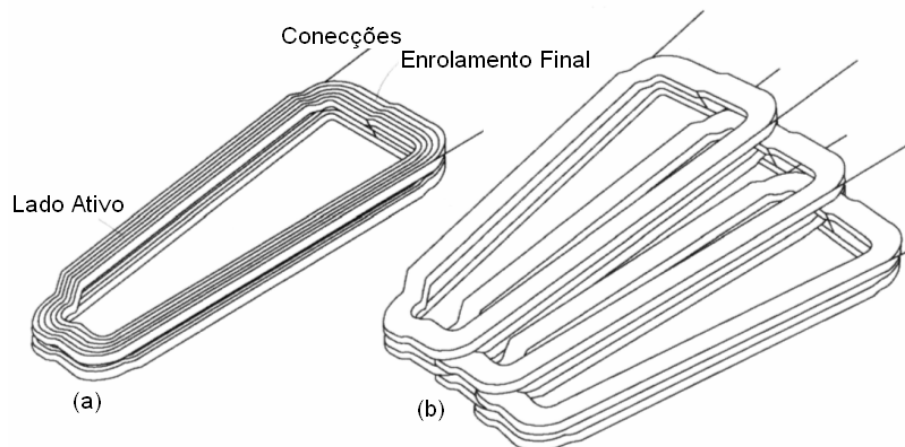


Figura 19 Enrolamento planificado: (a) vista de apenas uma bobina; (b) vista de três bobinas colocadas de forma entrelaçada, formando uma única peça [21].

A produção de movimentação rotativa também pode ser obtida através de motores lineares, dependendo do arranjo que se faça. Na figura 20 é mostrado um exemplo de protótipo que adota tal arranjo, onde quatro motores lineares são utilizados para rotacionar uma peça móvel.

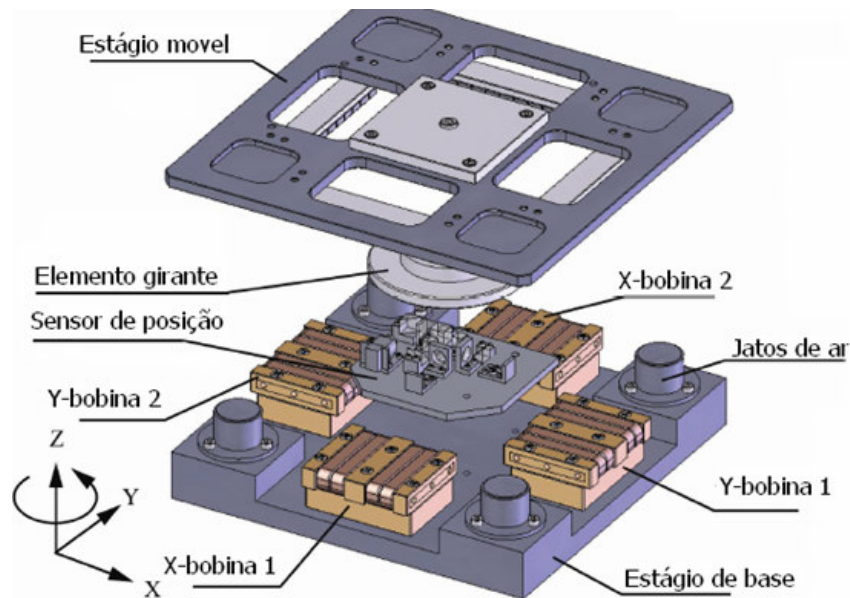


Figura 20 Estrutura básica de um atuador eletromagnético sendo utilizado para produção de movimento rotativo [20].

O arranjo da figura 20 consiste de um elemento móvel e uma base do estágio. Quatro motores lineares bifásicos de corrente contínua, sem escovas, são arranjados sendo dois no eixo x e dois no eixo y . Os motores se apresentam em uma distribuição magnética simétrica sobre o estágio de base. É neste estágio de base que ficam as bobinas de núcleo ferromagnético. O calor gerado pelas bobinas pode também ser liberado através da base do estágio. Quatro jatos de ar, direcionados no eixo z , localizados estrategicamente nos cantos do estágio fixo, são utilizados para auxiliar na sustentação do estágio móvel. Este, por sua vez, é formado por uma parte girante e uma estrutura quadrada que contém ímãs permanentes, produtores do campo magnético que fará a interação com as bobinas, provocando assim o movimento. A figura 21 mostra uma foto do protótipo montado, destacando-se os ímãs permanentes, o sistema de suspensão a ar, as bobinas e os sensores de posição.

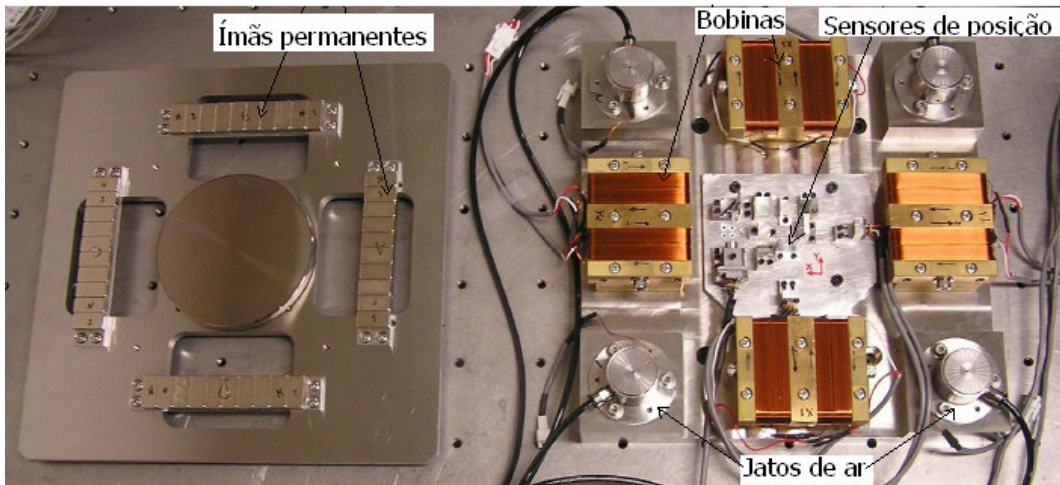


Figura 21 Fotografia do protótipo do atuador eletromagnético utilizado para produção de movimento rotativo [20].

2.3 O ATUADOR PLANAR COM BOBINAS PLANIFICADAS E NÚCLEO DE MATERIAL FERROMAGNÉTICO COMPÓSITO

O atuador planar apresentado neste trabalho trata-se de um dispositivo eletromagnético que pode representar outra alternativa para construção de mesas XY. Neste modelo, o translator (carro) desenvolve uma movimentação com dois graus de liberdade a partir de um único sistema de tração. Inicialmente, esta já é uma vantagem em relação às mesas XY utilizadas hoje em dia pela indústria, onde o deslocamento sobre o plano é feito, geralmente, com dois motores rotativos ou, ainda, com dois motores lineares.

2.3.1 Estrutura Básica

A figura 22 apresenta o desenho básico do atuador planar com bobinas planificadas e núcleo de material ferromagnético compósito em estudo, enquanto que na tabela 1 são mostradas suas principais características construtivas. O enrolamento multifases é composto por dois enrolamentos ortogonais entre si. O primeiro, chamado de enrolamento x , disposto ao longo do eixo x , e o segundo chamado de enrolamento y , disposto ao longo do eixo y . Cada enrolamento possui 4 fases independentes e isoladas eletricamente umas das outras. Os enrolamentos ortogonais são montados em camadas intercaladas e de forma planificada, isto é, entre uma camada do enrolamento x é

montada uma camada do enrolamento y , e assim sucessivamente, sem envolver o núcleo, como pode ser visto na figura 23.

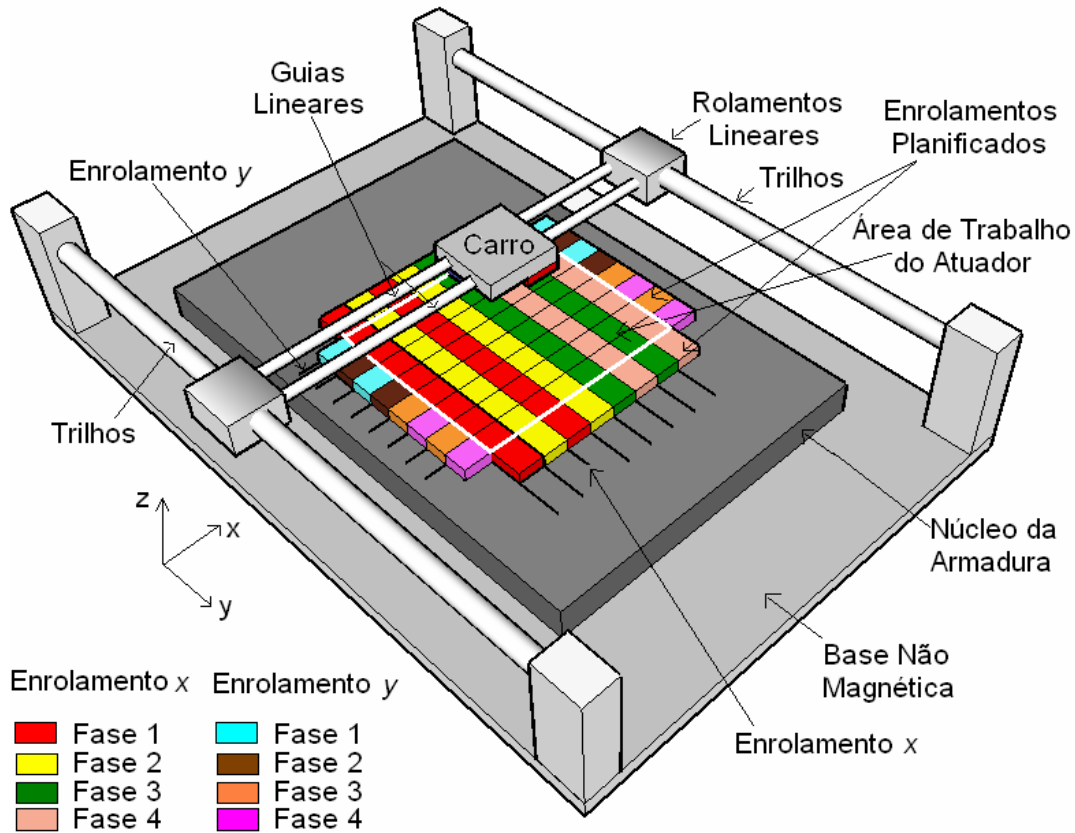


Figura 22 Ilustração do Atuador Planar com Bobinas Planejadas e Núcleo de Material Ferromagnético Compósito.

O carro possui dois ímãs permanentes sinterizados anisotrópicos de NdFeB, grau N35H, montados, em antiparalelo 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, a área de trabalho do atuador, para o deslocamento do carro sobre o estator, equivale a $200 \times 200 \text{ mm}^2$. A utilização de ímãs permanentes de NdFeB de alto produto energético possibilitou o desenvolvimento de um atuador planar com esta nova topologia e com o uso de um entreferro significativo [27] [30] [31].

Tabela 1 Características do Atuador Planar.

Itens	Característica	
Número de enrolamentos	2	
Número de fases por enrolamento	4	
Número de espiras por fase	225	
Número de camadas por enrolamentos	5	
Resistência elétrica de cada fase	20 Ω	
Material da culatra	Aço Maciço AISI 1020	
Sistema de suspensão	4 rolamentos lineares e 4 trilhos	
Número de ímãs permanentes	2	
Material dos ímãs permanentes	NdFeB sinterizado anisotrópico	
Situações analisadas	Caso 1	Caso 2
Material do núcleo da armadura	Aço Maciço AISI 1020	Somaloy 500
Comprimento do entreferro	12 mm	12 mm
Área da superfície polar dos ímãs	645,16 mm ²	645,16 mm ²
Altura ocupada pelos enrolamentos	10 mm	10 mm



Figura 23 Detalhe dos enrolamentos ortogonais, montados em camadas intercaladas, na sua forma planificada.

A figura 24 apresenta um detalhe do carro, com a culatra e os dois ímãs permanentes, destacando as medidas de cada peça. A largura de cada ímã permanente é aproximadamente igual à largura de cada uma das fases do enrolamento x e y . O carro é mecanicamente acoplado a uma estrutura com quatro enrolamentos e trilhos lineares, que possibilita o seu deslocamento planar com dois graus de liberdade. A figura 25 apresenta fotografias que destacam o carro, a estrutura de sustentação e a base montada para o atuador planar com bobinas planificadas em estudo.

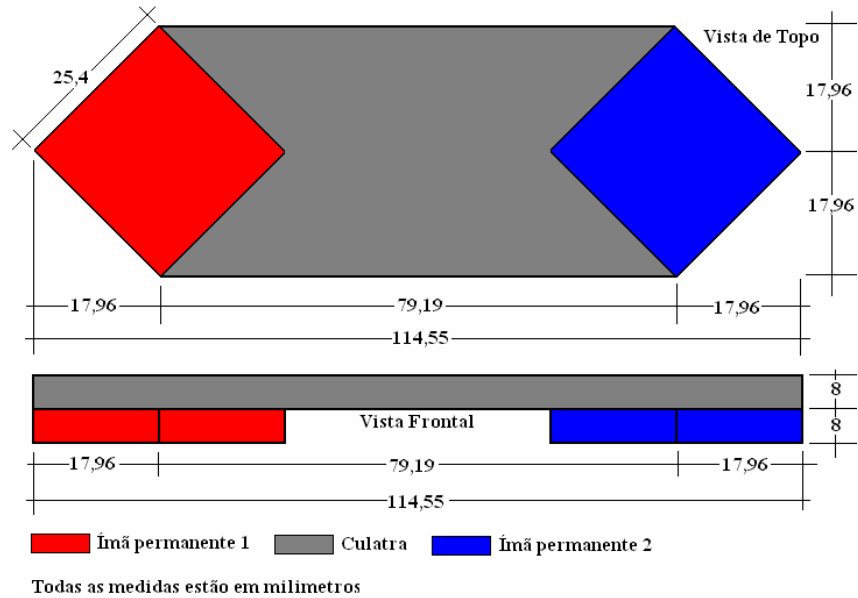


Figura 24 Detalhe do carro, com a culatra e os dois ímãs permanentes de NdFeB: vista frontal e vista de topo.

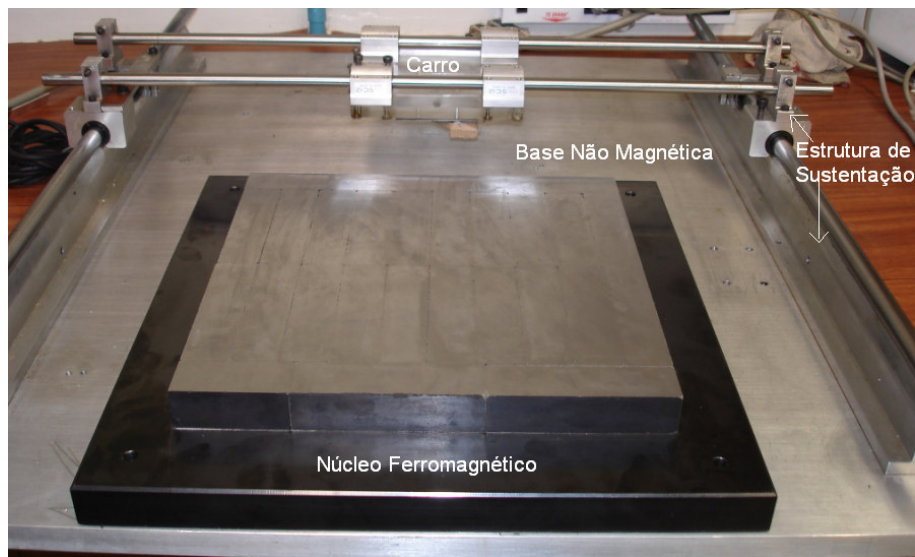


Figura 25 Estrutura montada para o translador do Atuador Planar: carro; estrutura de sustentação; núcleo ferromagnético e base.

O núcleo ferromagnético do atuador planar é confeccionado de tal forma que se possa testar dois materiais, Aço 1020 e Somaloy 500, montados um sobre o outro, como pode ser visto na figura 26. Assim, é possível testar o protótipo com dois diferentes materiais na armadura, bastando inverter a posição do núcleo.

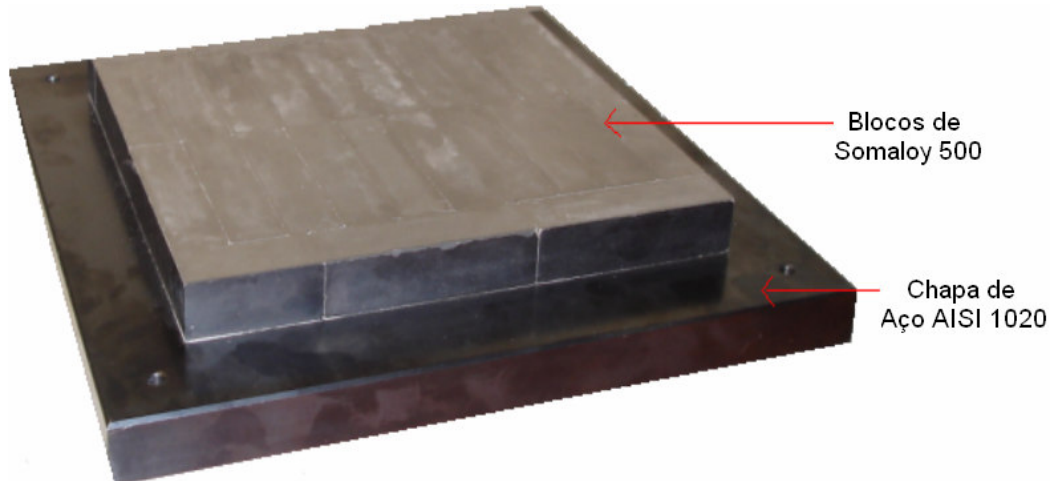


Figura 26 Núcleo ferromagnético do Atuador Planar.

A montagem do núcleo ferromagnético se dá inicialmente com a retificação da chapa 1020, de maneira que esta fique plana. Em seguida, é feita uma oxidação negra sobre esta chapa a fim protegê-la de corrosão. Sobre esta chapa são colocados e colados blocos de Somaloy 500 idênticos e retificados. Após a colagem, os blocos recebem uma camada de tinta, evitando assim a oxidação do material. Ao final do processo, tem-se de um lado a armadura de aço AISI 1020 e na outra face o Somaloy 500.

Com este processo de manufatura do núcleo ferromagnético, assegura-se que a estrutura do atuador planar não será alterada quando o protótipo for submetido ao ensaio, bastando apenas virar a armadura para se ter o núcleo com material diferente.

A estrutura do atuador planar em estudo é complementada por quatro rolamentos lineares dispostos em quatro trilhos, dois responsáveis pela movimentação no eixo x e os outros responsáveis pela movimentação no eixo y . Acoplados a estes rolamentos e trilhos, apresenta-se o carro contendo os ímãs permanentes de NdFeB. Abaixo do carro é colocado o núcleo de material ferromagnético.

2.3.2 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento do atuador planar é baseado na Força de Laplace que diz: quando um condutor elétrico, imerso em um campo magnético, é percorrido por corrente elétrica, sobre ele atuará uma força de origem eletromagnética proporcional à intensidade do campo magnético, da corrente elétrica que circula pelo condutor e o comprimento ativo do condutor imerso neste campo magnético,.

No atuador em estudo, os ímãs permanentes são responsáveis pela produção do fluxo magnético de excitação. Quando um ímã permanente está localizado sobre uma das fases do enrolamento excitado por corrente elétrica, desenvolverá uma força planar de propulsão, pela interação entre o fluxo magnético de excitação e a corrente elétrica. Este efeito de força planar de propulsão é responsável pelo deslocamento do carro paralelamente ao núcleo e ao enrolamento planar sobre a área de trabalho do atuador.

Na figura 27 é mostrado uma vista em corte do atuador planar, enfatizando cada uma das fases do atuador, iniciando pela culatra, passando pelos ímãs permanentes, entreferro e enrolamentos, chegando finalmente ao núcleo de material ferromagnético. No detalhe da figura 27 é mostrado o caminho preferencial do fluxo magnético de excitação produzido pelos ímãs permanentes.

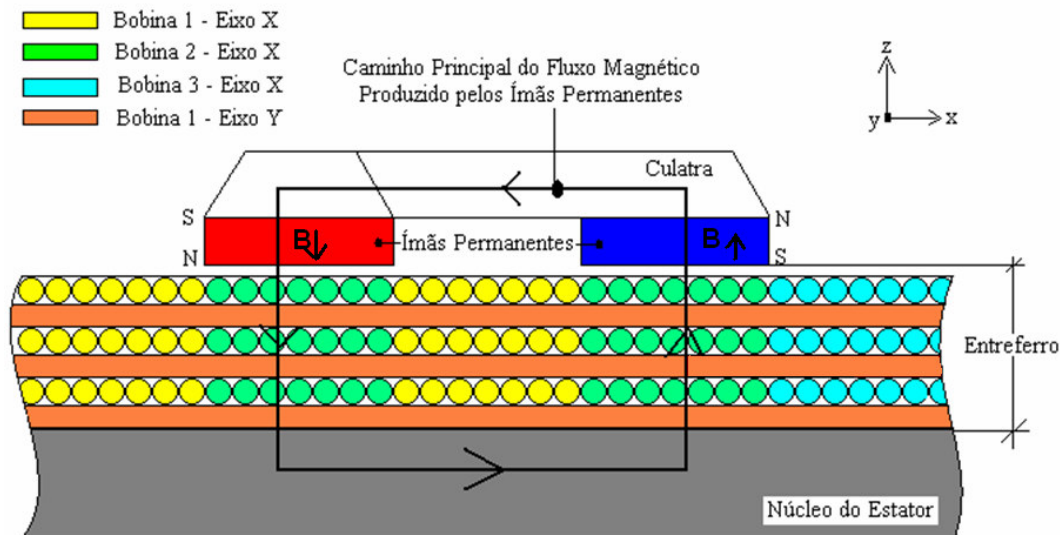


Figura 27 Vista esquemática bidimensional do Atuador Planar.

A equação 2.1, referente à produção de força, considera que os condutores sejam retilíneos e que a densidade de fluxo magnético seja constante. Para o caso de uma

destas condições, ou ambas, não sejam satisfeitas pode-se obter a força derivando-se as regiões onde o fenômeno acontece, para este caso há que se considerar a equação 2.2.

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

Pode-se ainda, ao invés de utilizar um segmento do condutor, utilizar um segmento de volume $dV = ds_{af} dl$, desde que se considere que $\vec{J}dV = id\vec{l}$ onde \vec{J} é o vetor densidade de corrente elétrica no condutor [60] e o símbolo s_{af} representa a área da seção transversal do condutor. Sendo isso considerado, no atuador planar com bobinas planificadas, a força planar de propulsão que atua nos condutores da fase percorrida por corrente elétrica e disposta sobre um ímã permanente N, pode ser obtida pela equação 2.3 baseado na Força de Laplace [28][29]:

$$\vec{F}_N = \int_{V_N} \vec{J}_N \times \vec{B}_{gN} dV_N \quad (2.3)$$

Na equação 2.3 \vec{B}_{gN} é a componente densidade de fluxo magnético no entreferro produzida pelo ímã permanente N; \vec{J}_N é o vetor densidade de corrente elétrica na fase do enrolamento planar localizado sob o ímã permanente N; V_N corresponde ao volume do condutor com corrente elétrica, que está imerso no fluxo magnético do ímã permanente N; por fim, \vec{F}_N representa a força eletromagnética planar de propulsão sobre o ímã permanente N.

A equação 2.3 permite determinar o módulo e o sentido da força eletromagnética de propulsão que age sobre os condutores percorridos por corrente elétrica, imersos em um campo magnético produzido pelos ímãs permanentes, fazendo com que o deslocamento se dê nos condutores. Para o caso do atuador planar em estudo, os ímãs permanentes do carro, geradores do campo magnético, é que estarão em movimentação e, por conseguinte, os condutores elétricos permanecerão estáticos. Assim a força produzida sobre os condutores, na verdade, será aplicada sob forma de força de reação no carro e, por conseguinte, produzirá o deslocamento do fluxo magnético de excitação. Para determinar o módulo e o sentido da força, a equação 3 é modificada para a equação 2.4.

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

Na figura 28 é mostrado o sentido do vetor força mecânica de origem eletromagnética que atua sobre o carro. A figura apresenta uma vista frontal e faz referências à posição relativa do carro do atuador planar e os enrolamentos da armadura percorridos por corrente elétrica. Ainda na figura 28 é possível visualizar o sentido do fluxo magnético dos dois ímãs permanentes, além do vetor densidade de corrente elétrica para uma situação específica.

É importante notar, ainda na figura 28, que na produção de força, somente é aproveitado a componente normal do fluxo magnético, sendo assim a equação 2.5 traz uma possível substituição que pode ser levada em conta na equação 2.4 [10].

$$\vec{B}_{gN} = B_{gzN} \vec{k} \quad (2.5)$$

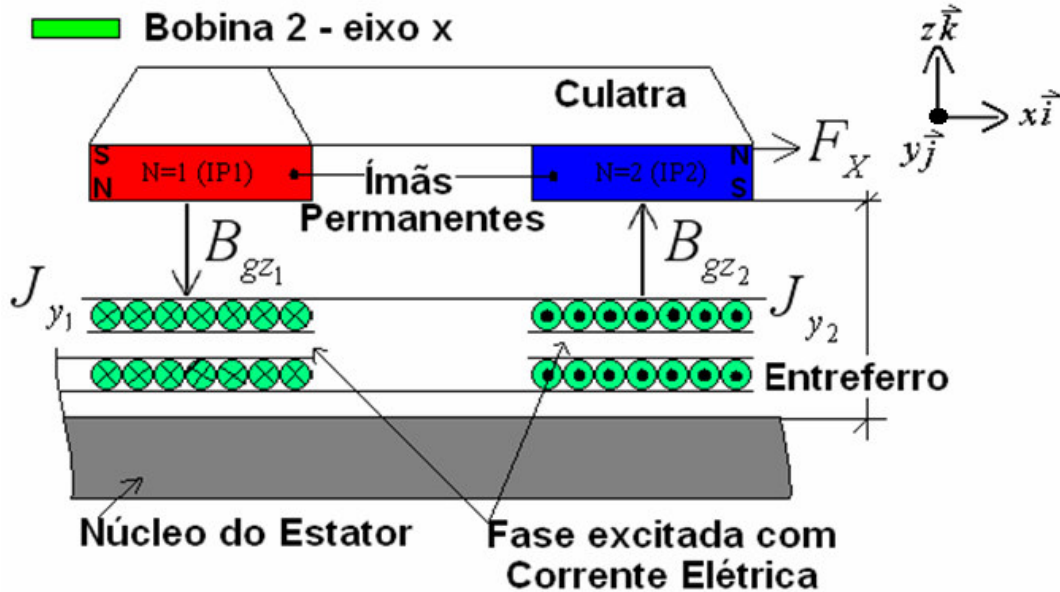


Figura 28 Vista frontal da posição relativa à fase do enrolamento x da bobina planar que está sendo excitada com corrente elétrica e imersa no campo [10].

Ainda o vetor densidade de corrente elétrica pode ser decomposto em duas componentes a saber: J_{xN} e J_{yN} . A primeira é a componente x do vetor densidade de corrente através da fase do enrolamento y . A segunda é a componente y do vetor densidade de corrente elétrica através da fase do enrolamento x . Na equação 2.6 é possível definir o vetor \vec{J}_N .

$$\vec{J}_N = J_{xN} \vec{i} + J_{yN} \vec{j} \quad (2.6)$$

Fazendo-se uma combinação entre as equações 2.4, 2.5 e 2.6, obtém-se 2.7.

$$\begin{aligned}\vec{F}_N &= \int_{V_N} (\vec{B}_{gN} \times \vec{J}_N) dV_N = \int_{V_N} B_{gzN} \vec{k} \times (\vec{J}_{xN} \vec{i} + \vec{J}_{yN} \vec{j}) dV_N \\ &= \int_{V_N} B_{gzN} (-J_{yN} \vec{i} + J_{xN} \vec{j}) dV_N = -F_{xN} \vec{i} + F_{yN} \vec{j}\end{aligned}\quad (2.7)$$

Na equação 2.7, F_{xN} é a componente x da força eletromagnética produzida pela fase do enrolamento x que possui uma densidade de corrente J_{yN} (componente y do vetor densidade de corrente \vec{J}_N). Por sua vez F_{yN} é a componente y da mesma força produzida pela fase do enrolamento y que possui uma densidade de corrente elétrica J_{xN} (componente x do vetor densidade de corrente \vec{J}_N) sob a ação do ímã permanente N.

Uma vez que o efeito dos dois ímãs permanentes são considerados, há o aparecimento de uma força eletromagnética de propulsão planar total, \vec{F} . A direção de \vec{F} define o sentido de deslocamento do carro, sentido este que depende o módulo e do sentido das correntes elétricas de fase que estão sendo excitadas e do sentido da densidade de fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes do translator. Logo a força planar de propulsão total é obtida através da equação 2.8:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 = -(F_{x1} + F_{x2}) \vec{i} + (F_{y1} + F_{y2}) \vec{j} \quad (2.8)$$

Onde \vec{F}_1 e \vec{F}_2 são os vetor força produzida pelo ímã permanente 1 e 2 respectivamente, F_{x1} e F_{x2} são os vetores força produzidos pelos ímãs permanentes 1 e 2 na direção x ; F_{y1} e F_{y2} são os vetores força produzidos pelos ímãs permanentes 1 e 2 na direção y . Com o objetivo de identificar os vetores envolvidos na produção de força eletromagnética planar, o desenho da figura 29 mostra o atuador planar com bobinas planificadas apenas com o enrolamento no eixo x . A força que é produzida sobre o carro será perpendicular ao plano formado pelos vetores densidade de fluxo magnético e densidade de corrente elétrica [10].

Por definição, o vetor densidade de corrente elétrica no enrolamento x possui apenas componentes y na região de atuação do carro. Ainda a figura 29 mostra uma fase do enrolamento x sendo percorrida por corrente elétrica, fase esta que está localizada sobre os ímãs permanentes, condição esta para a produção do maior módulo de força considerando apenas um enrolamento.

É importante perceber que quando apenas os enrolamentos do eixo x estiverem sendo excitados por corrente elétrica contínua, será gerado um vetor densidade de corrente elétrica na direção do eixo y e, pela interação com o campo magnético produzido pelos ímãs permanentes, será gerado um deslocamento do carro na direção do eixo x . Por sua vez, os vetores densidade de corrente elétrica nos enrolamentos y possuem apenas componentes x na região do carro.

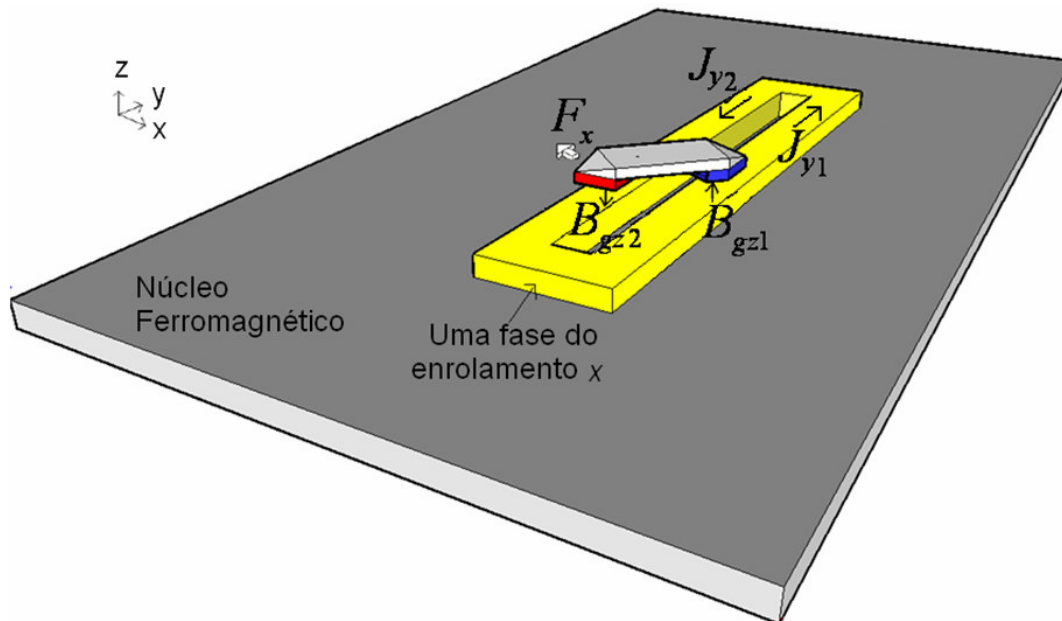


Figura 29 Vista do Atuador Planar, focando apenas um enrolamento x das bobinas planificadas, mostrando os vetores que interagem para a produção de força no eixo x .

Além das forças paralelas à área de trabalho, existe uma força perpendicular atuando no dispositivo. Trata-se da força de atração entre o carro ou translator e o núcleo da armadura. Essa força é conhecida como força normal e seu efeito é de carregar mecanicamente os sistema de trilhos e rolamentos, influenciando no atrito entre eles. A equação 2.9 ilustra o comportamento deste fenômeno.

$$F_{AZ} = \frac{sg}{2\mu_0} (B_{gz1}^2 + B_{gz2}^2) \quad (2.9)$$

Onde F_{AZ} é a força magnética normal de atração, sg é a área da superfície transversal ao fluxo magnético no entreferro sob cada ímã permanente, $B_{gT_{z1}}$ e $B_{gT_{z2}}$ correspondem às componentes z do vetor densidade de fluxo magnético total estabelecida no entreferro, finalmente μ_0 representa a permeabilidade magnética do entreferro [10].

2.3.3 Circuito Magnético

A análise do circuito magnético do atuador em estudo é feita a partir da analogia com circuitos elétricos, onde os ímãs permanentes são considerados como se fossem fontes de tensão elétrica e as relutâncias dos materiais, resistores elétricos. O fluxo disperso é, comumente, representado por uma corrente através de um resistor em paralelo com a fonte de tensão. O fluxo magnético resultante do circuito magnético é representado por corrente elétrica contínua. Na figura 30.a, o fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes, deixa o pólo norte do ímã permanente 1, atravessa o entreferro l_{g1} , atinge o núcleo de material ferromagnético, chega ao entreferro l_{g2} passando pelo pólo sul do ímã permanente 2, encontrando, em seguida, a culatra do carro, fechando assim o circuito magnético. O análogo elétrico é representado na figura 30.b.

A fórmula de relutância, desprezando a relutância relacionada ao fluxo magnético disperso é dada pela equação 2.10.

$$\mathfrak{R}_{eq} = \mathfrak{R}_{g1} + \mathfrak{R}_{nf} + \mathfrak{R}_{g2} + \mathfrak{R}_{cf} \quad (2.10)$$

Onde \mathfrak{R}_{eq} representa a relutância equivalente do circuito, \mathfrak{R}_{g1} representa a relutância do entreferro localizada sob o ímã permanente 1, \mathfrak{R}_{g2} é a relutância do entreferro localizada sob o ímã permanente 2, \mathfrak{R}_{nf} , a relutância do núcleo ferromagnético e finalmente \mathfrak{R}_{cf} representa a relutância da culatra ferromagnética. Se a permeabilidade magnética do material ferromagnético do núcleo da armadura e da culatra forem consideradas infinitas, obtém-se a equação 2.11.

$$\mathfrak{S}_m = \phi_m (\mathfrak{R}_{g1} + \mathfrak{R}_{g2}) \quad (2.11)$$

Onde \mathfrak{S}_m é a força magnetomotriz total, oriunda das somas de \mathfrak{S}_{m1} e \mathfrak{S}_{m2} , geradas, respectivamente, pelos ímãs permanentes 1 e 2; ϕ_m representa o fluxo magnético total do circuito.

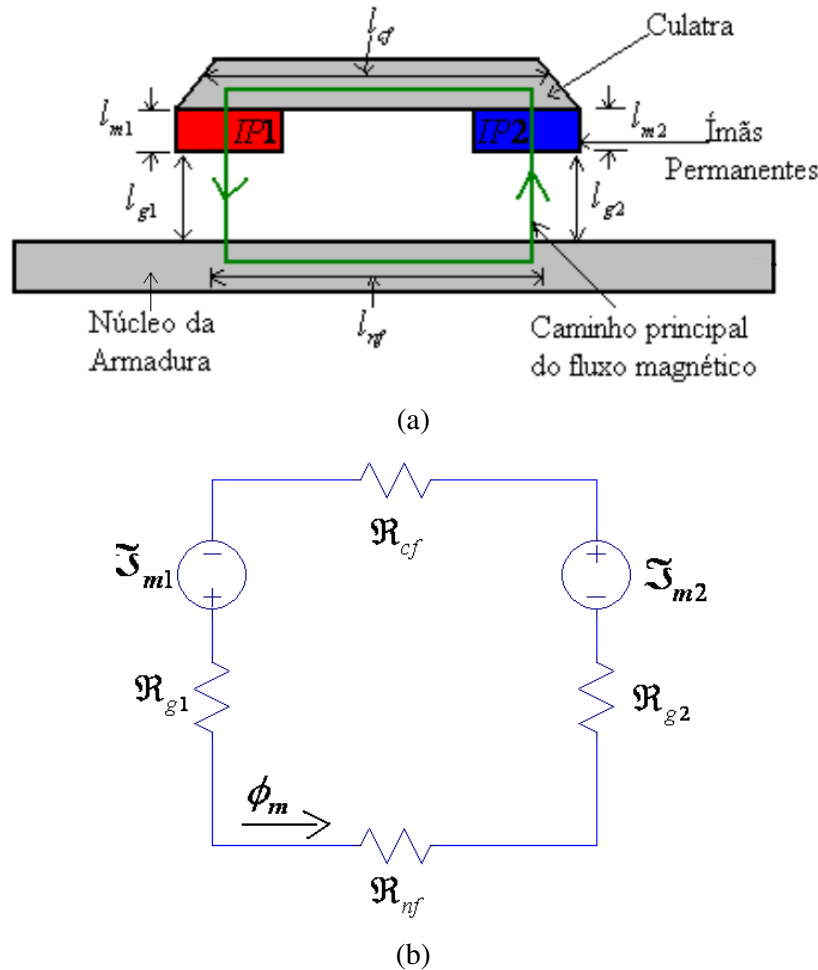


Figura 30 (a) Circuito magnético simplificado do Atuador Planar; (b) seu análogo elétrico.

Em termos de corrente aplicada em cada bobina, definiu-se uma faixa de operação entre zero e 5A. Esta faixa de corrente elétrica foi estimada respeitando as limitações térmicas e de capacidade de corrente para os condutores que formam o enrolamento. Cabe ressaltar que a capacidade de corrente elétrica nominal dos condutores empregados nos enrolamentos é bem inferior a 5A, contudo as bobinas não serão energizadas constantemente, mas sim com apenas pulsos elétricos relativamente curtos, possibilitando assim sua operação em sobre-corrente.

2.3.4 Exemplo de Operação

A figura 31 mostra um exemplo de operação. Quando os ímãs permanentes do carro estão alinhados sobre uma bobina do enrolamento x e esta é energizada, e as demais não, é criada uma densidade de corrente y , no condutor energizado, fazendo com que, desta interação, seja produzida uma força mecânica na direção do eixo x . A figura 31.b mostra este comportamento, quando a bobina 1 do enrolamento x é excitada com corrente elétrica contínua.

Da mesma sorte, quando os ímãs permanentes do carro estiverem alinhados sobre uma das bobinas do eixo y e esta for energizada, é criada uma densidade de corrente x no condutor, produzindo uma força mecânica na direção do eixo y em resposta à interação do fluxo de excitação produzido pelos ímãs permanentes e a densidade de corrente elétrica. Com auxílio da figura 31.c é possível visualizar esse comportamento, quando a bobina 3 do enrolamento y é excitada com corrente contínua.

Outro aspecto bastante importante do atuador planar em estudo é o fato de que o mesmo pode produzir uma movimentação em qualquer direção paralela ao seu plano de trabalho. Para isso basta que sejam excitadas simultaneamente uma fase do enrolamento x e uma fase do enrolamento y , alinhadas sob os ímãs permanentes do carro translatore. Na figura 31.d, o carro encontra-se posicionado em alinhamento com a bobina 1 do eixo x e com a bobina 3 do eixo y , nas quais é aplicada uma corrente elétrica contínua de forma simultânea e independente.

Como é possível concluir com as explicações extraídas da figura 31, o carro pode se deslocar por toda a superfície planar que contenha os enrolamentos, tanto no eixo x quanto no eixo y . Basta que as devidas bobinas sejam excitadas de forma correta, com valores de módulo e sentido de corrente elétrica pertinentes.

Uma outra particularidade interessante do esquema de produção de força mecânica apresentado na figura 32, é que nem sempre o carro estará alinhado sobre a mesma bobina de um enrolamento, seja o enrolamento x ou y . Em alguns casos, o ímã permanente 1 poderá estar alinhado com a bobina 1 do enrolamento x e com a bobina 1 do enrolamento y , enquanto que o ímã permanente 2 estará alinhado com a bobina 3 do enrolamento x e com a bobina 3 do enrolamento y . Esta situação é mostrada na figura 19.

Esta diversidade de possibilidades para a produção de movimentação determina o passo de deslocamento que o dispositivo eletromagnético pode percorrer com dois

graus de liberdade. O controle de posicionamento do carro passa necessariamente por uma correta excitação das bobinas em função da posição desejada.

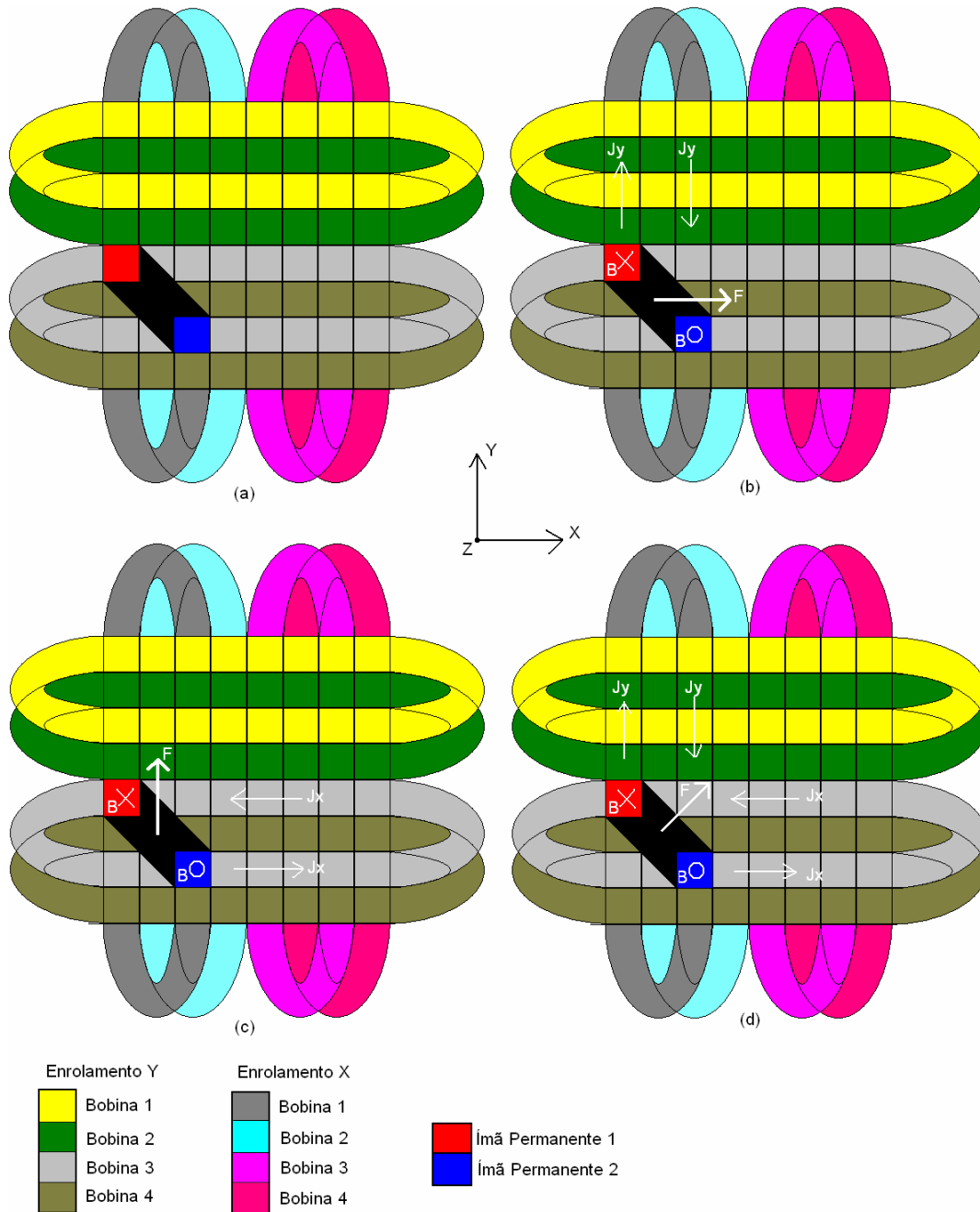


Figura 31 Exemplo de produção de movimento bidirecional: (a) carro em repouso; (b) movimento ao longo do eixo x; (c) movimento ao longo do eixo y e (d) movimento diagonal devido à excitação simultânea das fases dos enrolamentos x e y.

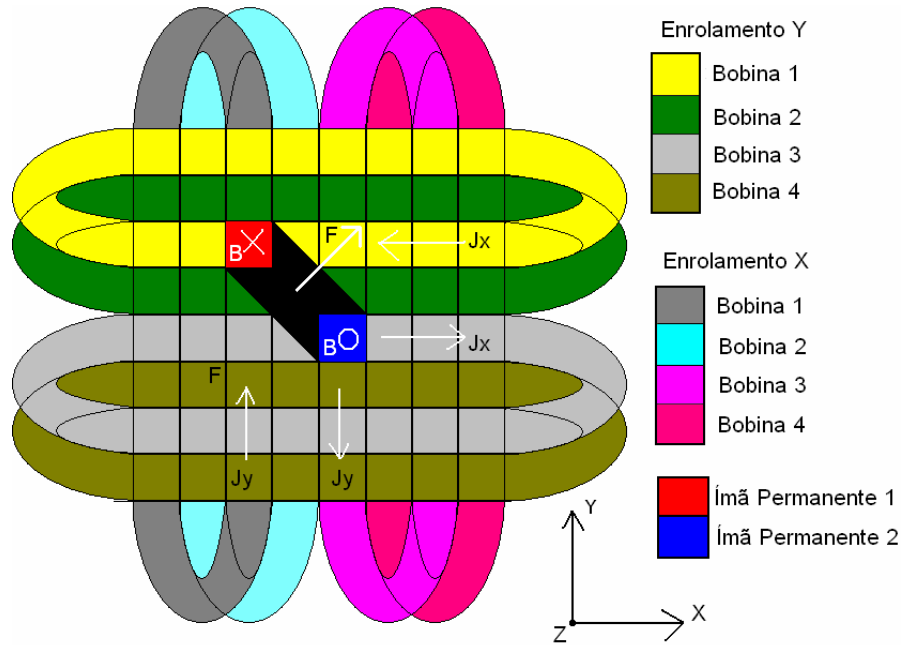


Figura 32 Exemplo de produção de movimento na diagonal do plano de trabalho devido à excitação simultânea das fases dos enrolamentos x e y , com os ímãs permanentes alinhados em diferentes bobinas planares.

2.3.5 Diferencial do Atuador Planar em Estudo

O Atuador Planar com Bobinas Planificadas e Núcleo Ferromagnético de Material Compósito em estudo apresenta características construtivas diferenciadas, devido à forma como as bobinas dos dois enrolamentos são montadas e o material utilizado no núcleo ferromagnético da armadura. Os enrolamentos com bobinas planificadas permitem independência entre o núcleo ferromagnético e os referidos enrolamentos. Isso é bastante importante para uma montagem mais simples do atuador, ou quando se requer uma substituição do material do núcleo ferromagnético, como é o caso, por exemplo, dos objetivos para testes funcionais deste trabalho.

A produção de movimento através de um único dispositivo de tração também é uma importante característica construtiva. Outros atuadores, utilizados na atualidade, produzem movimentação sobre o plano devido à combinação de três a quatro motores lineares ou rotativos atuando independentemente.

Um Atuador Planar que possui características de montagem semelhantes a este em estudo é o dispositivo encontrado na referência [10], cuja proposição de continuidade do seu estudo dá origem a este trabalho. Esse dispositivo eletromagnético

possui o núcleo envolvido por bobinas dos dois enrolamentos, a saber, enrolamento x e y , por definição. Isso não permite um melhor aproveitamento dos lados de bobinas, uma vez que somente um dos lados das bobinas é ativo e disponibilizado para interação com o campo magnético resultando na movimentação do carro na área de trabalho, ficando o outro lado da bobina sob o núcleo. Já no caso dos enrolamentos planares usados, devido à concepção de projeto, todos os lados de bobina são ativos, uma vez que os dois enrolamentos planares são montados no plano de trabalho do Atuador Planar.

3 MATERIAIS MAGNÉTICOS

O magnetismo é conhecido pelo homem há milhares de anos, mas o estudo dos seus princípios e mecanismos é relativamente recente. A eletricidade e o magnetismo desenvolveram-se como ciências independentes uma da outra até 1820. Nesta época, o físico dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) descobriu que a passagem de uma corrente elétrica por um condutor cria um campo magnético, nascia aí uma nova ciência: o eletromagnetismo. Embora o eletromagnetismo clássico seja uma ciência praticamente “completa”, o desenvolvimento de materiais magnéticos com propriedades cada vez melhores continua.

