

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

METODOLOGIA DE ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS  
COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MACIOS APLICADOS EM ATUADOR PLANAR DE  
INDUÇÃO

João Mota Neto

Tese para obtenção do Título de Doutor  
em Engenharia

Porto Alegre  
Dezembro de 2015

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

METODOLOGIA DE ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS  
COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MACIOS APLICADOS EM ATUADOR PLANAR DE  
INDUÇÃO

João Mota Neto  
Mestre em Engenharia

Trabalho realizado junto ao Laboratório de Transformação Mecânica do Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPG3EM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração: Processo de Fabricação

Porto Alegre

2015

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração em Processos de Fabricação, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Lirio Schaffer

Prof. Dr. Eng. Moisés de Mattos Dias (FEEVALE)

Prof. Dr. Eng. Oswaldo Hideo Ando Junior (ILATTI - UNILA)

Prof. Dr. Eng. Giuliano Arns Rampinelli (UFSC)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador do PPGE3M

*Bushidô.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha família por sempre me apoiar em minhas decisões e escolhas.

A minha esposa Michele, pelo amor, paciência, dedicação e compreensão

Ao meu orientador, Professor Dr. Eng. Lírio Schaeffer pelo apoio e confiança no desenvolvimento do tema.

Ao Laboratório de Transformação Mecânica - LdTM da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, coordenado pelo Prof. Dr. Eng. Lírio Schaeffer, pelo fornecimento da estrutura e equipamentos utilizados na execução deste projeto.

Ao Prof. Dr. Eng. Moisés de Mattos Dias, pelo auxílio nos testes realizados na FEEVALE.

Ao Diretor da Faculdade SATC, Carlos Antonio Ferreira pelo incentivo em continuar meus estudos.

Aos meu colegas de trabalho da SATC, em especial Anderson Diogo Spacek e Oswaldo Hideo Ando Junior pelo apoio e contribuição deste trabalho.

Ao eng. Wilson pela colaboração nos assuntos relacionados a metalurgia do pó

À todos os amigos e colegas, pela compreensão de minha ausência e incentivo.

À Faculdade SATC por ter me oportunizado mais esta conquista.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VIII
LISTA DE TABELAS .....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS .....	XV
RESUMO .....	XVII
ABSTRACT .....	XVIII
1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1 Justificativa e Relevância .....	20
1.2 Objetivo .....	20
1.3 Organização do Trabalho.....	21
2. Revisão de ATUADORES PLANARES DE INDUÇÃO.....	23
2.1 Funcionamento do Atuador Planar de Indução .....	23
2.2 Atuadores Planares de Indução - API.....	27
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	39
3.1 Metalurgia do Pó .....	39
3.1.1 Compactação dos Pós Metálicos .....	41
3.1.2 Processo de Cura de Compósitos Metálicos .....	41
3.2 Propriedades Magnéticas .....	42
3.2.1 Comportamento dos Materiais Magnéticos Quanto a Permeabilidade .....	43
3.2.2 Indução por Saturação Máxima ( $B_{max}$ ) .....	44
3.2.3 Curva de Histerese .....	45
3.3 Considerações Gerais sobre Materiais Compósitos.....	46
3.3.1 Benefícios de Compósitos Magnéticos Macios .....	47
3.3.2 Material Compósito Macio 1P Somaloy 500® .....	48
3.3.3 Material Supermalloy .....	54
3.3.4 Compósitos a Base de Ferro-Cobalto .....	57
3.3.5 Propriedades Magnéticas de Materiais Compósitos Magnéticos Macios	

Avaliados em Ampla Faixa de Frequência de Excitação .....	59
4.1 Comparações Construtivas dos Núcleos Empregados no Atuador Planar de Indução .	64
4.2 Confeção dos Núcleos Reduzidos.....	66
4.2.1 Núcleo Reduzido em Aço ABNT 1020 .....	66
4.2.2 Núcleo Reduzido em Ferro Resinado .....	67
4.2.3 Núcleo Reduzido em <i>SMC 1P Somaloy 500</i> <sup>®</sup> .....	68
4.3 Núcleo Completo.....	69
4.4.1 Bancada de Testes .....	71
4.4.2 Circuito de Potência.....	71
4.4.3 Implementação da Aquisição de Dados.....	72
4.5 Procedimento de Leitura da Corrente Elétrica Induzida pelo Núcleo Reduzido.....	74
5. MODELAGEM NUMÉRICA .....	80
5.1. Considerações Sobre o Método de Elementos Finitos .....	80
5.2. Modelo Numérico do Atuador Planar de Indução.....	82
5.2.1 Principais Características dos Núcleos Empregados no Atuador Planar de Indução .....	82
5.2.2 Simulações do Núcleo Reduzido Implementado no Atuador Planar de Indução .....	85
5.2.3 Simulações do Núcleo Completo Implementado no Atuador Planar de Indução .....	91
6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	92
6.1 Força de Propulsão Planar .....	92
6.1.1 Validação do Modelo Reduzido Fabricado com <i>SMC 1P Somaloy 500</i> <sup>®</sup> .....	92
6.1.2 Validação do Modelo Completo Fabricado com <i>SMC 1P Somaloy 500</i> <sup>®</sup> .....	94
6.2 Validação do Modelo Completo Fabricado com Aço ABNT 1020 .....	97
6.3 Validação do Modelo Completo Fabricado com Ferro Resinado .....	98
7. conclusões.....	102
8. Sugestão para TRABALHOS FUTUROS.....	104
9. referências.....	105
LISTA DE anexos .....	112
ANEXO A - Dimensões do núcleo completo implementado no Atuador Planar de Indução .	113
ANEXO B - Dimensões do núcleo reduzido implementado no API .....	114