Existem basicamente dois grupos distintos de matérias magnéticas: os materiais magneticamente macios (*soft magnetic materials*) e os materiais magneticamente duros (*hard magnetic materials*). Os primeiros são divididos em três categorias básicas: diamagnético, paramagnético e ferromagnético, enquanto que o segundo é também conhecido como ímãs permanentes, depois de magnetizados.

Os materiais diamagnéticos e paramagnéticos têm suas permeabilidades relativas próximas a do vácuo, ou seja, $\mu_r \cong 1$. Como exemplo de material diamagnético, ou seja, aqueles que têm permeabilidade magnética imediatamente inferior a 1, pode-se citar o cobre, $\mu_r = 0,999991$, e o chumbo, $\mu_r = 0,999983$; para os materiais paramagnéticos, aqueles com permeabilidade magnética imediatamente superior a 1, cite-se o alumínio, $\mu_r = 1,00002$, e paládio, $\mu_r = 1,0008$ [3][49][52].

Já os materiais ferromagnéticos macios apresentam permeabilidades relativas muito superiores a 1. Estes materiais são de importante aplicação em dispositivos eletromagnéticos, pois são usados para concentrar o fluxo magnético oferecendo um caminho de baixa relutância magnética. O ferro, o aço e a magnetita (Fe_3O_4) são exemplos de materiais comuns que apresentam propriedades magnéticas exploráveis. Além destes, existem muitos outros, porém menos comuns, como é o caso das ligas de terras raras e materiais compósitos. Dados esses aspectos e o interesse deste trabalho, serão examinados dois tipos de materiais: o aço maciço e os compósitos magneticamente macios [9][11].

3.1 AÇO MACIÇO

Por ser um material ferromagnético magneticamente macio, o aço é passivo à presença e variação do campo magnético externo. Para o caso da variação, seja em módulo, direção, sentido ou uma combinação destes, também ocorrerá à variação interna no material [39][47][52]. Outra característica importante é a não linearidade, uma vez que a permeabilidade relativa é variável com o campo magnético \vec{H} que é aplicado [16], equação 3.1,

$$\oint \vec{H} \circ d\vec{l} = ni \quad (3.1)$$

sendo n o número de espiras da bobina, i a corrente elétrica que circula na bobina e \vec{l} o comprimento do circuito magnético ao longo do caminho de integração. Este fenômeno pode ser percebido com ajuda da figura 33 em consonância com a figura 34.

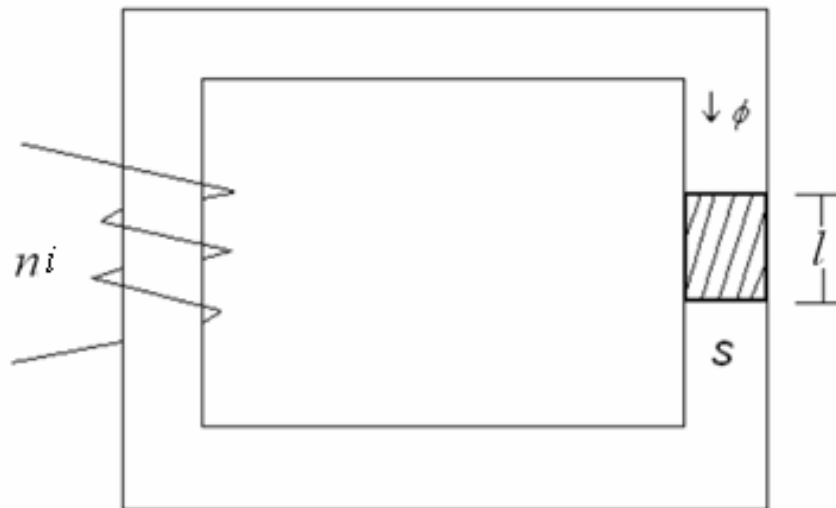


Figura 33 Circuito magnético com permeabilidade relativa não constante [10][52].

Como,

$$\phi = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (3.2)$$

sendo B a densidade de fluxo magnético ou ainda indução magnética, ϕ é o fluxo magnético e S é a área da seção através da qual o último se estabelece, é possível medir o fluxo magnético no entreferro a partir de variações na corrente elétrica pela bobina. Partindo-se de um valor baixo de corrente elétrica e aumentando-a, observa-se que o fluxo magnético aumenta também de forma quase proporcional. A partir de um determinado valor de fluxo, a relação constante de proporcionalidade entre o fluxo e a corrente desaparece e grandes variações de corrente elétrica proporcionam pequenas variações de fluxo. A este fenômeno dá-se o nome de saturação magnética e é visto na figura 34.

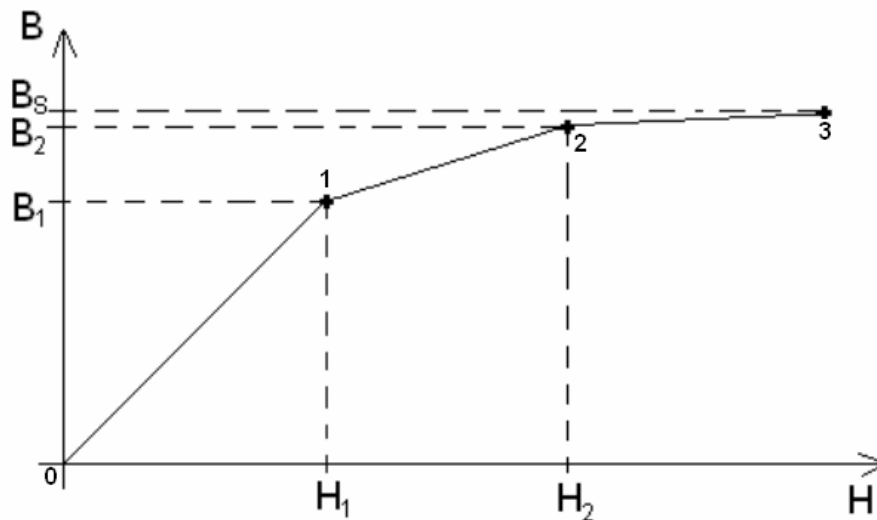


Figura 34 Gráfico de ensaio para a obtenção da indução de saturação [52].

Pode-se também obter a curva de permeabilidade magnética μ em função do campo magnético H aplicado, sabendo-se que $\mu = \frac{B}{H}$. Do ponto inicial até o ponto 1, à medida que se vai aumentando o valor de campo magnético, a permeabilidade do material permanece constante, operando na região linear do circuito magnético. Do ponto 1 até o ponto 2 o circuito magnético começa a entrar em saturação, onde a permeabilidade cai à medida que é aplicado campo magnético, apresentando a não linearidade. Do ponto 2 em diante, na medida em que o campo magnético aumenta, como o material está magneticamente saturado B_s , a permeabilidade tende a ficar cada vez menor e tende à permeabilidade do ar ou vácuo. Isso afeta o desempenho, quando

analisada a densidade de fluxo magnético que é pouco modificada para grandes valores de campo magnético [10][52].

Para a construção de um núcleo ferromagnético da armadura do Atuador Planar em estudo, foi utilizado o aço maciço AISI 1020, que também é empregado na culatra, cujas propriedades são apresentadas na tabela 2. Esse material apresenta um comportamento não linear com relação à magnetização como pode ser verificado na figura 35.

Tabela 2 Propriedades do Aço Maciço AISI 1020 [65].

Peso específico	Permeabilidade relativa magnética máxima	Resistividade elétrica nominal comercial	Densidade de fluxo magnético de saturação
7,85 g/cm ³	3.800	0,2 μΩ.m	1,95T

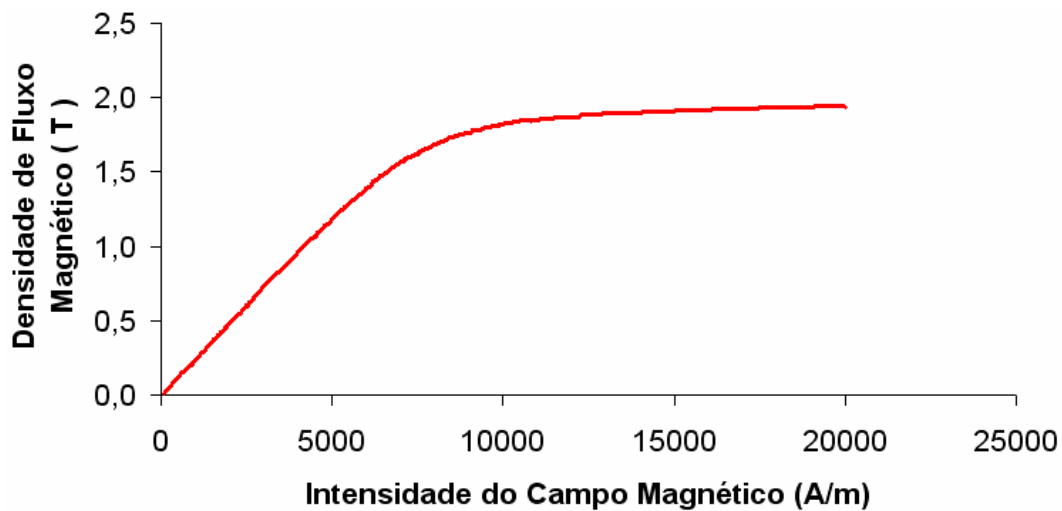


Figura 35 Curva de magnetização normal do Aço Maciço AISI 1020 [10].

3.2 MATERIAIS COMPÓSITOS

Pode-se adotar uma definição formal para materiais compósitos, considerando-se que:

“Um material compósito é um conjunto de dois ou mais materiais diferentes, combinados em escala macroscópica, para funcionarem como

uma unidade, visando obter um conjunto de propriedades que nenhum dos componentes individualmente apresenta.” [32]

Essa definição é simples de compreender, contudo merece cuidado especial, que é a especificação de que os componentes aparecem em escala macroscópica. Isso é importante para, por exemplo, distinguir materiais compósitos de ligas, nas quais também são combinados materiais diferentes, como o ferro e manganês no aço, contudo em escala atômica. Sendo assim, em materiais compósitos não apresentam modificação atômica dos elementos químicos envolvidos [32][56].

O conceito de material compósito é bastante importante, pois possibilita ao projetista, até certo ponto, transformar materiais, enfatizando certas características desejáveis e minimizando as indesejáveis, através da combinação ponderada de componentes. Uma vasta gama de aspectos do comportamento do material pode ser manipulada no projeto de um compósito, como por exemplo:

- Aparência física;
- Características magnéticas como permeabilidade, saturação, campo coercitivo e perdas;
- Características mecânicas como dureza, tensão de ruptura e de cisalhamento;
- Isolamento ou condutividade térmica, acústica e elétrica;
- Peso específico;
- Resistência à corrosão;
- Temperatura de trabalho.

Dentro deste contexto, técnicas de manufatura vêm sendo aprimoradas e novas tendências de produção são apresentadas. Dentre estas técnicas, a metalurgia do pó ganha bastante destaque por apresentar vantagens importantes [53].

3.2.1 Metalurgia do Pó

A metalurgia do pó é largamente usada na manufatura de peças metálicas ferrosas e não ferrosas. Essa técnica divide-se basicamente em dois processos importantes: sinterização e compactação. No primeiro, os pós de diferentes materiais

são misturados, segundo uma composição pré-determinada, e postos em moldes; a seguir, as peças são encaminhadas a fornos de fundição e submetidas a temperaturas da ordem da temperatura de fusão dos materiais metálicos envolvidos, isso promove o derretimento dos materiais do conjunto, causando o adensamento dos pós metálicos; sequencialmente as peças passam por um processo de esfriamento onde são retiradas dos moldes e submetidas a uma etapa de análise das especificações técnicas das características físicas, magnéticas e elétricas. Esse processo resulta em um material comparável ao material maciço; a liga formada é maior que no caso compactado [66]. No segundo, é agregado à composição um material ligante, por exemplo, um polímero ou cola, que, após a compactação, dará liga à peça resultante, mas à qual não se aplica temperaturas elevadas como no caso do sinterizado sob pena de destruí-la. Em materiais compactados, a liga apresenta maior resistividade, menor permeabilidade, menor temperatura de operação, menores dureza e tensões de ruptura e de cisalhamento, menores perdas parasitas e maiores perdas por histerese, quando comparados aos sinterizados de mesma composição [33][35][39]. Sendo tema de interesse e discussão deste trabalho, a seguir será apresentado um detalhamento da técnica de compactação para produção de materiais ferromagnéticos compósitos.

3.2.1.1 Metalurgia do Pó Aplicada a Materiais Compósitos

Na metalurgia do pó aplicado a materiais compósitos, os pós metálicos e os polímeros aditivos são submetidos à compressão em temperaturas controladas, sempre muito abaixo do ponto de fusão dos pós metálicos. Essa é base para promover a ligação metalúrgica entre as partículas e o aditivo, criando assim um composto ligante que une os pós sem, contudo, proporcionar o contato direto entre eles.

Fundamentalmente, esta técnica prima pela elevada economia do material, onde não há quase a geração de cavacos que, em uma usinagem normal, representam cerca de 50% da massa bruta da peça final, enquanto que, mesmo após etapas de acabamento, na metalurgia do pó a matéria usada chega a, aproximadamente, 97% da matéria bruta original [32][34].

Um grande número de vantagens técnicas e econômicas é observado na produção de materiais magnéticos pelo processo de compactação na metalurgia do pó. Esses materiais podem ser utilizados em diversos transdutores magnéticos, como é o

caso de motores, geradores e atuadores, assim como também em instrumentos de medição.

Esses tipos de materiais magnéticos compósitos são fabricados envolvendo ferro, aço, níquel, silício, cobalto entre outros. Os pós metálicos utilizados apresentam um elevado grau de pureza e uma compressibilidade, o que permite atingir elevadas densidades na compactação. Além disso, o material apresenta uma estrutura final de grãos isolados ou não mais refinados, mas com uma menor resistência mecânica do que materiais fundidos similares [39][40].

É através da metalurgia do pó aplicada a materiais compactados ou compósitos que se consegue a fabricação de peças específicas, com formatos complexos e detalhados. A maioria das peças viáveis por essa técnica pesa menos de 2,5 kg, devido à dificuldade de compactação para peças maiores; contudo, a metalurgia do pó possibilita que sejam produzidas peças de até 15 kg [39][40]. Algumas vantagens fundamentalmente importantes desta técnica da Metalurgia do Pó são listadas:

- Elimina ou reduz operações de usinagem;
- Facilita o controle exato da composição química desejada;
- Os produtos são obtidos com alta pureza;
- Permite a adequação do material a características específicas de projeto;
- Possibilita bom acabamento da peça;
- Reduz muito as perdas de matéria prima.

Esta técnica de metalurgia do pó destaca um processo denominado manufatura de peças metálicas compósitas, que é bastante importante para criação de materiais com características importantes, que podem ser usados em diversas áreas da engenharia e de outras aplicações. Este processo de compactação de materiais compósitos é realizado em diversas etapas seqüenciais:

1. Processo para obtenção de pós metálicos;
2. Mistura dos componentes químicos;
3. Injeção do composto metálico em moldes;
4. Compactação; e
5. Tratamento térmico.

3.2.1.1.1 Processos para a Obtenção de Pós Metálicos

Existem muitos processos para a obtenção de pós metálicos, como é o caso, por exemplo, dos métodos mecânicos onde a obtenção é feita a partir de trituração, moagem e pulverização ou atomização; dos métodos físico-químicos, através da pirólise (para obtenção de pós de ferro e níquel de alta pureza); dos métodos químicos, onde há uma redução de óxidos por hidrogênio ou monóxido de carbono e ainda a corrosão para pós de aço inoxidável. Contudo, existem dois processos mais largamente utilizados para obtenção de pós com características específicas: atomização e eletrólise [32][34][39].

Na atomização o metal é fundido e vazado através de orifícios, formando assim um filete líquido que é submetido a jatos de água, gás ou ar. Isso faz com que o material seja pulverizado, ocorrendo o seu imediato resfriamento na forma de pó. Só então, o pó é recolhido, seco, peneirado e tratado, estando assim pronto para a utilização, desde que esteja nos padrões desejados.

Neste processo de atomização, o tamanho das partículas varia em função de diversos aspectos e características do meio de produção tais como: espessura do filete; pressão do jato de água, gás ou ar; geometria do conjunto de pulverização. Geralmente a atomização por jatos de água apresenta partículas irregulares, enquanto a que por jatos de ar ou gás resulta em partículas esferoidais [32][39].

Já a eletrólise é um método bastante conhecido na indústria para a obtenção de pós de cobre. Esse processo separa os elementos químicos de um composto através da eletricidade. De maneira sumária, procede inicialmente com a decomposição dos compostos em íons, em seguida, uma corrente elétrica contínua passa através destes íons obtendo os elementos químicos [33].

Os pós produzidos por estas técnicas de eletrólise apresentam elevada pureza e baixa densidade. Após recolhida dos tanques de eletrólise, a massa de pó sob a forma de uma lâmina, é neutralizada, secada e peneirada a fim de classificar os grãos [32]. É importante considerar que o tamanho das partículas dos pós interfere nas propriedades dos compósitos.

3.2.1.1.2 Mistura dos Componentes Químicos

A composição química dos materiais desejados para o produto final é bem controlada na metalurgia do pó, fazendo com que isso seja uma de suas principais

características. Precisas quantidades de materiais variados podem ser misturadas uma vez que estão no formato de pó.

Ligas de pós de diferentes materiais ou mesmo o pó de diferentes materiais podem ser unidos, com a adição dos polímeros ligantes e lubrificantes, com a finalidade de se chegar a uma composição desejada. Sem dúvida esta versatilidade no manuseio e obtenção de materiais, bem como a composição de diferentes materiais através de pós, traz grandes vantagens à indústria [39].

3.2.1.1.3 Injeção do Composto Metálico em Moldes

O processo de injeção de pós metálicos se baseia na injeção de pós de plásticos em moldes para produção de componentes complexos, visando uma forma econômica se comparado a outros processos tendo o mesmo objetivo. A adaptação, otimização e aperfeiçoamento da tecnologia deu origem ao processo conhecido como Injeção de Pós Metálicos em Moldes, pela qual, uma vez feita a composição química adequada, uma grande fração de volume de pós metálicos é injetada em moldes sob forte pressão. A estes moldes também se dá o nome de matriz. Geralmente, são feitos de material metálico resistente a esforços mecânicos e térmicos.

Através do formato das matrizes é possível que sejam criados diferentes geometria de materiais compostos, tanto geometrias simplificadas, como é o caso do núcleo planificado, como geometrias mais complexas, como pequenos encaixes mecânicos.

3.2.1.1.4 Processo de Compactação

Em grande escala, a compactação de partículas metálicas se dá através do uso de prensas mecânicas ou hidráulicas. Pelo processo de Injeção do Compósito Metálico em Moldes, o pó é colocado em matrizes juntamente com alguns aditivos, depois disso, pistões superiores e inferiores são deslocados ao encontro da matriz, em temperaturas controladas. Num primeiro momento, o pó é levemente compactado de forma que sua densidade aumente apenas um pouco. Esta etapa causa apenas o adensamento das partículas sem, contudo, existir contato físico maior entre elas, uma vez que os pós metálicos são unidos e ao mesmo tempo separados por polímeros ligantes [39].

Para uma segunda etapa do processo, a pressão de compactação é aumentada o que resulta na deformação de algumas partículas, onde as menores chegam a quebrar-se, e, então, ocorre o entrelaçamento de alguns grãos, ocupando os espaços vazios oriundos da compactação anterior. Isso causa ainda um atrito entre as partículas de pó e a matriz; as demais partículas são unidas pelo polímero [38].

Para exemplificar o processo de compactação em peças de ferro, o pó compactado deve superar uma densidade de $5,5 \text{ g/cm}^3$, pois, abaixo disso, o material é considerado impróprio para operações industriais. A faixa de compactação de trabalho com o ferro é entre $5,7 \text{ g/cm}^3$ e $7,4 \text{ g/cm}^3$, priorizando assim, também, aspectos econômicos de aproveitamento do material [32]. Para esta agregação ferrosa é usada uma faixa de compactação entre 400 MPa e 800 MPa [34].

Um detalhe importante que merece destaque é a chamada “zona neutra”, uma região da peça onde as partículas de pó recebem menos compactação mecânica. Em muitos casos, estes espaços afetam as propriedades requeridas para a utilização a tal ponto que o composto torna-se inviável para a utilização industrial, inviabilizando aquela determinada peça. Isso destaca a importância de testes de compressão e tração nos materiais, além do devido controle das propriedades finais do material [39].

3.2.1.1.5 Tratamento Térmico

O processo conhecido como Tratamento Térmico acontece juntamente com o processo de Compactação. Quando se fala de controle de temperatura, se está remetendo a este processo. O tratamento térmico é importante, pois é através dele que o polímero aglutinante é transformado em uma liga pastosa, responsável pelo adensamento dos grãos de pós metálicos.

Este processo torna-se bastante significativo, pois características relevantes do material estão diretamente relacionadas com a temperatura que é aplicada durante a compactação. Na primeira compactação, o composto é submetido a uma temperatura em torno de 130° C ; para a segunda compactação, é introduzida uma temperatura mais elevada, entre $1/6$ e $1/3$ da temperatura de fusão dos pós metálicos que compõem a mistura, pois é nesta faixa o polímero ainda mantém suas propriedades iniciais e não passa para o estado líquido, o que causaria a sua separação do composto [39].

Após a compactação e o tratamento térmico, o material é esfriado, retirado do molde e submetido a um processo de verificação e análise das propriedades. A figura 36 apresenta um esquema em etapas do processo de metalurgia do pó para a produção de materiais compósitos.

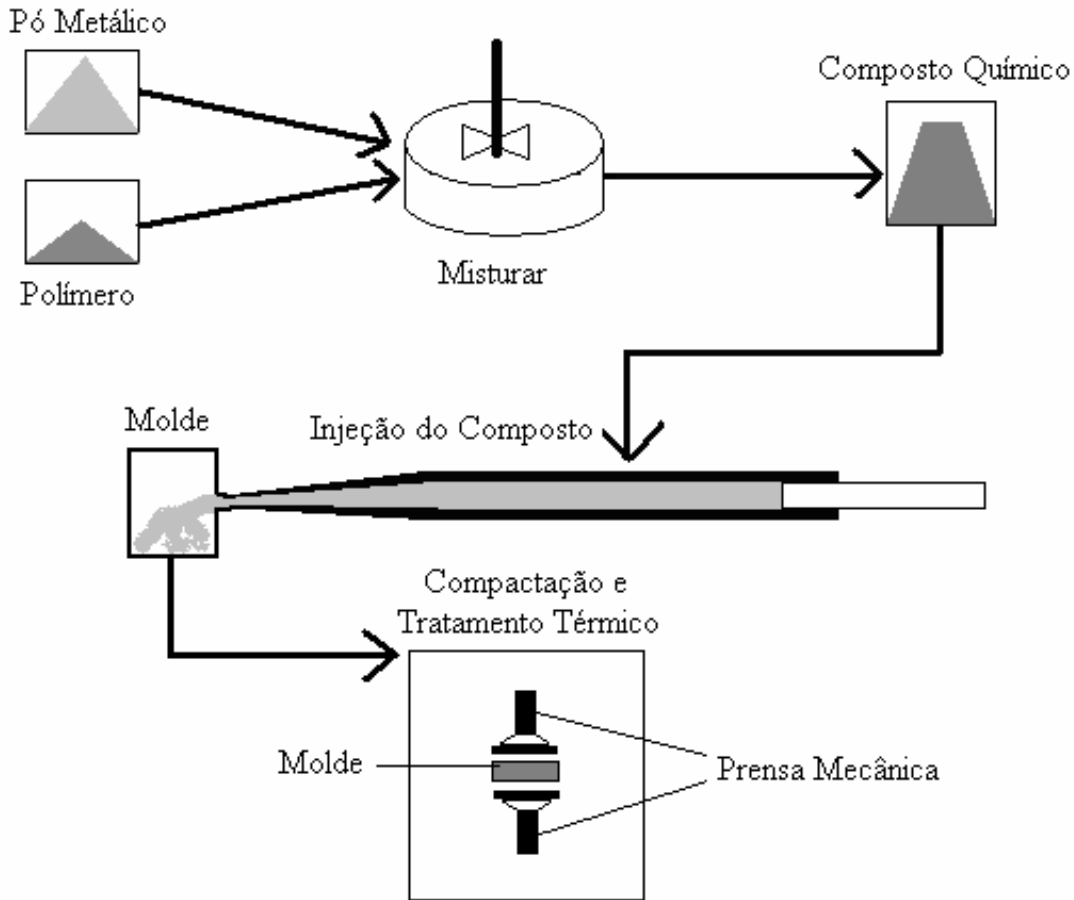


Figura 36 Etapas do processo de metalurgia do pó para a produção de materiais compósitos metálicos [39].

3.2.2 Materiais Metálicos Compósitos Magneticamente Macios

Materiais metálicos compósitos são materiais com propriedades metálicas que contêm dois ou mais elementos químicos na sua composição, sendo que pelo menos um deles é um metal. Apesar da quantidade de metais existentes na natureza, a grande maioria deles não é empregada na sua forma pura. A partir disso, estes metais são

combinados formando as ligas e apresentando uma diferenciação das propriedades originais de seus componentes. Algumas dessas propriedades, tais como a diminuição ou aumento do ponto de fusão, aumento da dureza ou ainda resistência mecânica, são largamente exploradas pela indústria metalúrgica [33]. As propriedades específicas dos materiais feitos a partir da técnica da metalurgia do pó são ditadas pela quantidade de cada elemento químico introduzido no composto [34].

Dentro desta linha de pesquisa surgem os materiais compósitos aplicados ao magnetismo. Estes materiais magnéticos compósitos podem ter suas propriedades elétricas, mecânicas e magnéticas adequadas a muitas das características que os dispositivos eletromagnéticos requerem. Os materiais compósitos magnéticos podem ser magneticamente duros (ímãs permanentes) ou magneticamente macios (núcleos ferromagnéticos) [35].

Tradicionalmente, os núcleos do rotor e estator para máquinas elétricas são fabricados empregando-se aço para fins elétricos laminado ou em blocos maciços. Para o caso dos núcleos fabricados com aço laminado, as lâminas são empilhadas umas sobre as outras e, muitas vezes, separadas entre si por algum material dielétrico e não ferromagnético. Isso faz com que qualquer núcleo apresente propriedades magnéticas anisotrópicas, sendo que no plano da laminação a condutividade elétrica e a permeabilidade magnética são maiores que na direção normal àquele plano. Assim, quando o núcleo é submetido a um fluxo magnético, a tendência é que este se estabeleça com maior densidade no plano de laminação, fazendo com que a distribuição tridimensional na peça não seja harmônica. Se a densidade de fluxo magnético, B , for alternada haverá o aparecimento de uma densidade de corrente elétrica induzida, J , no núcleo, ficando esta concentrada nos planos das laminações devida à maior condutividade em relação ao plano normal, conforme mostra a figura 37. Ou seja, se a orientação de B se dá paralela ao plano da lâmina, de forma bidimensional, pode-se obter uma permeabilidade mais elevada e uma resistividade maior entre lâminas, o que minimizará o efeito de correntes parasitas já que elas ficam praticamente confinadas na espessura da lâmina. Mas ao se tentar produzir uma distribuição de B normal ao plano da lâmina, obtém-se o contrário: uma menor permeabilidade devido ao entreferro que se forma entre as lâminas e uma corrente parasita maior, já que ela será induzida no plano da lâmina.

Há também materiais laminados nos quais há também anisotropia presente no próprio plano das laminações. É o caso, por exemplo, do aço-silício de grão orientado,

no qual a distribuição do fluxo magnético fica mais limitada ainda a uma direção preferencial no plano da lâmina.

A anisotropia apresenta o comportamento que pode resultar em características melhores de forma bi e unidimensional no volume do material, mas dificilmente o conseguirá de forma tridimensional.

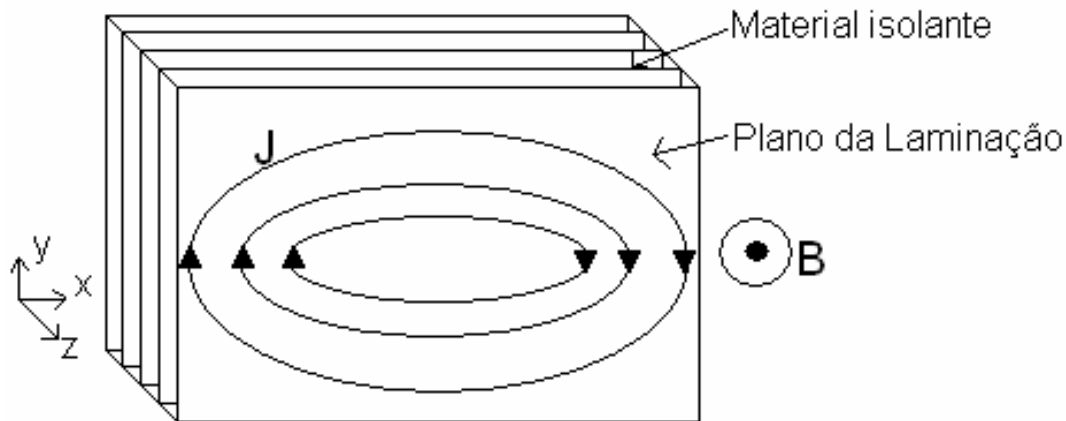


Figura 37 Correntes elétricas induzidas em um núcleo laminado quanto à presença de um campo magnético [52].

Para o caso dos núcleos confeccionados com placas de aço maciço, estes apresentam características praticamente isotrópicas, dependendo das técnicas de usinagem e produção. A permeabilidade magnética relativa destes materiais tende a ser elevada, contudo a resistividade elétrica entre placas é menor ainda do que os núcleos de aço laminado, sendo assim mais susceptíveis ao estabelecimento de correntes elétricas parasitas quando expostos à variação da densidade de fluxo magnético. A utilização destes materiais na construção de circuitos magnéticos é bastante limitada em função das elevadas perdas parasitas que podem apresentar [33][35].

Surge então a necessidade de apresentar um material que tenha propriedades totalmente isotrópicas, sendo igualmente susceptível ao estabelecimento de um fluxo magnético com distribuição no espaço tridimensional e ainda apresente uma elevada resistividade elétrica. Pela aplicação da metalurgia do pó na fabricação de materiais compactados compósitos, onde cada partícula de pó metálico pode ser individualmente isolada, é possível minimizar os efeitos das correntes elétricas induzidas mediante o aumento da resistividade elétrica entre grãos e assim do material como um todo [33].

Com isso o desempenho magnético pode melhor atender às necessidades da reunião de aplicações particulares pela seleção apropriada da base do pó e do revestimento aglutinante.

É neste cenário de necessidade tecnológica que surgem os materiais compósitos magneticamente macios (SMC – *Soft Magnetic Composite*). Estes materiais têm sua aplicação em dispositivos eletromagnéticos devido às importantes vantagens que estes apresentam quando comparados a outros materiais magnéticos macios.

Os materiais tipo SMC, produzidos pela técnica da metalurgia do pó, apresentam um número de vantagens sobre os aços laminados e aços maciços tradicionalmente usados em dispositivos eletromagnéticos. As propriedades originais deste material incluem a isotropia magnética e elétrica e perdas ocasionadas por correntes parasitas mais baixas [37][53]. Os pós de materiais, com diâmetro que varia de 15 a 150 μm , processados por esta técnica para composição de blocos ferromagnéticos macios são, geralmente, o Fe, o FeNi, Fe₃P, FeAl, enquanto que a pasta dielétrica usada pode ser de origem orgânica (resina epóxi e elastômeros) ou de origem inorgânica (óxidos, vidros) [34][38].

A base de material SMC é o pó de ferro com elevado nível de pureza. As partículas de pó são ligadas com um revestimento de um material orgânico ou inorgânico, que produz a isolamento elétrica. O pó revestido é comprimido no formato desejado e submetido a um tratamento térmico a fim de curar a liga [36][37].

Os materiais SMC são elétrica e magneticamente isotrópicos devido à sua natureza. A grosso modo, pode-se dizer que permitem em três dimensões o que o material laminado produz em termos bidimensionais. A característica magnética isotrópica beneficia a produção de novos dispositivos eletromagnéticos, pois os circuitos magnéticos já podem ser projetados para uma distribuição tridimensional do fluxo, e novas topologias mais complexas, antes inviáveis, podem ser exploradas para conseguir desempenhos mais interessantes [35].

Os materiais SMC têm também algumas desvantagens que devem ser considerado com cuidado no projeto, na manufatura e na aplicação de máquinas elétricas. Devido à sua concepção, a permeabilidade magnética relativa do material de SMC é significativamente mais baixa em comparação a outros materiais magnéticos macios, como, por exemplo, o aço maciço [33]. Isto pode ser visto como um problema em máquinas elétricas rotativas com um pequeno entreferro nas quais a magnetização depende de correntes de magnetização.

As maiores permeabilidades magnéticas relativas para materiais compósitos magneticamente macios são da ordem de 500 H/m. Conseqüentemente, é esperado que este material seja apropriado para a construção de máquinas e atuadores nos quais o entreferro é extenso, como, por exemplo, em configurações sem ranhuras (*slotless*). Um entreferro grande torna o dispositivo menos influenciado ou menos sensível à permeabilidade magnética do núcleo ferromagnético [36], já que a relutância magnética associada seria determinada pelo entreferro.

Outro problema associado a materiais tipo SMC são as elevadas perdas por histerese. O processo de compactação induz tensões mecânicas que dificultam a mobilidade dos domínios magnéticos. Se o material for tratado termicamente no nível de temperatura que produziria o alívio dessas tensões e a conseqüente redução de perdas por histerese, tanto o isolamento grão a grão quanto o aglutinante seriam danificados.

Comercialmente falando, existem vários materiais compostos magneticamente macios no mercado. Os mais comuns, a saber, seriam: Somaloy 500, Ancorsteel e Nanocon. A seguir são apresentadas suas principais propriedades.

3.2.2.1 Somaloy 500

O segundo material utilizado na confecção do núcleo ferromagnético da armadura estatórica do Atuador Planar é o Somaloy 500, produzido pela empresa sueca Högånäs. Esse material ferromagnético compósito magneticamente macio aplica-se para uso em baixas frequências na ordem de até 400Hz, por apresentar perdas magnéticas totais mais baixas nessa faixa. Suas partículas e estrutura são apresentadas na figura 38. O material é composto por pós metálicos, lubrificantes e aglutinantes. A quantidade de adição de lubrificantes e/ou de aglutinantes ao pó metálico, seguidos de compactação em tratamento de térmico, determinam as propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas do material [44].

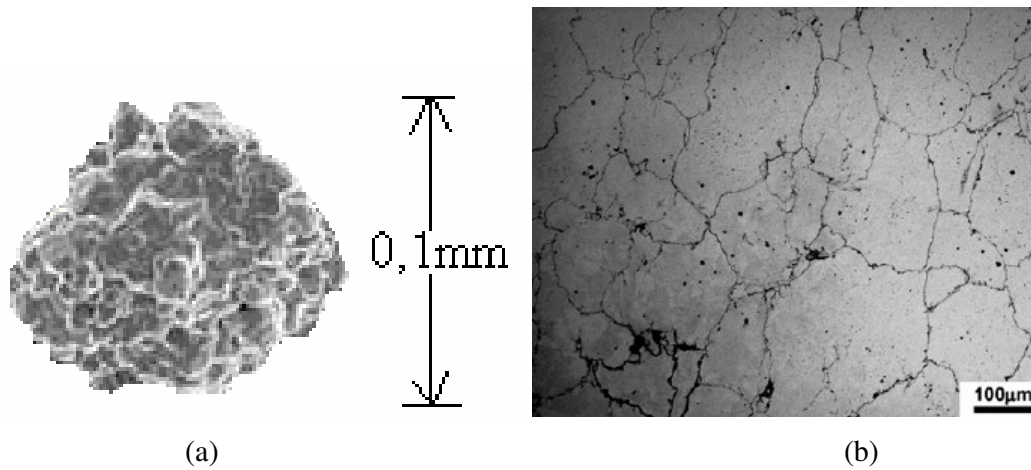


Figura 38 Somaloy 500: (a) Partícula e (b) Estrutura de Somaloy 500 [44].

A seguir são apresentadas algumas características específicas do Somaloy 500, principalmente no que diz respeito ao processo de fabricação, lubrificantes, compactação, tratamento térmico e propriedades elétricas e magnéticas, destacando assim pontos importantes para a utilização deste material.

3.2.2.1.1 Processo de Fabricação

O método de produção do composto magnético macio Somaloy 500 é mostrado na figura 39.

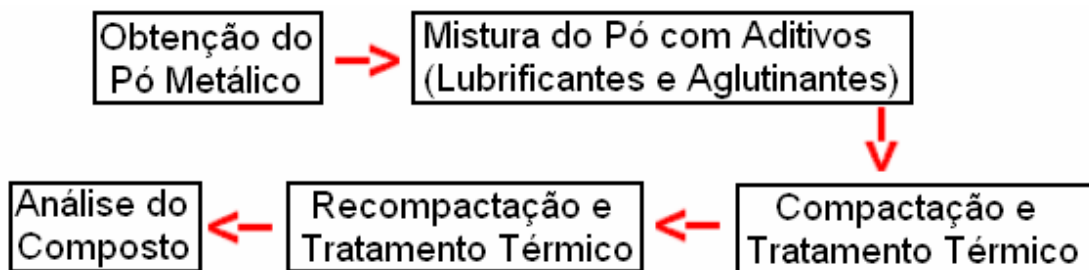


Figura 39 Processo de produção do Somaloy 500 [42].

A adição de lubrificantes no composto assegura uma redução da fricção durante as etapas de compressão e de injeção. Esta composição química, resultante de adição de ferro, aglutinantes e lubrificantes, é processada de forma a ficar homogênea. A primeira

compactação é feita em uma temperatura ambiente em torno de 130° C, provocando um pequeno adensamento do composto. Já a segunda compactação é realizada sobre maior pressão e temperatura, possibilitando uma maior rigidez mecânica ao composto [44].

3.2.2.1.2 Lubrificantes

Para o caso específico do Somaloy 500, o lubrificante mais utilizado é o Kenolube por este possibilitar ao composto um melhor conjunto de propriedades em comparação aos demais lubrificantes. Também existem outros três lubrificantes usados no composto de Somaloy 500, a saber: o H-wax, o Zn-st e o LB1. A figura 40 traz uma exposição comparativa entre três dos lubrificantes usados no processo de compactação do Somaloy 500, com dois diferentes percentuais de adição na composição, relacionado à força transversal de ruptura, após o composto ser compactado, por prensas mecânicas, a uma pressão de 800 MPa com o devido tratamento térmico específico para cada um [44].

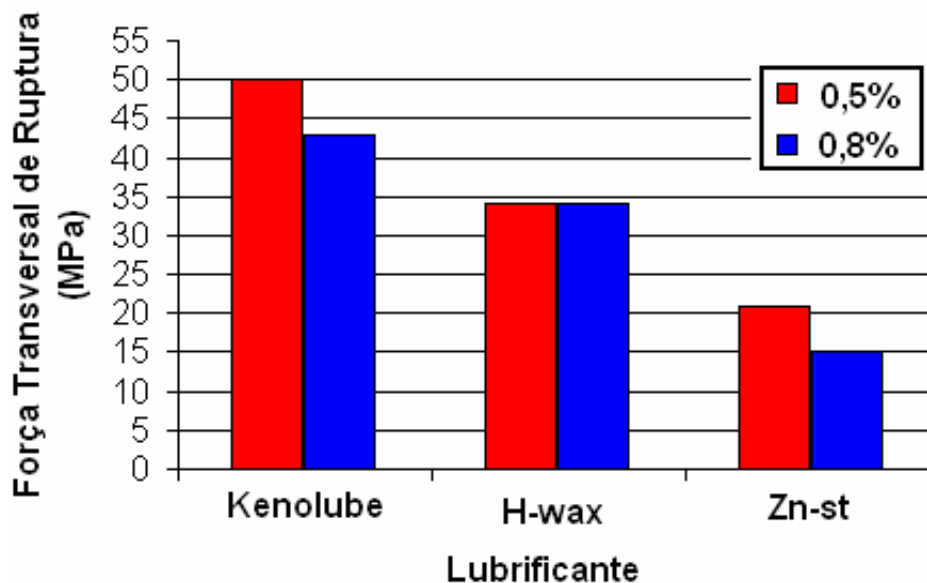


Figura 40 Efeito de três diferentes lubrificantes, utilizados na composição do Somaloy 500, quanto à variabilidade da força transversal de ruptura [42].

Como é possível enfatizar com auxílio da figura 6, em condições convencionais, o Kenolube é o lubrificante que está associado à maior força transversal de ruptura, produzindo uma maior resistência mecânica. Outro detalhe importante a ser verificado

na adição de lubrificantes é a relação direta que têm com o peso específico do material. Na figura 41 é apresentada essa relação em função da percentagem de injeção do lubrificante Kenolube no composto. Quanto mais lubrificante é introduzido no composto, menor é a sua densidade.

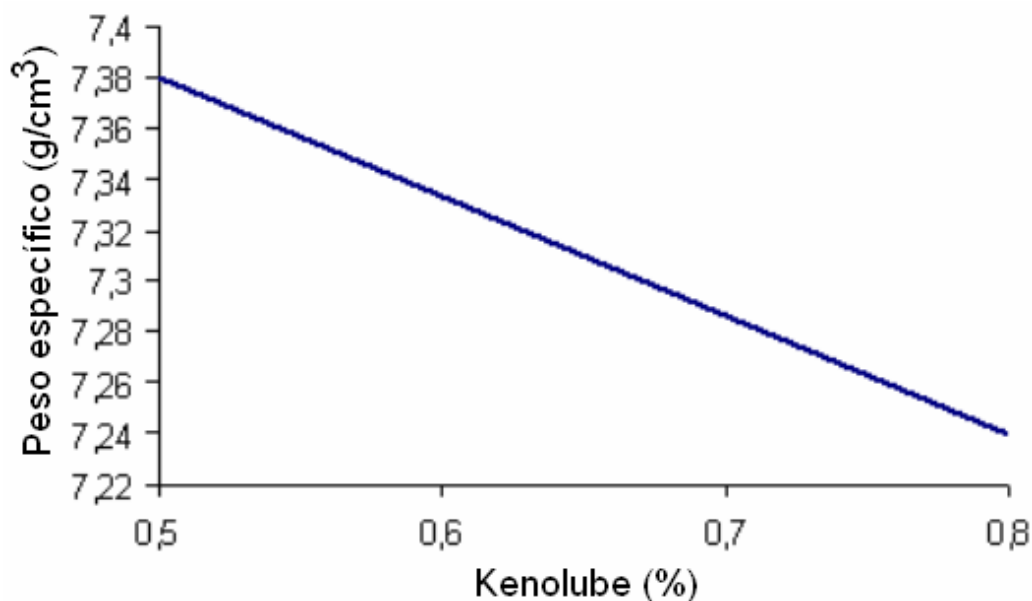


Figura 41 Efeito da adição de Kenolube sobre o peso específico do Somaloy 500, para a segunda compactação sob pressão de 800 MPa [44].

Uma cola orgânica pode ser introduzida na mistura além do lubrificante, entretanto, com a adição de muita cola o lubrificante torna-se ineficiente. A mínima adição de lubrificantes (0,5%) e a mínima adição de cola (0,5%) resultam num total de 1% de aditivos orgânicos o que ocasiona uma considerável redução na densidade do material após a compactação, prejudicando a sua resistência mecânica [44].

O outro lubrificante conhecido como LB1 também pode ser introduzido no estágio de mistura com o lubrificante e a cola, conseguindo-se acréscimos na força transversal de ruptura que chegam aos 100 MPa depois de tratado. Contudo, em ambientes industriais, o total de adição de orgânicos pode estar limitado em 0,6 % da composição final. Um dos inconvenientes mais marcantes do composto Somaloy com LB1 é a baixa permeabilidade magnética no material em comparação ao Somaloy com Kenolube.

3.2.2.1.3 Compactação

O processo de compactação para o Somaloy 500, independente dos tipos de aditivos, ocorre conforme descrito nos tópicos referentes à metalurgia do pó. O início do processo de compactação exige que a mistura já esteja preparada na sua forma homogênea. Como já foi dito, a compactação é feita com pressões que variam de 400 a 800 MPa para o Somaloy 500. Em caráter de comparação, são analisadas duas misturas (Somaloy 500 + 0,5% Kenolube e Somaloy 500 + 0,6% LB1) no que diz respeito à pressão de compactação como função do peso específico desejado, apresentadas na figura 42.

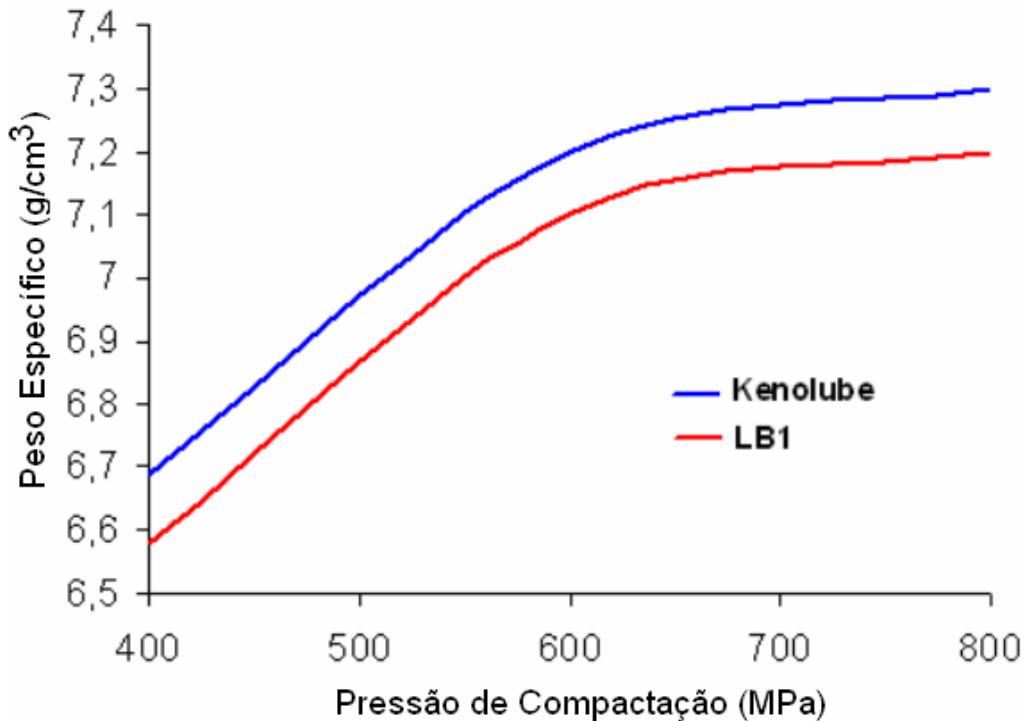


Figura 42 Comparação entre Somaloy 500 + 0,5% Kenolube e Somaloy 500 + 0,6% LB1[44].

Na figura 42 verifica-se que, quanto maior a compressão, maior o peso específico resultante. Contudo, para o caso do Somaloy 500, compactações acima dos 800 MPa não geram significativos aumentos de peso específico. Outro detalhe importante no peso específico é a relação direta que ele tem com a indução magnética. A figura 43 exemplifica a relação entre a indução magnética e o peso específico, quando

o material é submetido a um campo magnético de 100kA/m, para o caso do Somaloy 500 + 0,5% Kenolube [44].

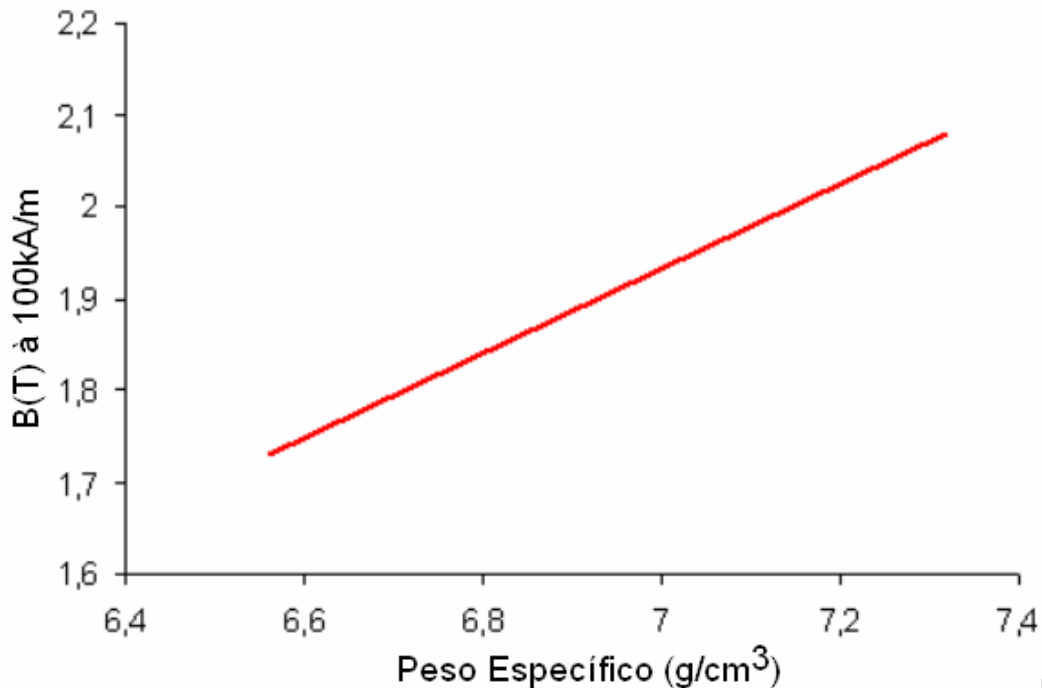


Figura 43 Relação entre o peso específico e a indução a 100kA/m para materiais magnéticos compostos do tipo Somaloy 500 + 0,5% Kenolube [44].

3.2.2.1.4 Tratamento Térmico

O tratamento térmico é um processo que ocorre simultaneamente à compactação. O Somaloy 500 com 0,5% de Kenolube em compactação de 800 MPa é aquecido a 500° C por 30 minutos no ar e adquire um incremento na força transversal de ruptura de 50 MPa. Esse aquecimento serve também para haver uma maior ligação entre os grãos metálicos da composição.

Outro tipo tratamento térmico é o tratamento de vapor. Pode ser usado na mistura com lubrificante Kenolube, onde o composto é introduzido em fornalhas com temperaturas entre 250° e 580° C por um tempo que varia entre 10 e 60 minutos. Este processo resulta na incorporação de uma tensão transversal de ruptura de 200 MPa. Entretanto, a isolação superficial das partículas tende a degradar quando o tempo e a temperatura são aumentados [44].

Após o tratamento térmico, o peso específico do material tende a diminuir um pouco, devido à acomodação do lubrificante na estrutura e da retirada das prensas de compactação sobre o material. Este efeito é mostrado na tabela 3 em função de diversos materiais lubrificantes com diferentes percentagens de adição [43].

Tabela 3 Comparação do peso específico antes e depois do tratamento de calor a 500 ° C por 30 minutos no ar – 800MPa [43].

Somaloy 500	Peso específico antes do tratamento térmico (g / cm^3)	Peso específico depois do tratamento térmico (g / cm^3)
+0,5% Kenolube	7,34	7,32
+0,6% Kenolube	7,32	7,30
+0,8% Kenolube	7,28	7,26
+0,5% Amide wax	7,37	7,33
+0,8% Amide wax	7,28	7,22
+0,5% Zn-st	7,40	7,37
+0,8% Zn-st	7,31	7,23

A mistura contendo o lubrificante colante LB1 deve ser recozida a uma temperatura de 275° C. A função da resina colante deste lubrificante é aumentar a tensão transversal de ruptura de 30 MPa para 100 MPa, quando submetido a esta temperatura por 60 minutos. O tratamento térmico com LB1 não é indicado para temperaturas acima dos 500° C [43][44].

3.2.2.1.5 Propriedades Magnéticas

As curvas de magnetização, dados fundamentais na análise das propriedades magnéticas dos materiais que relacionam a densidade de fluxo magnético, B , com o campo magnético, H , são importantes para a definição de ponto de operação do material, os valores de saturação do material e a permeabilidade magnética. Considerando esta importância, a seguir são feitas as exposições e análises de seis diferentes situações, considerando a curvas de magnetização de materiais à base de Somaloy 500, no que diz respeito a aditivo, tratamento térmico e peso específico. Os valores são relacionados nos gráficos das figuras 44 e 45 e na tabela 4. As compactações que geraram os três diferentes pesos específicos são: 400MPa, 600MPa e 800MPa, sendo que a maior pressão gera a maior densidade.

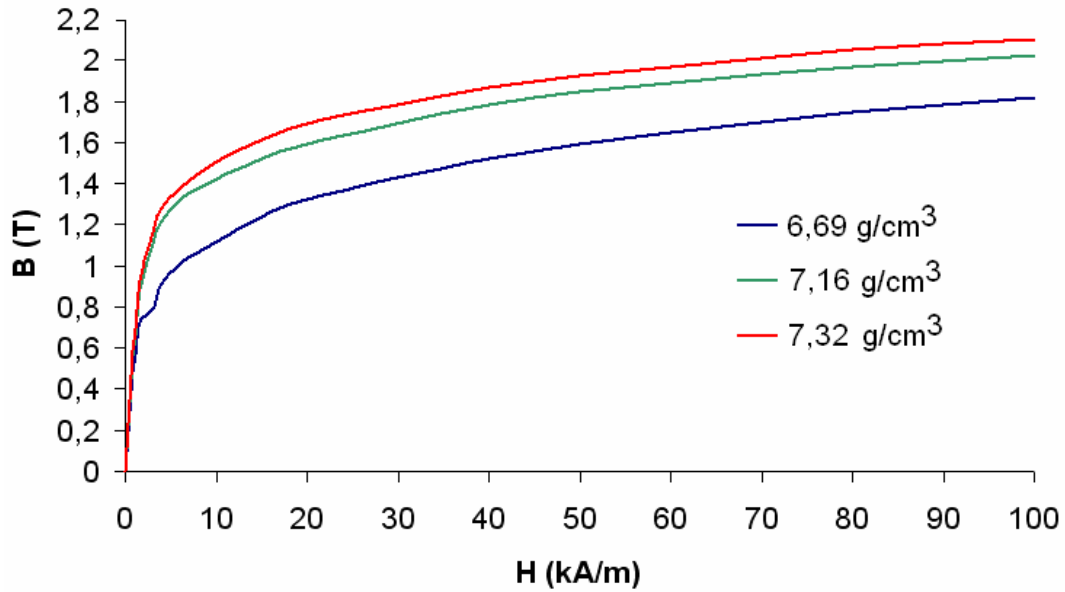


Figura 44 Curva de magnetização do Somaloy 500 + 0,5% Kenolube, com tratamento térmico a 500°C por 30 minutos no ar [44].

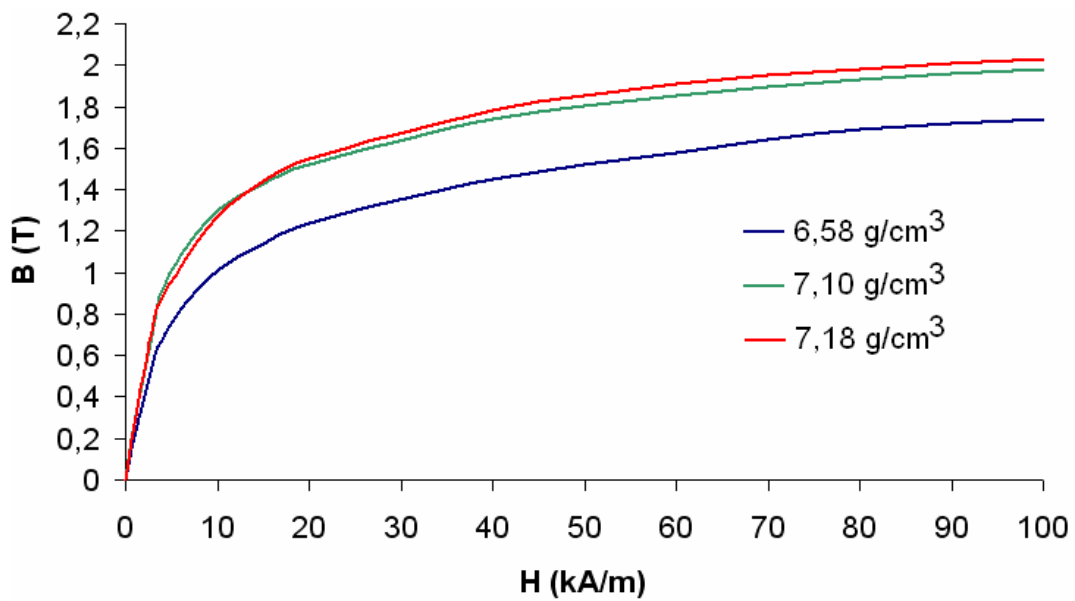


Figura 45 Curva de desmagnetização do Somaloy 500 + 0,6% LB1, submetida a tratamento térmico a 275°C por 60 minutos no ar [44].

Tabela 4 Comparação da permeabilidade relativa máxima do Somaloy 500, em função do aditivo utilizado, tratamento térmico e pressão de compactação [44].

Pressão de Compactação	0,5% Kenolube à 500°C por 30 minutos	0,6% LB1 à 275°C por 60 minutos
400MPa	371,36	159,16
600MPa	440,33	206,90
800MPa	461,55	212,21

Essas figuras e tabela deixam clara a importância do peso específico do material nas suas propriedades magnéticas: maiores pesos específicos geram permeabilidades magnéticas relativas máximas maiores. Outro fato importante é que o Somaloy 500 com Kenolube possui uma permeabilidade magnética proporcionalmente maior do que o quando usado o aditivo LB1. Ainda em função do peso específico do Somaloy 500 com 0,5% de Kenolube, é possível relacioná-la com a indução máxima (B_{max}) e indução residual (Br) obtidas com uso de possíveis diferentes lubrificantes, ressaltando a preferência pelo Kenolube. Estes resultados são apresentados na figura 46.

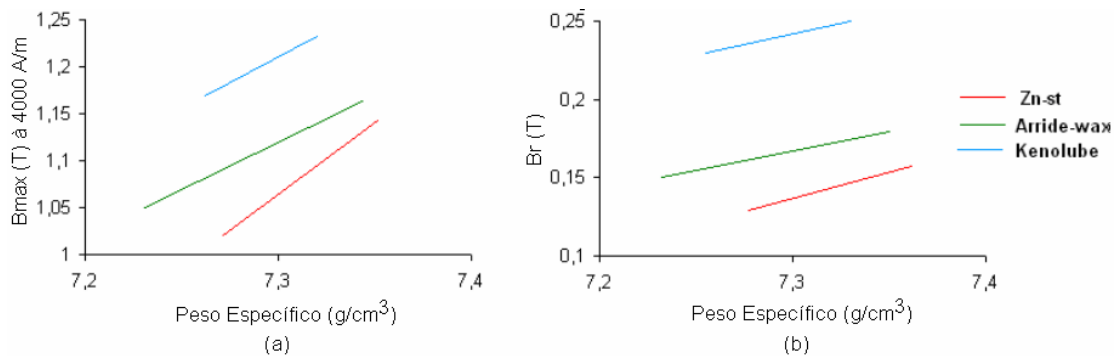


Figura 46 Efeito de diferentes lubrificantes e pesos específicos na (a) indução máxima e na (b) indução residual, quando os materiais são tratados a 500° C por 30 minutos no ar [43].

No que diz respeito à permeabilidade magnética relativa máxima do material, o Somaloy 500 com 0,5% de Kenolube (500° C por 30 min., no ar) tem uma permeabilidade relativa máxima de 500 e força coercitiva de 250 A/m. Já com a resina LB1 (275° C por 60 min.) consegue uma permeabilidade relativa máxima de 250 e força coercitiva de 350 A/m. Na figura 47 são apresentadas as relações de permeabilidade magnética relativa máxima em função do peso específico do material, quando

empregados três tipos de lubrificantes (Kenolube, Arride-wax e Zn-st), com uma adição de 0,5% na composição final.

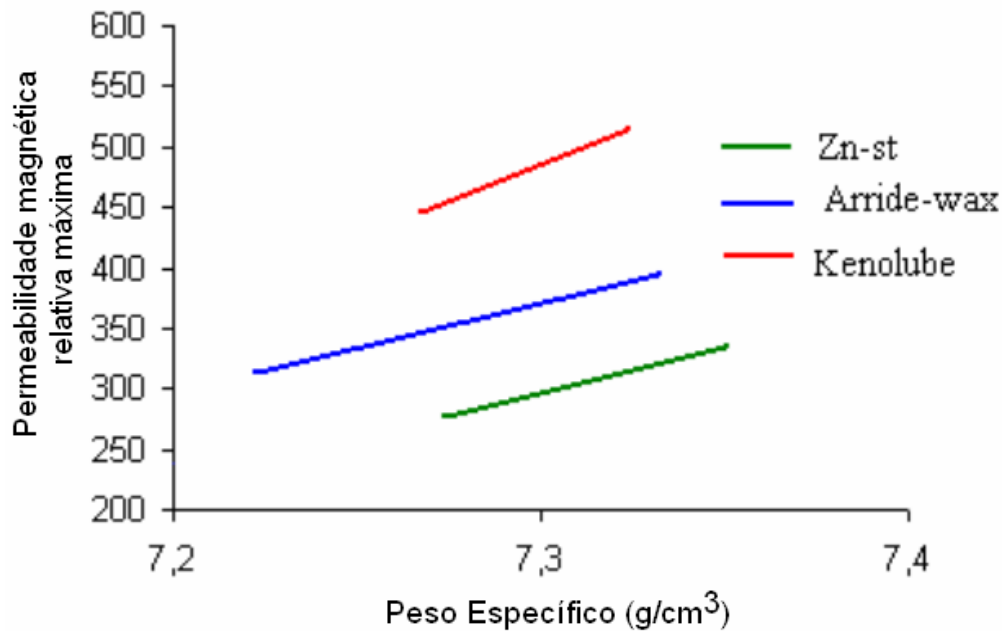


Figura 47 Efeito dos lubrificantes na permeabilidade DC do material tratado termicamente a 500° C por 30 minutos [43].

As partículas isoladas de pó no Somaloy 500 conseguem boas propriedades magnéticas com Kenolube depois do tratamento térmico a 500° C por 30 minutos e boa força coercitiva com recozimento a 275° C por 60 minutos, adicionando-se lubrificantes colantes.

Especificamente, o material compósito magneticamente macio utilizado para a confecção do segundo núcleo ferromagnético da armadura estatórica do Atuador Planar em estudo será o composto Somaloy 500 + 0,5% Kenolube, cuja algumas propriedades são apresentadas na tabela 5. Na figura 48 é mostrado um dos blocos de Somaloy 500 utilizado na montagem do núcleo ferromagnético, já na figura 49 é apresentada a curva de histerese do material em regime DC e AC em 500 Hz, enquanto que na figura 50 pode ser visto o gráfico que relaciona perdas magnéticas totais com a indução em função da frequência.

Tabela 5 Propriedades do Somaloy 500 + 0,5% Kenolube [35] [41]

Peso específico	Permeabilidade magnética máxima	Resistividade elétrica nominal comercial
7,32 g/cm ³	500	70 μΩ.m



Figura 48 Bloco de Somaloy 500 + 0,5% de Kenolube medindo 30mm x 30mm x 115mm.

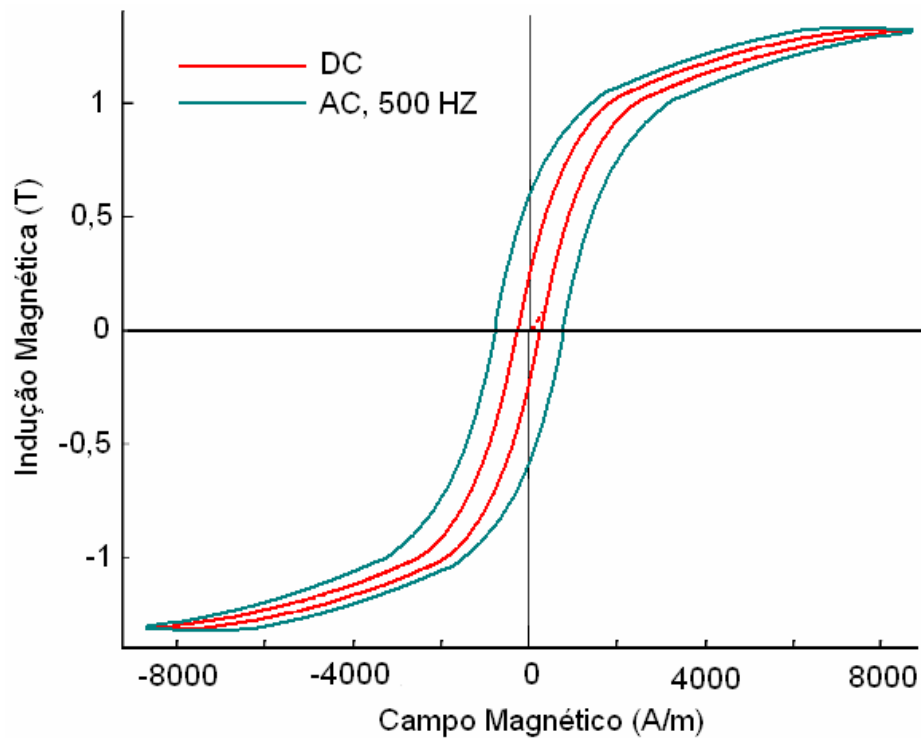


Figura 49 Curva de histerese do Somaloy 500 + 0,5% de Kenolube em regime DC e AC [44].

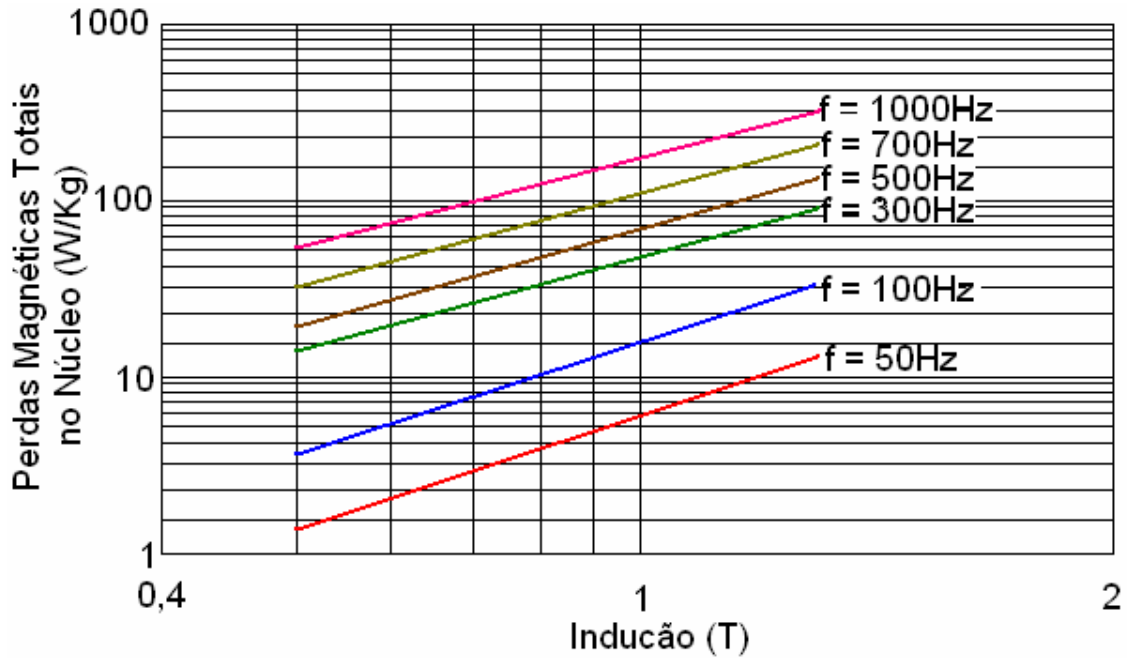


Figura 50 Perdas magnéticas totais no núcleo de Somaloy 500 em função da indução magnética e frequência [44].

3.2.2.2 Ancorsteel

Também obtido a partir do processo de compactação de pós metálicos, o Ancorsteel pode ser classificado como um material compósito magneticamente macio. É um tipo de material comum, porém menos usado e estudado que o Somaloy 500. Apresentando algumas características importantes que podem ser aproveitadas e utilizadas quando para a substituição do Somaloy. A seguir são apresentadas algumas propriedades e características deste material.

Esse material é apresentado comercialmente em três tipos básicos: SC 120, SC 100 e TC 80. Há outros tipos, com propriedades semelhantes, porém com menos aceitação. Também no Ancorsteel, as propriedades magnéticas dos compósitos são dependentes da quantidade do ferro, dos aditivos colocados no composto e do processo de fabricação utilizado na metalurgia do pó. A tabela 6 apresenta os dados magnéticos nominais, comumente comerciáveis, dos três tipos básicos, destacando características como: peso específico, força coercitiva e indução magnética.

Tabela 6 Dados magnéticos nominais e comerciais de três tipos básicos do compósito Ancorsteel [45].

Ancorsteel	Peso específico (g/cm ³)	Força coercitiva (Ae/m)	Indução magnética a 3183 Ae/m (T)
SC 120	7,45	374,01	1,12
SC 100	7,40	381,97	1,09
TC 80	7,20	374,01	0,77

O Ancorsteel tipo SC 120 apresenta uma composição com partículas metálicas mais grosseiras e um índice mais baixo de adição de polímero aglutinante em relação aos outros dois tipos examinados, isso resulta em um peso específico mais elevado. Em comparação aos demais tipos de Ancorsteel, o SC 120 apresenta melhores propriedades magnéticas para baixas frequências. Já o Ancorsteel tipo TC 80 utiliza uma distribuição de partícula menor e é combinado com um tratamento inicial de oxidação do pó seguido pelo seu revestimento por polímero [45].

No gráfico da figura 51 são apresentados os resultados do efeito de compactação no peso específico do Ancorsteel tipo SC 120. Ainda é importante destacar que pressões de compactação muito baixas, por exemplo 135 MPa, geram uma força coerciva de aproximadamente 262,6 Ae/m, enquanto que uma maior compactação, 685 MPa, geram uma força coerciva maior, chegando a aproximadamente 350,14 Ae/m.

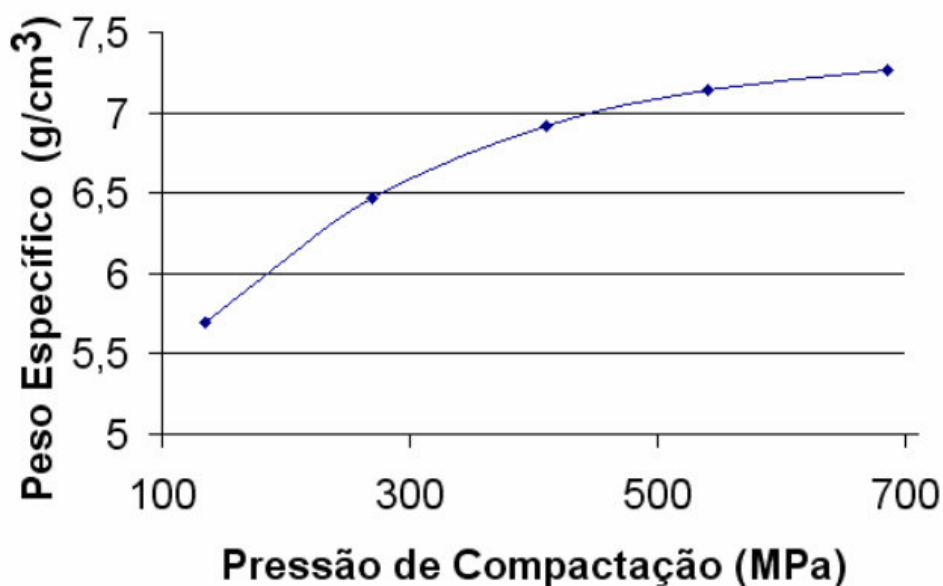


Figura 51 Efeito de compactação no peso específico do Ancorsteel SC 120 [45].

Durante a compactação do Ancorsteel SC 120, o composto é submetido a temperaturas em torno de 150° C. Logo após, o material é recozido em temperaturas que variam de 150°C a 650°C. Este segundo cozimento determina, fundamentalmente, a permeabilidade magnética relativa do material. Para uma avaliação em c.c., é possível, através da figura 52, verificar os efeitos provocados na permeabilidade em função da temperatura de recozimento para este material.

Como é possível perceber, uma das grandes limitações deste material é a permeabilidade relativa baixa. Ela é uma consequência direta do revestimento orgânico-metálico altamente isolante. O isolamento das películas reduz as perdas por correntes elétricas parasitas, contudo cria uma espécie de entreferro entre os grãos de pó, não condutor, que impede assim transferência do fluxo magnético através das partículas adjacentes do pó.

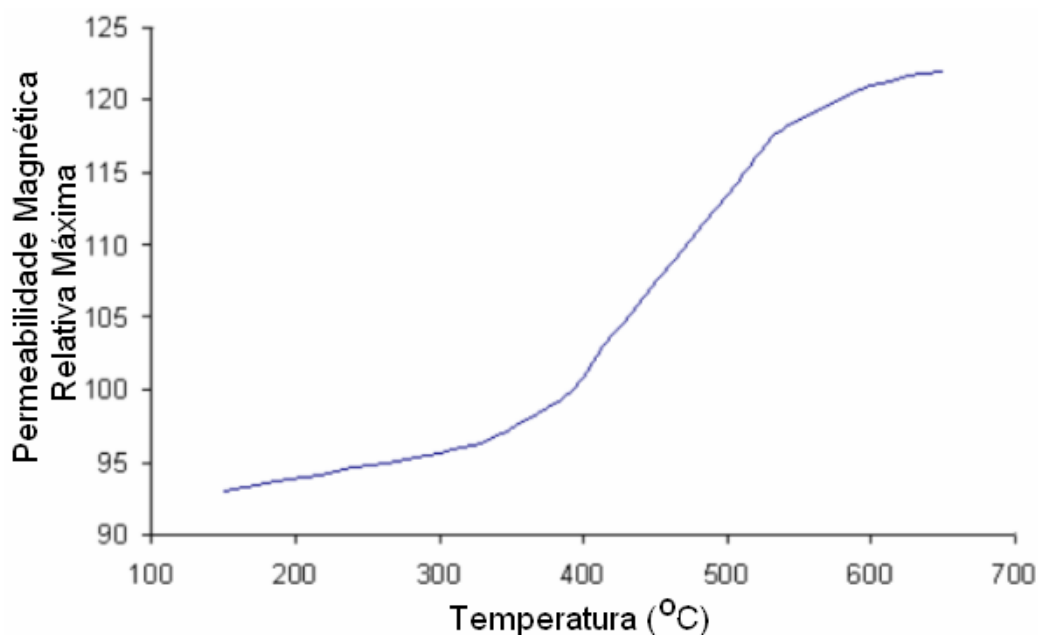


Figura 52 Efeito da temperatura sobre a permeabilidade magnética relativa do Ancorsteel SC 120 recozido [45].

Os pós metálicos isolados, também neste composto de Ancorsteel, apresentam também uma excelente flexibilidade tridimensional do projeto e a aplicabilidade de isotropia do fluxo [48]. Na figura 53 é apresentada a curva de histerese quasi-estática do pó de ferro compactado e recozido em comparação entre o aço laminado M19 e o Ancorsteel tipo SC 120. Nota-se que os materiais laminados exibem uma

permeabilidade mais elevada e uma maior saturação. A razão para o desempenho do pó isolado é a presença do revestimento do pó.

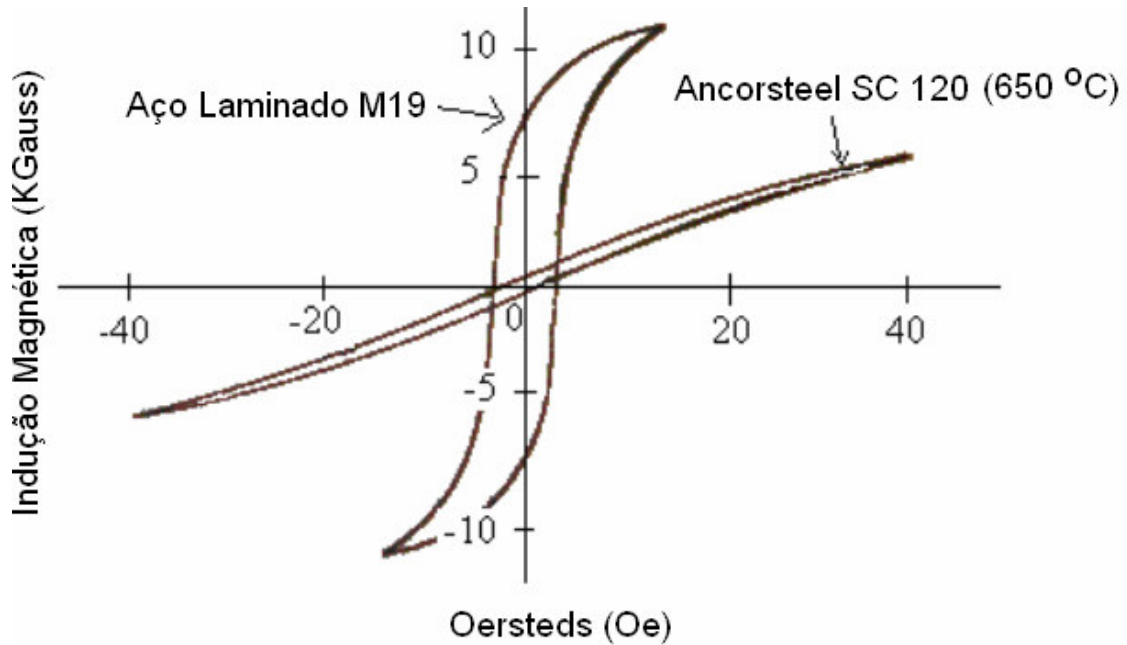


Figura 53 Curva de histerese quasi-estática, comparando o aço laminado e o material compósito recozido [45].

3.2.2.3 Nanocon

Outro material compósito magneticamente macio é o Nanocon. Dentre suas principais características está a força coercitiva que pode chegar a 358,10 Ae/m. Ainda, produz uma elevada resistividade elétrica com permeabilidade magnética praticamente constante numa larga faixa de frequência. A Figura 54 mostra a permeabilidade magnética relativa em função da frequência e a influência do tamanho das partículas do pó de ferro. Observa-se que a permeabilidade relativa supera a da maioria dos materiais compostos magneticamente macios [46]. Devido à sua permeabilidade constante em larga faixa de frequência, este material é aplicado principalmente em corrente alternada.

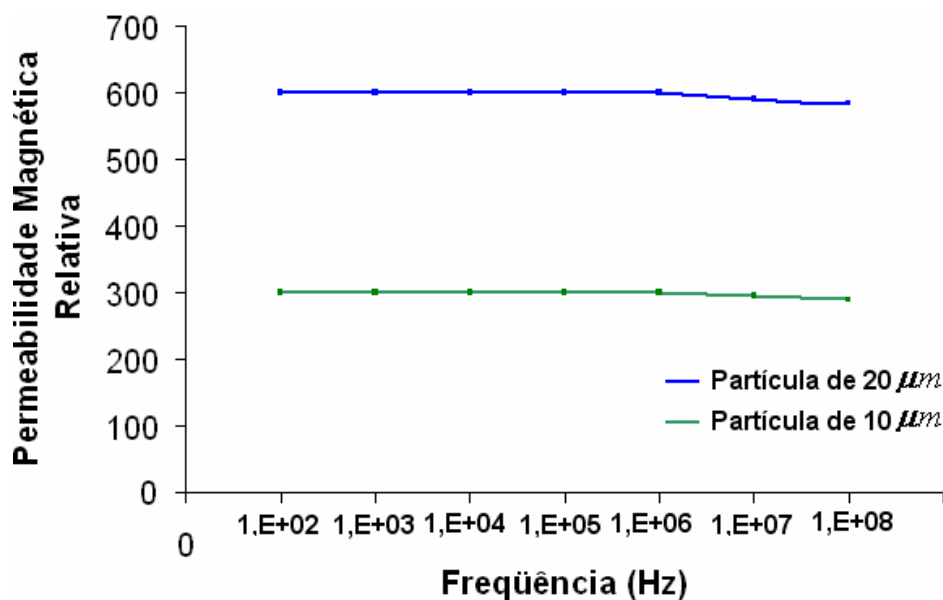


Figura 54 Permeabilidade magnética relativa do material Nanocon em função da frequência [46].

3.3 ÍMÃS PERMANENTES

Os materiais magneticamente duros, conhecidos como ímãs permanentes, são caracterizados por apresentarem uma alta indução remanente e um elevado campo coercitivo quando comparados com os materiais ferromagnéticos macios. Um ímã permanente opera como tal no segundo quadrante de sua curva de histerese. As informações contidas na sua curva de segundo quadrante ou ainda característica desmagnetizante normal são importantes, pois é aí que são apresentadas características fundamentais dos ímãs permanentes: campo coercitivo, H_c , indução remanente, B_r , produto energético, (BH) , permeabilidade e a forma de curva [12][52].

Em 1983, foi desenvolvido um novo ímã permanente, também baseado em terras raras, o Neodímio-Ferro-Boro. Estes ímãs permanentes apresentavam um elevado campo coercitivo e também um alto valor de indução remanente, apresentando um melhor desempenho que qualquer outro na atualidade em termos de campo coercitivo e indução remanente [50][52].

Os ímãs permanentes de Neodímio-Ferro-Boro, $Nd_2Fe_{14}B$, com, aproximadamente, $B_r = 1,22$ T e $H_c \cong 800000$ A/m também são conhecidos como “Super-Ímãs”. São produzidos pela aglutinação de ligas pulverizadas e depois são

sinterizados ou compactados. São altamente susceptíveis à corrosão e devem, quase sempre, possuir revestimento protetor, sendo, portanto, normalmente niquelados, zincados ou revestidos com resina epóxi [10][59].

O carro do atuador planar em estudo possui dois ímãs permanentes de NdFeB, sinterizados, anisotrópicos e niquelados, idênticos e com faces polares quadradas de lado 25,4 mm e espessura de 8mm, têm uma temperatura nominal de operação de 130°C e uma temperatura de Curie de 310°C. Os dados magnéticos deste material são fornecidos pelo fabricante e apresentados na tabela 7. Enquanto que na figura 55 é apresentada a curva de desmagnetização normal, obtida no segundo quadrante.

Tabela 7 Dados magnéticos dos Ímãs Permanentes N35H [59]

Remanência (B_r)		Força Coercitiva (H_c)		Força coercitiva intrínseca (H_{ci})		Máx. produto energético (BH) _{max}		Permeab. relativa nominal
kG	T	kOe	kA/m	kOe	kA/m	MGOe	kJ/m	
11,8-12,8	1,18-1,28	11	876	17	1353	33-36	263-287	1,09

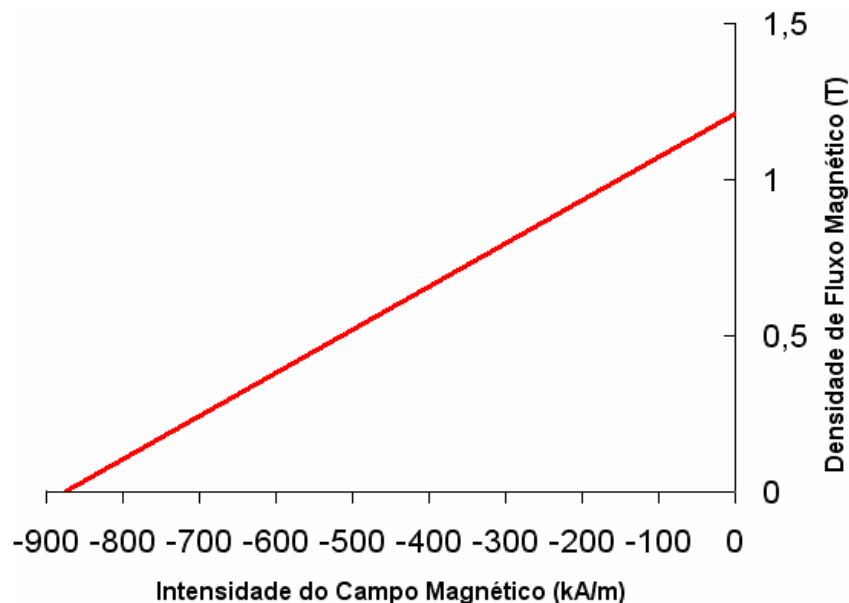


Figura 55 Curva de desmagnetização normal do ímã permanente de NdFeB de comprimento axial de 8,0mm [59].

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS USADOS NO ATUADOR PLANAR

A verificação e o conhecimento do peso específico e da resistividade elétrica do material composto magneticamente macio Somaloy 500, utilizado na confecção do núcleo ferromagnético que compõe a armadura estatórica do atuador planar em análise, é de fundamental importância para este estudo. Além disso, o conhecimento da resistividade elétrica do aço AISI 1020 complementa esta importância. Sabendo-se disso, foram realizados três ensaios práticos de laboratório para a determinação destas grandezas. Estes testes são apresentados a seguir, bem como os seus resultados e o embasamento físico utilizado para a determinação dos mesmos.

Um detalhe bastante importante que deve ser considerado é o fato de que os equipamentos de medição utilizados no experimento apresentam incertezas, e essas, apesar de pequenas, causam uma tendência de erro no valor medido. Assim, de forma ponderada e proporcional, teve-se o cuidado de equacionar essas incertezas, associando-as na forma de erro percentual máximo para cada ensaio.

3.4.1 Determinação da Resistividade Elétrica do Somaloy 500

O teste da resistividade elétrica para o bloco de Somaloy 500 partiu-se da consideração da fórmula básica da eletricidade que determina a resistência elétrica R de um condutor, a saber:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (3.3)$$

Onde ρ é a resistividade, l é o comprimento do condutor e S é a área de seção transversal à passagem de corrente elétrica. A fórmula acima pode ser escrita como:

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad (3.4)$$

Para a determinação da resistência elétrica do bloco, montou-se um esquema de medição conforme indica a figura 56. Neste esquema, o bloco de Somaloy é conectado ao aparelho para medição de resistência elétrica através de quatro fios, onde os dois das extremidades são responsáveis pela condução de corrente elétrica controlada no bloco,

enquanto que os dois fios centrais são responsáveis pela medição da diferença de potencial elétrico, V , criado no bloco em resposta a esta excitação elétrica. O objetivo fundamental destas ligações é neutralizar o efeito da resistência elétrica dos fios condutores, além de se valer da Lei de Ohm para a determinação do mensurado.

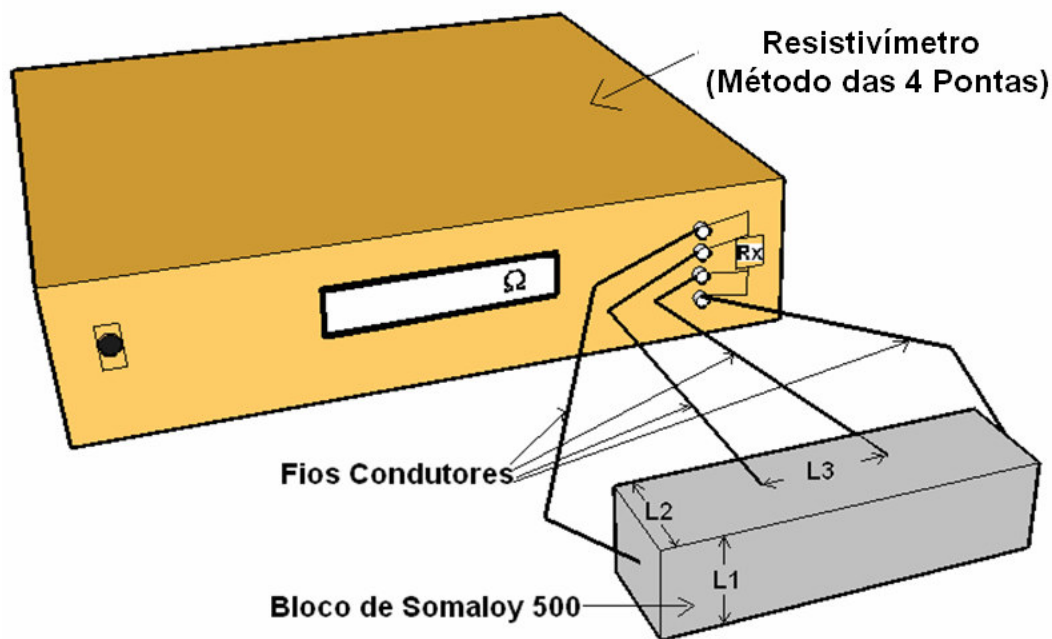


Figura 56 Esquema de medição de resistência elétrica para o bloco de Somaloy 500.

Para este teste são ensaiados três blocos de Somaloy 500, ou seja, Bloco 1, Bloco 2 e Bloco 3, escolhidos aleatoriamente, os quais supostamente são produzidos a partir do mesmo processo. Isso é entendido importante uma vez que na montagem do núcleo ferromagnético de material SMC os blocos são associados, lado a lado, formando o conjunto. As peças ensaiadas são do mesmo lote das peças utilizadas na fabricação do núcleo ferromagnético em questão.

De cada um dos três blocos são extraídas 20 amostras em duas condições de temperatura e em tempos diferentes, garantindo com isso uma melhor certeza e confiabilidade dos resultados. As temperaturas utilizadas para estas medições são temperaturas típicas, as quais o atuador planar estará submetido, ainda que em caráter de protótipo. Para a utilização da fórmula de resistividade elétrica exposta acima, faz-se necessário a medição de três grandezas, a saber: resistência elétrica, área de seção transversal ($L2 \times L1$) e comprimento ($L3$).

O bloco 1 apresenta uma área de seção transversal de $0,0009\text{m}^2$ e um comprimento de $0,038\text{m}$, é submetido a dois ensaios em diferentes temperaturas, produzindo os resultados apresentados na tabela 8. No bloco 2 a área de seção transversal é igual à $0,0009\text{m}^2$ enquanto que o comprimento mede $0,033\text{m}$, novamente são feitos dois ensaios em diferentes temperaturas, produzindo os resultados apresentados na tabela 9. Finalmente, no bloco 3 a área de seção transversal permanece a mesma, enquanto que o comprimento fica medindo $0,036\text{m}$, são processados dois ensaios em diferentes temperaturas, produzindo os resultados apresentados na tabela 10.

Tabela 8 Resultados relacionados à resistividade elétrica do bloco 1.

Ensaio	Temperatura (°C)	Resistência Elétrica (Ω)	Resistividade Elétrica ($\Omega.m$)	Desvio Padrão ($\Omega.m$)	Erro Percentual Máximo (%)
1	26	0,0019256	$45,6063 \times 10^{-6}$	$1,057 \times 10^{-7}$	3,388905127
2	23	0,0019562	$46,3311 \times 10^{-6}$	$5,603 \times 10^{-7}$	3,36982038

Tabela 9 Resultados relacionados à resistividade elétrica do bloco 2.

Ensaio	Temperatura (°C)	Resistência Elétrica (Ω)	Resistividade Elétrica ($\Omega.m$)	Desvio Padrão ($\Omega.m$)	Erro Percentual Máximo (%)
3	26	0,0016668	$45,4576 \times 10^{-6}$	$1,68 \times 10^{-7}$	3,022855851
4	23	0,0016629	$45,3529 \times 10^{-6}$	$5,421 \times 10^{-7}$	3,025101994

Tabela 10 Resultados relacionados à resistividade elétrica do bloco 3.

Ensaio	Temperatura (°C)	Resistência Elétrica (Ω)	Resistividade Elétrica ($\Omega.m$)	Desvio Padrão ($\Omega.m$)	Erro Percentual Máximo (%)
5	26	0,0017937	$44,8425 \times 10^{-6}$	$0,54 \times 10^{-7}$	3,257048819
6	23	0,0017856	$44,6390 \times 10^{-6}$	$3,53 \times 10^{-7}$	3,262194398

Com a devida associação dos resultados extraídos nos ensaios de 1 até 6, a média ponderada da resistividade elétrica obtida é de $47,03823\mu\Omega.m$ com um desvio padrão médio de $4,16783\mu\Omega.m$ e um erro percentual máximo associado menor que 3,4

% em todos os ensaios. Segundo o fabricante do Somaloy 500, a empresa Höganas AB [2], a resistividade elétrica do Somaloy 500 fica na faixa de $50 \text{ a } 70 \mu\Omega.m$ à 25°C , resultado este bem próximo dos obtidos com o experimento. O ensaio obedece as recomendações da American Society for Testing and Materials, respeitando as condições de repetibilidade e validação dos resultados [60][62][65].

3.4.2 Determinação da Resistividade Elétrica do Aço 1020

Seguindo-se a mesma metodologia e os mesmos princípios utilizados no ensaio de resistividade elétrica do Somaloy 500, descrito acima, ensaiou-se o material aço AISI 1020, também utilizado na confecção do núcleo ferromagnético da armadura. Para este teste são ensaiados três blocos de aço AISI 1020, ou seja, Bloco 4, Bloco 5 e Bloco 6, escolhidos aleatoriamente, cujo quais são produzidos a partir do mesmo processo. As peças ensaiadas são do mesmo lote das peças utilizadas na fabricação do núcleo ferromagnético em questão. Os resultados destes ensaios são descritos abaixo.

O bloco 4 apresenta uma área de seção transversal de $0,000736m^2$ e um comprimento de $0,022m$; é submetido a dois ensaios em diferentes temperaturas, produzindo os resultados apresentados na tabela 11.

Tabela 11 Resultados relacionados à resistividade elétrica do bloco 4.

Ensaio	Temperatura (°C)	Resistência Elétrica (Ω)	Resistividade Elétrica ($\Omega.m$)	Desvio Padrão ($\Omega.m$)	Erro Percentual Máximo (%)
7	26	$5,6021 \times 10^{-6}$	$1,874 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-9}$	2,308740787
8	23	$5,6222 \times 10^{-6}$	$1,881 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-9}$	2,304296894

O bloco 5 apresenta um comprimento igual a $0,025m$ e uma área de seção transversal de $0,000736m^2$; dois ensaios em temperaturas diferentes, determinam os valores médios apresentados na tabela 12.

Tabela 12 Resultados relacionados à resistividade elétrica do bloco 5.

Ensaio	Temperatura (°C)	Resistência Elétrica (Ω)	Resistividade Elétrica ($\Omega.m$)	Desvio Padrão ($\Omega.m$)	Erro Percentual Máximo (%)
9	26	$6,2328 \times 10^{-6}$	$1,835 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-9}$	2,729093706
10	23	$6,3568 \times 10^{-6}$	$1,871 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-9}$	2,703194257

No bloco 6 foram verificados valores de $0,0008 m^2$ para a área de seção transversal e de $0,025 m$ para o comprimento; novamente, dois ensaios em temperaturas diferentes determinam os valores médios apresentados na tabela 13.

Tabela 13 Resultados relacionados à resistividade elétrica do bloco 6.

Ensaio	Temperatura (°C)	Resistência Elétrica (Ω)	Resistividade Elétrica ($\Omega.m$)	Desvio Padrão ($\Omega.m$)	Erro Percentual Máximo (%)
11	26	$5,7750 \times 10^{-6}$	$1,848 \times 10^{-7}$	$1,9 \times 10^{-9}$	2,719567108
12	23	$5,8110 \times 10^{-6}$	$1,868 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-9}$	2,698859439

Com a devida associação dos resultados extraídos, a média ponderada da resistência elétrica obtida com estes ensaios é de $0,1862 \mu\Omega.m$ com um desvio padrão médio de $0,0016 \mu\Omega.m$, com um erro percentual associado menor que 2,73 % em todos os ensaios. Este resultado de resistividade elétrica vai ao encontro de outros resultados publicados em artigos, sendo bastante próximos a este, ficando na faixa de $0,171 \mu\Omega.m$ à $0,2 \mu\Omega.m$ [65].

Como já era esperado, frente à exposição da teoria preliminar, devido às diferenças de estrutura do Aço 1020 e do Somaloy 500, este último apresenta uma resistividade elétrica maior que o primeiro, dificultando assim o estabelecimento de corrente elétrica induzida no material.

3.4.3 Determinação do Peso Específico do Somaloy 500

O peso específico do bloco de Somaloy 500 é importante para se identificar qual das curvas BH será utilizada. Partiu-se do Princípio de Arquimedes que prevê que todo corpo mergulhado num fluido, em repouso, sofre, por parte do fluido, uma força vertical para cima, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo. Com isso fez-se um esquema de ensaio de modo que a fórmula relacionando o Princípio de Arquimedes pudesse ser utilizada. Inicialmente processou-se a medição da massa do bloco de Somaloy, conforme sugere do esquema da figura 57; em seguida fez-se a medição do peso do mesmo bloco, quando mergulhado em água, conforme indica o esquema da figura 58.

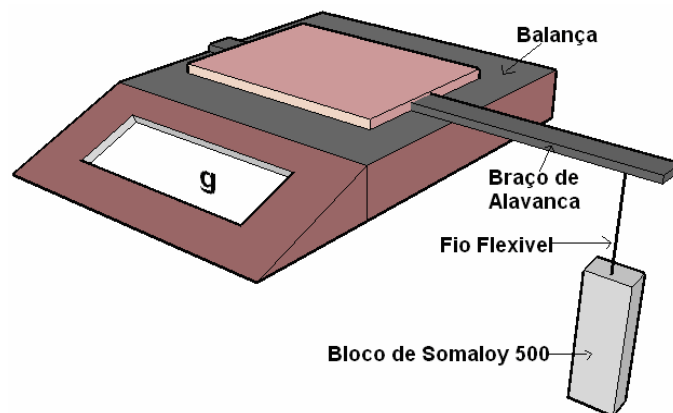


Figura 57 Esquema para determinação da massa do bloco de Somaloy 500.

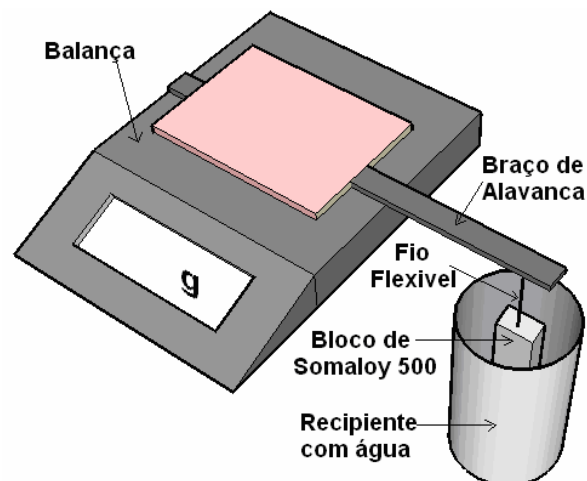


Figura 58 Esquema para determinação da massa do bloco de Somaloy 500 quando submerso em água.

Tomando o mesmo cuidado que no teste da resistividade elétrica, foram selecionados aleatoriamente 3 blocos de Somaloy 500 (Bloco 7, Bloco 8 e Bloco 9) do mesmo lote dos utilizados para o núcleo ferromagnético. Cada bloco tem o seu valor de peso na água e fora dela amostrado 20 vezes para cada uma das duas diferentes temperatura de ensaio, onde também foram respeitados as condições de repetibilidade e validação dos resultados. As massas do braço de alavanca e do fio flexível foram descontadas do valor final das medições.

A fórmula matemática que relaciona as variáveis medidas, a fim de obter-se o peso específico do Somaloy 500 ($\beta_{Somaloy}$), é dada pela equação 3.5.

$$\beta_{Somaloy} = \frac{\beta_{Água}}{1 - \frac{P_{na \quad água}}{P_{fora \quad da \quad água}}} \quad (3.5)$$

Onde $\beta_{Água}$ é o peso específico da água que é conhecida em função da temperatura, $P_{na \quad água}$ é a massa do bloco de Somaloy 500 registrada pela balança, quando introduzido em água, $P_{fora \quad da \quad água}$ é a massa do bloco de Somaloy 500, registrada pela balança fora da água. Sendo feitas estas medições, a seguir são apresentados os resultados desses ensaios.

As duas diferentes temperaturas escolhidas para os ensaios são: 20° C, onde a massa específica da água é de 1,00177 g/cm³ e 24° C com uma massa específica da água igual a 1,00268 g/cm³. Na tabela 7 estão relacionados valores médios obtidos com os ensaios realizados nesta verificação. O bloco 7 corresponde aos ensaios 13 e 14; o bloco 8 corresponde aos ensaios 15 e 16; já o bloco 9 corresponde aos ensaios 17 e 18.

Com a devida associação dos resultados extraídos, a média ponderada do peso específico obtido com este ensaio é de 7,33578161 g/cm³, com um desvio padrão médio de 0,016968171 g/cm³ e com um erro percentual associado menor que 2,29 % em todos os ensaios. Segundo o fabricante do Somaloy 500, empresa Höganäs AB [33], o peso específico para o Somaloy 500 fica na faixa de 6,65 a 7,42 g/cm³ para uma temperatura de 25° C, resultado este próximo dos obtidos com o experimento. O ensaio obedece às recomendações da American Society for Testing and Materials, respeitando as condições de repetibilidade e validação dos resultados [61][63][64].

Tabela 14 Resultados relacionados ao Peso Específico do Somaloy 500 nos ensaios de 13 a 18.

Ensaio	Temp. (°C)	$P_{na\ água}$ (g)	$P_{fora\ da\ água}$ (g)	Peso Específico (g/cm^3)	Desvio Padrão (g/cm^3)	Erro Percentual Máximo (%)
13	24	668,3	773,9	7,3488937	0,050913	2,26734528
14	20	668,6	774,4	7,3327671	0,065911	2,27125575
15	24	671,2	777,9	7,3105437	0,058933	2,28711402
16	20	672,4	778,4	7,3567602	0,052911	2,276800849
17	24	652,4	755,6	7,3419313	0,067131	2,214576221
18	20	652,5	755,9	7,3237937	0,056078	2,216247672

4 ANÁLISE DO ATUADOR PLANAR

A análise do Atuador Planar compreende a verificação de fenômenos elétricos e magnéticos envolvidos na operacionalidade do dispositivo. Esta análise objetiva estudar o comportamento estático e dinâmico, dando foco à distribuição da densidade de fluxo magnético, às forças de origem magnética produzidas e a questões acerca das correntes elétricas induzidas. Nesta última, serão apresentados equacionamentos, além da exposição de uma teoria preliminar do fenômeno. Os resultados obtidos nestas análises são oriundos de métodos numéricos computacionais.

4.1 CORRENTES ELÉTRICAS INDUZIDAS

O estudo do fenômeno de indução de corrente elétrica em meios condutores é de grande interesse na engenharia, principalmente nas questões que envolvem o eletromagnetismo, sendo considerado em muitos casos:

- Cálculo de perdas magnéticas em núcleos de transformadores e de máquinas elétricas;
- Freios eletromagnéticos;
- Efeito pelicular;
- Fornos de indução, entre outros.

Geralmente, o modelo analítico das correntes elétricas induzidas é aplicado somente para meios isotrópicos e lineares. Para os meios não lineares, com é o caso de materiais ferromagnéticos utilizados nos núcleos em máquinas elétricas, tal modelo é de difícil determinação, sendo possível apenas através de métodos numéricos como, por exemplo, o método dos elementos finitos [54] [55] [58].

A geração de correntes elétricas parasitas depende muito das frequências associadas a elas. Com frequências mais altas, as correntes parasitas são geradas perto da superfície do corpo no qual forem induzidas, enquanto que em frequências mais baixas a profundidade de penetração é maior. A formação das correntes parasitas num material, bem como a sua distribuição, depende, além da geometria, de características eletromagnéticas do material: condutividade elétrica e permeabilidade magnética. Depende ainda da não homogeneidade do material [47] [58].

O fenômeno de indução de correntes elétricas pode ocorrer de duas maneiras:

1. Se a variação de campo magnético for provocada por uma bobina excitada por corrente elétrica e esta estiver nas proximidades de um meio condutor elétrico de resistividade não infinita, haverá o aparecimento de força de repulsão entre ambos, conforme indica a figura 59; ainda, devido ao efeito Joule, haverá dissipação de energia no meio condutor, energia esta que é fornecida pela fonte de corrente elétrica que alimentou a bobina, caracterizando perdas [54][57]. O efeito da densidade de corrente elétrica induzida, \vec{J}_{ind} , no material condutor tende a se opor à variação da indução magnética que a induziu [51].

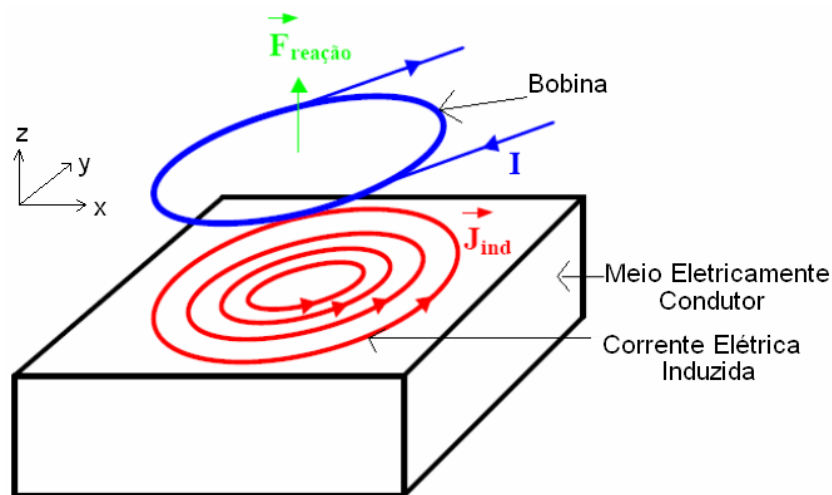


Figura 59 Bobina induzindo corrente elétrica em um meio condutor [54].

2. Quando um condutor elétrico é submetido à variação de fluxo magnético, provocado pela movimentação de um ímã permanente, por exemplo, ocorrerá a indução de correntes elétricas no meio condutor que se opõem à variação que as induziu, de acordo com a Lei de Faraday-Lenz; a interação entre o campo magnético indutor e a corrente elétrica induzida oriunda deste campo provoca o aparecimento de uma força eletromagnética de repulsão entre os dois [54], conforme pode ser visto na figura 60; com a resistividade não nula do meio condutor, haverá a uma dissipação de potência neste devido às perdas for efeito Joule [54].

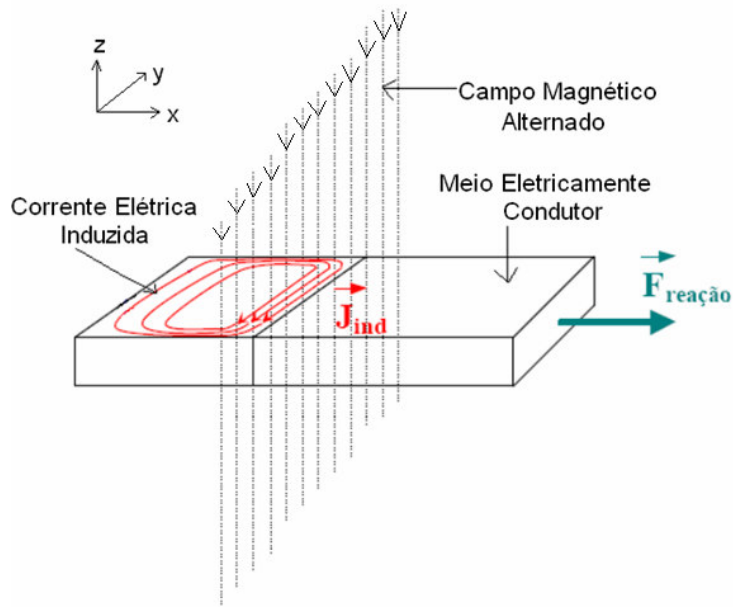


Figura 60 Meio condutor elétrico sendo movimentado em direção a uma região com densidade de fluxo magnético B [54].

Na segunda maneira descrita para a indução de corrente elétrica, a variação do campo magnético pode estar associada ao deslocamento de um bloco, contendo ímãs permanentes responsáveis pela geração de um campo magnético. Nesta situação a indução de corrente elétrica acontece quando o ímã permanente é deslocado próximo em relação à placa, criando vários anéis de corrente induzida [52], conforme é mostrado na figura 61. Esta corrente se opõe à variação do fluxo magnético que a induziu, e a magnitude das grandezas dependerá das características gerais, como por exemplo, condutividade da placa e velocidade relativa de translação.

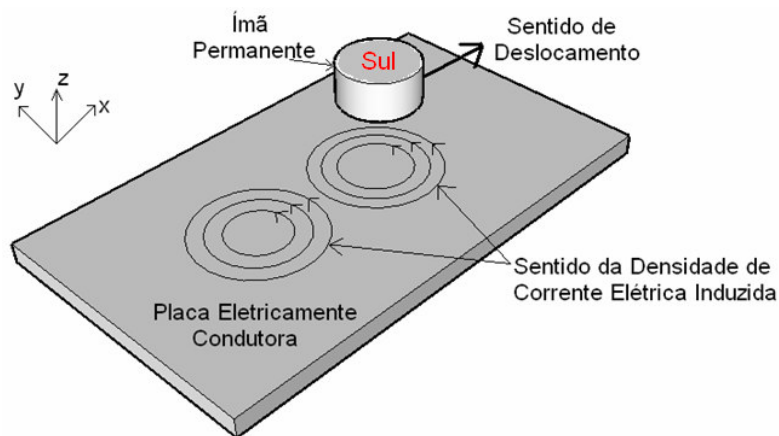


Figura 61 Ímã permanente sendo deslocado paralelamente a uma placa condutora [52].

4.1.1 Efeitos das Correntes Elétricas Induzidas

As correntes induzidas podem apresentar efeitos desejáveis ou indesejáveis em dispositivos eletromagnéticos, dependendo do ponto de vista ou do propósito que se tenha. Se, por exemplo, deseja-se aquecer um material condutor, essas correntes são bastante úteis; é o chamado aquecimento por indução usado em processos industriais como forma de se fazer tratamento térmico ou mesmo fundição. Já em máquinas de indução, as correntes induzidas são responsáveis pelo princípio de funcionamento do dispositivo seja para a produção de torque eletromecânico, seja na geração de energia elétrica.

Contudo, para transformadores, onde o objetivo principal é a transferência de energia, o efeito de aquecimento provocado pelas correntes elétricas induzidas é indesejável e afeta o desempenho do dispositivo, gerando perdas e baixando o rendimento. Em máquinas elétricas em geral, o efeito das correntes induzidas nos núcleos ferromagnéticos é igualmente prejudicial ao funcionamento dos dispositivos [9] [52].

As correntes induzidas podem circular pela superfície do material, sendo limitadas apenas pela resistência elétrica do meio condutor. Portanto, o quadrado da intensidade das correntes induzidas multiplicado pelo valor da resistência do caminho estabelecido por elas produz calor devido ao efeito Joule [51].

Certamente, em dispositivos magnéticos que não sejam aproveitados as correntes induzidas, há alternativas de manufatura de núcleos ferromagnéticos que possibilitam a redução ou minimização dessas correntes. Dentre os métodos mais utilizados destaca-se a laminação de núcleos ferromagnéticos: lâminas de material ferromagnético são colocadas umas sobre as outras e intercaladas com material dielétrico; isso produz uma menor seção elétrica para o estabelecimento de correntes induzidas em cada lâmina e aumenta a resistência elétrica entre lâminas, resultando em menores perdas Joule por efeito das correntes parasitas induzidas no material ferromagnético. Outra alternativa aos núcleos laminados que vem sendo usada mais recentemente é a utilização de Materiais Compósitos Magneticamente Macios [9][52].

4.1.2 Fundamentação Teórica

Para estudo de correntes elétricas induzidas é necessário que se faça uso de uma das equações de Maxwell adaptada para a análise de características no domínio quase-estático ou magnetodinâmico, equação 4.1.

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.1)$$

A equação 4.1 indica que a taxa de variação temporal da indução magnética, \vec{B} , cria um campo elétrico, \vec{E} . Esta expressão pode ser escrita na forma integral, para isso imagine-se uma superfície S onde \vec{B} e \vec{E} sejam definidos. Utilizando o Teorema de Stokes, tem-se a forma integral, equação 4.2.

$$\oint_{L(S)} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\oint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} \quad (4.2)$$

Esse campo elétrico \vec{E} , que será responsável pela produção da corrente induzida no interior do núcleo, eletricamente condutor, tem sentido oposto a $\partial \vec{B} / \partial t$, explicando assim o sentido negativo da fórmula $\text{rot } \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$. E a Lei de Lenz, simplificada, diz: “o sentido da corrente induzida é tal que o seu efeito tende a se opor à variação do fluxo que a originou” [9][47].

A variação do campo elétrico no interior de um núcleo eletricamente condutor provoca o aparecimento de corrente elétrica induzidas que podem circular no bloco. Assim sendo, essas correntes estão diretamente ligadas ao efeito Joule. Elas podem ser bastante expressivas, se a resistência elétrica do material for pequena, e com isso podem ocasionar, além de perdas elétricas, fusão parcial ou total do material dependendo a intensidade do campo magnético aplicado [47][52].

4.1.2.1 Equacionamento para Campos Variáveis Penetrando em Meios Condutores

A penetração de campos magnéticos em meios condutores é vista como um problema complexo no que diz respeito ao seu equacionamento e determinação teórica. A seguir serão apresentados equacionamentos relacionados à geração de campo elétrico,

a partir da variação temporal da indução magnética e ainda um equacionamento da densidade de corrente elétrica induzida a partir da geração deste campo [47].

4.1.2.1.1 Equação para o Campo Elétrico

Partindo-se da equação 4.1, aplicando-se o rotacional em ambos os lados tem-se a equação (4.3).

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

Admitindo-se que o vetor campo elétrico \vec{E} é o produto entre a resistividade ρ e o vetor densidade de corrente elétrica \vec{J} , na forma de $\vec{E} = \rho \vec{J}$; o divergente de \vec{J} é igual a zero, então o divergente de \vec{E} também é zero, nessas condições, podendo-se escrever a equação 4.4 [67].

$$\text{div} \vec{E} = 0 \quad (4.4)$$

Considerando que o Laplaciano Vetorial Δ , pode ser escrito com equação 4.5,

$$\Delta \vec{A} = \text{grad} \text{div} \vec{A} - \text{rot} \text{rot} \vec{A} \quad (4.5)$$

onde, neste caso, \vec{A} é um vetor qualquer, a equação 4.5 pode ser escrita com:

$$\text{rot} \text{rot} \vec{E} = \text{grad} \text{div} \vec{E} - \Delta \vec{E} \quad (4.6)$$

Assim, a partir da equação 4.4, pode-se reescrever a equação 4.6, tornando-a:

$$\text{rot} \text{rot} \vec{E} = -\Delta \vec{E} \quad (4.7)$$

Quanto ao lado direito da equação 4.3 pode-se deduzir as seguintes expressões:

$$-\text{rot} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \text{rot} \vec{B} = -\frac{\partial}{\partial t} \mu \text{rot} \vec{H} \quad (4.8)$$

Considerando-se que a permeabilidade do material, μ , é constante, a equação 4.8 pode ser escrita como:

$$-\text{rot} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu \frac{\partial}{\partial t} \text{rot} \vec{H} = \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4.9)$$

onde σ é a condutividade elétrica do material. Substituindo-se equação 4.7 e equação 4.9 em equação 4.3 [67], tem-se que:

$$\Delta \vec{E} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4.10)$$

4.1.2.1.2 Equação para a Densidade de Corrente Elétrica

A indução da densidade de corrente elétrica em meios condutores pode ocorrer através da variação de campo magnético nas proximidades do meio. Essa variação pode ser estabelecida a partir de um dispositivo fixo, emissor de fluxo variável ou provocada pela movimentação de uma placa contendo ímãs permanentes [67]. No primeiro caso, a equação da densidade de corrente elétrica, J , também pode ser escrita a partir da equação 4.1, substituindo-se \vec{E} por \vec{J}/σ na equação 4.10, onde se tem então:

$$\text{rot} \left(\frac{\vec{J}}{\sigma} \right) = \mu\sigma \frac{\partial \left(\frac{\vec{J}}{\sigma} \right)}{\partial t} \quad (4.11)$$

Considerando-se que a condutividade σ do material é constante, a equação 4.11 pode ser escrita como:

$$\frac{1}{\sigma} \text{rot}(\vec{J}) = \mu\sigma \frac{1}{\sigma} \frac{\partial(\vec{J})}{\partial t} \quad (4.12)$$

Logo, fazendo-se as simplificações tem-se que:

$$\text{rot}(\vec{J}) = \mu\sigma \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} \quad (4.13)$$

Nesse segundo caso, quando uma placa contendo ímãs permanentes é deslocada nas proximidades de um bloco feito a partir de material condutor, nele serão induzidas correntes elétricas. A densidade de corrente elétrica induzida está associada diretamente à velocidade de movimentação da placa e à indução magnética estabelecida. Segundo Melcher [67], este equacionamento é possível acrescentando um termo na equação 4.1 que relaciona a velocidade do bloco, sendo assim, a equação pode ser escrita nos seguintes termos:

$$\text{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \text{rot} (\vec{v} \times \vec{B}_{\text{int}}) \quad (4.14)$$

No lado direito da equação 4.14, o primeiro termo, como visto, está relacionado com a produção de campo elétrico a partir da variação temporal da densidade de fluxo

magnético, \vec{B} , provocada, por exemplo, pela excitação alternada na fonte produtora desse fluxo. Já o segundo termo está relacionado com a produção de campo elétrico a partir da produção de indução magnética, \vec{B}_{int} , oriunda do deslocamento, com velocidade \vec{v} , de uma placa contendo uma fonte constante de campo magnético, por exemplo, ímã permanente. Assim, sabendo-se que $\vec{E} = \vec{J}/\sigma$, onde σ é a condutividade do meio, a equação 4.14 pode ser escrita como:

$$\text{rot } \frac{\vec{J}}{\sigma} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \text{rot } (\vec{v} \times \vec{B}_{\text{int}}) \quad (4.15)$$

Considerando-se, ainda, que a condutividade do material é constante e admitindo-se que $-\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = +\text{rot } \vec{E}$, a equação 4.15 pode ser escrita como:

$$\frac{1}{\sigma} \text{rot } \vec{J} = \text{rot } \vec{E} + \text{rot } (\vec{v} \times \vec{B}_{\text{int}}) \quad (4.16)$$

Arranjando-se a equação 4.16 tem-se como resultado final a equação 4.19.

$$\vec{J} = \sigma (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}_{\text{int}}) \quad (4.17)$$

4.1.3 Efeito Pelicular

Como visto, as correntes elétricas induzidas formam laços fechados que circulam nos planos metálicos perpendiculares ao fluxo magnético. A concentração dessas correntes elétricas perto da superfície metálica vai diminuindo à medida que o campo magnético entra no metal condutor. Esta diminuição é dada de forma exponencial com a profundidade. O fenômeno é conhecido como efeito pelicular também chamado de efeito *skin*.

A profundidade que as correntes induzidas penetram em um material são afetadas pela frequência da excitação, a condutividade elétrica e a permeabilidade magnética do material. Ela diminui quando a frequência cresce, quando a permeabilidade magnética aumenta e quando a condutividade elétrica se eleva. A expressão que calcula a profundidade de penetração a que as correntes induzidas podem chegar em um material condutor é dada pela equação 4.18

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (4.18)$$

onde δ é a profundidade de penetração máxima da corrente elétrica induzida, f é a frequência da corrente induzida, μ é a permeabilidade magnética do meio condutor e σ é a condutividade elétrica do meio condutor [47].

4.1.3.1 Comparação entre o Aço 1020 e o Somaloy 500

Quando um condutor elétrico é percorrido por uma corrente elétrica constante, esta se distribui uniformemente na seção transversal. O mesmo não ocorre quando a corrente é variável no tempo, por exemplo, no caso de uma corrente alternada senoidal. Este fenômeno recebe o nome de efeito pelicular. No efeito pelicular, δ é função da condutividade σ , da permeabilidade magnética μ do condutor e da frequência angular ω , relacionados na equação 4.19 [67].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}} \quad (4.19)$$

Onde, para o caso do atuador planar em estudo, ω é a pulsação associada à corrente induzida e é função da variação do fluxo magnético quer pelo efeito da velocidade, quer pela variação da corrente nos enrolamentos planares da armadura. Eventualmente, ω será também a pulsação da harmônica fundamental, quando o efeito é analisado através de uma série de Fourier. Sendo assim, é possível comparar o comportamento do efeito pelicular nos dois materiais utilizados como núcleos ferromagnéticos, relacionando-os através das fórmulas (4.20) e (4.21) considerando os coeficientes particulares de cada material:

$$\delta_{Aço} = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma_{Aço} \mu_{Aço}}} \quad (4.20)$$

$$\delta_{Somaloy} = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma_{Somaloy} \mu_{Somaloy}}} \quad (4.21)$$

Pode-se considerar ω igual nos dois casos, pois ambos serão analisados comparativamente com a mesma velocidade de translação do campo magnético, ou seja, com a mesma harmônica fundamental. Dividindo-se (4.20) por (4.21), tem-se que:

$$\frac{\delta_{Somaloy}}{\delta_{Aço}} = \frac{\sqrt{\frac{2}{\omega\sigma_{Somaloy}\mu_{Somaloy}}}}{\sqrt{\frac{2}{\omega\sigma_{Aço}\mu_{Aço}}}} = \frac{\sqrt{\sigma_{Aço}\mu_{Aço}}}{\sqrt{\sigma_{Somaloy}\mu_{Somaloy}}} = \sqrt{\frac{\sigma_{Aço}\mu_{Aço}}{\sigma_{Somaloy}\mu_{Somaloy}}} \quad (4.22)$$

$$\frac{\delta_{Somaloy}}{\delta_{Aço}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{Aço}}{\sigma_{Somaloy}}\right)\left(\frac{\mu_{Aço}}{\mu_{Somaloy}}\right)} \quad (4.23)$$

4.2 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

O MEF é um método que permite avaliar, de forma numérica, a solução de problemas contínuos governados por equações diferenciais parciais. Também bastante usado na análise e projeto de dispositivos eletromagnéticos, o Método dos Elementos Finitos disponibiliza a montagem e simulação de um modelo virtual, considerando as propriedades físicas reais do modelo, tais como a linearidade ou não da permeabilidade magnética relativa, as condições de fronteira, a magnetização de peças geradoras de campo magnético, condutividade térmica e elétrica, velocidade, entre outras.

O método prevê a divisão do domínio de análise em subdomínios. Esses pequenos subdomínios são conhecidos como elementos finitos. Podem ser bi ou tridimensionais. Em problemas 3D, eles podem assumir formas como podem ser vistas na figura 62. A junção de todos os elementos finitos formam o domínio ou malha, mostrada na figura 63, onde o problema é modelado e definido nas suas divisões seja por propriedades de material ou por discretização.

Os elementos finitos podem ser de diferentes tamanhos, ou formas, assim como disposta com mais densidade nas regiões de maior interesse, onde se deseja uma solução mais detalhada e precisa. É através desta estrutura de dados, ou seja, nós, elementos e malha, que se é possível avaliar aproximadamente as grandezas de interesse nos fenômenos analisados [10].

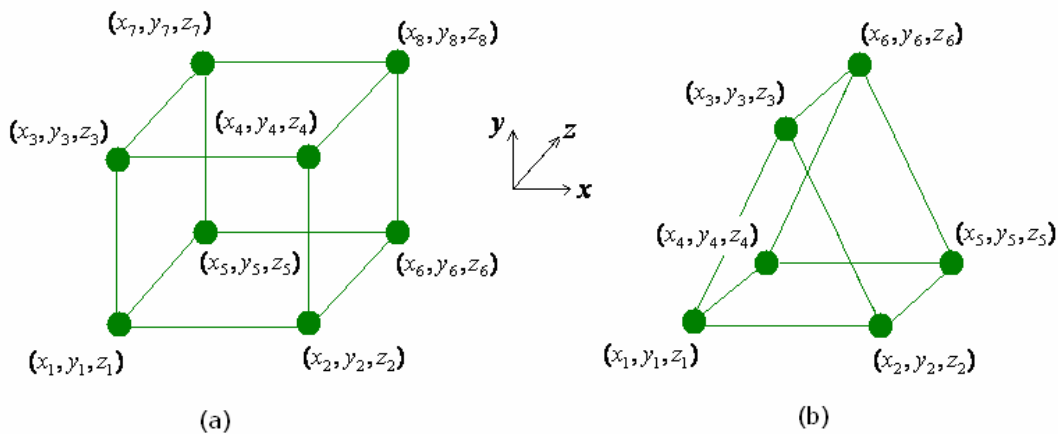


Figura 62 Elemento finito tridimensional: (a) forma quadrada e (b) forma triangular.

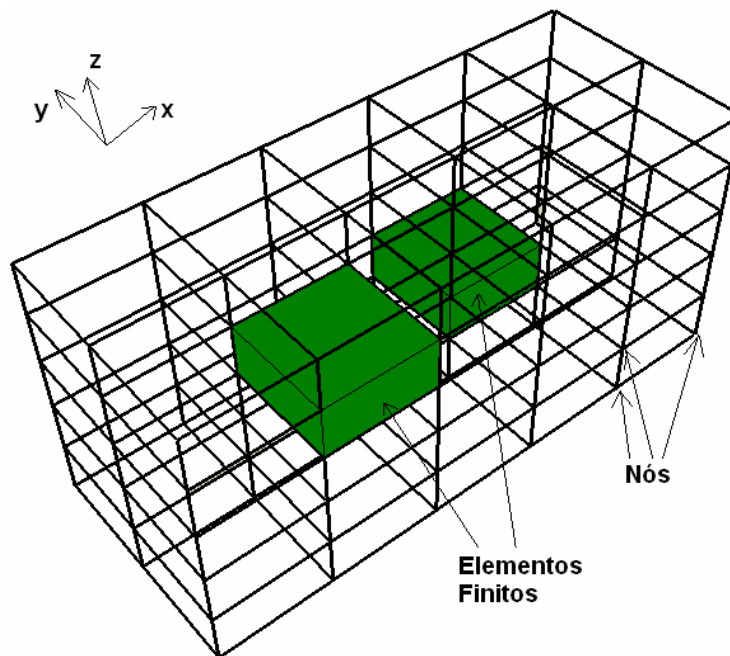


Figura 63 Malha de elementos finitos para a formação do domínio a ser analisado.

4.2.1 O Pacote Computacional MEGA

O programa computacional utilizado na análise numérica eletromagnética do atuador planar em estudo trata-se do pacote computacional MEGA 3D, versão 6.29, desenvolvido pelo Applied Electromagnetic Research Centre, da Universidade de Bath, Inglaterra. O MEGA consiste em dois programas: o MEGAVIEW e o MEGASOLVE. O MEGAVIEW engloba as etapas de pré e o pós-processamento. É na etapa de pré-

processamento que é definido o tipo de problema e que serão gerados os nós e elementos que formarão a malha. A malha é gerada pela junção de todos os elementos finitos, que por sua vez são definidos pelos nós. Também são definidas as condições de contorno do problema e físicas do material bem como suas dimensões. Já na etapa de pós-processamento, são analisados os resultados gerados pelo MEGASOLVE através de ferramentas gráficas e de cálculo.

O MEGASOLVE trata da solução numérica. É utilizado para gerar soluções para o modelo. Uma vez que o problema foi ajustado com o uso do MEGAVIEW, o MEGASOLVE resolve o problema iterativamente. É nesta etapa de solução que serão geradas e resolvidas numericamente as equações diferenciais da modelagem do dispositivo eletromagnético de acordo com os dados de entrada fornecidos na etapa de pré-processamento.

No pacote computacional MEGA 3D, uma malha tridimensional é criada pela extrusão de uma malha bidimensional. Assim, o primeiro passo para uma simulação tridimensional é a montagem virtual de um malha do plano 2D. São definidas regiões sobre esta malha. Essas regiões podem ocupar diferentes níveis quando da extrusão, formando assim o dispositivo tridimensional. As regiões são editadas, através de comandos, para fornecer ao programa computacional as características peculiares de cada uma.

Podem ser também introduzidos elementos de bobinas ao modelo, contudo isso não se dá da mesma forma que para os demais elementos. Para inserção de bobinas é necessário que estas sejam editadas separadamente. Esta edição contempla valores de comprimento, largura, altura, condutividade, posição tridimensional e número de espiras. A corrente ou tensão elétrica introduzida como alimentação em cada bobina é editada à parte, através de comandos que dão entrada a valores de definição da grandeza.

Por fim, as condições de fronteira devem ser definidas. Novamente, através de edição, são informadas ao software as condições de contorno de grandezas básicas, por exemplo, os potenciais magnéticos escalares e vetoriais associados à solução, que se apresentam nas regiões limites de simulação do modelo. Feito isso, o modelo é submetido à etapa de solução, passando após para a etapa de pós-processamento.

O MEGA, enquanto *software* de simulação de dispositivos eletromagnéticos, faz uso das Equações de Maxwell para o desenvolvimento e solução das equações diferenciais geradas. Estas equações são usadas em modelos de baixa frequência. O

MEGA pode solucionar problemas em regime estático e dinâmico, com alimentação elétrica alternada ou constante. Pode ainda solucionar e modelar problemas lineares ou não lineares. Para o primeiro caso, todos os materiais envolvidos na simulação devem ter a permeabilidade magnética relativa constante, isto é, apresentar a curva de magnetização constante. Para o segundo caso, onde a não linearidade é considerada, os materiais considerados no modelo de simulação devem ter a sua curva de magnetização não linear já definido no pré-processamento.

4.2.2 Modelo Numérico do Atuador Planar

A distribuição do fluxo magnético gerado pelos ímãs permanentes no atuador planar ocorre no volume, não se tendo simetrias que permitissem uma análise bidimensional. Sendo assim, é necessário que seja feita uma análise em 3D.

A malha básica ou plano básico do atuador planar em estudo foi gerada a partir de elementos 2D triangulares e retangulares. A culatra e os materiais dos núcleos ferromagnéticos foram definidos como regiões não lineares e adotadas as curvas de magnetização apresentadas nas seções anteriores dessa dissertação. A culatra é manufaturada de material aço AISI 1020, e a curva BH deste material que define o comportamento da magnetização deve ser considerada pelo método numérico. O núcleo ferromagnético ou armadura é simulado para dois casos. No primeiro o material considerado é o aço AISI 1020, adotando-se uma resistividade elétrica de $0,1862\mu\Omega.m$, e para o segundo caso é considerado o material Somaloy 500, com resistividade elétrica igual a $47,03823\mu\Omega.m$. Estes valores de resistividade elétrica são oriundos dos ensaios de caracterização dos materiais apresentados nesse trabalho.

Os ímãs permanentes são considerados idênticos, e para análise numérica é fornecido o valor da permeabilidade magnética relativa $1,09H/m$ e do fluxo remanente $B_r = 1,22T$. A densidade de fluxo remanente foi definida tendo apenas a componente normal z . Na figura 64 é apresentado o detalhe da uma vista em corte da malha, considerando as regiões do núcleo ferromagnético, ímãs permanentes, bobina, culatra e entreferro. A malha total, numa perspectiva tridimensional, possui um total de 189.895 nós e 188.632 elementos dispostos em 39 níveis.

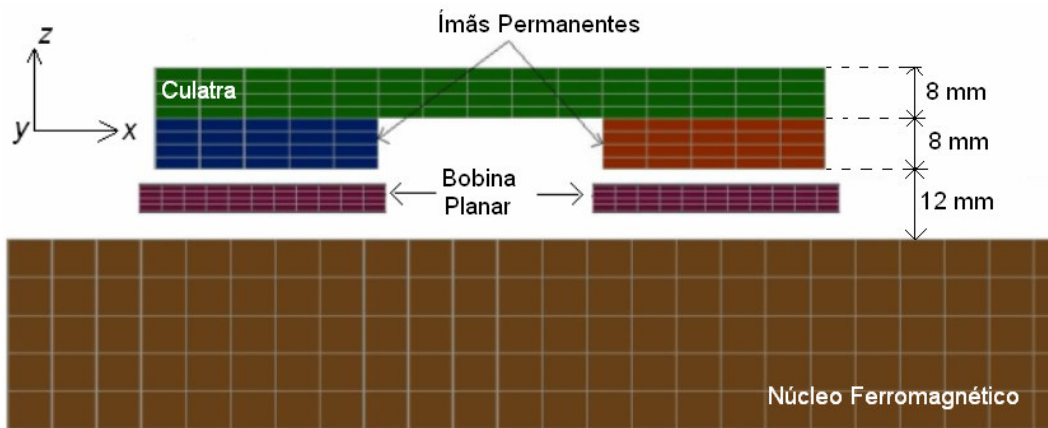


Figura 64 Detalhe da vista bidimensional e frontal do modelo virtual.

A figura 65 mostra malha em 3D do atuador planar com bobinas planificadas. Pela figura, pode ser verificado que os elementos apresentam maior discretização na região próxima à fonte de campo magnético.

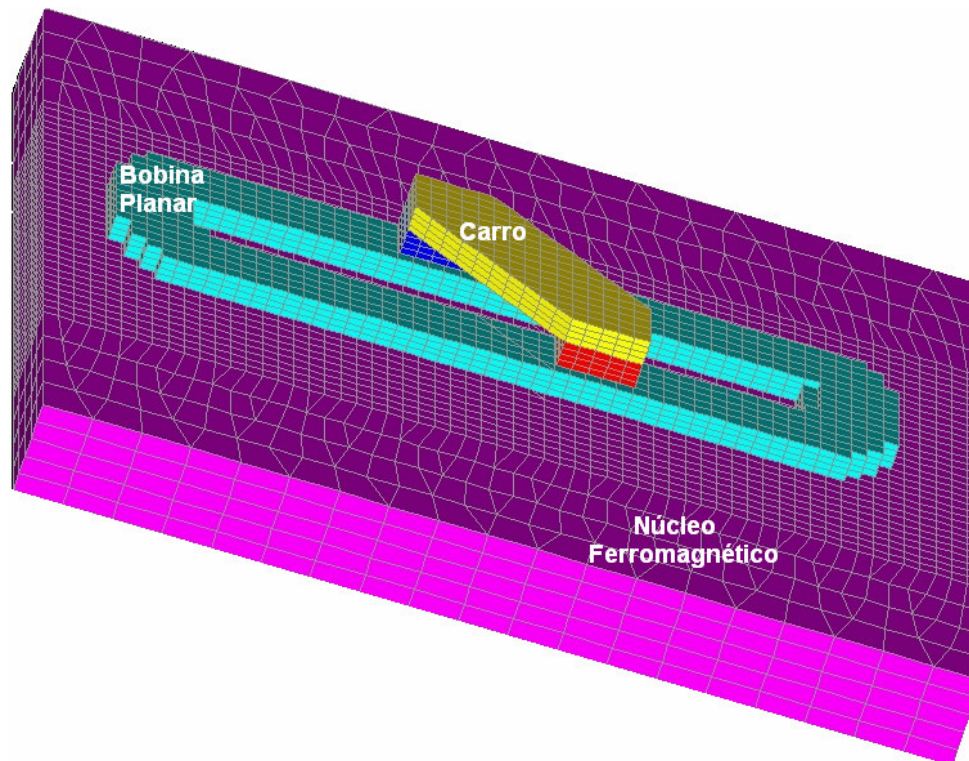


Figura 65 Malha 3D do modelo virtual do Atuador Planar.

O modelo tridimensional é representado apenas com uma bobina do enrolamento x , e está localizada em alinhamento sob os ímãs permanentes. Esta bobina é editada com

características equivalentes as do modelo físico real, como, por exemplo, área ocupada, número de espiras e corrente elétrica aplicada.

4.3 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Foram realizadas várias simulações numéricas no modelo virtual estudado. Estas simulações estão divididas em duas etapas: estática e dinâmica. O objetivo é prever e analisar o comportamento do atuador planar em estudo para os dois casos de configuração que são propostos para o núcleo ferromagnético da armadura estática. Ainda, através destas simulações numéricas computacionais, será possível validar, de forma direta ou indireta, os resultados obtidos em análises experimentais.

4.3.1 Simulação Numérica Estática

Com foco principal na região que engloba o carro, o entreferro e a armadura, um dos objetivos da análise numérica estática é prever o comportamento da distribuição de fluxo magnético no atuador planar. Além disso, os efeitos da força planar de propulsão e força normal que atuam sobre o carro, quando na bobina planificada é aplicada uma corrente elétrica constante que varia de zero a cinco Ampères, também são investigados.

No *software* utilizado, o valor do vetor densidade de fluxo magnético é apresentado pontualmente em suas componentes B_x, B_y, B_z , ou através do módulo calculado por $B_{\text{mod}} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$. Os valores de força podem ser calculados através de duas diferentes formas: 1) Tensor de Força de Maxwell e 2) Força de Lorentz. Nas simulações envolvidas neste trabalho, será utilizada a primeira opção devido às características de forças envolvidas no modelo do atuador em estudo.

Para que seja usado o Tensor de Maxwell no cálculo de força, algumas características de simulação devem estar presentes. Elas são:

1. A superfície que envolve o campo magnético deve estar em uma região de $\mu = \mu_0$, podendo ser o ar ou material de permeabilidade magnética relativa semelhante;
2. A força \vec{F} deve ser calculada numa superfície ou contorno; a fórmula aplicada para tanto é

$$\vec{F} = \frac{1}{\mu_s} \oint \vec{T} dA \quad (4.24)$$

sendo dA um elemento diferencial da superfície S que envolve o corpo sobre o qual atuam as forças, \vec{T} é o Tensor de Força de Maxwell.

4.3.1.1 Simulação da Densidade de Fluxo Magnético

Como visto no terceiro capítulo desta dissertação, o Somaloy 500 possui uma permeabilidade magnética inferior a do Aço 1020, fato este que pode limitar a aplicação do Somaloy 500 em núcleos ferromagnéticos. No entanto, em configurações com grande entreferro, como no caso, a relutância do entreferro é dominante frente à do material ferromagnético. Desta forma, a densidade de fluxo no entreferro depende mesmo é deste último e nem tanto da permeabilidade do material ferromagnético.

Através de simulações numéricas verificou-se o comportamento do módulo da densidade de fluxo magnético no atuador planar. Considerou-se que, inicialmente, não havia regiões condutoras de corrente elétrica, passando a existirem na avaliação subsequente, para os dois casos de materiais ferromagnético do núcleo da armadura.

No protótipo virtual montado para esta simulação os ímãs permanentes são idênticos e com faces polares quadradas de lado 25,4 mm e com espessura de 8 mm. O núcleo ferromagnético também é um quadrado de lado igual a 300 mm e espessura de 30 mm, de propriedades magnéticas não lineares definidas pelas suas curvas de magnetização. A culatra, com uma altura de 8 mm, feita de aço 1020, une os ímãs permanentes que estão montados com magnetização em antiparalelo. O entreferro, região de ar entre o núcleo ferromagnético e o carro, tem um comprimento, no eixo z , de 12 mm entre o plano da face polar dos ímãs permanentes junto ao entreferro e à superfície superior do núcleo.

Na figura 66 é mostrada a distribuição da densidade fluxo magnético do atuador planar quando o núcleo ferromagnético é composto de Aço 1020. Na figura 66(a) é apresentado um esquemático de localização a fim de situar onde é feito o corte C – C' para a verificação da distribuição da densidade de fluxo magnético. Já na figura 66(b) é apresentado um mapa em 2D do módulo da densidade de fluxo magnético visualizado a

partir do corte C – C’; ainda na figura 66(c) é apresentado o mapa dos vetores de densidade de fluxo magnético para o mesmo corte C – C’.

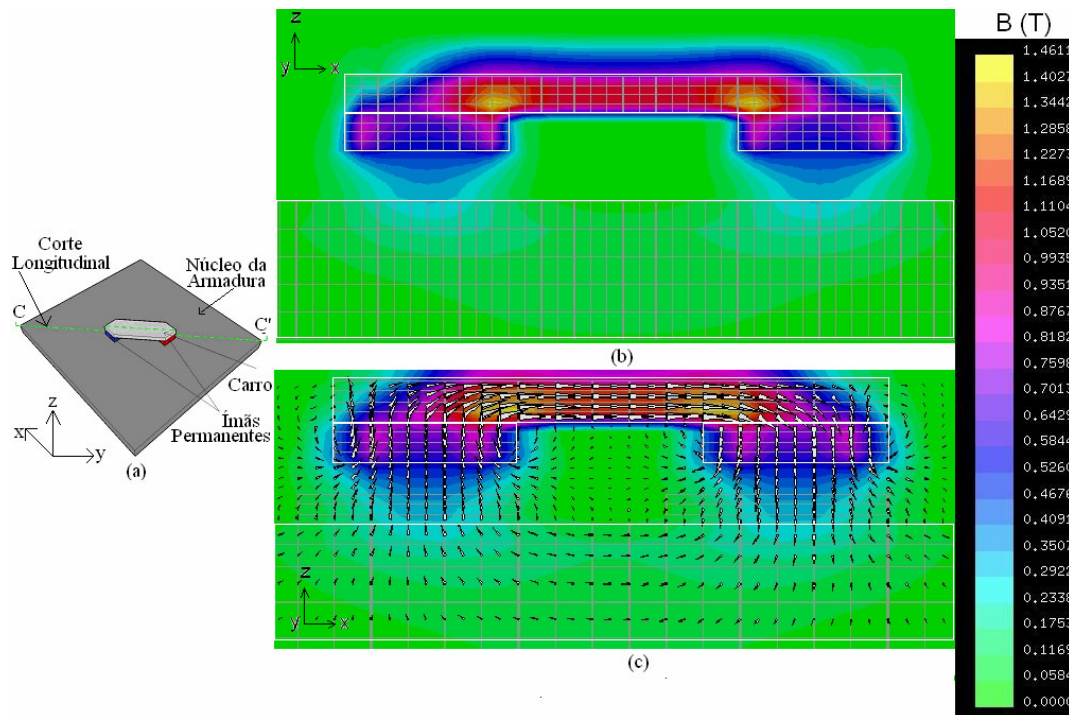


Figura 66 Mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético quando não existem regiões condutoras de corrente elétrica no modelo e a armadura é de manufaturada com aço AISI 1020: (a) vista superior com a localização do corte CC’; (b) detalhe do mapeamento 2D da densidade de fluxo magnético no modelo; (c) mapa 2D do caminho do fluxo magnético representado através de vetores de B.

Seguindo esta análise, o gráfico da figura 67 está relacionado com os cortes C – C’ e mostram o valor puntual do vetor densidade de fluxo magnético a 0,5 mm da face polar dos ímãs permanentes e no entreferro, com corrente elétrica nula nos enrolamentos planares. Neste gráfico é possível perceber ainda que o módulo do vetor fluxo magnético é maior nas extremidades do ímã permanente e vai diminuindo à medida que se aproxima do centro, este fenômeno já é conhecido e também esperado e verificado para este caso.

A distribuição do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro, ou seja, a 6mm da face polar dos ímãs permanentes na direção z, também é investigada em toda a extensão transversal compreendida abaixo do carro. Esta distribuição pode ser visualizada no gráfico da figura 68. Estas análises são bastante

importantes para que possam comparar os valores de vetor densidade de fluxo magnético quando os núcleos da armadura são alterados.

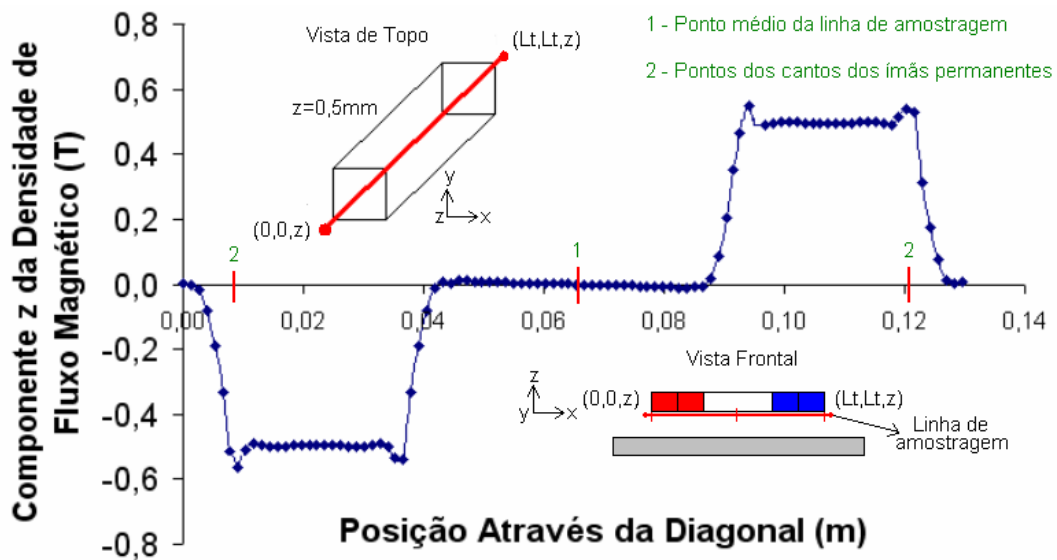


Figura 67 Valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético sobre a linha vermelha como indicada, quando o núcleo ferromagnético é composto de **Aço 1020**, sem regiões condutoras de corrente elétrica.

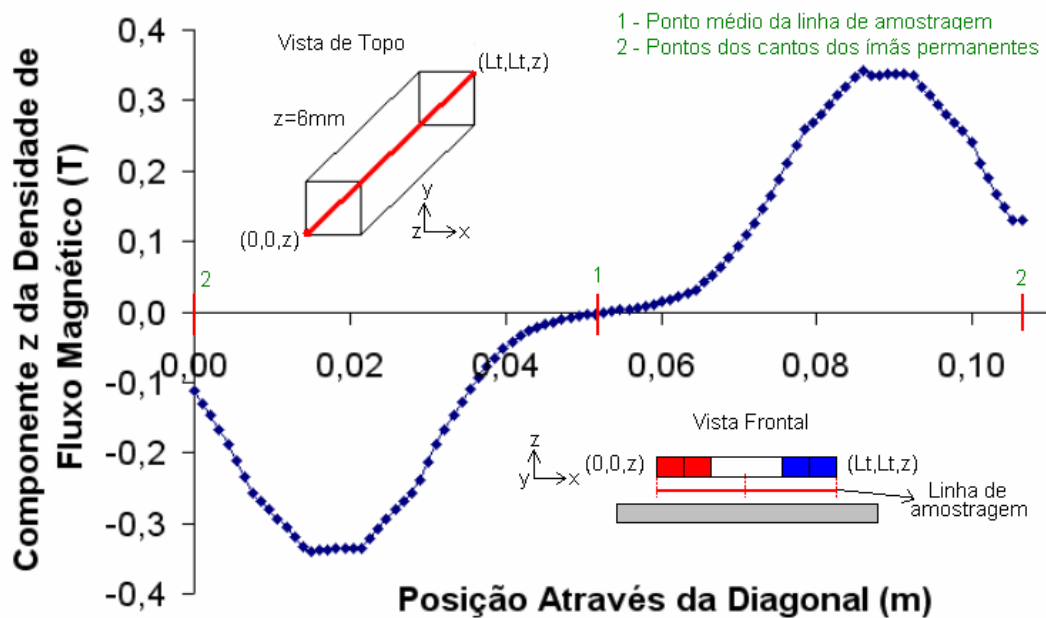


Figura 68 Gráfico de valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro, quando o núcleo ferromagnético é composto de **aço AISI 1020** e não há regiões condutoras de corrente elétrica.

Na segunda etapa dessa análise numérica estática, o núcleo da armadura é substituído por um feito de Somaloy 500. Respeitando as mesmas características estruturais do caso anterior, apenas diferindo quanto ao material utilizado na armadura, são feitas simulações numéricas do mesmo tipo das anteriores.

Na figura 69 é mostrada a distribuição da densidade de fluxo magnético do atuador planar quando o núcleo ferromagnético é composto de Somaloy 500. Na figura 69(a) é apresentado um esquemático de localização a fim de situar onde é feito o corte C – C’ para a verificação da distribuição do fluxo magnético. Já na figura 69(b) é apresentado um mapa em 2D do módulo da densidade de fluxo magnético visualizado a partir do corte C – C’, ainda na figura 69(c) é apresentado o mapa dos vetores de densidade de fluxo magnético para o mesmo corte C – C’.

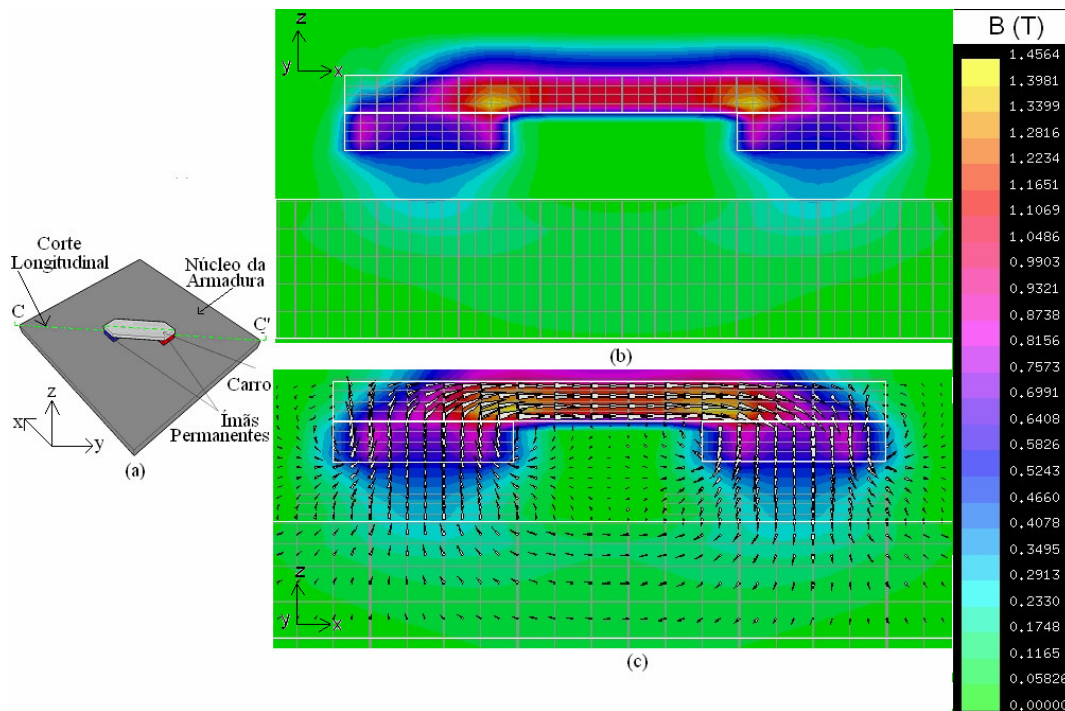


Figura 69 Mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético quando não existem regiões condutoras de corrente elétrica no modelo e a armadura é de manufaturada com Somaloy 500: (a) vista superior com a localização do corte CC’; (b) detalhe do mapeamento 2D do fluxo magnético no modelo; (c) mapa 2D do caminho do fluxo magnético representado através de vetores.

O gráfico da figura 70 está relacionado com os cortes C – C’ e mostra o valor puntual do vetor densidade de fluxo magnético a 0,5 mm da face dos ímãs permanentes.

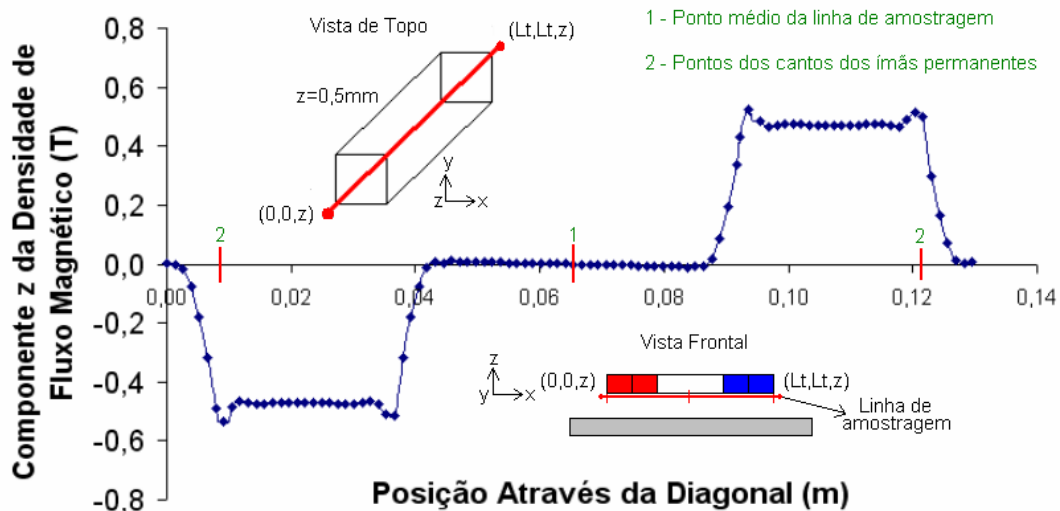


Figura 70 Gráfico de valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na extremidade transversal dos ímãs permanentes, quando o núcleo ferromagnético é composto de Somaloy 500.

A mesma análise feita anteriormente para o gráfico similar confirma-se neste da figura 70, onde o vetor fluxo magnético é maior nas extremidades do que na região central. Também para o caso do Somaloy 500 é investigada a distribuição do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro, na mesma região transversal sob o carro, o resultado obtido é apresentado no gráfico da figura 71.

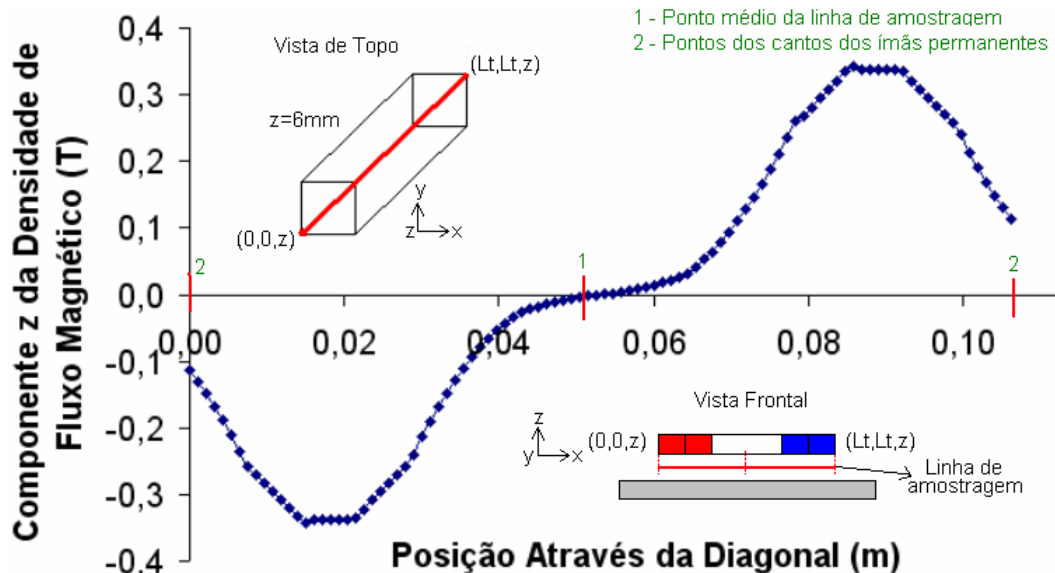


Figura 71 Gráfico de valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro, quando o núcleo ferromagnético é composto de Somaloy 500.

A diferença do valor do módulo do fluxo magnético, devido ao grande entreferro para os núcleos de aço AISI 1020 e Somaloy 500, é bastante pequena, chegando a um máximo de 1,5933% como resultado das simulações feitas. Para que isso fique ainda mais claro, são apresentados nas figuras 72 e 73 gráficos relacionando valores de módulo das diferenças da densidade de fluxo magnético para os dois materiais utilizados como núcleo ferromagnético em duas diferentes posições z do entreferro, fazendo-se o valor pontual de B do aço menos o valor pontual do B do Somaloy.

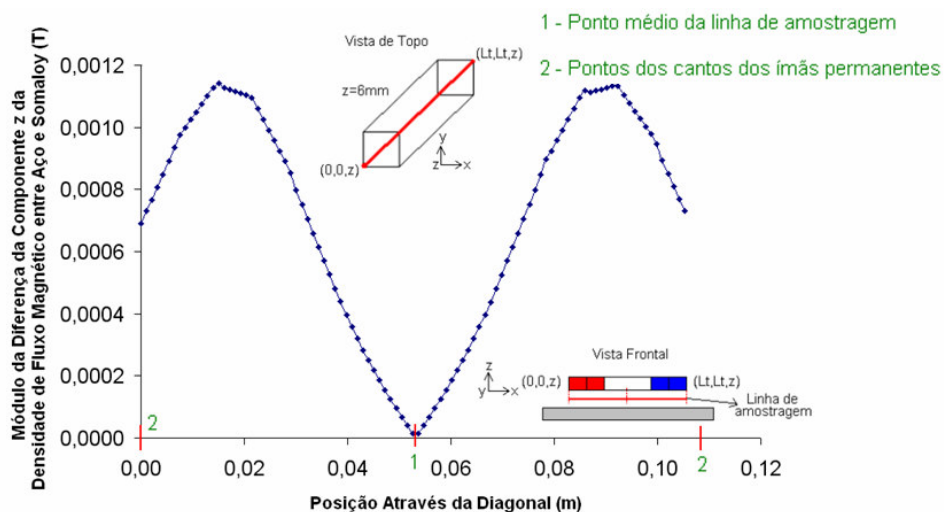


Figura 72 Gráfico do módulo da diferença do valor da densidade de fluxo magnético pontual da componente z , na extremidade transversal dos ímãs permanentes, considerando-se B com núcleo de aço AISI 1020 menos B com núcleo de Somaloy 500.

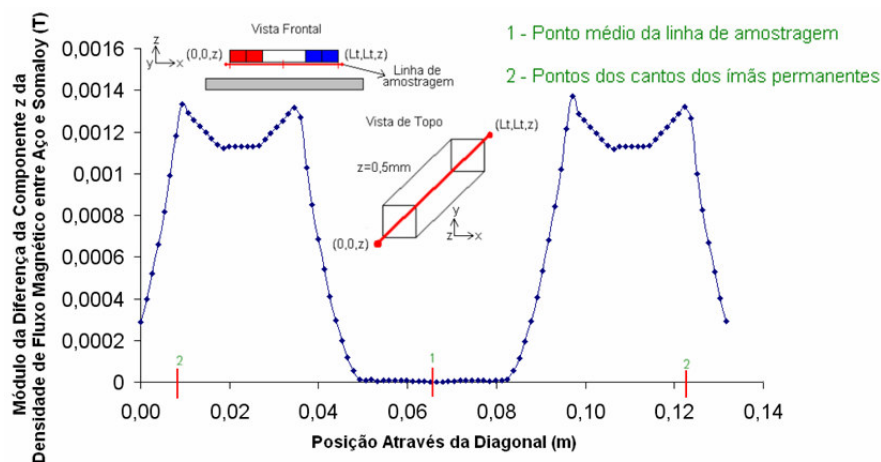


Figura 73 Gráfico do módulo da diferença do valor da densidade de fluxo magnético pontual da componente z , na região central do entreferro, considerando-se B com núcleo de aço AISI 1020 menos B com núcleo de Somaloy 500.

Os resultados apresentados nas figuras 72 e 73 são indicativos importantes que poderão confirmar que a troca de material no núcleo ferromagnético da armadura não é fator relevante para alterar a distribuição de B no entreferro. Sendo assim, pode-se sugerir que o atuador, nessas condições, apresentará a mesma força de tração, a mesma força normal e a mesma taxa de variação de B independentemente de se usar aço 1020 ou Somaloy 500 no núcleo do estator.

Quando os enrolamentos planificados são excitados com corrente elétrica contínua, há o aparecimento do efeito de reação da armadura [10]. Para simular este fenômeno, um enrolamento da fase x , localizado em perfeito alinhamento sob os ímãs permanentes, é excitado com corrente elétrica $i = 5$ A. A figura 74 está relacionado o comportamento da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro, medida na diagonal sob o carro. O monitoramento para $i = 5$ A foi escolhido, porque representa uma situação extrema de funcionamento em termos de corrente em cada fase do enrolamento da armadura.

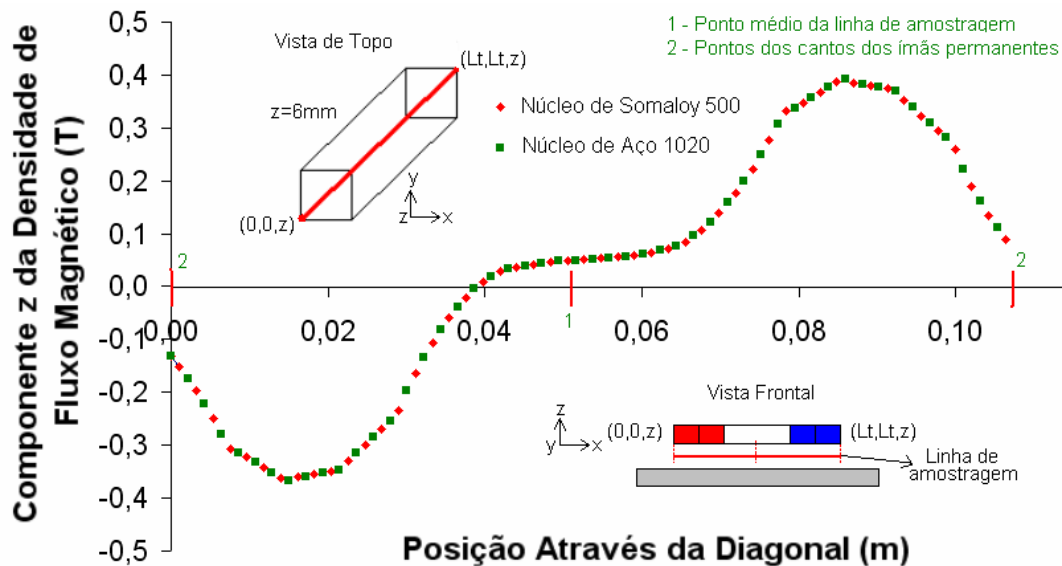


Figura 74 Gráfico da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro para $i = 5$ A, calculado através da diagonal sob o carro, para os núcleos de aço AISI 1020 e de Somaloy 500.

4.3.1.2 Simulação da Força Planar de Propulsão e da Força Normal

Como visto em capítulos anteriores deste trabalho, a força planar de propulsão linear está diretamente ligada à interação do fluxo magnético produzido pelos ímãs

permanentes com a corrente elétrica nas bobinas imersas neste campo. A simulação é feita no sentido de quantificar esta força bem como verificar o seu comportamento nos dois casos de núcleo ferromagnético da armadura com os materiais propostos. Isso é feito em função da corrente elétrica aplicada nas bobinas quando o carro está estático, e os ímãs permanentes estão em alinhamento com as bobinas ativas.

A simulação também contempla a verificação da força normal de atração entre o carro e o núcleo em função da corrente elétrica aplicada às bobinas, novamente para os dois diferentes materiais da armadura. É importante considerar que a faixa de operação simulada para o atuador planar com bobinas planificadas, em termos de corrente elétrica, varia de 0 a 5,0 Ampères.

Como já mencionado, os valores de força planar de propulsão e força normal que atuam no carro são simulados pelo *software* através do Tensor de Maxwell. Nesta etapa serão verificadas estas forças em função da corrente elétrica aplicada no enrolamento x da armadura. Num primeiro momento, o núcleo ferromagnético da armadura será de Aço 1020 sendo, em seguida, alterado para o de Somaloy 500. Os gráficos de força planar de propulsão linear e normal são apresentados nas figuras 75 e 76.

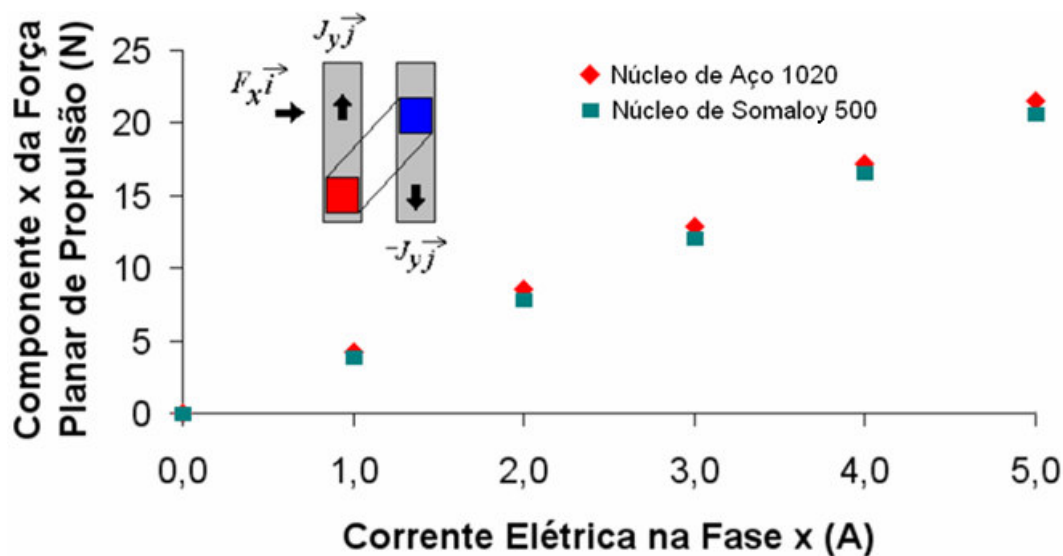


Figura 75 Gráficos da simulação da força planar de propulsão em função da corrente elétrica aplicada na fase do enrolamento x localizada em perfeito alinhamento com os ímãs permanentes, para os dois núcleos ferromagnéticos.

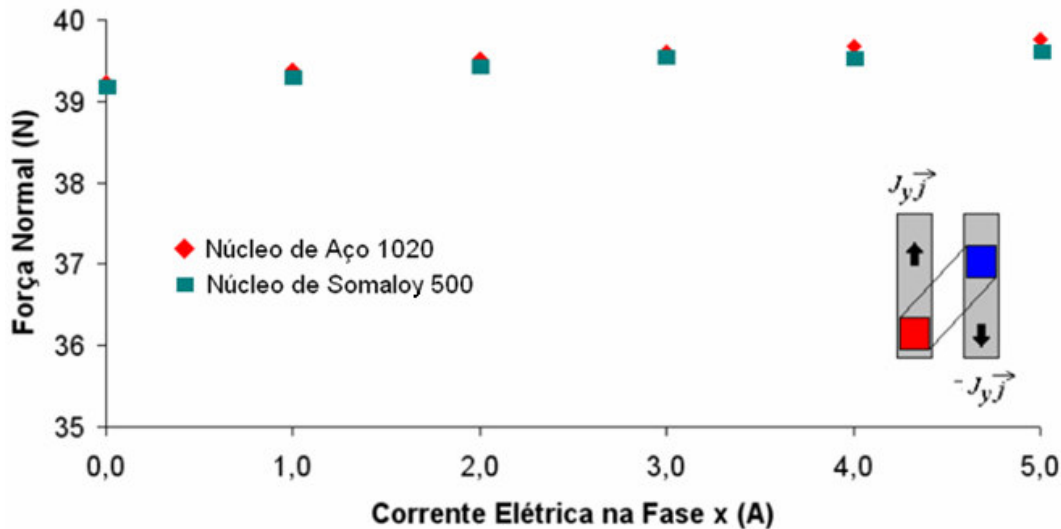


Figura 76 Gráficos da simulação da força normal em função da corrente elétrica aplicada na fase do enrolamento x localizada em perfeito alinhamento com os ímãs permanentes, para os dois núcleos ferromagnéticos.

Com a ajuda da figura 76 é possível notar que a força normal varia pouco em função da corrente elétrica para os dois casos do núcleo ferromagnético. O aumento da corrente elétrica introduzido nas bobinas faz com que o campo magnético nos enrolamentos aumente interagindo com o campo magnético gerado pelos ímãs permanentes criando uma maior atração entre o carro e o núcleo da armadura, fato este que justifica um aumento, ainda que pequeno, na força normal devido ao aumento desta corrente.

Em relação à força planar de propulsão linear, nota-se que, para os dois casos do núcleo ferromagnético, ela assume um comportamento praticamente linear, como já previsto teoricamente. A sensibilidade da força planar de propulsão linear para o carro em regime estático é de $4,36493N/A$ quando o núcleo da armadura é de Aço 1020 e de $4,36085N/A$ quando utilizado o Somaloy 500. Ou seja, uma sensibilidade muito parecida para os dois casos, com uma diferença percentual de apenas 0,0935%.

Outra simulação contemplando a força planar de propulsão linear é feita quando os ímãs permanentes do carro estão perfeitamente alinhados com as fases ativas do enrolamento de x e y . Para este caso, a energização dos dois enrolamentos, x e y , produzem uma resultante de força que é a combinação vetorial entre a força produzida através da interação do campo magnético com a corrente elétrica que circula pelo enrolamento x e no enrolamento y perfeitamente alinhados com os ímãs permanentes. O

gráfico da figura 77 faz uma exposição destes dados de força planar de propulsão em função da corrente elétrica que é aplicada em cada uma das bobinas. É importante ressaltar que, para esta simulação, a corrente elétrica que circula pelos dois enrolamentos envolvidos tem o mesmo valor em módulo.

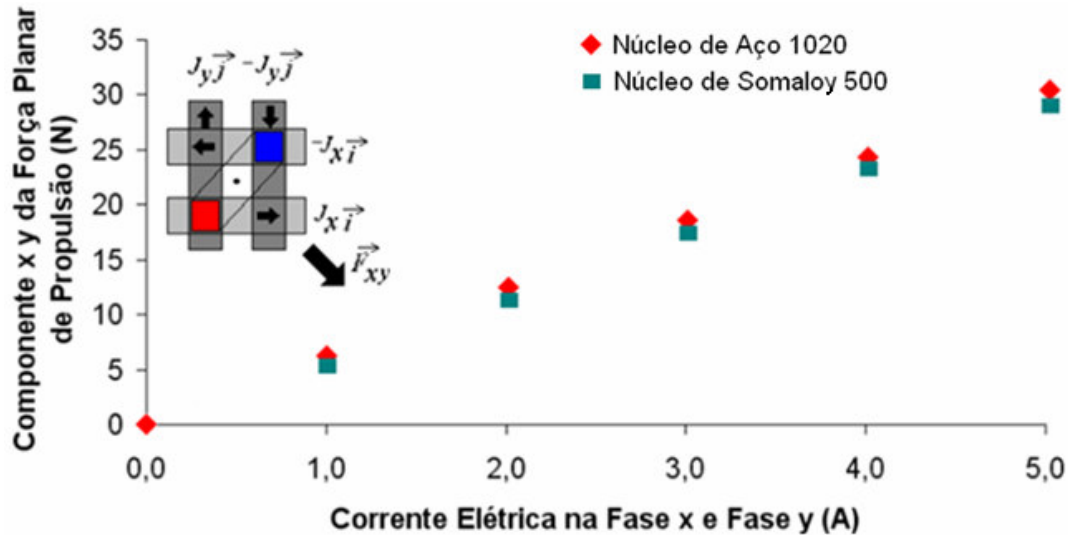


Figura 77 Gráfico da simulação da força planar de propulsão em função da corrente elétrica aplicada na fase do enrolamento x e enrolamento y .

Mantendo a tendência, e comprovado com a apresentação do gráfico da figura 77, a resposta da força planar de propulsão em função da corrente elétrica é praticamente linear, com uma ligeira superioridade para o caso do núcleo ser de aço, pelos mesmos fatores antes discutidos. A sensibilidade para o aço AISI 1020 é de $6,03597N/A$ e para o caso do Somaloy 500 é de $5,98765N/A$, diferença de apenas 0,801% entre as duas sensibilidades.

4.3.2 Simulação Numérica Dinâmica

Na simulação numérica dinâmica o foco não se limita apenas às regiões principais que englobam o carro e a região abaixo deste. Aqui todo o conjunto é focado, uma vez que o carro passa a ser movimentado sobre a estrutura estática e as bobinas planares são excitadas com corrente elétrica pulsada. Um dos objetivos disso é prever o comportamento da distribuição da densidade de fluxo magnético no atuador planar em diferentes situações de movimentação do carro, considerando ainda a troca de material

para o núcleo ferromagnético. Além disso, é simulada e avaliada a distribuição da densidade de corrente elétrica induzida na armadura estatórica pelo efeito da movimentação do carro com os ímãs permanentes e o chaveamento das bobinas.

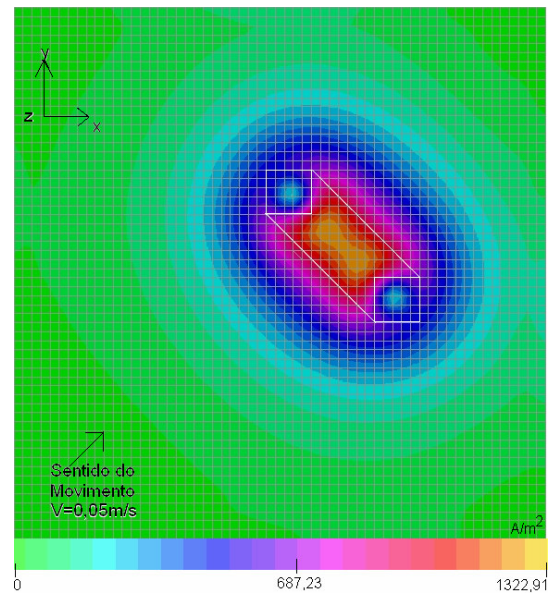
4.3.2.1 Simulação das Correntes Elétricas Induzidas no Núcleo da Armadura

Também foco de análise e discussão deste trabalho, as correntes elétricas podem ser induzidas de duas formas no núcleo ferromagnético da armadura estatórica do atuador planar em estudo. Na primeira situação, a indução se dá pelo deslocamento do fluxo magnético de excitação gerado pelos ímãs permanentes, em resposta à movimentação do carro sobre o estator. Já para a segunda, as correntes elétricas são induzidas pelo efeito de chaveamento pulsado das bobinas dos enrolamentos.

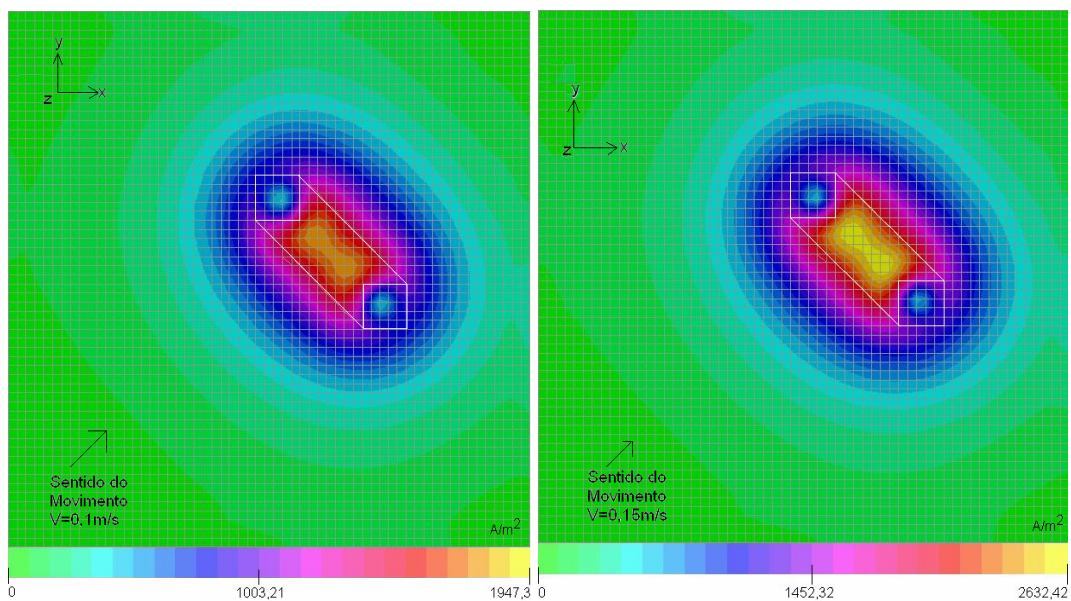
A análise numérica dinâmica inicial prevê a movimentação do carro sobre o núcleo da armadura, sem a presença dos enrolamentos planares, com velocidade constante. São escolhidas três velocidades para ensaio, a saber: 0,05 m/s, 0,10 m/s e 0,15 m/s todas na direção xy de movimentação. Nestas simulações, as mesmas configurações de montagem do atuador planar são mantidas, e os resultados são extraídos quando o carro está em regime permanente de movimentação e não no regime transitório. Ainda, o protótipo é ensaiado para os dois casos onde há a alteração do material do núcleo ferromagnético da armadura, em caráter comparativo.

Os primeiros resultados a serem apresentados dizem respeito à distribuição da densidade de corrente elétrica induzida, \bar{J} , na superfície da armadura estatórica, devida à movimentação do carro equipado com ímãs permanentes. Os mapas da figura 78 trazem a simulação de \bar{J} para as três velocidades ensaiadas, quando o núcleo ferromagnético da armadura é composto de Aço 1020.

Mantendo a mesma configuração do motor linear simulado e em caráter comparativo, a figura 79 traz os mapas da distribuição da densidade de corrente elétrica induzida, \bar{J} , na superfície do núcleo ferromagnético da armadura, agora composto de Somaloy 500, para as mesmas três velocidades do ensaio anterior.



(a)



(b)

(c)

Figura 78 Distribuição da densidade de corrente elétrica na superfície da armadura estática, com o núcleo ferromagnético de Aço 1020, quando a movimentação do carro se dá na direção xy com velocidades de (a) 0,05m/s, (b) 0,10m/s e (c) 0,15m/s.

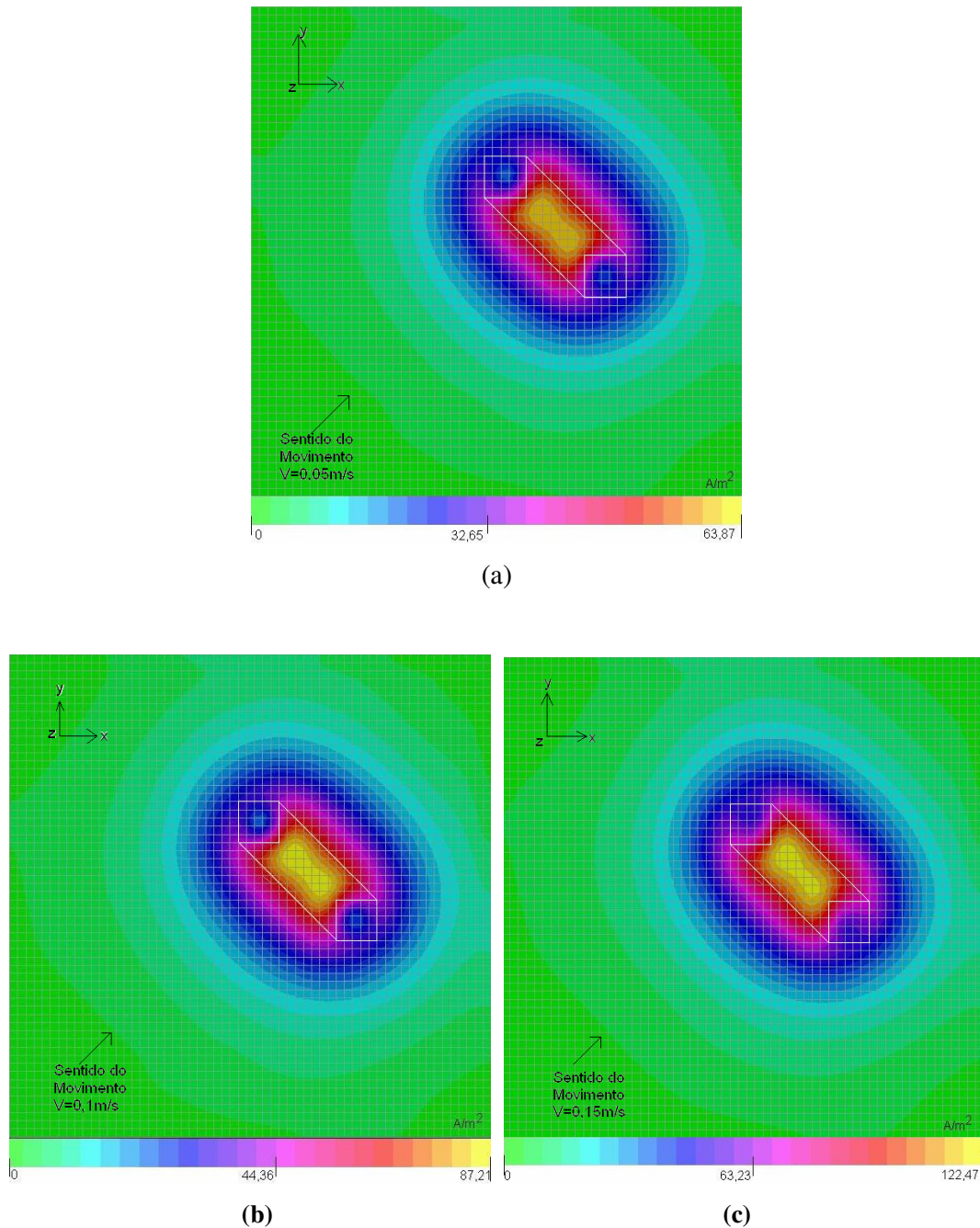
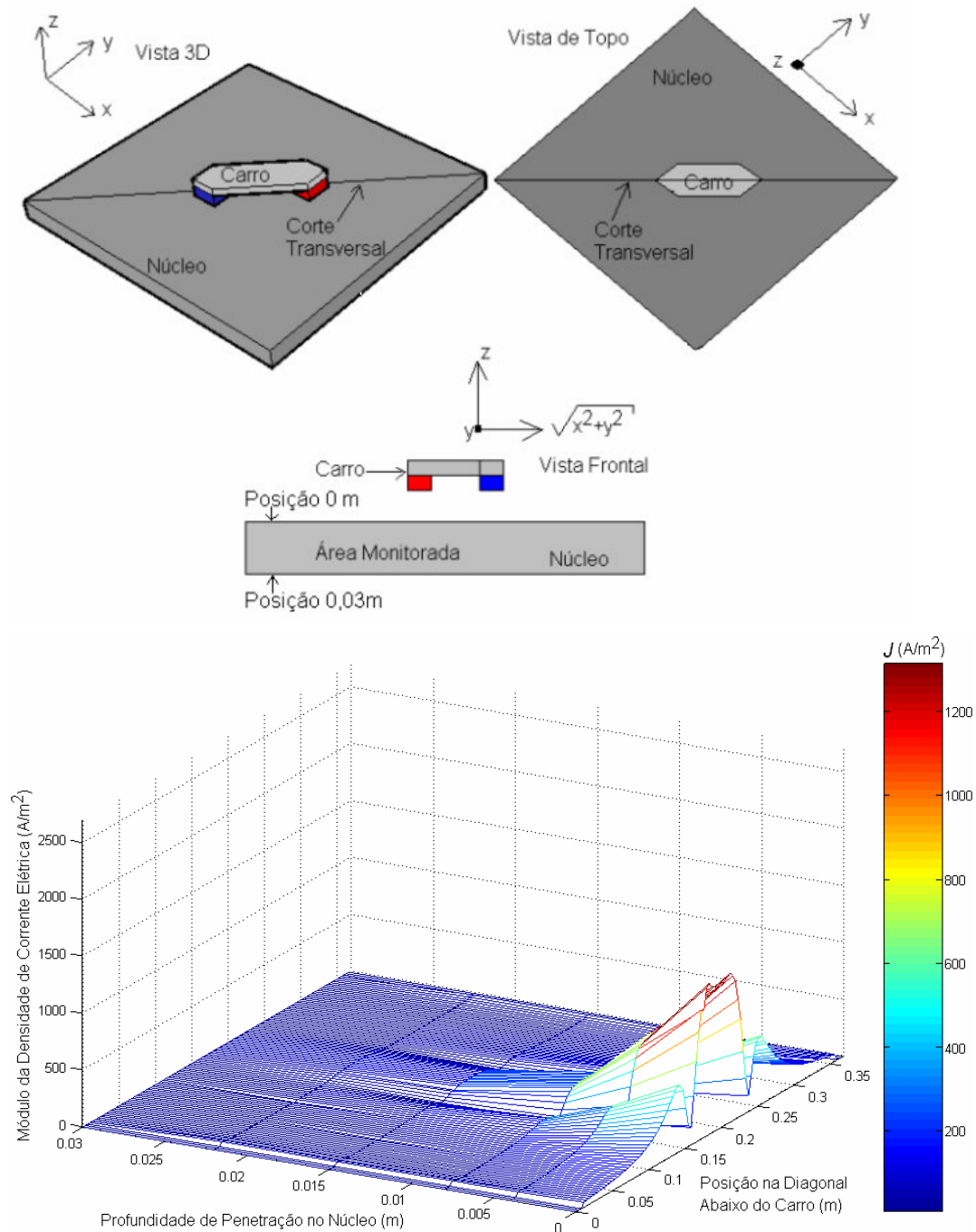


Figura 79 Distribuição da densidade de corrente elétrica na superfície da armadura estática, com o núcleo ferromagnético de Somaloy 500, quando a movimentação do carro se dá na direção xy com velocidades de (a) 0,05m/s, (b) 0,10m/s e (c) 0,15m/s.

Ainda, no que diz respeito à distribuição da densidade de corrente elétrica induzida, é feito um monitoramento do comportamento deste fenômeno ao longo da espessura do núcleo ferromagnético numa região abaixo do carro, determinando assim

uma área para esta distribuição. Para isso, um corte transversal imaginário é feito na estrutura, destacando a área de maior concentração de fluxo magnético, possibilitando o monitoramento da área de interesse. Nos gráficos 3D da figura 80, esta distribuição é apresentada, considerando as três velocidades constantes de excursão do carro, em regime permanente, sobre o núcleo, quando este é composto de aço AISI 1020.



(a)

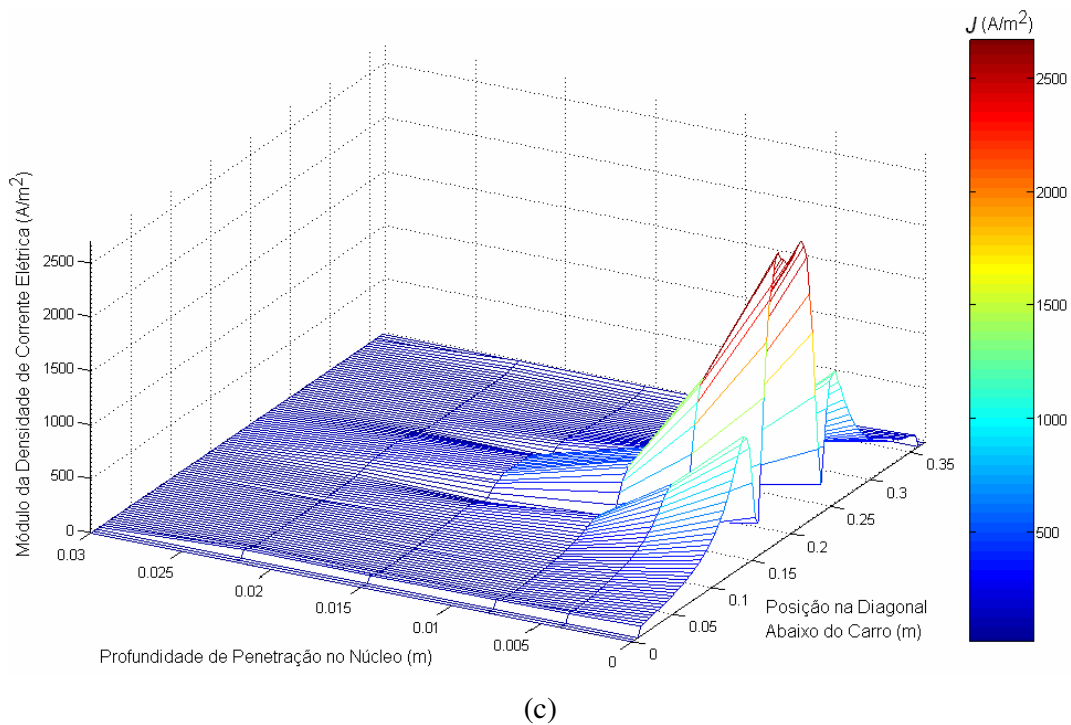
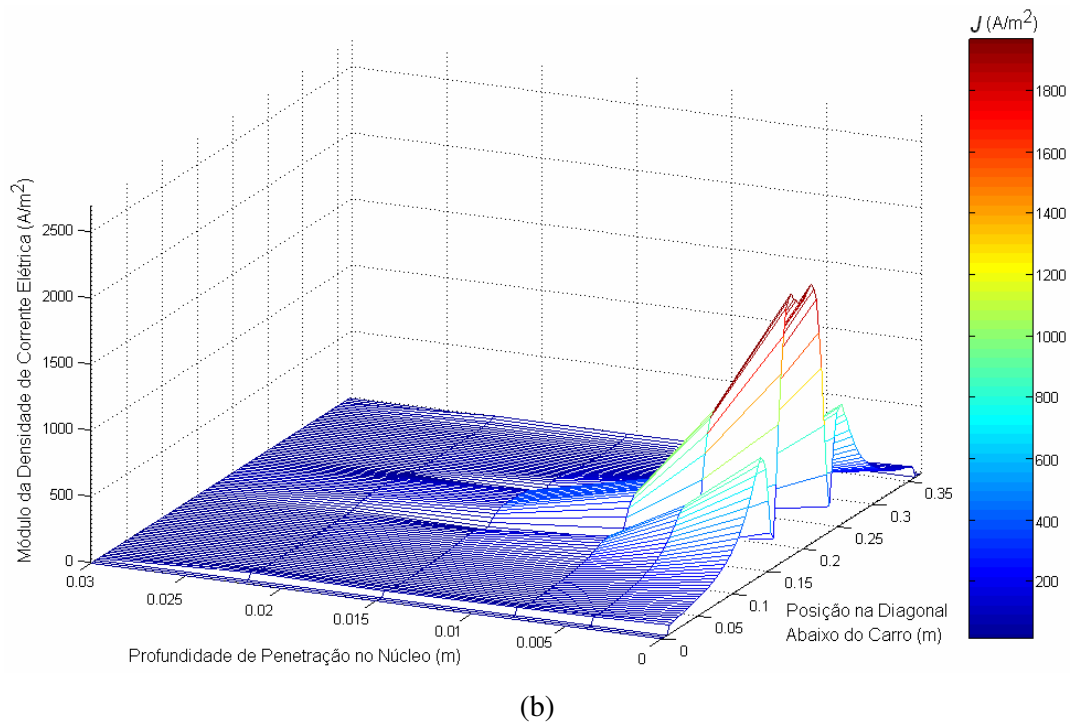
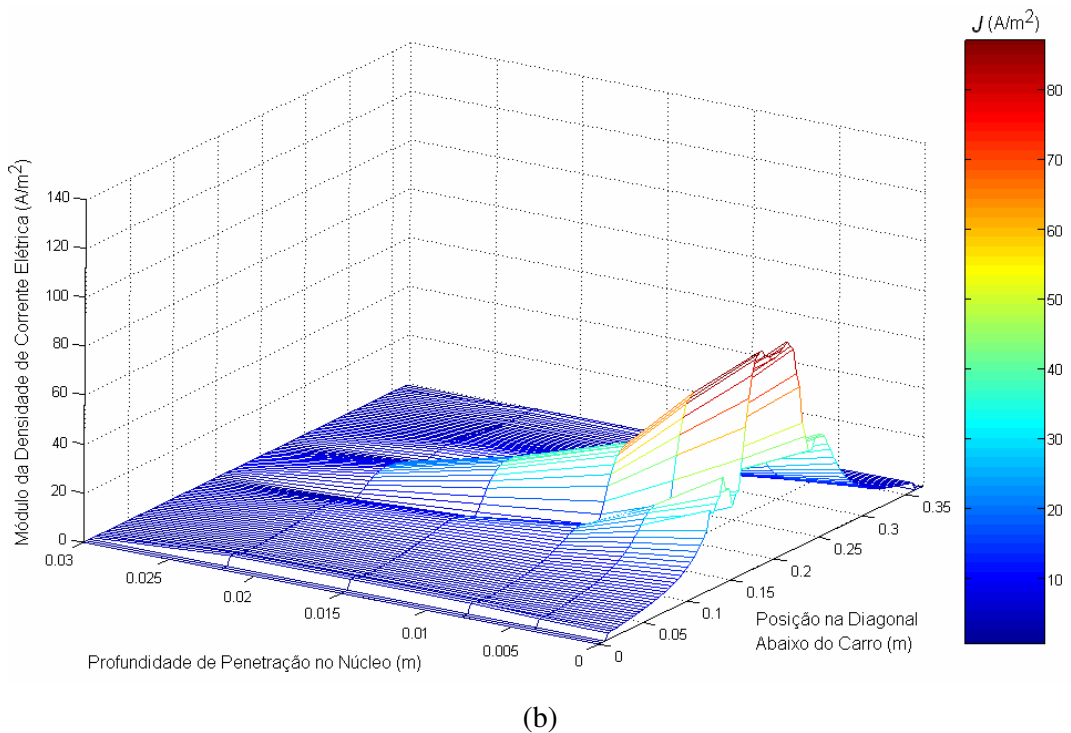
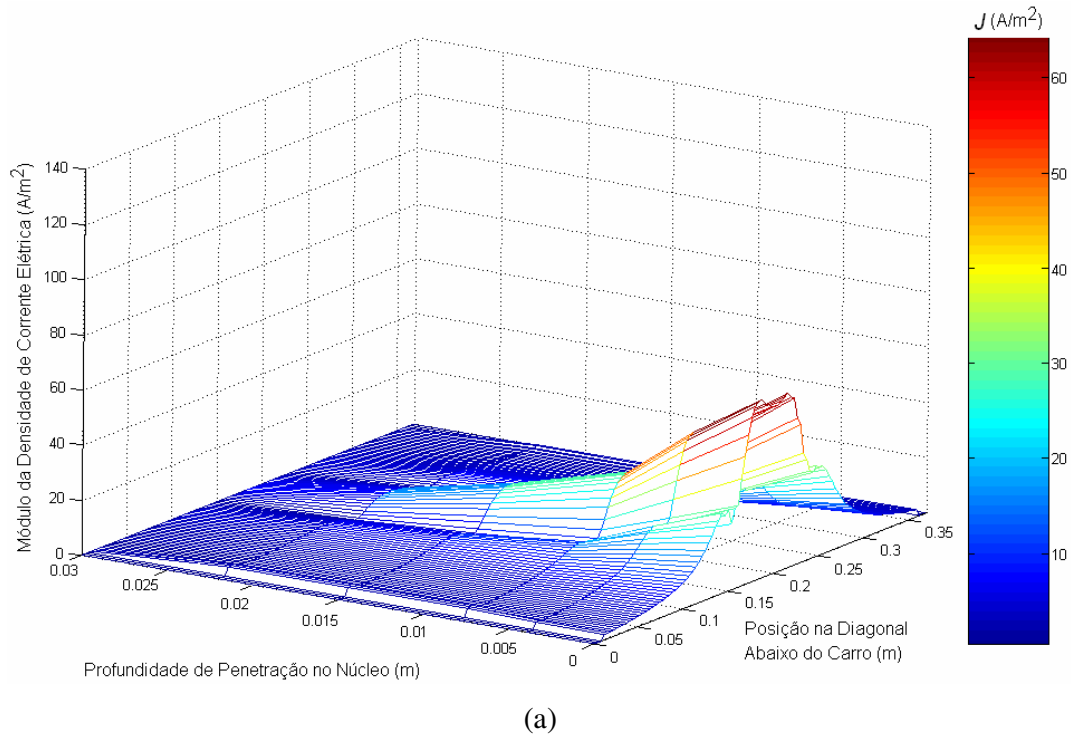
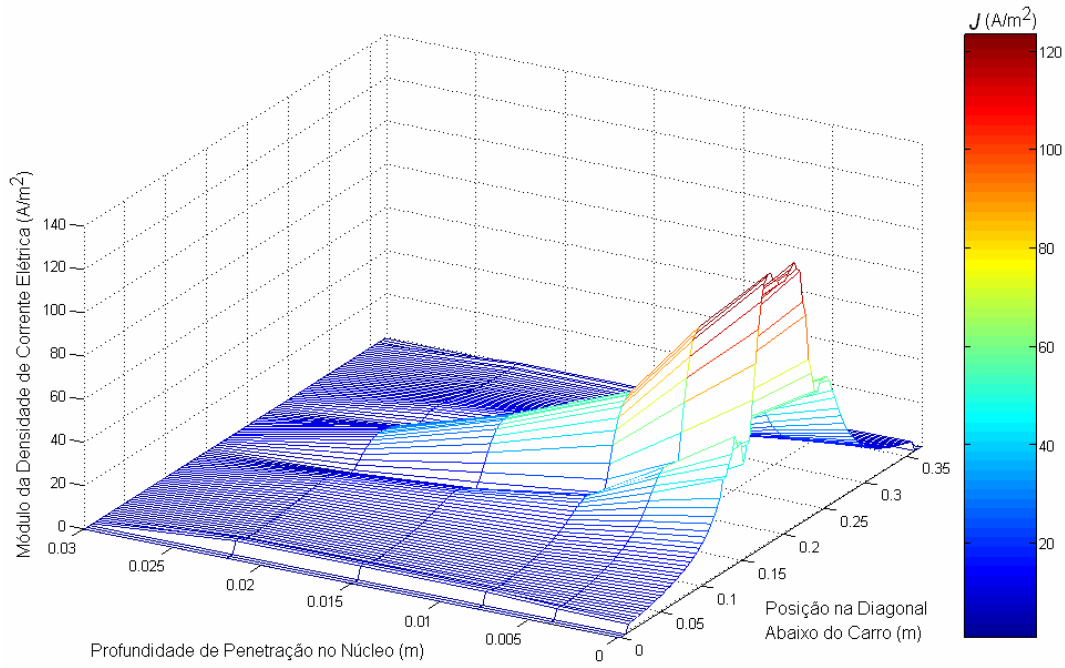


Figura 80 Gráfico 3D da distribuição da densidade de corrente elétrica induzida no núcleo da armadura composto de aço AISI 1020 em uma área abaixo do carro, considerando toda a espessura do núcleo ferromagnético, para as velocidades de (a) 0,05m/s, (b) 0,10m/s e (c) 0,15m/s.

A distribuição da densidade de corrente elétrica ao longo da espessura do núcleo também é monitorada quando o material Somaloy 500 é utilizado. A região monitorada é a mesma do caso aço AISI 1020, para efeitos de comparação. Os resultados são apresentados na figura 81, através de gráficos 3D, considerando-se as três velocidades de excursão do carro sobre o núcleo.





(c)

Figura 81 Gráfico 3D da distribuição da densidade de corrente elétrica induzida no núcleo da armadura composto de Somaloy 500 em uma área abaixo do carro, considerando toda a espessura do núcleo ferromagnético, para as velocidades de (a) 0,05m/s, (b) 0,10m/s e (c) 0,15m/s.

A análise quantitativa dos gráficos 3D apresentados acima pode ser melhorada com a exposição de gráficos, em 2D apresentados nas figuras 82 e 83, relacionando a densidade de corrente elétrica em função da posição na diagonal analisada, apresentando curvas de diferentes posições da profundidade de penetração ao longo da espessura do núcleo ferromagnético. Com o auxílio destes gráficos é possível concluir que a densidade de corrente induzida, J , é significativamente maior quando o núcleo é de aço AISI 1020 para todas as velocidades analisadas, devida à menor resistividade elétrica, sendo mais susceptível ao estabelecimento de corrente elétrica.

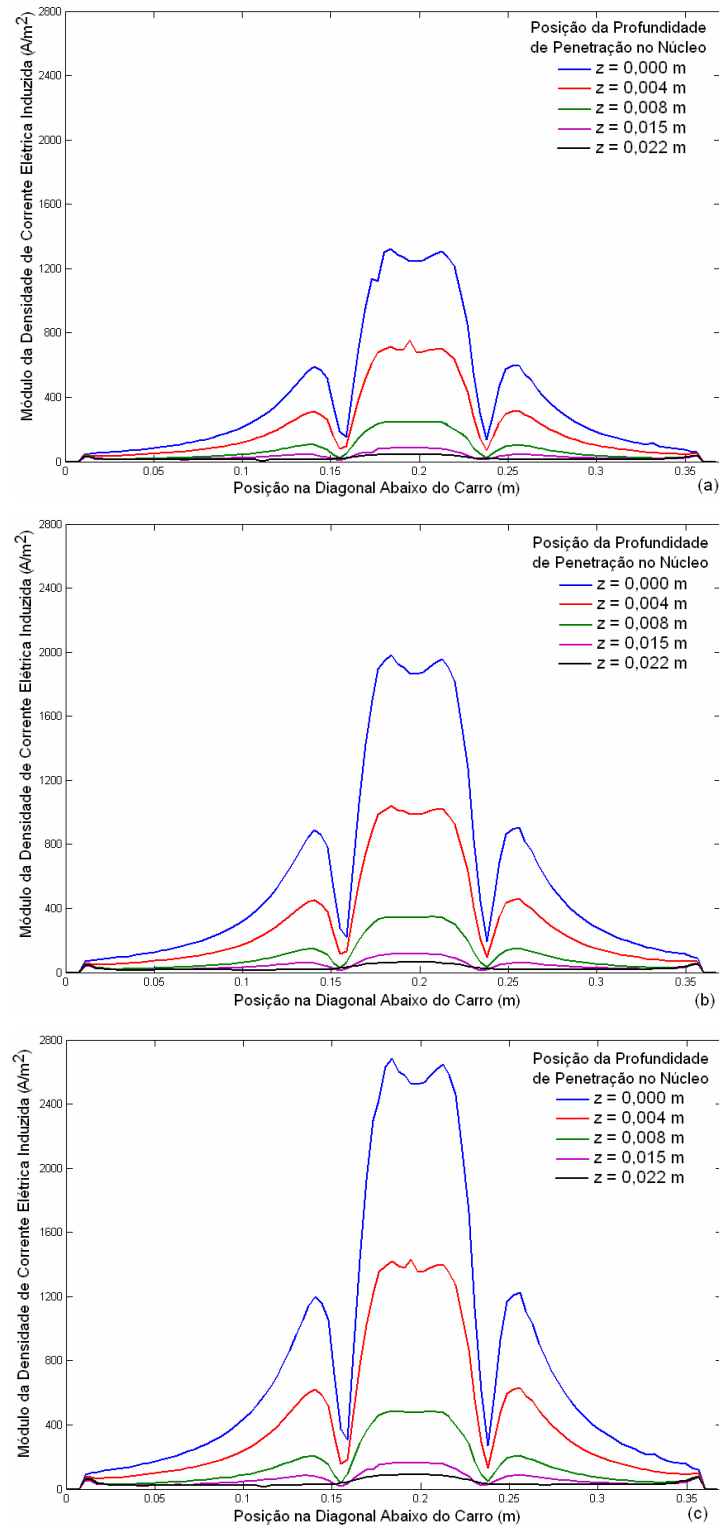


Figura 82 Gráfico 2D da distribuição da densidade de corrente elétrica induzida em função da diagonal analisada, relacionando diferentes posições da profundidade de penetração ao longo da espessura do núcleo ferromagnético de aço AISI 1020 para as velocidades de (a) 0,05m/s, (b) 0,10m/s e (c) 0,15m/s.

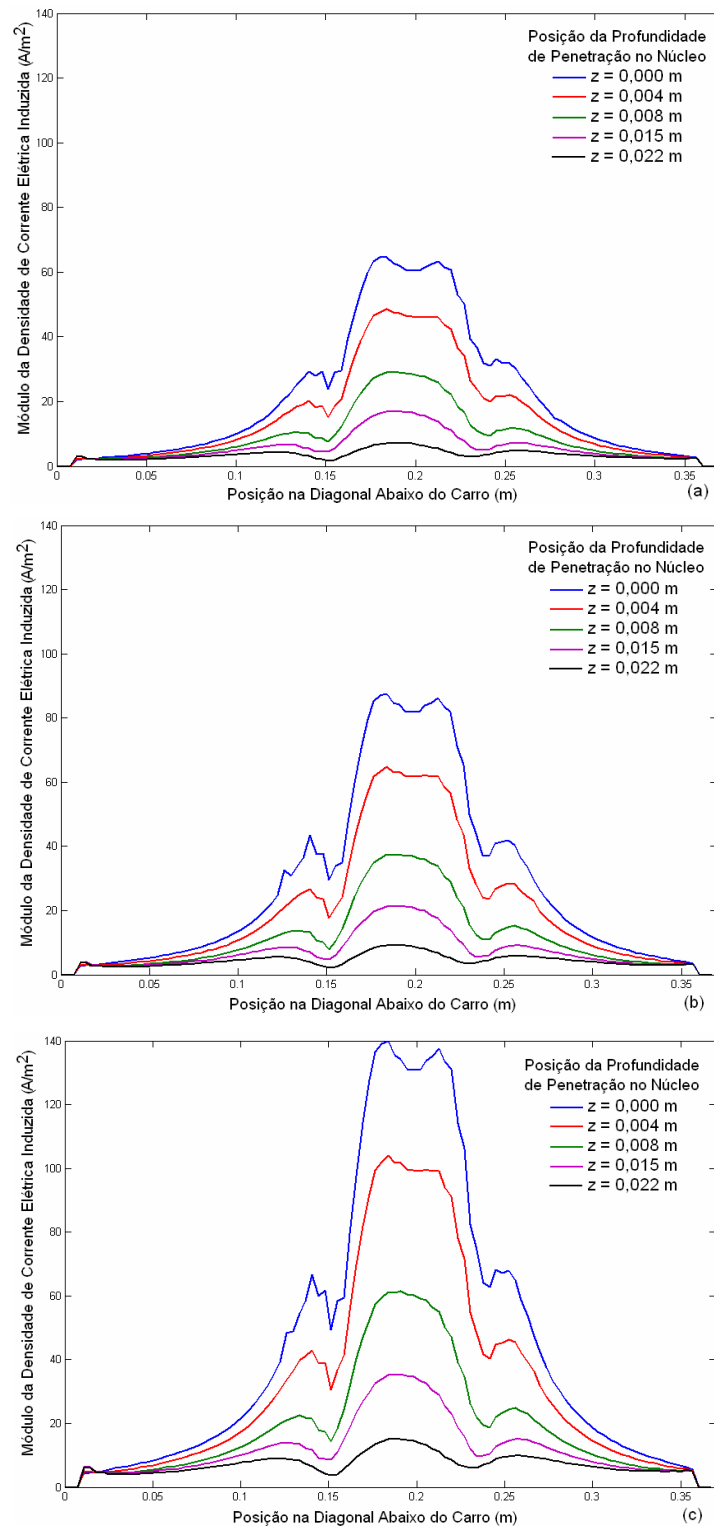
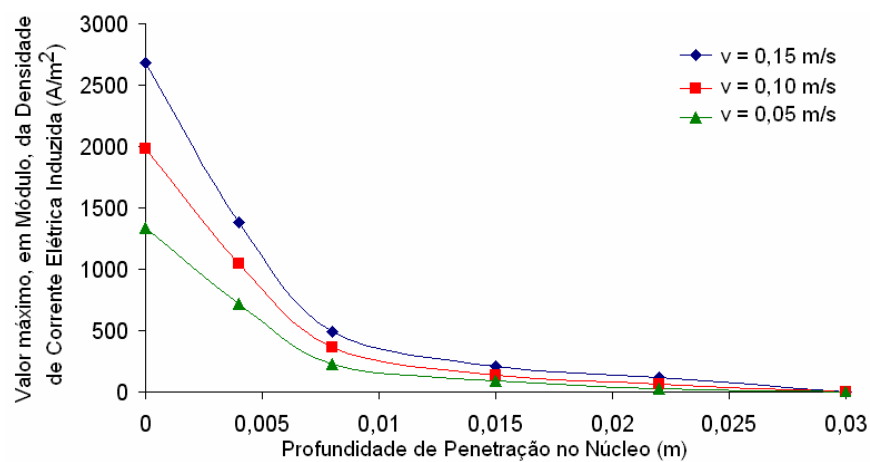
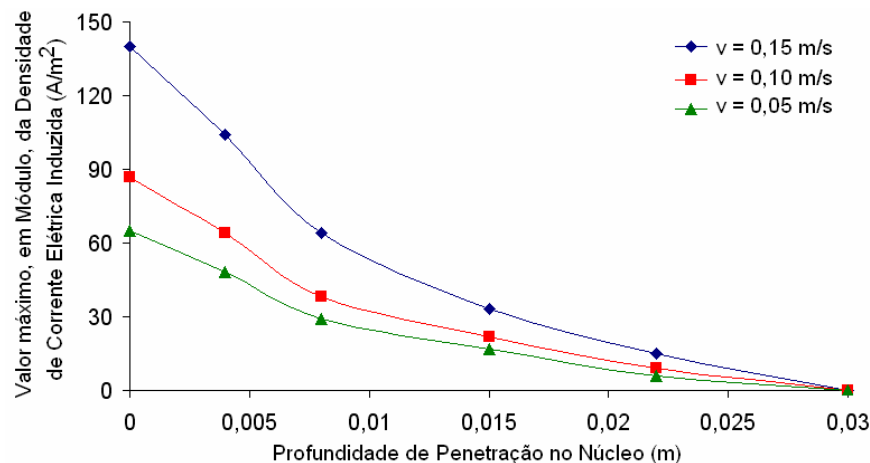


Figura 83 Gráfico 2D da distribuição da densidade de corrente elétrica induzida em função da diagonal analisada, relacionando diferentes posições da profundidade de penetração ao longo da espessura do núcleo ferromagnético de Somaloy 500 para as velocidades de (a) 0,05m/s, (b) 0,10m/s e (c) 0,15m/s.

Dentro desta análise de corrente elétrica induzida, pode-se ainda avaliar aspectos específicos do comportamento do máximo valor, em módulo, da densidade de corrente induzida em função da profundidade de penetração no núcleo ferromagnético da armadura, considerando as três velocidades analisadas e os dois diferentes materiais do núcleo em estudo. Estes resultados apresentados na figura 84, destacam-se em importância uma vez que apresenta a curva não linear do comportamento deste fenômeno investigado, deixando claro que quando o material do núcleo é o Aço 1020 a densidade concentra-se mais na superfície do núcleo, enquanto que para o Somaloy 500 esta grandeza é mais distribuída ao longo da área investigada no núcleo.



(a)



(b)

Figura 84 Gráficos do valor máximo, em módulo, da densidade de corrente elétrica induzida em função da profundidade de penetração no núcleo ferromagnético para as três velocidades, com núcleo ferromagnético de (a) aço AISI 1020 e (b) Somaloy 500.

Ainda nesta análise da distribuição da densidade de corrente elétrica no núcleo estático da armadura, também se pode verificar o módulo da corrente elétrica induzida que circula em uma área transversal compreendida entre os centros dos ímãs permanentes projetada sobre o núcleo, com uma espessura total de 30mm. Esta escolha se justifica sob o argumento de que nesta região o vetor densidade de corrente elétrica tem o mesmo sentido, como é mostrado na figura 85, onde o carro se desloca paralelamente ao núcleo com velocidade de 0,10 m/s.

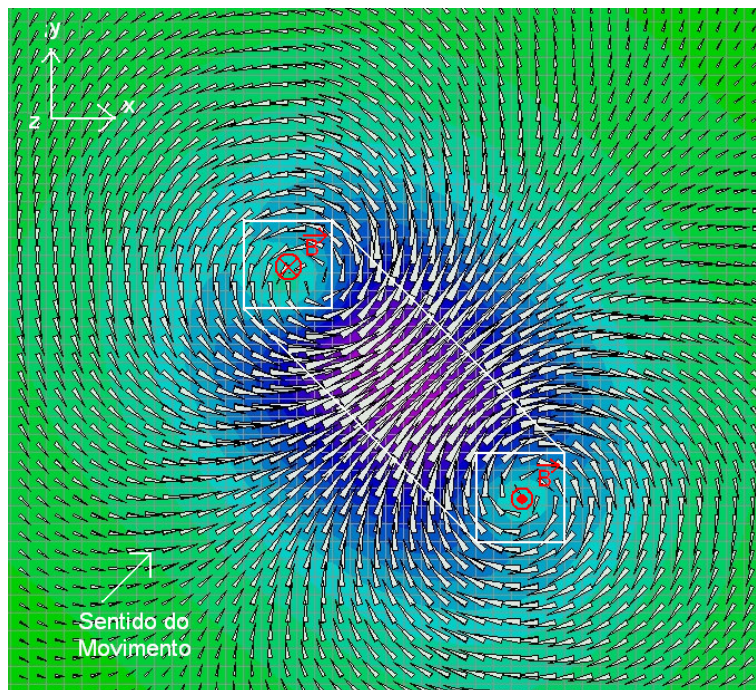
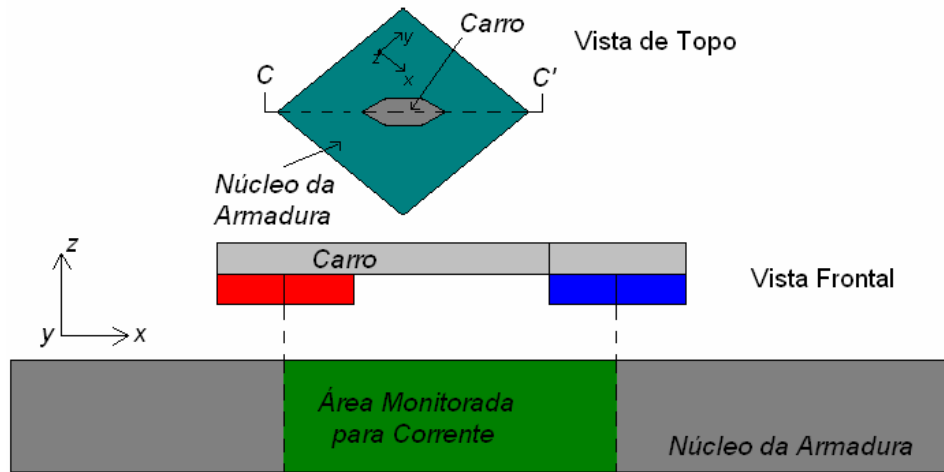


Figura 85 Distribuição vetorial da densidade de corrente elétrica na base do núcleo ferromagnético de Aço 1020 quando o carro percorre uma velocidade de 0,10 m/s em regime permanente.

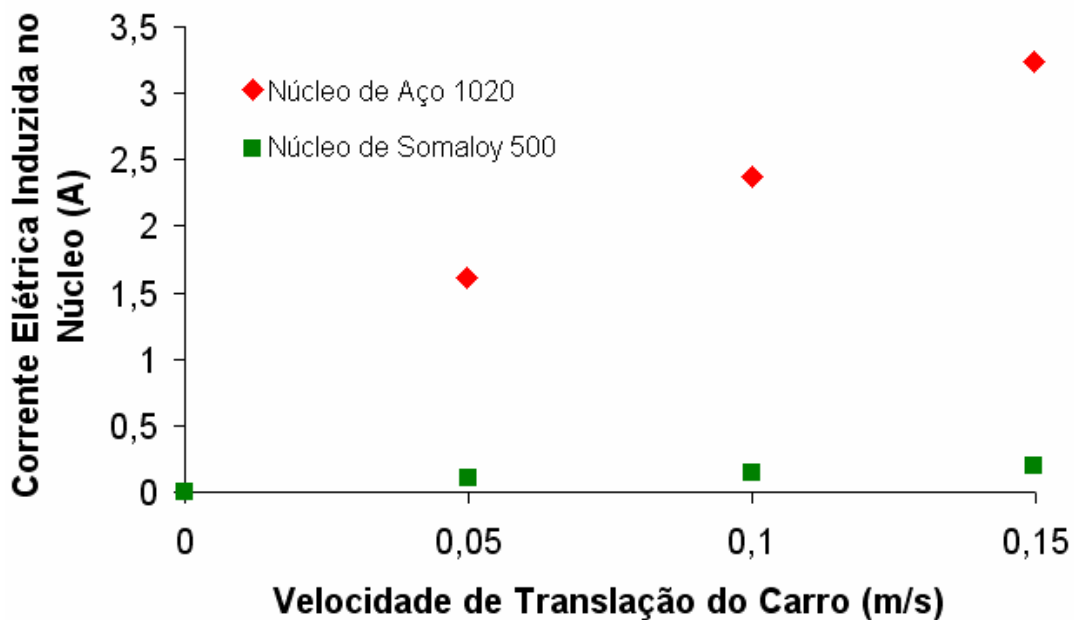
Os resultados relacionados à velocidade de translação do carro com a corrente elétrica induzida na região monitorada, para os dois diferentes materiais utilizados na armadura, são apresentados na figura 86.

Conforme mencionado anteriormente, o chaveamento da corrente elétrica nos enrolamentos planares também é responsável pela indução de corrente elétrica no núcleo da armadura. Simulações neste sentido também foram realizadas, chaveando-se um das bobinas do enrolamento x com um pulso de corrente constante de frequência 2Hz e amplitude de 2 Ampères, sem a presença do carro. A verificação se deu num

instante em que a bobina era excitada com corrente elétrica pulsada e os dois núcleos dos casos considerados são novamente trabalhados. A ilustração da distribuição da densidade de corrente elétrica na superfície do núcleo da armadura se dá através da figura 87, onde são apresentados os mapas desta distribuição para os dois materiais do núcleo ferromagnético considerados neste estudo.



(a)



(b)

Figura 86 (a) Desenho explicativo da região de monitoramento da corrente elétrica induzida; (b) Gráfico da corrente elétrica induzida no núcleo ferromagnético da armadura em função da velocidade de translação do carro, em uma área transversal sob o carro.

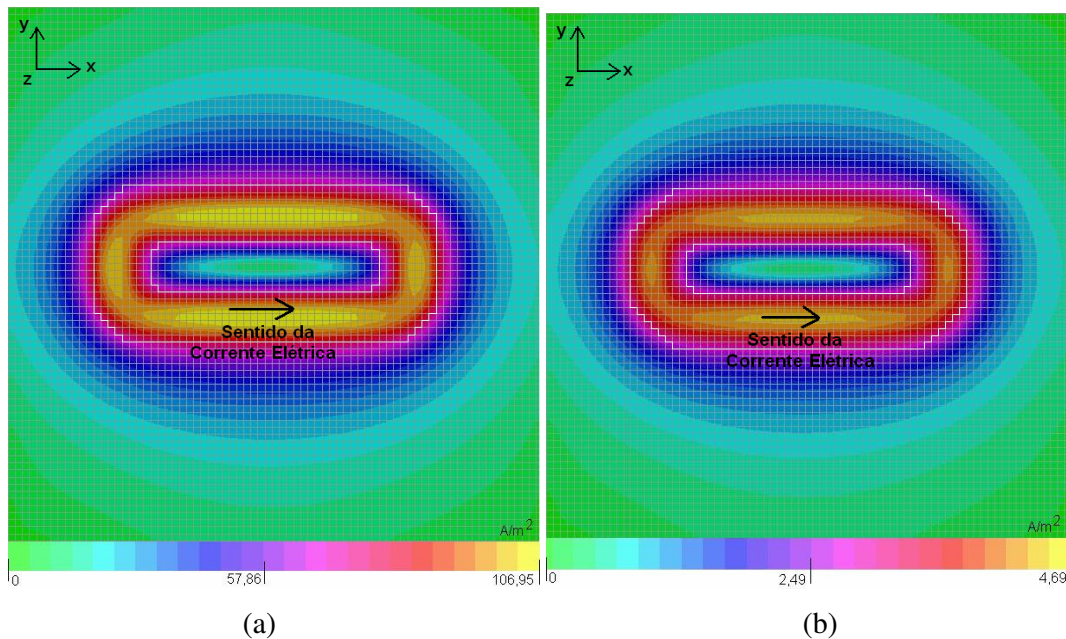


Figura 87 Distribuição da densidade de corrente elétrica na superfície do núcleo da armadura quando uma das bobinas é excitada com corrente elétrica constante de amplitude 2 A e frequência 2 Hz, em regime permanente, considerando os núcleos de (a) Aço 1020 e (b) Somaloy 500.

4.3.2.2 Simulação da Densidade de Fluxo Magnético

Nas simulações de densidade de fluxo magnético, sempre considerando os dois núcleos ferromagnéticos de diferentes materiais, são investigadas duas situações bastante importantes para esta análise. A primeira diz respeito ao comportamento da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro, ou seja, a 6mm da superfície do núcleo da armadura, medida na diagonal sob o carro. Já a segunda trata da distribuição do módulo da densidade de fluxo magnético através de um corte transversal feito na estrutura.

Novamente, para estas simulações serão consideradas as três velocidades constantes de translação do carro sobre o núcleo da armadura, sem a presença dos enrolamentos planares. Os resultados mostrados a seguir são obtidos quando o carro encontra-se em regime permanente de velocidade e não em regime transitório. As figuras 88, 89 e 90 mostram os três gráficos divididos de forma a relacionar as três velocidades consideradas, sendo que para cada um a comparação é feita entre o núcleo de aço AISI 1020 e o núcleo de Somaloy 500, para a primeira situação.

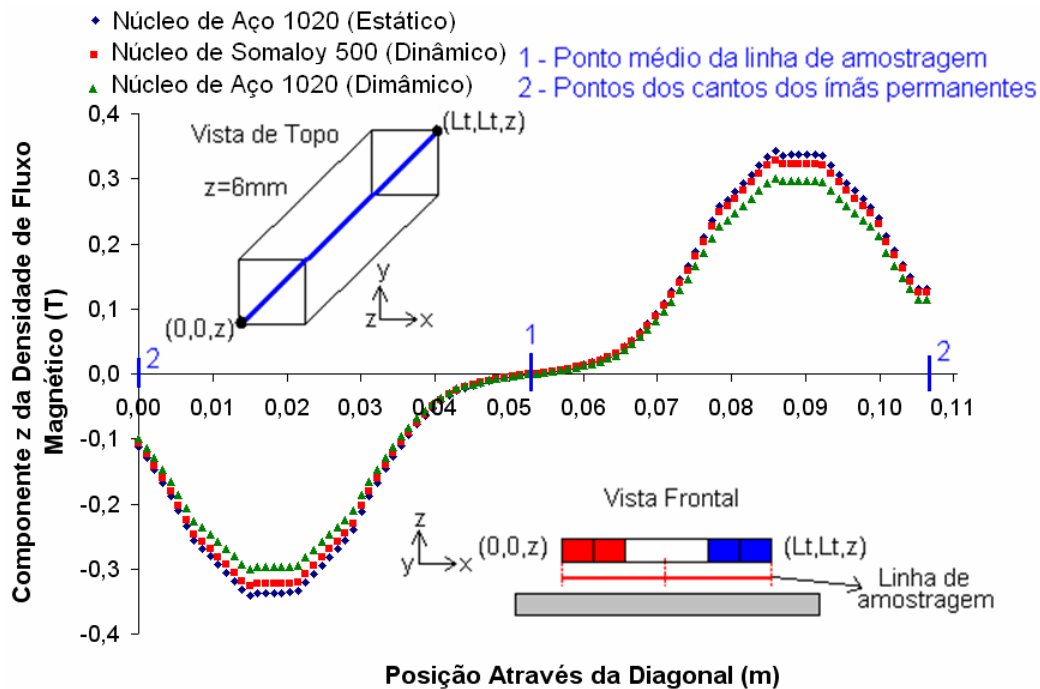


Figura 88 Gráfico da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro medida na diagonal sob o carro, quando estático (com núcleo de Aço 1020) e quando com velocidade de 0,05m/s na direção x sobre o núcleo ferromagnético.

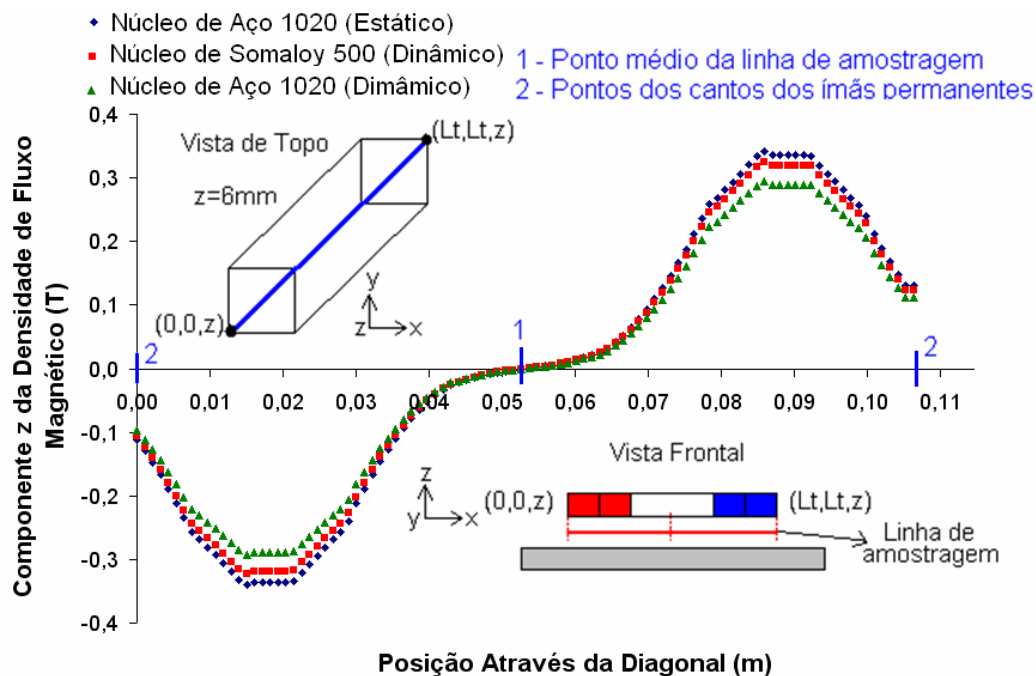


Figura 89 Gráfico da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro medida na diagonal sob o carro, quando estático (com núcleo de Aço 1020) e quando com velocidade de 0,10 m/s na direção x sobre o núcleo ferromagnético.

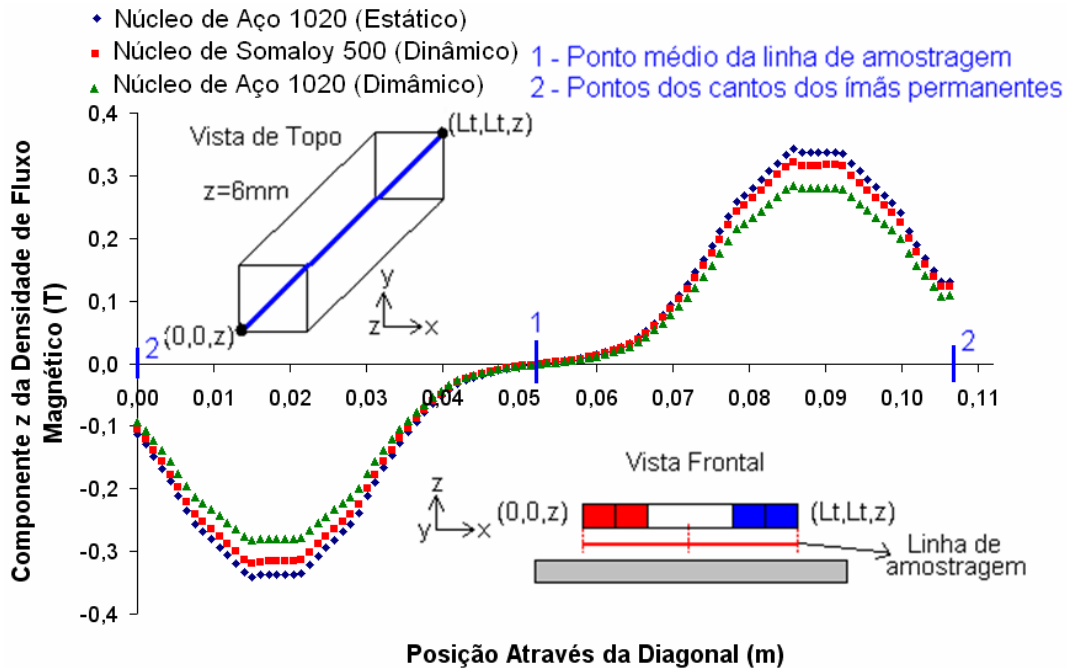


Figura 90 Gráfico da componente z do vetor densidade de fluxo magnético na região central do entreferro medida na diagonal sob o carro, quando estático (com núcleo de Aço 1020) e quando com velocidade de $0,15\text{m/s}$ na direção x sobre o núcleo ferromagnético.

A segunda análise prevista para densidade de fluxo magnético em regime dinâmico trata da verificação do mapeamento bidirecional do módulo desta grandeza, através de um corte que passa pela linha central do carro. O objetivo desta análise é mapear a distribuição da densidade de fluxo magnético em função da velocidade de translação do carro e do material utilizado como núcleo ferromagnético da armadura estática, além de destacar a profundidade de penetração do campo magnético nos casos em que é analisado. As figuras 91 e 92 apresentam o mapeamento bidirecional obtido através do corte que passa pela linha central do carro, passando pelos ímãs permanentes, através da geometria do atuador planar.

É importante perceber, com a ajuda dos gráficos das figuras 91 e 92, que o maior módulo da densidade de fluxo magnético apresenta-se quando o núcleo ferromagnético é composto de Somaloy 500. Também, para este mesmo material, a profundidade de penetração e distribuição do campo magnético é maior, uma vez que para o aço AISI 1020 o fluxo magnético concentra-se na superfície do núcleo, o que vai ao encontro da afirmação que a profundidade de penetração é inversamente proporcional à raiz quadrada do produto da permeabilidade magnética pela condutividade do material.

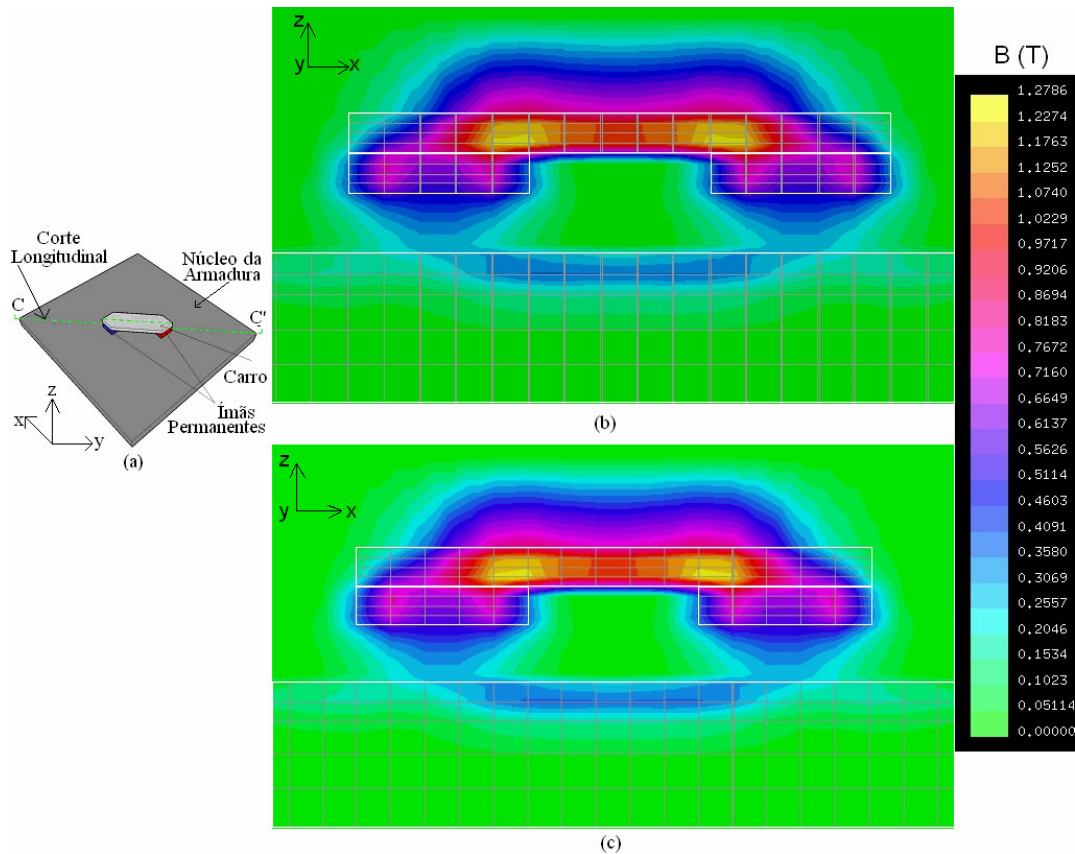


Figura 91 Mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético para armadura manufaturada com aço AISI 1020: (a) vista superior com a localização do corte CC'; detalhe do mapeamento 2D do fluxo magnético no modelo quando o carro desloca-se com velocidade constante de (b) 0,05m/s e (c) 0,10m/s.

O estudo numérico apresentado não pode ser considerado uma ferramenta de definição de projeto, mas sim uma ferramenta de análise de projeto. Os dados apresentados e gerados a partir destas simulações computacionais serão confrontados com dados extraídos a partir de experimentos práticos realizados com o protótipo do motor linear em estudo. Ainda assim que se possa, esta ferramenta de simulação auxilia na determinação de algumas características importantes de projeto, tais como, dimensões dos materiais e resultados práticos esperados. Além disso, os resultados apresentados, nas diferentes análises feitas nesse capítulo, corroboram com os aspectos teoricamente previstos para todos os casos estudados.

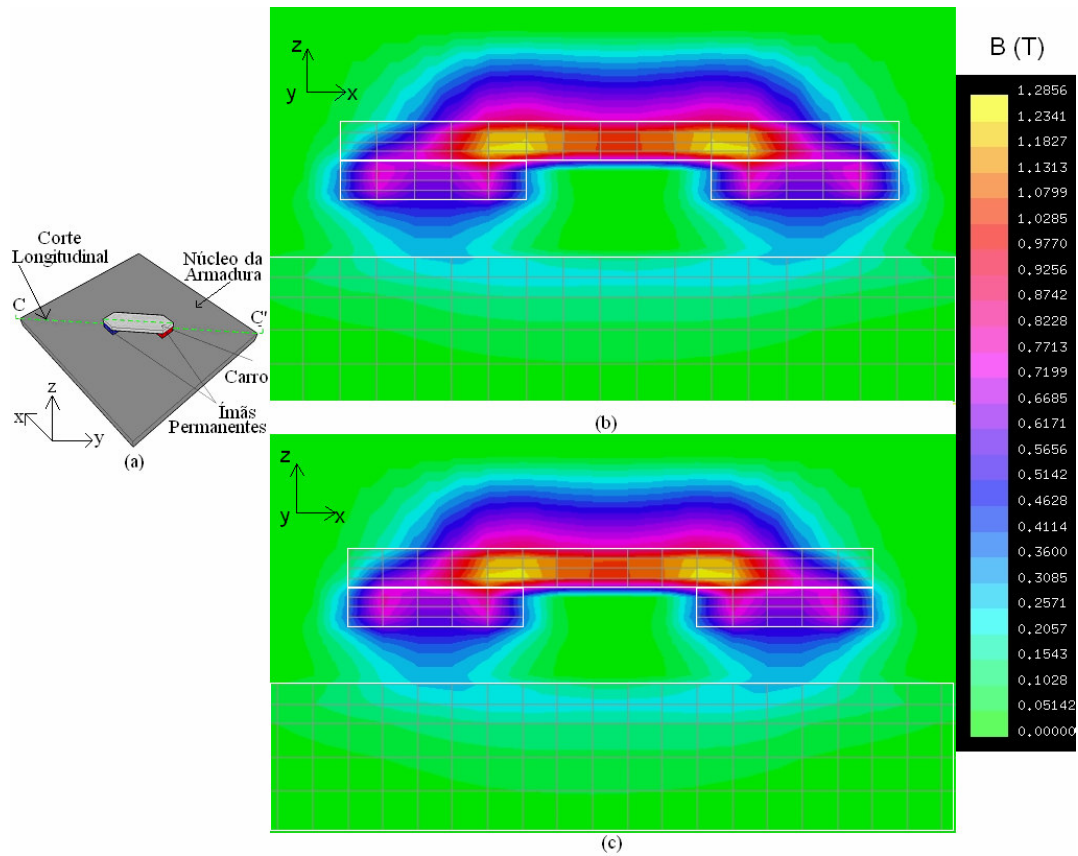


Figura 92 Mapeamento do módulo do vetor densidade de fluxo magnético para armadura manufaturada com Somaloy 500: (a) vista superior com a localização do corte CC'; detalhe do mapeamento 2D do fluxo magnético no modelo quando o carro desloca-se com velocidade constante de (b) 0,05m/s e (c) 0,10m/s.

5 TESTES EXPERIMENTAIS E RESULTADOS

Os testes experimentais do Atuador Planar têm por objetivo caracterizar o protótipo em suas propriedades estáticas e dinâmicas. Além disso, os resultados dos testes realizados podem ser comparados com os resultados extraídos das simulações numéricas feitas, para validação dos resultados. Em efeito de comparação, os gráficos resultantes dos ensaios práticos são apresentados concomitantemente com os gráficos dos valores obtidos nas simulações computacionais.

Todos os testes desenvolvidos se deram para os dois casos em discussão neste trabalho: o primeiro utilizando o núcleo de material ferromagnético de aço AISI 1020 e o segundo usando-se o núcleo de Somaloy 500. Os testes buscam determinar a força estática de propulsão linear, quando o carro está perfeitamente alinhado com as bobinas excitadas por corrente elétrica, bem como a força normal, o efeito de frenagem sofrido pelo carro quando em deslocamento sobre a armadura estatórica e, ainda, monitorar valores de densidade de fluxo magnético no entreferro.

5.1 ENSAIOS EM REGIME ESTÁTICO

O ensaio em regime estático vai determinar as forças que atuam sobre o carro, a saber: força planar de propulsão linear e força normal, ambas de origem magnética. Ainda é de interesse verificar valores pontuais de densidade de fluxo magnético no entreferro para os dois materiais utilizados como núcleo ferromagnético.

5.1.1 Medição da Densidade de Fluxo Magnético

O ensaio de densidade de fluxo magnético se dá com a medição de valores pontuais do módulo do vetor densidade de fluxo magnético sobre um plano a uma distância de 0,5mm da face polar dos ímãs permanentes no entreferro, quando não há circulação de corrente elétrica nas bobinas planares. Um gabarito foi utilizado para que os pontos nos quais a medição é feita correspondam àqueles considerados na análise computacional. O gabarito utilizado contém 15 pontos distribuídos simetricamente. Um gaussímetro com sonda Hall foi empregado.

Este ensaio é bastante importante para determinar a variação dos valores de densidade de fluxo magnético quando o material do núcleo ferromagnético da armadura

é substituído. É mostrado claramente que o valor da densidade de fluxo magnético é pouco alterado quando da substituição do material do núcleo, validando ainda mais a afirmação de que a baixa permeabilidade magnética do Somaloy 500, em comparação a do aço AISI 1020, não causa significativas alterações na distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro, devido ao grande entreferro.

Na figura 93 é apresentado o gráfico com os valores pontuais do módulo do vetor densidade de fluxo magnético transversal à face polar do ímã permanente para o caso do material do núcleo ferromagnético ser de aço AISI 1020, enquanto que na figura 94 é apresentado o gráfico com os valores para o caso do núcleo ferromagnético ser de Somaloy 500. Em ambos os gráficos, faz-se a comparação com os valores obtidos de forma simulada e de forma experimental.

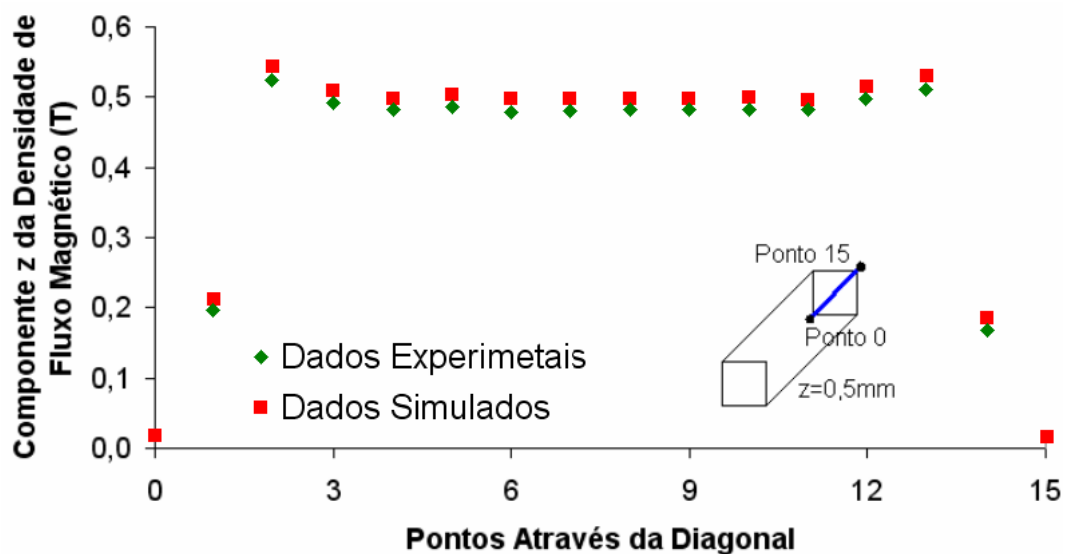


Figura 93 Gráfico de valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético medidos a 0,5 mm da face polar de um dos ímãs permanentes, quando o núcleo ferromagnético é composto de aço AISI 1020, caso simulado e caso experimental.

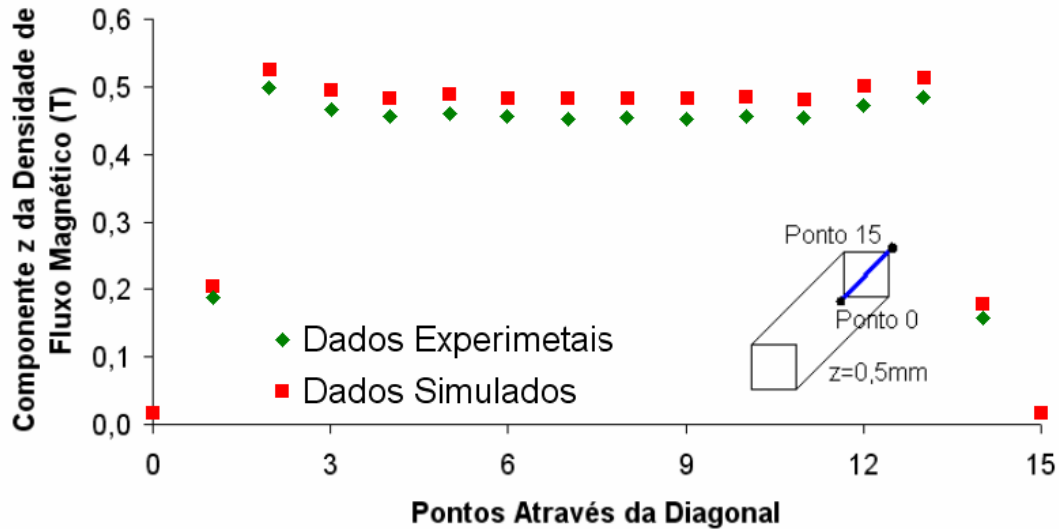


Figura 94 Gráfico de valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético medidos a 0,5 mm da face polar de um dos ímãs permanentes, quando o núcleo ferromagnético é composto de Somaloy 500, caso simulado e caso experimental.

Com a ajuda dos gráficos antes apresentados pode-se perceber que o valor simulado e o valor obtido experimentalmente têm boa concordância entre si, o que pode ser utilizado como parâmetro para a validação dos resultados. O gráfico da figura 95 apresenta uma comparação dos valores pontuais da densidade de fluxo magnético na direção z , obtidos experimentalmente, numa região transversal, 0,5mm abaixo da face polar de um dos ímãs permanentes, quando da utilização dos dois núcleos ferromagnéticos considerados nos casos em estudo.

Mantendo a tendência que já vinha sendo verificada na análise de simulação numérica, os valores pontuais do módulo do vetor densidade de fluxo magnético numa região 0,5mm abaixo da face polar de um dos ímãs permanentes são bastante próximos nos dois casos. A diferença máxima é de 1,4272% na região analisada, quando a substituição do núcleo ferromagnético é feita. A tendência de resultados similares reforça-se quando se percebe que os valores destes vetores são ligeiramente maiores quando a estrutura do protótipo é montada com o núcleo ferromagnético da armadura de aço AISI 1020.

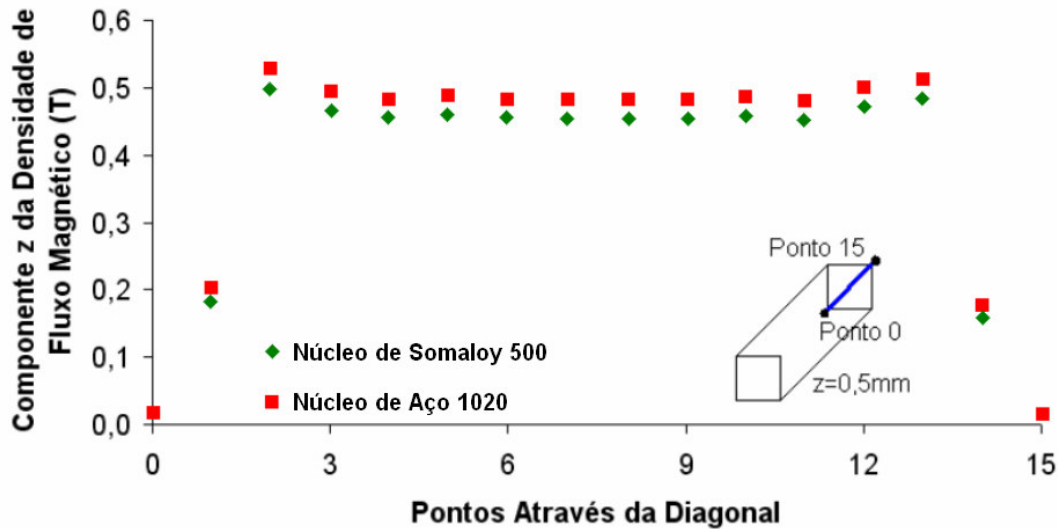


Figura 95 Gráfico de valores pontuais da componente z do vetor densidade de fluxo magnético, obtidos de forma experimental, medidos a 0,5 mm da face polar de um dos ímãs permanentes, considerando os núcleos de aço AISI 1020 e Somaloy 500.

5.1.2 Medição das Forças Planar e Normal

O objetivo deste ensaio é determinar a força planar de propulsão linear e a força normal quando o carro encontra-se em regime estático e os ímãs permanentes estão em total alinhamento com as bobinas excitadas por corrente elétrica. Num primeiro momento, os testes são feitos com corrente elétrica em apenas uma bobina do enrolamento x ; já num segundo momento, uma das bobinas do enrolamento y também recebe corrente elétrica e a força é resultante da interação do fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes no entreferro com as correntes dos dois enrolamentos. As medições de força são feitas com células de carga acopladas a um condicionador de sinais.

5.1.2.1 Medição da Força Normal

Os valores de força normal são obtidos por meio de uma célula de carga e de um condicionador de sinais. Esta força medida está relacionada com a atração que o carro, equipado com ímãs permanentes, tem com a armadura estática, de material ferromagnético. O esquema montado para este ensaio pode ser visto na figura 96. Neste

ensaio, uma das extremidades da célula de carga é devidamente fixada a um suporte de alumínio e a outra é utilizada para a fixação do carro. Mantendo-se o mesmo entreferro de uma operação normal do Atuador Planar, ou seja 12 mm, o efeito de atração do carro pelo núcleo submete a célula de carga a uma força, deformando a mesma. Esta deformação é percebida pelo condicionador de sinal acoplado, que emite uma resposta linear em função desta força.

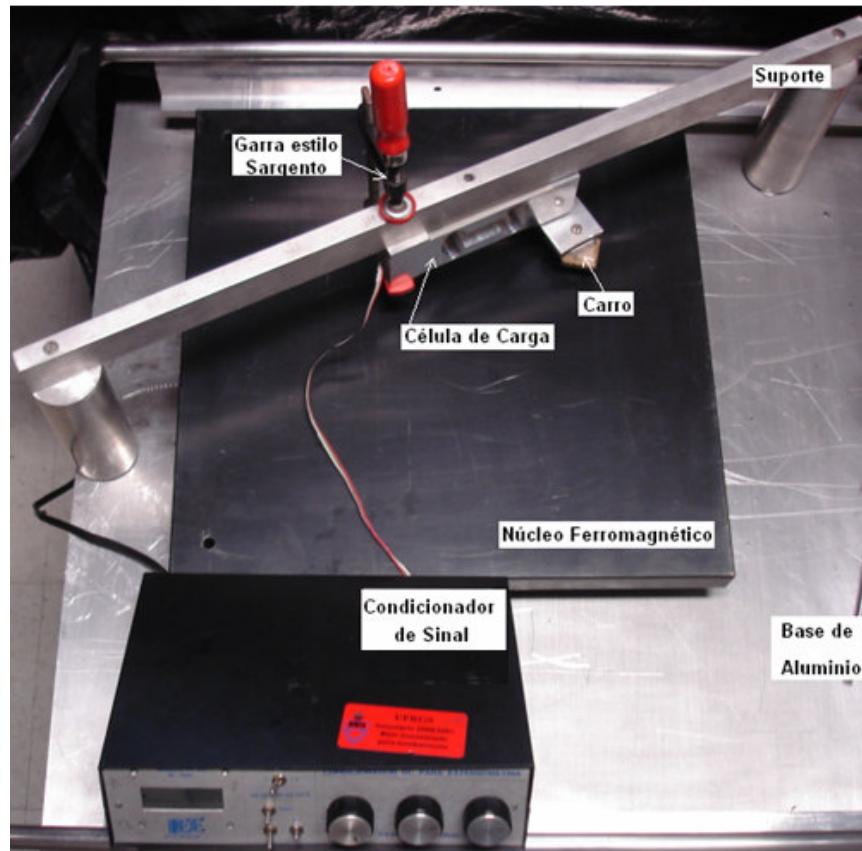


Figura 96 Fotografia da montagem feita para a medição de força normal.

O ensaio de força normal é realizado para as duas situações de núcleo ferromagnético. Os enrolamentos planares são colocados entre o carro e o núcleo e uma das bobinas do enrolamento x , a qual está em alinhamento com os ímãs permanentes do carro, é submetida a correntes elétricas que variam de 0 até 5 Ampères. Na figura 97 é apresentado um gráfico da força normal em função da corrente elétrica aplicada na bobina, quando o núcleo da armadura é de aço AISI 1020. Já na figura 98 o gráfico apresentado é de quando o núcleo é de Somaloy 500. Para a situação apresentada na figura 97, a força normal, obtida de forma experimental, que atua sobre o carro em

função da atração com o núcleo é de 40,652 N, quando a corrente elétrica aplicada ao enrolamento x é nula, e de 41,905 N quando esta corrente chega a 5A. Já para a situação apresentada na figura 98, a força normal medida de forma experimental, é de 40,521 N quando a corrente elétrica é nula e 41,876 N quando a corrente elétrica é de 5A. Este pequeno aumento na força normal em função da corrente elétrica aplicada pode ser explicado pelo também pequeno aumento da densidade de fluxo magnético no entreferro devido à interação do campo magnético da bobina e dos ímãs permanentes.

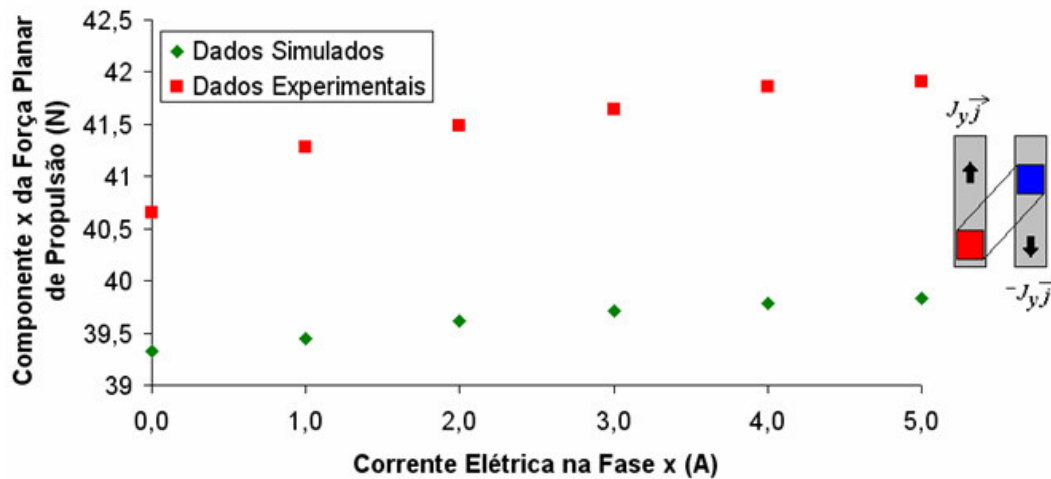


Figura 97 Gráfico da força normal atuante sobre o carro em função da corrente elétrica aplicada no enrolamento x da bobina planar, quando o núcleo ferromagnético da armadura é de aço AISI 1020.

Para efeito de validação dos resultados, registra-se que a máxima diferença percentual entre os valores simulados e experimentais é de 5,24% quando o núcleo ferromagnético é de aço AISI 1020, e de 5,32% quando o núcleo é de Somaloy 500. Ainda, na figura 99 é apresentado um gráfico comparativo destacando a força normal obtida através de testes experimentais, para os dois diferentes materiais dos núcleos considerados, mediante a variação da corrente elétrica introduzida na fase que se encontra em perfeito alinhamento com os ímãs permanentes do carro. Em termos percentuais, da força normal obtida de forma experimental, a diferença entre os dois casos do núcleo é de 0,3225 %, quando a corrente elétrica é nula, e de 0,0692 % quando a corrente é de 5 A.

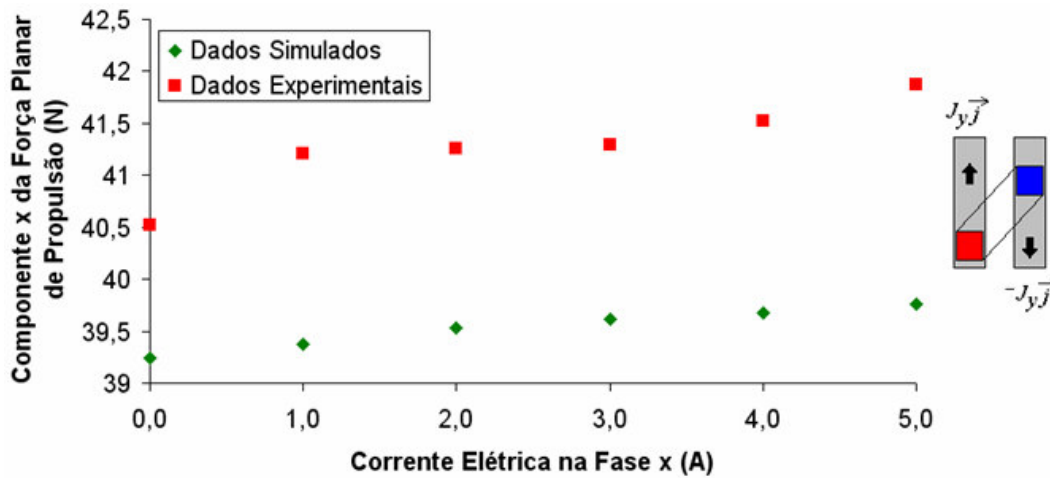


Figura 98 Gráfico da força normal atuante sobre o carro em função da corrente elétrica aplicada no enrolamento x da bobina planar, quando o núcleo ferromagnético da armadura é de Somaloy 500.

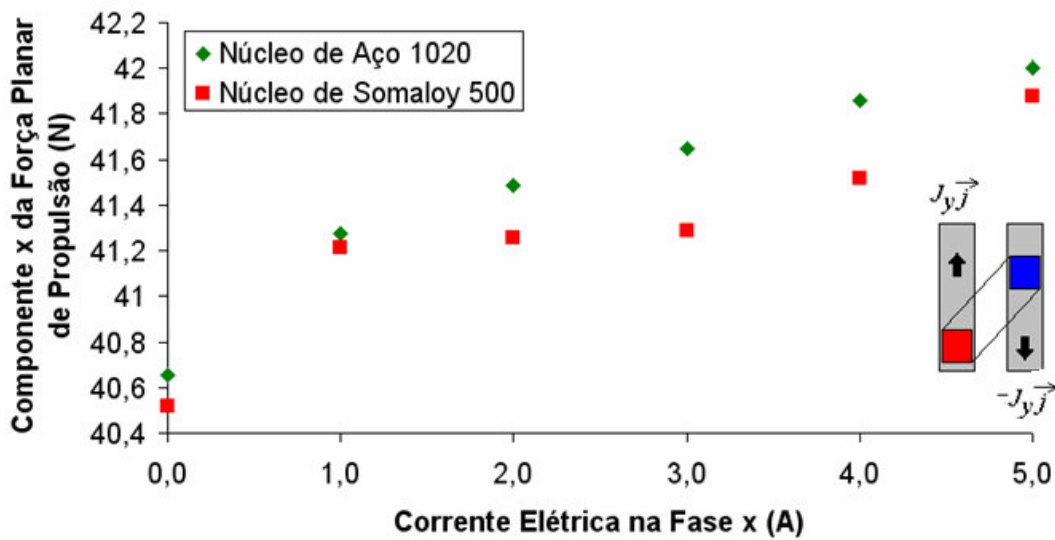


Figura 99 Força normal, obtida através de testes experimentais, para os núcleos de Aço 1020 e Somaloy 500, quando corrente elétrica é introduzida na fase que se encontra em alinhamento com os ímãs permanentes do carro.

Percebe-se claramente que, devido a uma ligeiramente maior densidade de fluxo magnético estabelecido quando da utilização do aço como material do núcleo da

armadura, os valores de força normal, tanto experimentais quanto simulados, são um pouco maior do que quando é utilizado o Somaloy 500; mesmo assim os dados são bastante próximos, apresentando pequenas diferenças, como mostrado em termos percentuais.

5.1.2.2 Medição da Força Planar de Propulsão Linear

Neste ensaio foram consideradas duas possibilidades práticas. Na primeira a energização é feita somente em uma bobina do enrolamento x , enquanto que na segunda a energização dá-se em bobinas do enrolamento x e do enrolamento y simultaneamente. Nas duas situações, o ensaio se dá sob características estáticas e com o carro em total alinhamento com as bobinas energizadas. A configuração para a montagem do ensaio segue conforme o desenho apresentado na figura 100. O esquema montado para a medição da força planar de propulsão linear, quando somente uma fase do enrolamento x é acionada por corrente elétrica, é mostrada na figura 101.

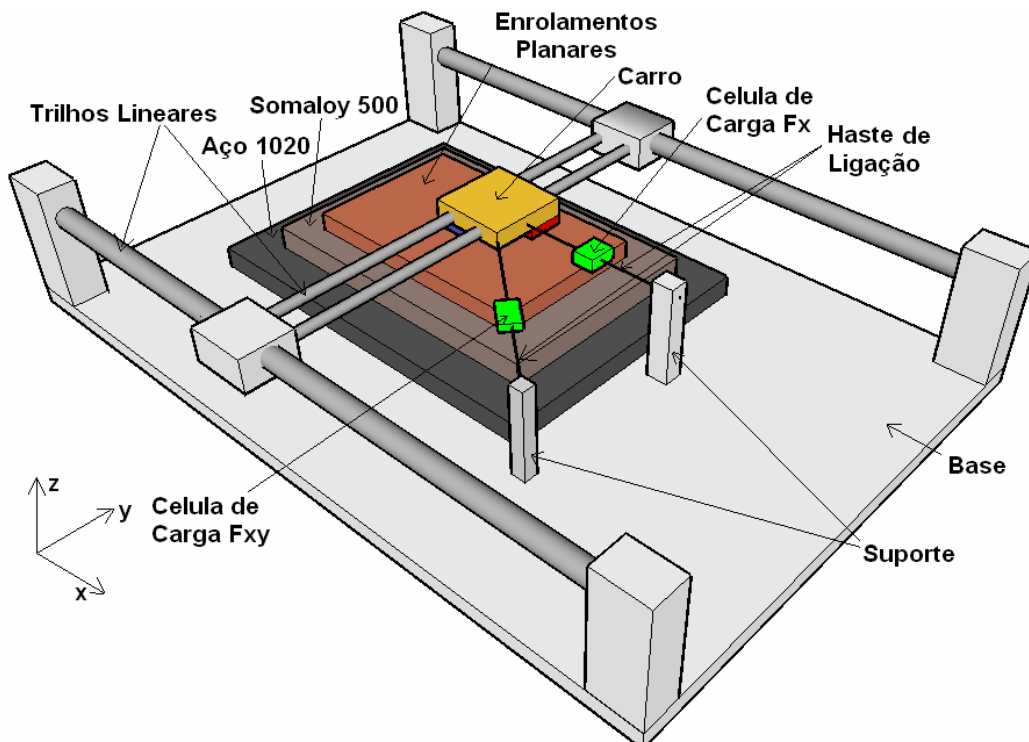


Figura 100 Figura da estrutura montada para o ensaio de força planar de propulsão linear.

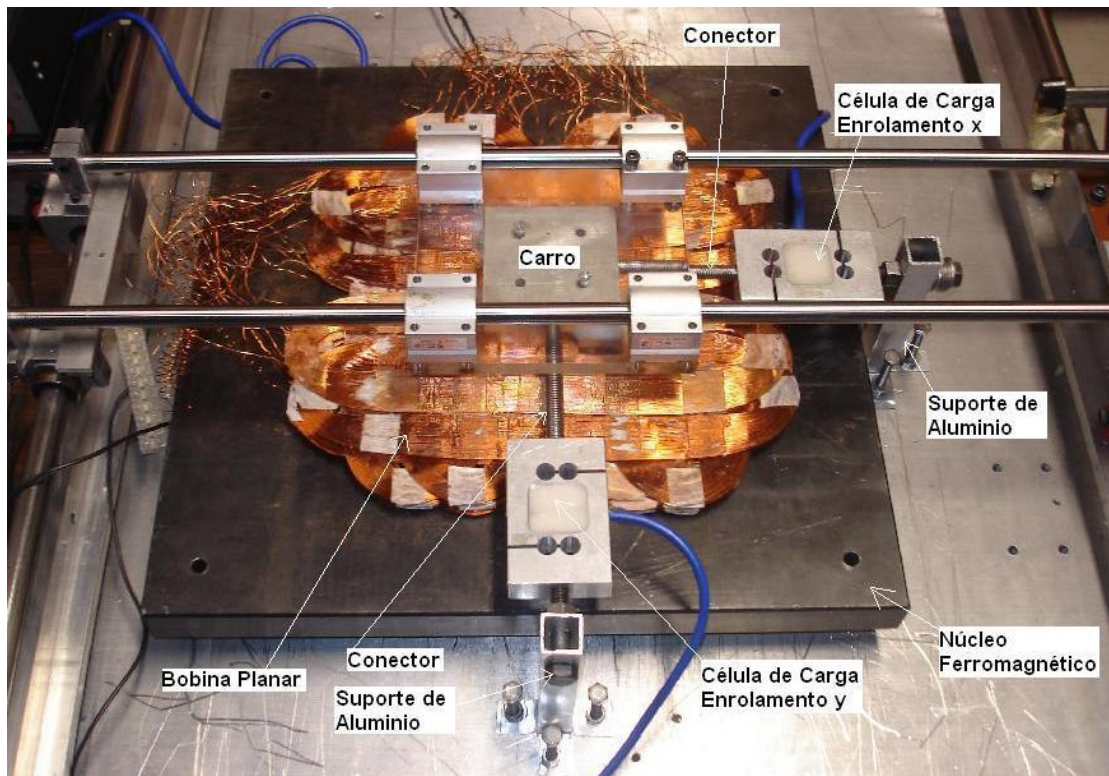


Figura 101 Fotografia do esquema montado para a medição da força planar de propulsão quando a fase x é energizada.

Nota-se que, no esquema montado na figura 101, a célula de carga é acoplada em uma de suas extremidades a um suporte que permite que a mesma seja disposta na horizontal. A outra extremidade é ligada ao carro, prendendo este a uma posição em alinhamento com a bobina excitada por corrente elétrica. Esta fixação é considerada adequada ao ensaio, pois, uma vez excitada a bobina, a tendência do carro é deslocar-se no plano em função da interação da corrente elétrica com o fluxo magnético de excitação. Contudo, estando o carro fixo, esta tendência de movimento será percebida pela célula de carga provocando uma deformação linearmente proporcional à força gerada pelo carro.

A corrente elétrica controlada na bobina é suprida através da retificação da tensão elétrica a partir de um variac monofásico e medida através da instrumentação previamente preparada para o experimento. Este aparato é mostrado na figura 102.

Para este ensaio, a faixa de operação na bobina varia de zero até 5 Ampères. A intensidade da força depende do valor da corrente elétrica aplicada no enrolamento. Para cada valor de corrente é feita simultaneamente a aquisição respectiva do valor da força. Os gráficos apresentados na figura 103 referem-se ao ensaio de força planar

versus corrente elétrica, considerando (a) quando o núcleo é de aço AISI1020 e (b) quando o núcleo é de Somaloy 500.

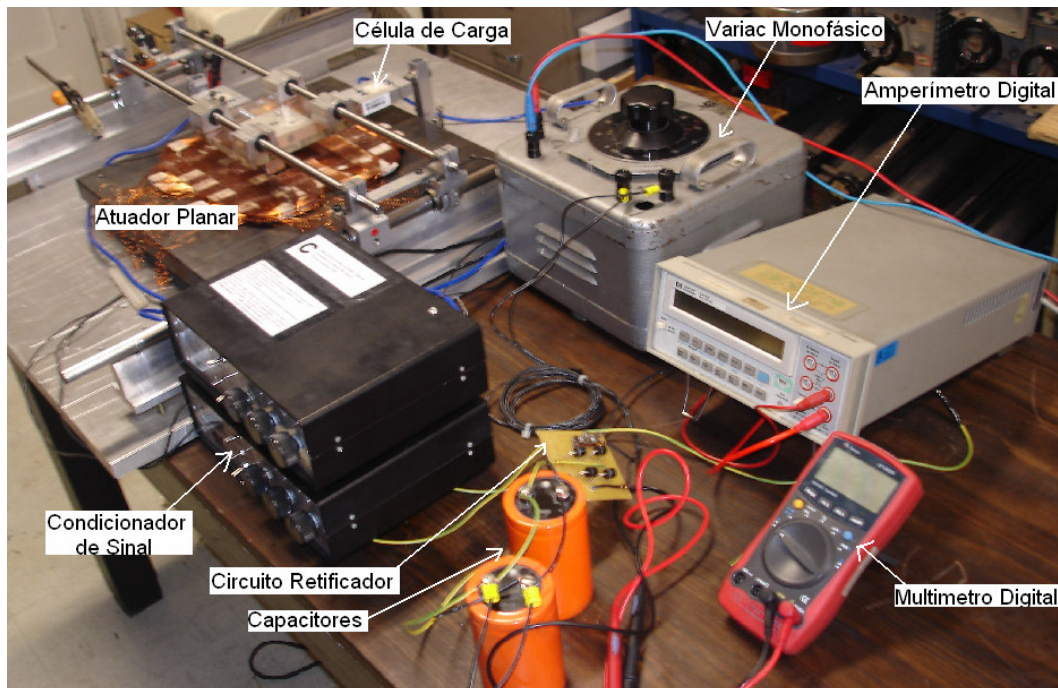
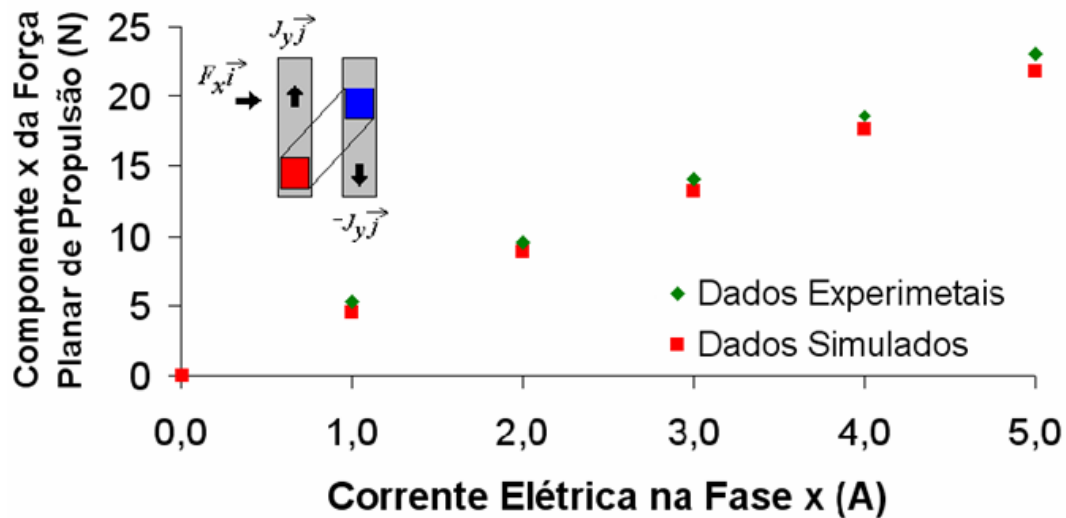
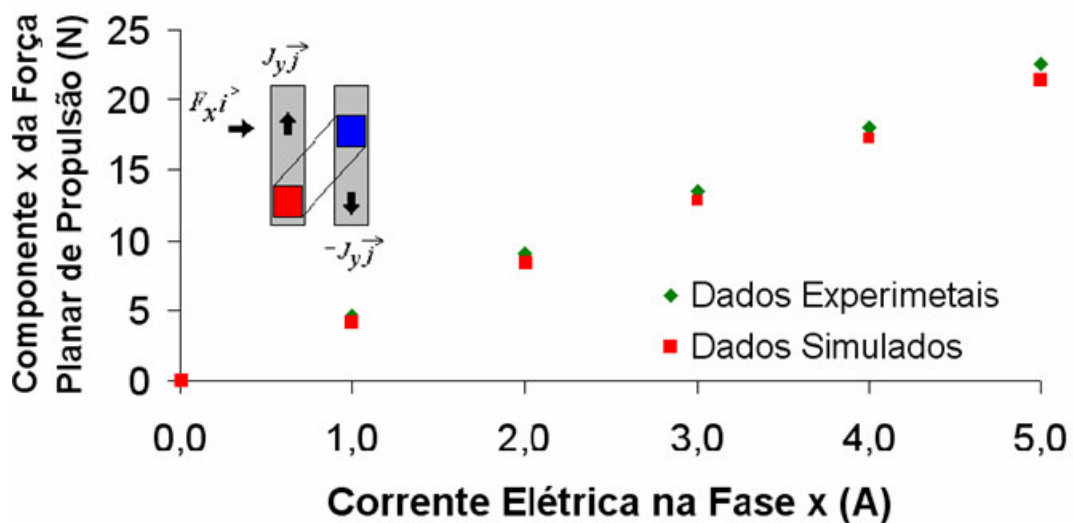


Figura 102 Aparato montado para o controle e geração da corrente elétrica aplicada à bobina.

A sensibilidade da força planar de propulsão linear obtida pela medição, quando apenas uma bobina do enrolamento x é excitada, é de 4,55414 N/A quando o núcleo é de aço AISI 1020, e de 4,53155 N/A quando o núcleo é de Somaloy 500, nas situações verificadas. Para este ensaio, a maior diferença percentual entre os resultados obtidos de forma experimental e simulada é de 4,37 % quando o núcleo ferromagnético é de aço AISI 1020 e de 4,25 % quando o núcleo é de Somaloy 500.



(a)



(b)

Figura 103 Gráficos da força planar de propulsão linear em função corrente elétrica aplicada ao enrolamento x , em alinhamento com os ímãs permanentes do carro: (a) quando o núcleo é de Aço 1020 e (b) quando o núcleo é de Somaloy 500.

Na figura 104 é apresentado um gráfico comparativo, destacando a força planar de propulsão linear na direção x , obtida através de testes experimentais, para os dois diferentes materiais dos núcleos considerados, mediante a variação da corrente elétrica introduzida na fase que se encontra em alinhamento com os ímãs permanentes do carro.

Pelas mesmas justificativas anteriormente consideradas, os resultados são bastante próximos, apresentando uma diferença percentual não superior a 0,874%.

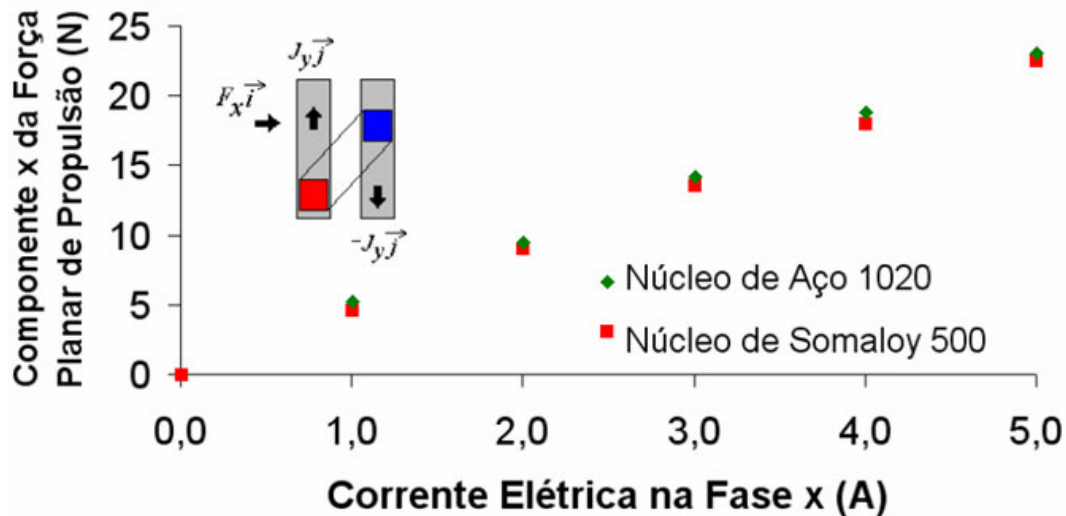


Figura 104 Força planar de propulsão linear, obtida através de testes experimentais, para os núcleos de armadura com aço AISI 1020 e Somaloy 500, quando corrente elétrica é aplicada na fase x que se encontra em alinhamento com os ímãs permanentes do carro.

Outro ensaio realizado, considerando a segunda possibilidade prática em processo experimental, trata de manter, com a mesma corrente elétrica, duas bobinas: uma do enrolamento x e a outra do enrolamento y , também em alinhamento com os ímãs permanentes do carro. Novamente, uma força planar de propulsão linear é gerada, contudo desta vez a resultante da força é dada pela associação direta das forças produzidas pelas bobinas dos enrolamentos envolvidos. O esquema montado para este ensaio é mostrado na figura 105.

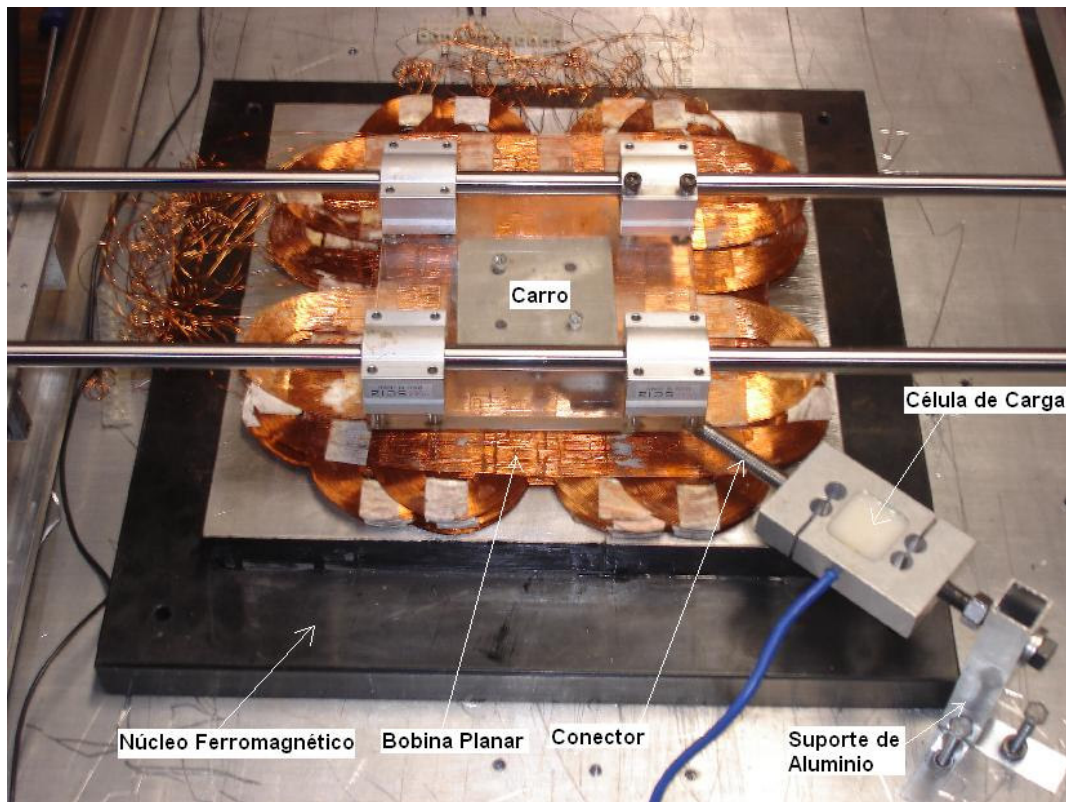
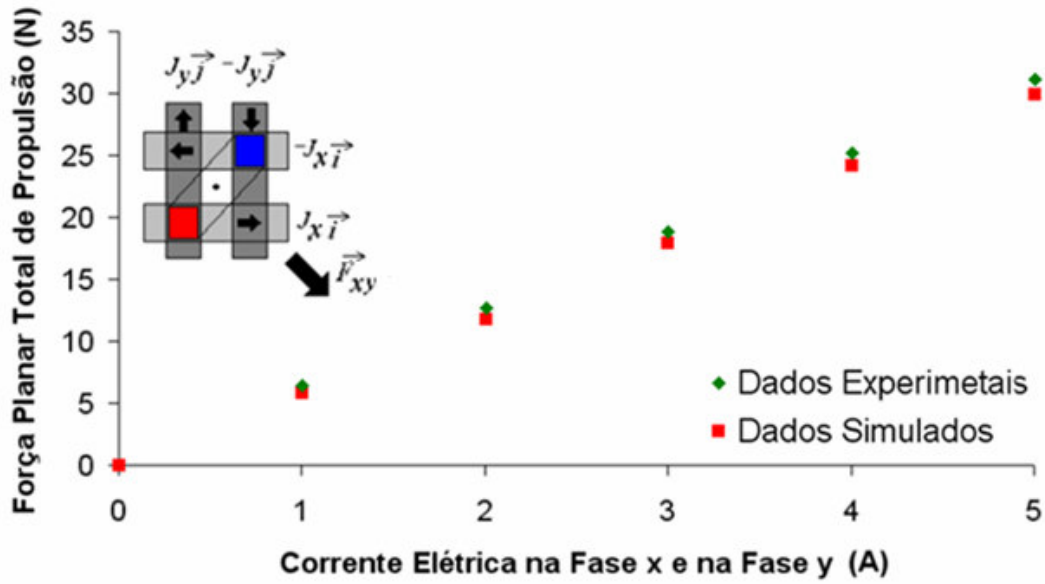


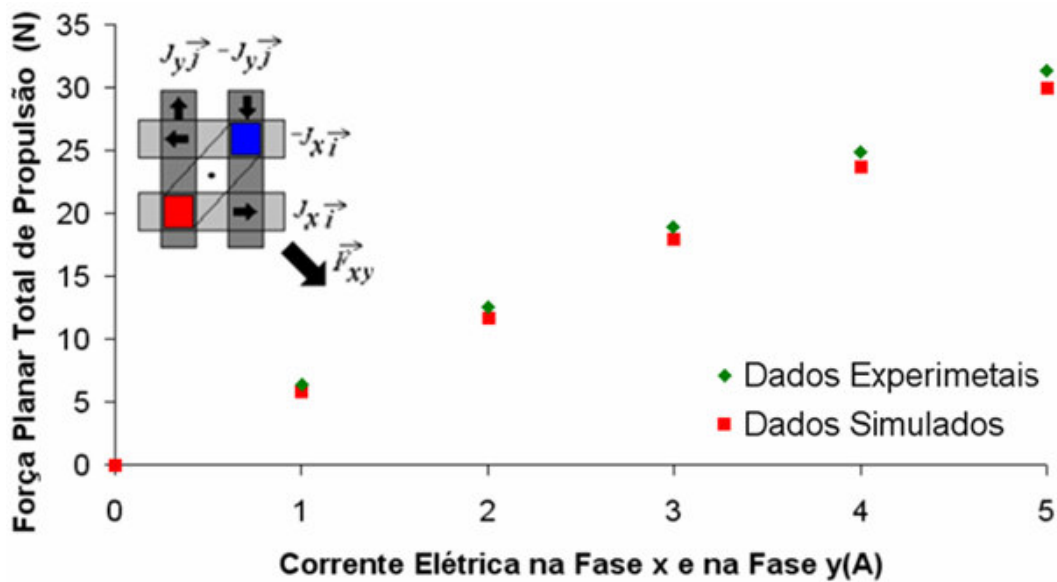
Figura 105 Montagem para a medição da força planar de propulsão quando a fase x e a fase y são energizadas.

É importante perceber, através do esquema mostrado na figura 105, que a célula de carga utilizada para a medição da força planar é colocada na direção do movimento do carro previsto e de acordo com a excitação dos enrolamentos x e y como descrita. Esta célula de carga está fixa a uma estrutura de alumínio e conectada ao carro, possibilitando que este permaneça estático. A medição da força, pela célula de carga, se dá através da deformação da mesma, que é percebida pelo seu condicionador de sinal.

A faixa de operação ensaiada varia entre zero e 5 Ampères. As bobinas dos dois enrolamentos são ligadas em série, garantindo que a mesma corrente elétrica circule por elas. A relação de força planar produzida e corrente elétrica aplicada é, a menos da reação da armadura, praticamente linear, tendência esta que é mostrada com a apresentação destes resultados nos gráficos da figura 106, que relacionam valores quando o núcleo da armadura é de Aço 1020 e quando é de Somaloy 500.



(a)



(b)

Figura 106 Gráficos da força planar de propulsão linear em função corrente elétrica aplicada ao enrolamento x e no enrolamento y , em alinhamento com os ímãs permanentes do carro, (a) quando o núcleo é de Aço 1020 e (b) quando o núcleo é de Somaloy 500.

A sensibilidade da força planar de propulsão linear quando as bobina do enrolamento x e do enrolamento y são excitadas é de 6,23574 N com o núcleo de Aço 1020 e de 6,20879 N com o núcleo de Somaloy 500.

Sob efeito de validação dos resultados apresentados, novamente foi avaliado a máxima diferença percentual entre os resultados simulados e os experimentais, ficando em 4,32% quando o núcleo é de Aço 1020 e em 5,03% quando o núcleo é de Somaloy 500. Na figura 107 é apresentado um gráfico comparativo destacando a força planar total de propulsão linear, obtida através de testes experimentais, para os dois diferentes materiais dos núcleos considerados, mediante a variação da corrente elétrica introduzida na fase x e na fase y que se encontram em perfeito alinhamento com os ímãs permanentes do carro, neste caso, a diferença máxima percentual entre os dois resultados experimentais é de apenas 1,09%.

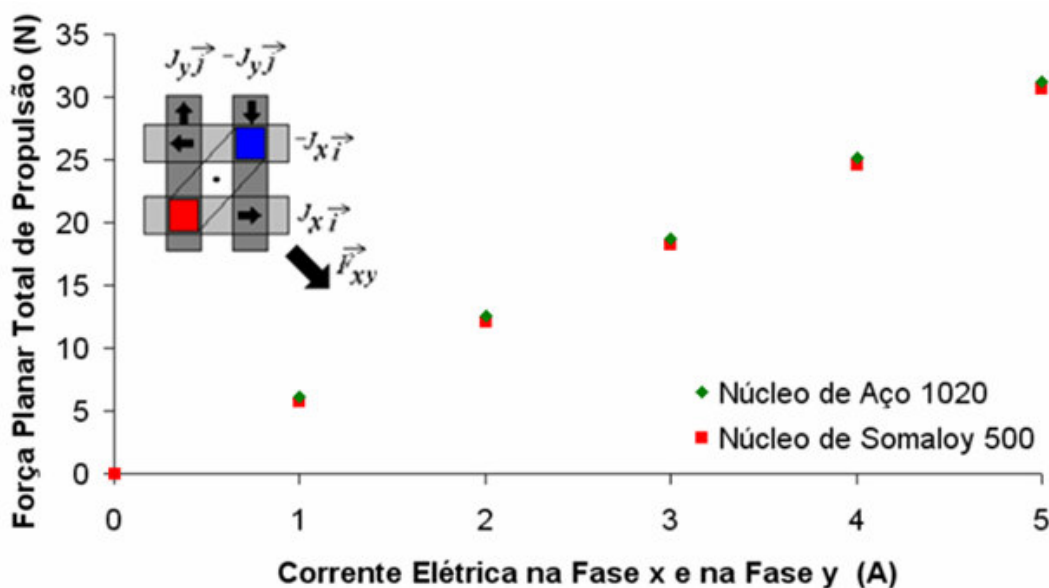


Figura 107 Força planar de propulsão linear, obtida através de testes experimentais, para os núcleos de Aço 1020 e Somaloy 500, com corrente elétrica na fase x e na fase y , que se encontram em alinhamento com os ímãs permanentes do carro.

Nota-se que a tendência de uma pequena diferença entre as forças resultantes quando o núcleo ferromagnético é alterado também é mantida para os ensaios de força planar de propulsão linear; há um ligeiro aumento, quando se utiliza o núcleo ferromagnético composto de aço, pelos mesmos motivos já relatados neste trabalho.

Para as três situações ensaiadas neste tópico do trabalho, ou seja, força normal quando a bobina do enrolamento x é excitada, força planar de propulsão linear quando a bobina do enrolamento x é excitada e força planar de propulsão linear quando a bobina do enrolamento x e a bobina do enrolamento y são excitadas, a diferença percentual encontrada entre a simulação computacional do modelo e o ensaio prático do protótipo é perfeitamente aceitável, considerando-se que em praticamente todos os casos esta se manteve abaixo dos 5%. Este resultado é importante para se ter segurança quanto aos resultados apresentados e validados desta forma e quanto às conclusões que eles permitirão se obter.

5.2 ENSAIO EM REGIME DINÂMICO

O ensaio em regime dinâmico preocupa-se em determinar a força de frenagem que atua sobre o carro, quando este sofre um deslocamento sobre o núcleo da armadura estática. Essa força é proporcional à corrente elétrica induzida no núcleo.

5.2.1 Medição das Forças de Frenagem

Um campo magnético viajante deslocando-se nas proximidades de um material eletricamente condutor, induz uma força eletromotriz neste material, quando concatena este. Sendo formado um circuito elétrico através desse material, aparece uma corrente elétrica nele induzida. Ela terá um efeito tal que se oporá à variação do campo magnético que a produziu. Isso pode se manifestar na forma de um efeito de força contrária ao movimento que produziu aquela variação, dando origem a uma força de frenagem. Esta situação ocorre no Atuador Planar em estudo, onde o carro, equipado com ímãs permanentes responsáveis pela geração de fluxo magnético de excitação, desloca-se sobre um núcleo ferromagnético que tem uma determinada resistência elétrica [3][9][67].

Em ensaios anteriores, demonstrou-se que o fluxo magnético produzido pelos ímãs permanentes sobre a armadura é praticamente o mesmo para o núcleo

ferromagnético de aço AISI 1020 e para o de Somaloy 500. Assim, pode-se assumir que a força eletromotriz induzida é também considerada a mesma em ambos os casos para as mesmas velocidades do carro. As diferenças entre os dois materiais utilizados no núcleo ferromagnético são, basicamente e do ponto de vista eletromagnético especificamente, a resistividade elétrica de e a permeabilidade magnética, que também determinam a profundidade de penetração do campo magnético. Ambos os aspectos são determinantes da corrente elétrica induzida. Espera-se que, como o Somaloy 500 apresenta uma maior resistividade elétrica que o Aço 1020, neste material seja induzida uma menor corrente elétrica em resposta ao campo magnético viajante, por conseguinte minimizando os efeitos de frenagem eletromagnética assim produzida. Isso foi verificado também experimentalmente, através de ensaios. Uma vez que a força de frenagem depende da velocidade, um método indireto para a sua determinação baseado nesta última será empregado no ensaio.

Os ensaios propostos estão divididos em duas partes. Na primeira é feito um estudo teórico para definir a obtenção experimental dos parâmetros. Na segunda etapa o protótipo é ensaiado de forma prática, considerando-se situações que ocorrem quando o Atuador Planar em estudo é acionado. Os experimentos idealizados preocuparam-se em quantificar, um coeficiente de atrito geral para três situações: quando o atuador é montado com núcleo ferromagnético de aço AISI 1020, quando montado com Somaloy 500 e quando montado sem núcleo ferromagnético, obtendo-se, assim neste último, apenas seu atrito mecânico.

5.2.1.1 Estudo Teórico - Metodologia de Ensaio

A fim de que seja feita uma avaliação teórica da situação em estudo para o caso do Atuador Planar, cria-se um modelo aproximado do que realmente se espera na prática. Este módulo simplificado tem por base o diagrama de forças mostrado na figura 108. As questões acerca desta metodologia de ensaio estão baseadas em que a força de atrito aerodinâmica, que varia com o quadrado da velocidade, é desprezada.

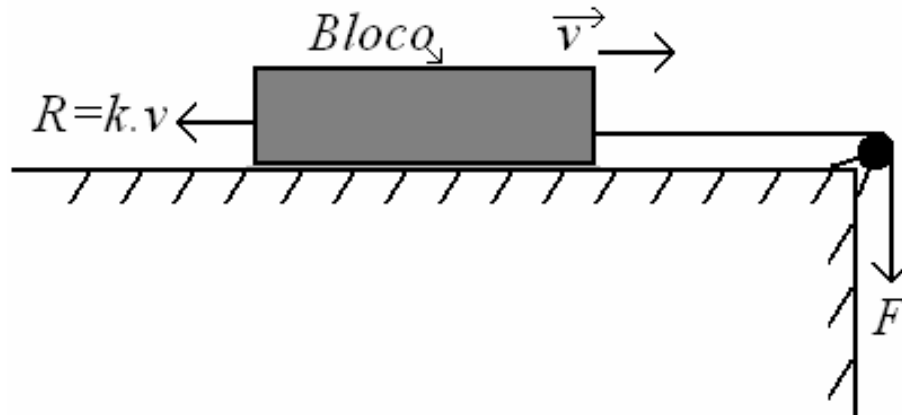


Figura 108 Diagrama esquemático de forças no Atuador Planar.

A avaliação teórica parte do pressuposto de que a força F , produzida a partir de uma massa padrão conhecida, m_{pp} , traciona o bloco de massa m também conhecida e que representa a massa total de estrutura do translator. Uma força de frenagem R , que se opõe ao movimento, tem origem nos atritos mecânico e aerodinâmico e nas correntes parasitas, oferecendo uma resistência à movimentação no sentido do deslocamento. A proposta é se considerar o efeito dessa força de frenagem como relacionado a um coeficiente de atrito geral, k , que englobará as parcelas mencionadas antes como se houvesse um efeito de atrito total [9]. É a partir disso que a modelagem se desenvolve.

$$F = m_{pp} \cdot g \quad (5.1)$$

$$R = kv \quad (5.2)$$

$$F_R = F - R \quad (5.3)$$

$$F - kv = ma = m \frac{dv}{dt} \quad (5.4)$$

$$dt = m \frac{dv}{F - kv} \quad (5.5)$$

F_R é a força resultante considerando a força de tração e a força de frenagem, k é o coeficiente de atrito geral e pressuposto constante com v , a velocidade de deslocamento do carro e g é a aceleração da gravidade igual a $9,806 \text{ m/s}^2$. A aceleração de deslocamento a é menor que a aceleração gravitacional devido ao efeito do atrito total assim considerado.

$$dt = m \frac{dv}{F - kv} \quad (5.6)$$

$$\int_0^{\tau} dt = m \int_0^v \frac{dv}{F - kv} \quad (5.7)$$

$$\tau = -\frac{m}{k} \left[\ln |F - kv| \right]_0^v \quad (5.8)$$

$$-\frac{k\tau}{m} = \ln |F - kv| - \ln |F| \quad (5.9)$$

$$-\frac{k\tau}{m} = \ln \left(\frac{F - kv}{F} \right) \quad (5.10)$$

Fazendo a substituição $\tau = t$, sendo t o tempo e $v = v$:

$$e^{-\frac{kt}{m}} = e^{\ln \left(\frac{F - kv}{F} \right)} \quad (5.11)$$

$$e^{-\frac{kt}{m}} = \frac{F - kv}{F} \quad (5.12)$$

$$F e^{-\frac{kt}{m}} = F - kv \quad (5.13)$$

$$F e^{-\frac{kt}{m}} - F = -kv \quad (5.14)$$

$$v = \frac{F}{k} - \frac{F}{k} e^{-\frac{kt}{m}} \quad (5.15)$$

$$v = \frac{F}{k} \left(1 - e^{-\frac{kt}{m}} \right) \quad (5.16)$$

A equação 5.16 acima desenvolvida prevê que a velocidade v de deslocamento do carro está diretamente ligada à força de tração F , à massa m do sistema, ao coeficiente de atrito geral k e ao tempo t de deslocamento necessário para se atingir a determinada velocidade. Sabendo-se desse comportamento teórico do sistema, o coeficiente de atrito geral pode ser obtido, considerando que

$$ma = F - R \quad (5.17)$$

$$\therefore m \frac{dv}{dt} = mg - kv \quad (5.18)$$

$$\therefore k = \frac{m}{v} \left(g - \frac{dv}{dt} \right) \quad (5.19)$$

Medido-se a velocidade e obtendo-se a sua derivada em relação ao tempo, pode-se obter k como sugerido.

5.2.1.2 Experimento Prático

O experimento prático desenvolvido preocupa-se em verificar o efeito de frenagem que atua sobre o carro em regime dinâmico, bem como seus respectivos coeficientes de atrito eletromagnético e mecânico correspondentes a cada caso analisado. Para estes testes é montado um esquema, instrumentando o Atuador Planar, conforme pode ser visto na figura 109. Nesta montagem, um peso padrão de valor conhecido é responsável pela força de tração que movimenta o carro sobre o núcleo ferromagnético da armadura estatórica. Este peso é ligado ao carro através de um fio de Nylon flexível de atrito e massa desprezíveis.

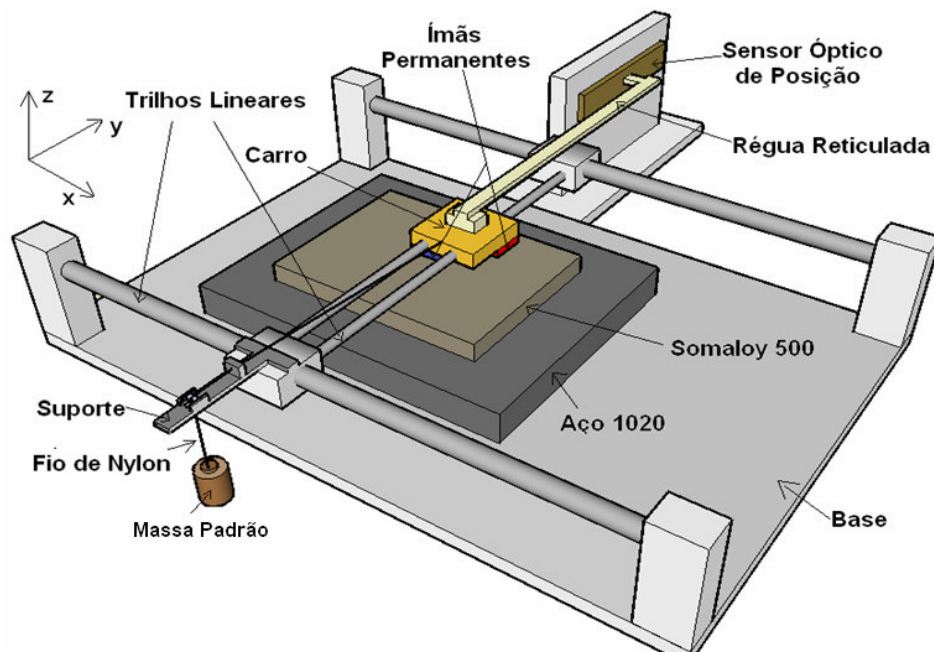


Figura 109 Esquema montado para o ensaio de força de frenagem devida às correntes induzidas pelo efeito da velocidade.

Acoplada ao carro e usando um sensor óptico, uma régua reticulada, com uma resolução mínima de 5mm, é responsável pela geração de dados de posição instantânea em função da movimentação do carro. Esses dados são adquiridos e processados por equipamentos de instrumentação e de aquisição de dados acoplados ao sistema de medição do Atuador Planar. Assim, através de um rápido processamento, pode ser feita a obtenção dos valores de velocidades instantâneas em função do tempo ao longo de uma trajetória. A figura 110 traz a ilustração fotográfica do esquema montado para os fins experimentais deste ensaio.

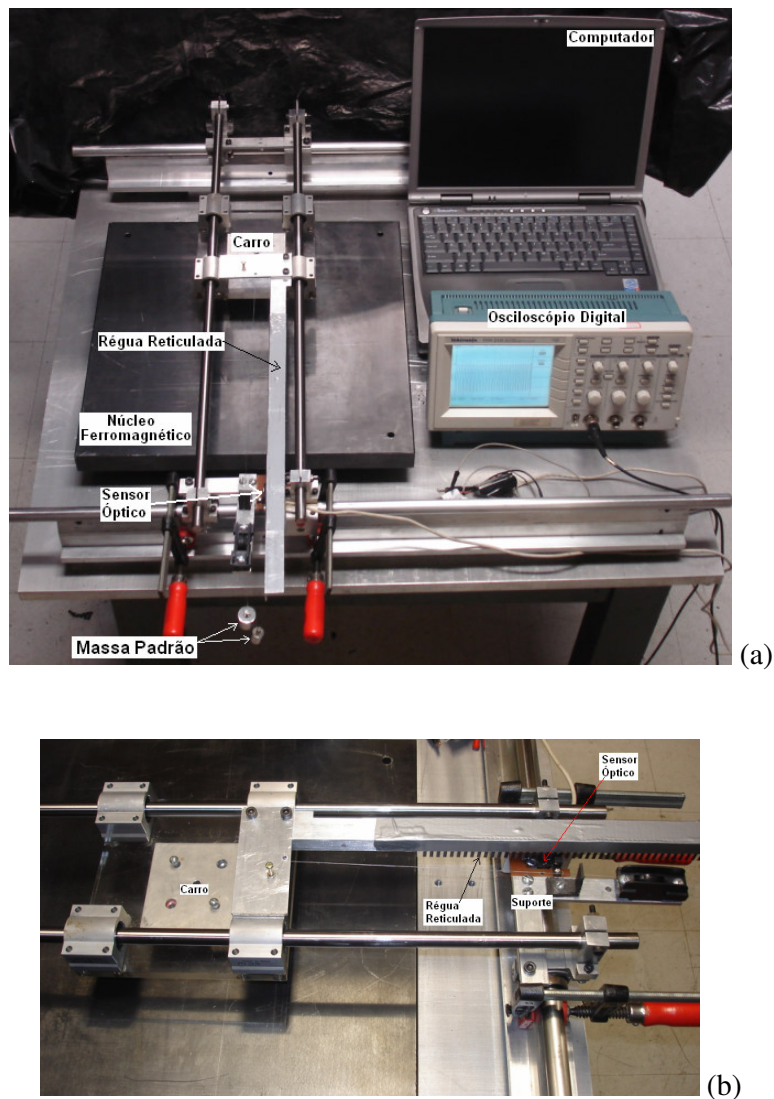


Figura 110 Fotografias do esquema montado para verificação do efeito das correntes elétricas induzidas nos dois diferentes núcleos ferromagnéticos: (a) vista geral; (b) destaque para a régua reticulada e o sensor óptico.

Um detalhe bastante importante que deve ser considerado é o fato de que os equipamentos de medição utilizados no experimento apresentam incertezas e essas, apesar de pequenas, podem causar um erro no valor medido. Assim, de forma ponderada e proporcional, teve-se o cuidado de equacionar essas incertezas, na forma de erros combinados, apresentando o erro percentual máximo para cada teste.

Para cada um dos casos estudados quanto ao material na armadura estatórica, são considerados quatro diferentes valores de pesos padrões para fazer a tração do carro e ainda diversas amostragens são obtidas com a finalidade de testar a repetibilidade dos resultados em diferentes situações e com diferentes variáveis, como temperatura e umidade ambiente. Os quatro valores de peso padrão considerados são 70, 80, 90 e 200 gramas, utilizados separadamente, gerando uma força de tração, sobre o carro, de 0,68642N, 0,78448N, 0,88254N e 1,962N, respectivamente, a partir da consideração de uma constante de aceleração gravitacional de $9,806m/s^2$.

A partir da força de tração, o carro é deslocado na direção horizontal e paralela ao plano de trabalho do Atuador. A velocidade de deslocamento encontra a oposição da força de atrito mecânico e da força gerada pelas correntes parasitas. Assim sendo, conclui-se que, se a estrutura estiver sem os ímãs permanentes e sem o núcleo ferromagnético a velocidade de deslocamento enfrenta a oposição apenas da força de atrito mecânico provocada pelos rolamentos sobre a guia de curso já que estamos desprezando o efeito aerodinâmico. A idéia de assim testar o atuador sem núcleo permitiria segregar o efeito da força de frenagem eletrodinâmica da força de atrito mecânico. Não havendo correntes induzidas no núcleo, pois não se teria este último, o efeito de atrito é unicamente mecânico a considerar no caso. No entanto uma correção se faz necessária.

A força normal de atração entre o carro com ímãs permanentes e o núcleo ferromagnético da armadura não é desprezível e carregará o sistema guia, ou seja, os rolamentos lineares e as guias cilíndricas nas quais eles correm. Isso pode afetar o coeficiente de atrito mecânico entre os rolamentos e as guias. Mas, não havendo a força normal, pois não se teria o núcleo ferromagnético da armadura nem os ímãs permanentes, esse efeito desaparece. Como se quer obter o coeficiente de atrito que corresponda à situação real, na qual a força normal e esse seu efeito estão presentes, a sua ausência tem que ser compensada. Com auxílio de uma célula de carga é determinado que o valor da força normal de atração mais o peso dos ímãs permanentes

do carro é de 39,256 N, segundos testes experimentais previamente realizados, para o entreferro de 12 mm. É possível a sua compensação com a colocação de uma massa de 4 kg sobre o carro. O monitoramento da velocidade se dá ao longo de um deslocamento máximo de 0,25 metros do carro, que, por sua vez, parte do repouso para todos os casos.

O ensaio está dividido em 12 testes numerados e descritos abaixo, considerando-se que há 4 valores diferentes de força de tração e que são ensaiadas e diferentes configurações de montagem para o atuador planar em estudo no que diz respeito ao núcleo ferromagnético. Na primeira montagem o núcleo ferromagnético e os ímãs permanentes do carro são removidos da estrutura com o objetivo de verificar o coeficiente de atrito puramente mecânico do dispositivo; já na segunda e terceira montagens, agora com os ímãs permanentes, o núcleo ferromagnético é considerado e posto no sistema a fim de que sejam verificadas as forças de atrito oriundas das correntes elétricas induzidas no núcleo somadas ao atrito mecânico.

- | | |
|---------|--|
| Teste 1 | Carro, sem os ímãs permanentes, deslocando-se sem núcleo ferromagnético com força de tração de 0,68642 N; |
| Teste 2 | Carro, com os ímãs permanentes, deslocando-se com núcleo de material ferromagnético de Somaloy 500 e com uma força de tração de 0,68642 N; |
| Teste 3 | Carro, com os ímãs permanentes, deslocando-se com núcleo de material ferromagnético de aço AISI 1020 e com uma força de tração de 0,68642 N; |
| Teste 4 | Carro, sem os ímãs permanentes, deslocando-se sem núcleo ferromagnético e com força de tração de 0,78448 N; |
| Teste 5 | Carro, com os ímãs permanentes, deslocando-se com núcleo de material ferromagnético de Somaloy 500 e com uma força de tração de 0,78448 N; |
| Teste 6 | Carro, com os ímãs permanentes, deslocando-se com núcleo de material ferromagnético de aço AISI 1020 e com uma força de tração de 0,78448 N; |

- Teste 7 Carro, sem os ímãs permanentes, deslocando-se sem núcleo ferromagnético e com força de tração de 0,88254 N;
- Teste 8 Carro, com os ímãs permanentes, deslocando-se com núcleo de material ferromagnético de Somaloy 500 e com uma força de tração de 0,88254 N;
- Teste 9 Carro, com os ímãs permanentes, deslocando-se com núcleo de material ferromagnético de aço AISI 1020 e com uma força de tração de 0,88254 N;
- Teste 10 Carro, sem os ímãs permanentes, deslocando-se sem núcleo ferromagnético e com força de tração de 1,962 N;
- Teste 11 Carro, com os ímãs permanentes, deslocando-se com núcleo de material ferromagnético de Somaloy 500 e com uma força de tração de 1,962 N;
- Teste 12 Carro, com os ímãs permanentes, deslocando-se com núcleo de material ferromagnético de aço AISI 1020 e com uma força de tração de 1,962 N.

Os resultados de velocidade instantânea, v , em função do tempo são apresentadas nas figuras 111, 112, 113 e 114. O coeficiente de atrito total resultante, k , pode ser obtido com os dados assim apresentados e utilizando a equação 5.16. Os dados estão ordenados comparativamente para as três situações. Analisando-se separadamente para cada um dos pesos padrões responsáveis pela tração do carro, percebe-se que, para um mesmo valor de força de tração, a velocidade instantânea e final é alterada em função do material utilizado no núcleo ferromagnético. Ainda para facilitar a compreensão, é posto o coeficiente de atrito médio, de cada situação.

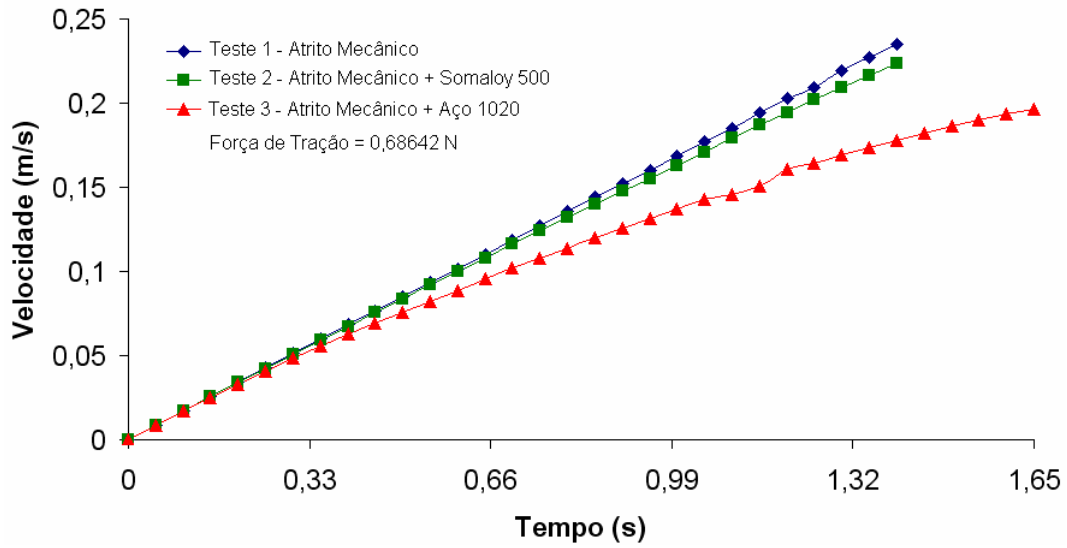


Figura 111 Gráfico relacionando dados pontuais de velocidade em função do tempo obtidas pelos testes 1, 2 e 3.

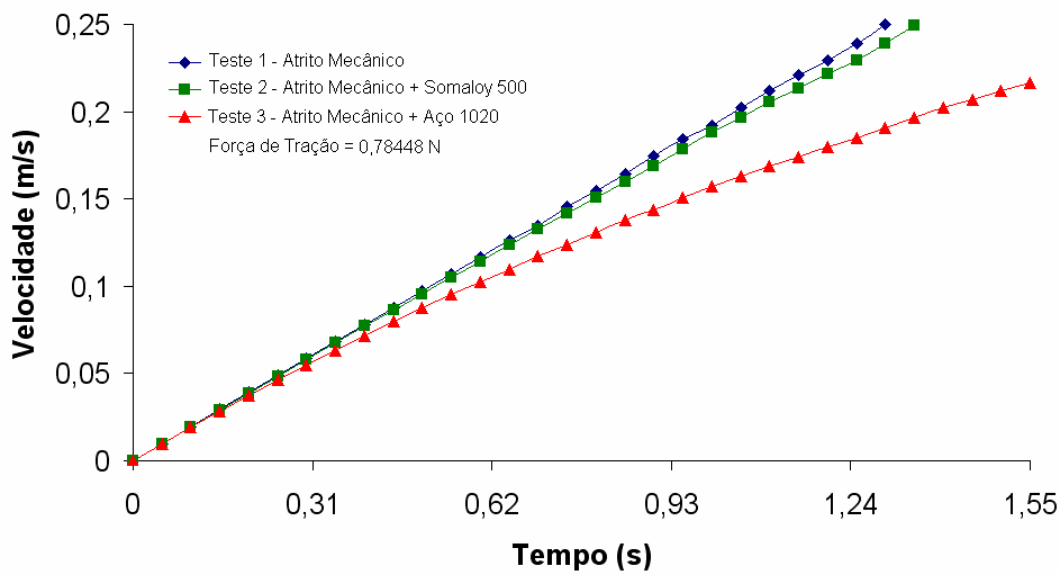


Figura 112 Gráfico relacionando dados pontuais de velocidade em função do tempo obtidas pelos testes 4,5 e 6.

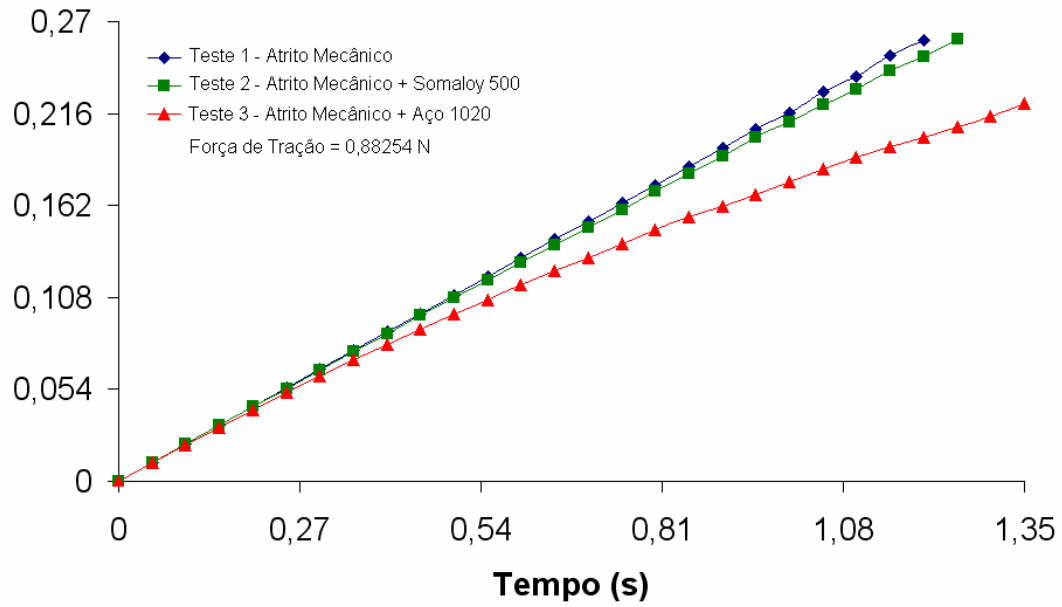


Figura 113 Gráfico relacionando dados pontuais de velocidade em função do tempo obtidas pelos testes 7, 8 e 9.

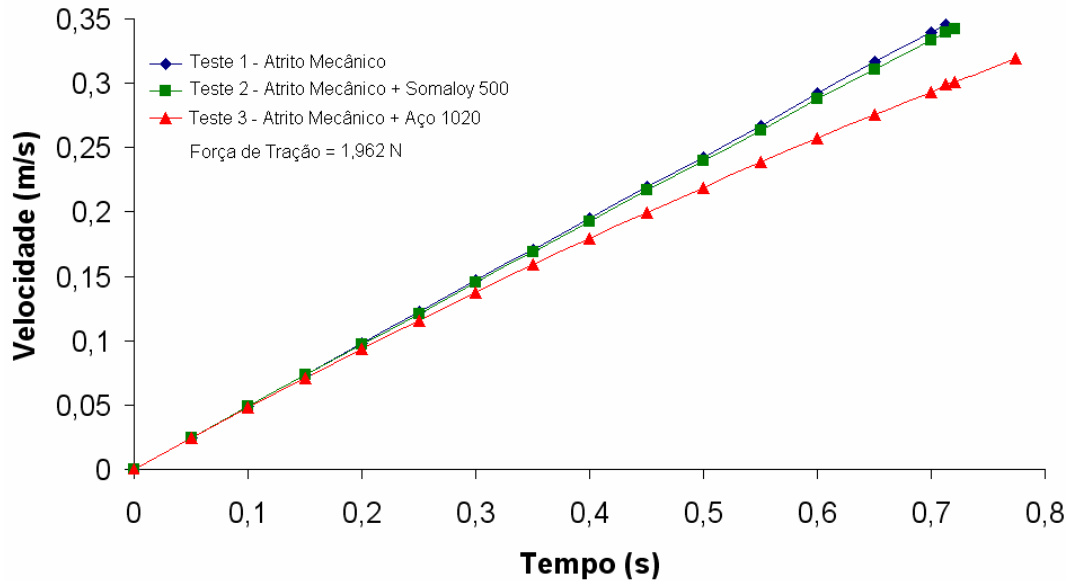


Figura 114 Gráfico relacionando dados pontuais de velocidade em função do tempo obtidas pelos testes 10, 11, 12.

A tabela 15 expõe os resultados dos 12 testes realizados, considerando as três diferentes configurações de montagem do Atuador Planar, destacando ainda o erro percentual máximo combinado para cada teste, oriundo das incertezas associadas aos equipamentos de medição utilizados.

Tabela 15 Dados relacionados aos testes 1 até 12 destacando o coeficiente de atrito médio total para cada configuração do Atuador Planar.

Força de Tração (N)	Coeficiente de Atrito Médio Total (Ns/m)			
	Sem Núcleo	Núcleo de Somaloy 500	Núcleo de aço AISI 1020	Erro Percentual Máximo (%)
0,68642	0,12435	0,38177	1,80596	0,2006660
0,78448	0,13153	0,37542	1,80125	0,2195312
0,88254	0,12445	0,36221	1,80901	0,2709172
1,962	0,11691	0,34932	1,84084	2,3152263

Como análise dos resultados apresentados na tabela 15, destaque-se que o coeficiente de atrito em cada teste com o mesmo núcleo deveria ser o mesmo, uma vez que estamos supondo que os coeficientes de atrito não variam com a velocidade. Contudo, estas diferenças encontram explicação no erro associado aos instrumentos de medição, sejam estes analógicos ou digitais. No entanto, percebe-se que as diferenças são mínimas, combinadas também com o baixo valor do erro percentual máximo.

Como é possível perceber, quando o protótipo ensaiado não está com núcleo ferromagnético, a velocidade instantânea, para cada um dos pontos monitorados, é maior, uma vez que a única limitação ao movimento é à força de atrito mecânico e aerodinâmico, se considerado. Quando é colocado um núcleo ferromagnético, além desta força, a velocidade é limitada pela força eletromagnética gerada a partir das correntes elétricas induzidas e produzidas a partir da velocidade de deslocamento do carro. Ou seja, quanto maior for a corrente elétrica induzida, maior será a força de origem eletromagnética que fará oposição ao movimento. É importante destacar que a entreferro entre os ímãs permanentes e o núcleo ferromagnético da armadura estática é constante durante todo o percurso de translação e mede 12 mm. Isso busca garantir, conforme constado em no Capítulo 4, que o fluxo de excitação seja o mesmo tanto no caso com o aço, quanto no caso com o Somaloy. Portanto, as diferença agora

encontradas em termos de força de frenagem e coeficiente de atrito geral não se devem à mudança de fluxo de excitação entre uma configuração e outra.

Para efeito de validação dos resultados apresentados, cada um dos doze testes diferentes tem seus valores amostrados 20 vezes, extraindo-se a média ponderada. Os erros percentuais, oriundos das incertezas associadas aos equipamentos de medição, ficaram abaixo de 3%, valor este que não altera significativamente o valor dos resultados obtidos.

5.2.1.3 Análise dos Resultados Teóricos e Práticos

Considerando-se à análise teórica do modelo e os resultados práticos apresentados acima para os diferentes casos em estudo, pode-se concluir que a força de frenagem eletromagnética está relacionada com a resistividade elétrica do material colocado na armadura estatórica do conjunto. Por apresentar coeficientes de atrito total bastante similares dentro de cada configuração de núcleo ferromagnético, em todos os testes realizados, são utilizados, para cada situação, os coeficientes de atrito médio [9][68]. Considerando-se isso, a força de atrito F_{At} pode ser descrita em função da velocidade e do próprio coeficiente de atrito; tem-se que

$$\vec{F}_{At} = k\vec{v} \quad (5.20)$$

$$k = k_m + k_{em} \quad (5.21)$$

$$\vec{F}_{At} = k_m\vec{v} + k_{em}\vec{v} \quad (5.22)$$

onde k é o coeficiente de atrito total, \vec{v} é a velocidade instantânea, k_m é o coeficiente de atrito mecânico e k_{em} é o coeficiente de atrito relacionado à força de frenagem eletromagnética produzida pelas correntes induzidas por efeito de velocidade.

Fazendo-se a média ponderada de cada um dos coeficientes de atrito, é possível dizer que o coeficiente de atrito mecânico é de $0,12095 \text{Ns/m}$, o coeficiente de atrito mecânico juntamente com o eletromagnético quando o núcleo é de aço AISI 1020 é de $1,86564 \text{Ns/m}$ e quando o núcleo é de Somaloy 500 é de $0,382235 \text{Ns/m}$. Sendo assim, o gráfico da figura 115 relaciona alguns pontos de velocidade em função da força de atrito total (atrito mecânico e atrito por efeito das correntes induzidas).

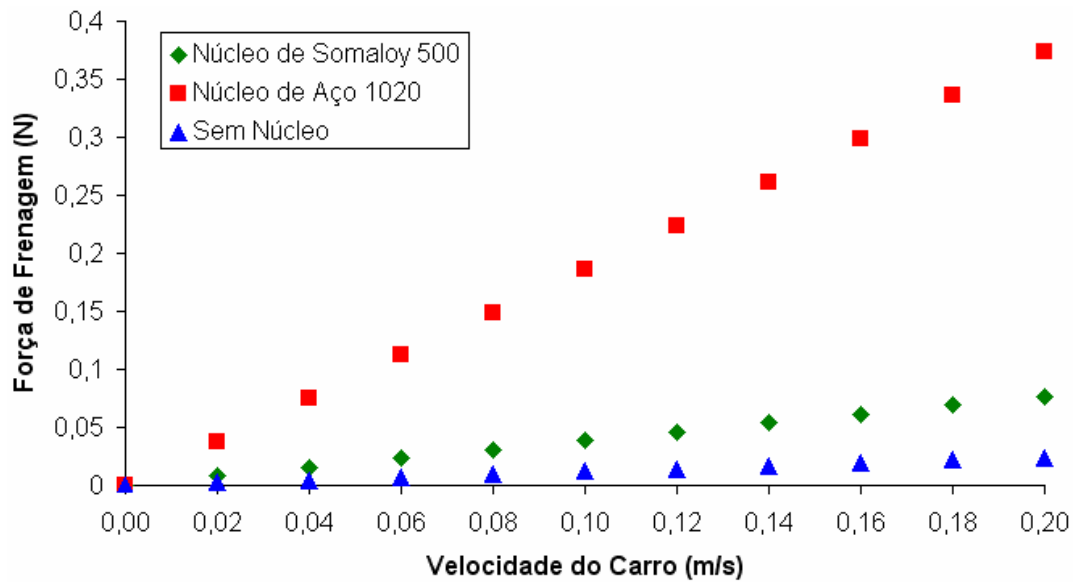


Figura 115 Gráfico da força de atrito total em função da velocidade para três situações de núcleo ferromagnético.

Pode-se ainda extrair apenas o coeficiente de atrito de origem eletromagnética para os dois núcleos utilizados nos ensaios, descontando de cada coeficiente total o coeficiente mecânico [9][68]. Isso é feito através da seguinte equação 5.23.

$$k_{em} = k - k_m \quad (5.23)$$

Desta forma, o coeficiente de atrito eletromagnético, quando o núcleo ferromagnético da armadura estática é composto de aço AISI 1020, é de $1,74469 \text{ Ns/m}$, enquanto que, para o núcleo de Somaloy 500, este coeficiente fica com valor de $0,261285 \text{ Ns/m}$. O gráfico da figura 116 mostra o valor da força de frenagem puramente eletromagnética em função da velocidade para os dois diferentes núcleos ferromagnéticos utilizados.

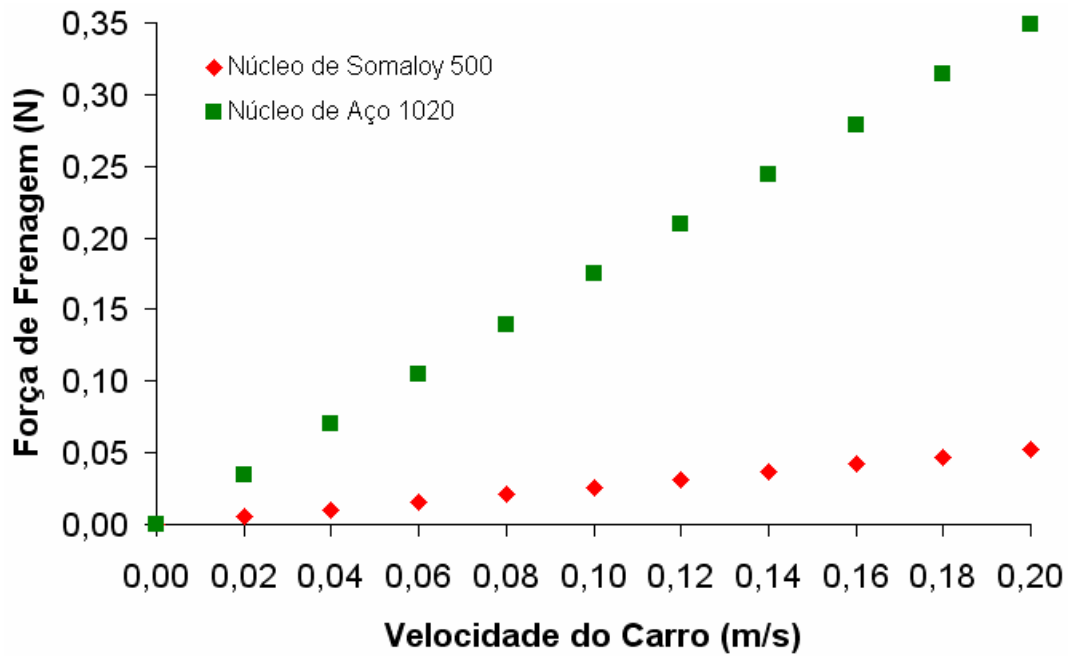


Figura 116 Gráfico da força de frenagem puramente eletromagnética em função da velocidade para dois diferentes núcleos ferromagnéticos.

Esses ensaios, somados à exposição de dados e gráficos, justificam a preocupação em analisar como os materiais afetam o desempenho de equipamentos. No caso específico do atuador planar, a força planar de propulsão linear eletromagnética aplicada para um determinado deslocamento será maior, se o núcleo apresentar um material de resistividade elétrica elevada, desde que não haja comprometimento em outras variáveis envolvidas no sistema.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesta dissertação foi apresentado um Atuador Planar com enrolamentos planares, que permite movimentação bidirecional sobre o seu plano de trabalho a partir de um único dispositivo de tração. Isso é resultado da continuidade da Tese referenciada em [10], abordando as recomendações feitas, fazendo com que o dispositivo apresente agora uma armadura estatórica com enrolamentos planejados e núcleo de material ferromagnético compósito, destacando estas como características ainda ímpares aplicadas a esse tipo de atuador, bem como a análise numérica e experimental da forma como é proposta.

A partir de uma ampla revisão da bibliografia, foram introduzidos conceitos básicos sobre motores lineares e atuadores planares, destacando as suas características construtivas, princípios de operação, aplicações e funcionalidade. Um levantamento do estado da arte sobre atuadores planares fez-se necessário a fim de determinar os estudos já realizados e as características encontradas hoje em dispositivos como o em estudo.

Uma importante colaboração da análise numérica e dos cálculos teóricos iniciais foi a determinação prévia da força normal e a da força planar de propulsão linear nas faixas de operação do Atuador Planar. Esse estudo inicial dos valores dessas grandezas permitiu a determinação das características construtivas do protótipo no que diz respeito à estrutura e o dimensionamento do sistema de suspensão, permitindo assim que fosse utilizada a estrutura do Atuador Planar apresentado em [10], fazendo-se adaptações para os casos em que se desenvolveu o estudo.

O foco principal deste trabalho é o estudo a respeito de materiais compósitos magneticamente macios, ou SMC do nome em inglês *soft magnetic composite*, que estão sendo paulatinamente utilizados pela indústria, por serem ainda uma alternativa relativamente nova. A caracterização elétrica, magnética e mecânica desse material acrescentou informações importantes acerca do estudo comparativo entre o aço (caso 1) e o SMC (caso 2), ambos com características diferentes, e usados separadamente como materiais do núcleo magnético da armadura do Atuador. As análises comparativas dos resultados experimentais e numéricos reforçaram a idéia de que apesar da diferença de permeabilidade magnética relativa entre os dois materiais utilizados no núcleo, devido à configuração em que é apresentado, a força eletromotriz induzida é praticamente a mesma nos dois casos, contudo, por apresentar uma resistividade elétrica maior, no caso 2, haverá o aparecimento de menos correntes elétricas induzidas no núcleo,

minimizando as perdas magnéticas e mecânicas por elas geradas, quando o carro é movimentado.

Inicialmente, supôs-se que, apesar da menor permeabilidade que o Somaloy 500 tem em relação ao aço AISI 1020 - cerca de sete vezes -, a densidade de fluxo magnético no entreferro seria praticamente a mesma para núcleos de ambos os materiais, devido aquele ser grande e, portanto, o maior responsável pela relutância magnética equivalente do Atuador Planar. Essa consideração pode ser verificada e validada através de resultados numéricos e experimentais coerentes e concordantes entre si. Ou seja, a determinação do ponto de operação dos ímãs permanentes e a distribuição da densidade de fluxo de excitação são definidas pelo grande entreferro que caracteriza o Atuador Planar, a despeito das permeabilidades magnéticas máximas do aço AISI e do Somaloy 500 serem muito maiores que a do ar.

A força planar de propulsão linear e a força normal também foram verificadas, em regime estático, para os dois tipos de núcleos empregados, tanto de forma numérica quanto experimental. Assim se pode comparar as diferenças entre resultados numéricos e experimentais em cada caso, como também as diferenças percentuais entre os valores simulados e experimentais entre os dois casos. Os resultados comparativos dos valores de densidade de fluxo magnético, em valores médios, sobre a face polar de um dos ímãs permanentes, são apresentados na tabela 16. Já os resultados de sensibilidade comparativos entre os valores da força planar de propulsão linear, quando somente uma bobina do enrolamento x é excitada por corrente elétrica, são apresentados na tabela 17. Na tabela 18 são apresentados os resultados comparativos com relação à força normal desenvolvida quando não há circulação de corrente elétrica nas bobinas planares.

Os valores assim obtidos e mostrados nas tabelas 16, 17 e 18 apresentaram uma boa concordância entre si. Os valores muito similares dessas grandezas analisadas são explicados pelo fato de a densidade de fluxo magnético também ser similar uma vez que a corrente elétrica aplicada, as fontes produtoras de campo magnético e a estrutura são as mesmas para todos os casos e ensaios. Estes ensaios foram especialmente importantes, porque, além de apresentar valores comparativos entre os dois materiais utilizados como núcleo ferromagnéticos, foi possível validá-los, haja vista a apresentação de uma análise numérica e uma experimental.

Tabela 16 Valores médios, numéricos e experimentais, comparativos, para os dois casos, da densidade de fluxo magnético, sobre a face polar de um dos ímãs permanentes, em regime estático, destacando as diferenças percentuais.

	Análise Numérica	Análise Experimental	Diferença Percentual
AISI 1020	0,40487 T	0,39272 T	3,00096%
Somaloy 500	0,39145 T	0,38308 T	2,13820%
Diferença Percentual	3,31464%	2,45466%	

Tabela 17 Valores de sensibilidade, numéricos e experimentais, comparativos, para os dois casos, da força planar de propulsão linear, em regime estático, destacando as diferenças percentuais.

	Análise Numérica	Análise Experimental	Diferença Percentual
AISI 1020	4,36493 N/A	4,55414 N/A	4,15468 %
Somaloy 500	4,36085 N/A	4,53155 N/A	3,76692 %
Diferença Percentual	0,09347 %	0,496032 %	

Tabela 18 Valores, numéricos e experimentais, comparativos, para os dois casos, da força normal, em regime estático, destacando as diferenças percentuais.

	Análise Numérica	Análise Experimental	Diferença Percentual
AISI 1020	39,33 N	40,65 N	3,24723 %
Somaloy 500	39,24 N	40,52 N	3,15893 %
Diferença Percentual	0,22883 %	0,31980 %	

No que diz respeito à análise dinâmica, foram avaliados alguns aspectos fundamentais e também comparativos nos dois casos estudados, quando da substituição do material do núcleo da armadura. O foco inicial desta avaliação deu-se no efeito *skin* ou efeito pelicular. É sabido que a profundidade de penetração de um campo magnético

em um meio condutor é inversamente proporcional à raiz quadrada dos produtos entre frequência ou velocidade associada do campo magnético (de deslocamento ou de excitação), permeabilidade magnética e condutividade elétrica do material. Sendo assim, as simulações dinâmicas que envolveram campo magnético demonstraram que, quando é usado o Somaloy como material do núcleo ferromagnético da armadura, a profundidade de penetração do campo magnético é maior que aquela obtida com o aço, pois neste último o campo fica mais concentrado na superfície do núcleo. Também avaliou-se que a profundidade de penetração do campo magnético, para um mesmo material, varia de acordo com a velocidade de translação deste campo. Este efeito que altera a distribuição de campo magnético no interior de um material ferromagnético, no caso o núcleo da armadura, só é passível de verificação em regime dinâmico, devido à associação de um campo magnético viajante.

Também se pode verificar, na análise estática, que a distribuição de densidade de fluxo magnético de excitação produzida pelos ímãs permanentes do carro, devido a sua movimentação, para os dois casos abordados é praticamente a mesma. Assim sendo, a taxa de variação desse fluxo magnético no tempo observada pelos dois tipos de núcleos também é semelhante. Tal taxa, que é associada ao movimento do translator sobre o núcleo da armadura, induz neste último corrente elétrica de valor inversamente proporcional à resistividade elétrica do material. Foram apresentados gráficos que comprovam essa premissa, destacando que o SMC, por apresentar uma estrutura composta por grãos de pó ferromagnético isolados entre si, tem uma maior resistividade elétrica do que o aço. A importância de se ter menos corrente elétrica induzida fundamenta-se quando explicado que essa corrente produz uma força, pela interação com a densidade de fluxo magnético de excitação, que tende a se opor a variação que produziu a primeira, ou seja, a velocidade. Esta explicação está associada à geração de um segundo campo magnético, gerado pelas correntes induzidas, diretamente proporcional à sua densidade. O efeito do aumento deste campo magnético secundário, que se apresenta em oposição ao primeiro, causa uma diminuição no seu valor nominal. Além disso, pela Lei de Lenz, explica-se que ele provoca um efeito de frenagem sobre a movimentação do translator.

Com relação à excitação pulsada das bobinas planares, apresentou-se figuras que demonstram que a densidade de corrente elétrica induzida no núcleo, a partir desta excitação é diretamente proporcional à condutividade elétrica do material utilizado como núcleo ferromagnético. Essa corrente induzida, originária da excitação das

bobinas, também se opõe à variação da densidade de fluxo magnético gerado pelos ímãs permanentes afetando a dinâmica do Atuador.

Um outro aspecto abordado na análise dinâmica numérica trata do comportamento da densidade de fluxo magnético na região central do entreferro onde há sua maior concentração. Verificou-se que o valor puntual desta grandeza examinada é maior quando o núcleo da armadura é composto de material SMC. Isso se deve ao fato de que, como há menos indução de corrente elétrica no Somaloy, há também uma menor produção de campo magnético secundário de oposição, produzindo um menor efeito de frenagem no atuador. Essa tendência é mantida para as três velocidades usadas nos testes. Contudo, à medida que a velocidade vai aumentando, a diferença percentual entre a resultante de densidade de fluxo magnético também aumenta para os dois casos. Isso é justificável uma vez que, quanto maior for a velocidade de deslocamento do fluxo magnético de excitação, maior será a indução de corrente no núcleo ferromagnético da armadura estatórica.

Finalmente, complementa-se o estudo com a análise do efeito de frenagem que essa corrente induzida provoca no deslocamento do translator. Para isso, montou-se um sistema que pudesse, ao mesmo tempo, oferecer um deslocamento ao carro e medir a sua velocidade desenvolvida em função do tempo. Pode-se verificar que, quando o núcleo da armadura é de aço AISI 1020, a velocidade instantânea, a partir de uma mesma força de tração, é menor do que quando é utilizado o Somaloy 500. Isso se explica pelo fato de que, como há uma maior densidade de corrente elétrica induzida no aço, há também a geração de uma maior força magnética, cujo efeito é de se opor à variação que induziu aquela corrente, interferindo assim, mais significativamente, no deslocamento do carro. Os gráficos apresentados de velocidade em função do tempo, bem como os dados relacionados, foram importantes, pois através deles foi possível extrair o coeficiente de atrito eletrodinâmico que a corrente induzida provoca no sistema, ficando esse em $1,74469Ns/m$ quando utilizado o Aço e em $0,261285Ns/m$ quando utilizado o SMC. Esse coeficiente determina, para cada caso, o quanto de força de frenagem, de origem eletromagnética, é responsável pelo efeito de frenagem no sistema.

A continuidade deste trabalho pode contemplar um desenvolvimento da modelagem analítica teórica mais detalhada e que depende de formas de solução de equações diferenciais que resultem na distribuição da densidade de corrente induzida como descrita. A partir daí, os efeitos da força de frenagem e mesmo das perdas Joule

associadas ao núcleo pode também ser equacionadas levando em consideração as distribuições de densidade de corrente induzida e de densidade de fluxo magnético. Esse estudo analítico deve abordar aspectos do comportamento do campo magnético em regime dinâmico, seja transitório ou permanente.

Outro estudo seqüencial relacionado a este trabalho pode determinar o projeto e implementação de um sistema de controle a laço fechado que inclua desde o reconhecimento de posição do carro sobre o plano até o devido chaveamento das bobinas planares possibilitando a adequada movimentação do translator. Este acionamento deve prever que as forças necessárias para a movimentação no eixo x pode ser diferente do que para o eixo y devido às diferenças implícitas de posicionamento de um enrolamento em relação ao outro no entreferro.

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] KRAUS, J. D.; CARVER, K. R. **Eletromagnetismo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.
- [4] BASAK, A. **Permanent-Magnet DC Linear Motor**. Oxford: Oxford Science Publications, 1996.
- [5] MILLER, T. J. E. **Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives**. Oxford: Clarendon Press, 1993.
- [6] RODRIGUES, A. LEÃO, **Design of Low Speed Linear induction Motor**. 1973, Dissertação (Mestrado), Universidade de Londres, Londres: 1973.
- [7] NASAR, S. A.; BOLDEA, I. **Linear Electric Actuator and Generator**. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [8] GIERAS, Jacek F.; PIECH, Zbigniew J. **Linear Synchronous Motors: transportation and automation systems**. Londres: CRC Press, 2000.
- [9] TIPLER, P. A. **Física**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1978. v. 2
- [10] SILVEIRA, Marília Amaral. **Estudo de um Atuador Planar**. Porto Alegre, 2003. Tese (Doutorado), Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Porto Alegre, UFRGS, 2003.
- [11] BAGGIO FILHO, Nolvi F. **Desenvolvimento de Um Motor Linear de Corrente Contínua, Brushless, com Ímãs Permanentes**. Canoas, 2005. Trabalho (Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica), Departamento de Engenharia Elétrica, Canoas, ULBRA, 2005.
- [12] FLORES FILHO, A. F. **Investigation of a Double Armature Homopolar Brushless d. c. Linear Motor**. Cardiff, 1996. Ph. D. (Thesis) , University of Wales, Cardiff, 1996.
- [13] FLORES FILHO, A. F. **Ímãs Permanentes de Terras Raras: utilização industrial**. Porto Alegre: DELET-UFRGS, 1998. (Caderno Técnico)

- [14] 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, IEEEIES, 1997. p. MC1-12.1-MC1-12.3.
- [15] EBIHARA, Daiki; WATONOBÉ, Takashi; WATADA, Massaya. **Characteristic Analysis of Surface Motor**. Tokyo, Japan: Musashi Institute of Technology, 2005.
- [16] BRENNEMANN, A. E.; HOLLIS, R. L. **Magnetic and Optical-Fluorescent Position Sensing for Planar Linear Motor**. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: Carnegie Mellon University, 1995.
- [17] JEON, Jeong Woo; CARAIANI, Mitica; KIM, Sung-Shin. **High-Precision Control of Magnetic of Magnetic Levitation System**. Korea: Korea Electrotechnology Research Institute. Machine Control and Application Group, 1995.
- [18] LEITE, Luciana Cambraia. **Identificação do Conjugado de Uma Máquina de Indução Setorial via Rede Neurais Artificiais**. Campinas, 2003. Tese (Doutorado), Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- [19] SPRENGER, Bernhard. **Planar High Speed Linear Direct Drive with Submicron Precision**. Germany, 1999. Dissertation (degree of Doctor of Technical Sciences). Swiss Federal Institute of Technology ETH Zurich, 1999.
- [20] HORIE, K.; GAO, W.; KATAKURA, K.; KIYONO, S. **High-Speed Positioning of a Surface Motor-Driven Planar Stage**. Sendai, Japan: Department of Nanomechanics, Nanosystems Engineering Laboratory, Tohoku University, 2005.
- [21] RIDA, A.; FERNANDEZ, V.; GIJS, M. A. M. **Planar Coil-Based Microsystem for the Long-Range Transport of Magnetic Beads**. Swiss: Swiss Federal Institute of Technology Lausanne. Institute of Microelectronics and Microsystems, 1996.
- [22] WALKER, A. M.; PULLEN, K. R. **An Axial Flux Machine Design with an Airgap Winding using Flat Conductors**. London, UK: Mechanical Engineering, Imperial College London, 1994 .
- [23] PARKER, B.; ESCALLIER, J. **Serpentine Coil Topology for BNL Direct Superconducting Magnets**. In: Particle Accelerator Conference, 2005, New York, USA. **Proceedings**, Knoxville, Tennessee, 2005.
- [24] 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.
- [25] 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, 2001, Nagano. **Proceedings...** Nagano: IEEJ, 2001. p. 268-273.

- [26] FLORES FILHO, Ály F. Produção de Movimento Bidirecional Através de um Novo Atuador Planar. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO - SNCA, 2001, Salvador. **Anais...** Salvador: AINST/IEEE/UFBA, 2001. TT-041.
- [27] FLORES FILHO, A. F.; SUZIM, A. A.; SILVEIRA, M. A. 3D Analysis and Simulation of a Novel Planar Actuator. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES – ICEM, 2000, Espoo. **Proceedings...** Espoo: Helsinki University of Technology, 2000. v.3, p. 1379-1383.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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, Sept., 1999.
- [31] 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.
- [32] MENDONÇA, Paulo de Tarso R. **Materiais Compostos & Estruturas:** sanduíche. 1 ed. São Paulo: Editora Manole, 2005.
- [33] PERSSON, P. Jansso. Soft Magnetic Composite Material: Use for Electrical Machines. In: Conference Electrical Machines and Drives, 1998, Newcastle Upon Tyne, UK. **Proceedings...** New York: IEE., The University Newcastle, 1998.
- [34] CHICINAS, I.; GEOFFROY, O.; ISNARD, O. POP, V. Soft Magnetic Composite Based on Mechanically Alloyed Nanocrystalline Ni₃Fe Phase. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 290-291, Part 2, April 2005, p. 1531-1534.
- [35] PERSSON, P. Jansso. **Advances in Powder Metallurgy Soft Magnetic Composite Materials for Electrical Machines.** Savoy Place, London, UK: The Institution of Electrical Engineers, Published by the IEE, 1998.
- [36] GUO, Y.; ZHU, J. G.; LIN, Z. W.; ZHONG, J. J. **3D Vector Magnetic Properties of Soft Magnetic Composite Material.** Australia: Faculty of Engineering, University

of Technology, **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. Australia, v. 302, n. 2, p. 511-516, July, 2006.

[37] GUO, Jian Zhu; GUO, Y. **Study with Magnetic Property Measurement of Soft Magnetic Composite Material and Its Application in Electrical Machines Center for Electrical Machines and Power Electronics**. Sydney, Australia: Faculty of Engineering University of Technology, 2004.

[38] BULL, S. J. Development of Soft Magnetic Composites for Low Loss Applications. 2002. Disponível em [http:// www.staff.ncl.ac.uk/s.j.bull/smc.html](http://www.staff.ncl.ac.uk/s.j.bull/smc.html). Acesso em 26 de outubro de 2006.

[39] LALL, Chaman. **Soft Magnetism: fundamentals for powder metallurgy and metal injection molding**. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1992.

[40] FERREIRA, José M. G. de Carvalho. **Tecnologia da Pulverometalurgia**. Lisboa, Portugal: Edição da Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.

[41] PERSSON, M. SMC: More than Material. Sweden, Höganäs AB. **Paper presented in Conference Magnetic Materials Based on Powder Metallurgy**, London, UK, 1998.

[42] JANSSON, P. Soft Magnetic Composites – From DC to 1 MHz with Iron Powder. Sweden, Höganäs AB. **Paper presented Powder Metallurgy World Congress**, Granada, Spain, 1998.

[43] JANSSON, P. SMC Materials: Including Present and Future Applications. Sweden, Höganäs AB. **Paper presented at PM TEC 2000 MPIF**, New York, USA, 2000.

[44] JANSSON, P. Advances in Soft Magnetic Composites Based in Iron Powder. Sweden, Höganäs AB. **Paper presented at Soft Magnetic Materials**, Gorham/Intertech Consulting, Barcelona, Spain, 1998.

[45] HANEJKO, Francis G.. **Application of High Performance Material Processing: Electromagnetic Product**. Las Vegas: Höganäs Corporation., 1998. (Catálogo Técnico)

[46] HANEJKO, Francis G. **Powder Metallurgy Materials for AC Magnetic Applications**. Washington: Höganäs Corporation. 1996. (Catálogo Técnico)

[47] ASSUMPÇÃO BASTOS, João Pedro. **Eletromagnetismo e Cálculo de Campo**. 3. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1996.

[48] EDMINISTER, Joseph A. **Eletromagnetismo**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1980.

[49] HAYT JUNIOR, William H. **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1978.

[50] FLORES FILHO, Ály Ferreira. **Aplicação de Ímãs Permanentes de Terras Raras em Máquinas Elétricas**. Porto Alegre: UFRGS, 2005 (Apostila Universitária).

- [51] NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1992, 2ª ed, v.3
- [52] ASSUMPÇÃO BASTOS, João Pedro. **Eletromagnetismo para Engenharia: estática e quase-estática**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004.
- [53] PADILHA, Fernando A. **Materiais de Engenharia: microestruturas e propriedades**. Curitiba: Editora Hemus S.A, 2000.
- [54] DIETRICH, Álvaro Batista. **Um Estudo de Correntes Induzidas em Meios Múcuos Ferromagnético**. São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2000.
- [55] STOLL, R. L. **The Analysis of Eddy Currents**. Oxford: Claredon Press, 1974.
- [56] O'HANDLEY, R. C. **Modern Magnetic Materials: principles and applications**. New York: Editora John Wiley and Sons, 2000.
- [57] AGARWAL, P. D. Eddy Current Losses in Solid and Laminated Iron. **Transaction AIEE (Communication and Electronic)**, France, v. 78, p. 169-181, 1959.
- [58] STEGEMANN, Dieter. **Fundamentos do Método de Correntes Parasitas**. Jülich: Forschungszentrum Jülich GmbH, 1990. v. 1. Scientific Series of the International Bureal.
- [59] SALES, Mailto. NdFeB Magnet Manufacturer. Disponível em http://www.chinamagnets.com/document/NdFeB_Magnet.pdf. Acesso em 30 de agosto de 2006.
- [60] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Electrical Conductors: Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials. **Annual Book of ASTM Standards**, ASTH, 1998. Section 2, v. 02.03, B193 – 95.
- [61] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Rubber, Natural and Synthetic: General Test Methods: Standard Test Method for Rubber Chemicals - Density. **Annual Book of ASTM Standards**, ASTH, 1998. Section 9, v. 09.01, D 1817 -96.
- [62] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Magnetic Properties; Materials for Thermostats, Electrical Heating and Resistance, Contacts, and Connectors: Standard Test Method for Electrical Resistivity of Soft Magnetic Alloys. **Annual Book of ASTM Standards**, ASTH, 1998. Section 3, v. 03.04, A712 - 75.
- [63] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Construction: Soil and Rock (I): Standard Test Method for Density of Soil in Place by the Rubber Balloon Method. **Annual Book of ASTM Standards**, ASTH, 1998. Section 4, v. 04.08, D 2167 - 94.

[64] BARBOSA, Valmar Carneiro; BREITSCHAFT, Ana Maria Senra. Um Aparato Experimental para o Estudo do Princípio de Arquimedes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, v. 28, p. 115 – 122, 2005.

[65] MAINIER, Fernando B., SILVA, Paulo C. F. Revestimento de Níquel-Fósforo Aplicado em Equipamentos Utilizados na Produção de Petróleo. In: **SEMANA DE ENGENHARIA DA UFF, SEMINÁRIO FLUMINENSE DE ENGENHARIA**, 2005, Niterói, Rio de Janeiro, Anais... Rio de Janeiro: Editora da UFF, 2005.

[66] HAMILTON, A.. **Processo de Sinterização**. Santa Catarina: Faculdade de Engenharia Industrial Mecânica da UFSC, 2000.

[67] MELCHER, James R. **Continuum Electromechanics**. Cambridge: MIT Press, 1981.

[68] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física**. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2002, v.3.

[69] FLORES FILHO, A. F.; BAGGIO FILHO, N. F.; SILVEIRA, M. A. Dynamic Analysis of XY-Actuator Applying Soft Magnetic Composite (SMC) in the Armature Core. IN: MAGNETISM AND MAGNETIC MATERIALS CONFERENCE, 2007, Tampa, Florida, USA.

[70] FLORES FILHO, A. F., BAGGIO FILHO, N. F., SILVEIRA, M. A. Analysis of the force produced by speed- induced eddy currents in XY-actuator. IN: INTERNATIONAL MAGNETISM CONFERENCE, 2008, Madri, Espanha.

[71] 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.