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Fluxograma de Pesquisa e Experimento dos Estudos da Tese .....	22
Figura 2.1 - Transformação elemental de um motor rotativo em um atuador linear[7].....	24
Figura 2.2 - Alocação dos enrolamentos no núcleo reduzido.....	24
Figura 2.3 - Interação do campo magnético produzido no primário com secundário.....	25
Figura 2.4 - Representação de um Atuador Linear de Indução [9].....	26
Figura 2.5 - Aspecto transversal do atuador linear de indução : a) com placa de ferromagnético; b) sem placa [1].....	26
Figura 2.6 - Vista do atuador planar de Indução e suas partes [11].....	27
Figura 2.7 - Força de propulsão planar no enrolamento $x$ é energizado com tensão primária RMS [15] .....	28
Figura 2.8 - Força planar de propulsão linear <i>versus</i> tensão elétrica primária RMS, quando os enrolamentos $x$ e $y$ são excitados [15].....	29
Figura 2.9 - Estrutura proposta por Silveira para o atuador planar de indução trifásico (API) [5] .....	30
Figura 2.10 - Vista frontal do atuador planar, destacando a região do carro [5].....	30
Figura 2.11 - Força de propulsão planar <i>versus</i> correntes nas fases bobina $x$ localizada sob os ímãs permanentes [18] .....	31
Figura 2.12 - Densidade de fluxo magnético no eixo $z$ [18] .....	32
Figura 2.13 - <i>Layout</i> simplificado da concepção do atuador planar [19].....	33
Figura 2.14 - Suspensão e Diagrama de Força de Impulso do Atuador Planar Indução [19]. .....	33
Figura 2.15 - Topologia proposta para o Núcleo Primário composto por 36 ranhuras [8] .	34
Figura 2.16 - Estrutura da bancada de testes aplicada na validação da proposta do Atuador Planar de Indução com 36 ranhuras [8] .....	35
Figura 2.17 - Força de propulsão gerada pelo Atuador Planar de Indução [20].....	36
Figura 2.18 - Força de normal gerada pelo Atuador Planar de Indução [20].....	36



Figura 2.19 - Proposta do Atuador Planar com seis graus de liberdade [21] .....	37
Figura 2.20 - Resposta do sistema em malha aberta do eixo z do atuador planar de seis graus de liberdade [21] .....	38
Figura 2.21 - Resposta do sistema com estrutura de controle proposta em malha fechada do eixo z do atuador planar de seis graus de liberdade [21].....	38
Figura 3.1 – Processo da metalurgia do pó [30].....	40
Figura 3.2 - Curva BH com excitação em corrente contínua para SMC 1P Somaloy 500® [48] .....	44
Figura 3.3 - Exemplo de laço de histerese (Ferro puro) .....	45
Figura 3.4 - Posicionamento do Somaloy® entre outros materiais quanto Indução x Frequência [44, 49].....	48
Figura 3.5 - Características do Somaloy: (a) Tamanho aproximado da partícula de ferro; e (b) Disposição da camada isolante entre partículas [50] .....	49
Figura 3.6 - Permeabilidade relativa x campo magnético para aço 3% Si laminado e um material SMC [31] .....	51
Figura 3.7 - Comparativo das Curvas B-H do Aço Laminado e 1P Somaloy 500® [62] ...	52
Figura 3.8 - Terminação dos pontos críticos em relação à pressão e temperatura referente 1P Somaloy 500® [66] .....	54
Figura 3.9 - Influência da pressão de compactação sobre as perdas do núcleo e permeabilidade relativa inicial [65].....	56
Figura 3.10 Influência do teor de polímetro sobre a evolução das perdas do núcleo e da permeabilidade relativa[68].....	57
Figura 3.11 Influência do teor de polímetro sobre a evolução das perdas do núcleo na faixa de 100Hz a 100KHZ. A pressão de compactação para todos os pós compactados é 700 MPA. [67].....	58
Figura 3.12 - Diagrama de fases Fe-Co [74].....	60
Figura 3.13 - (a) Protótipo para realização de teste; (b) Modelo Numérico de Simulação tridimensional do protótipo [76].....	60
Figura 3.14 - Laços de histerese para (a) 5 Hz; (b) 1000 Hz [76] .....	61
Figura 3.15 - Densidade do fluxo magnético circular geométrico [76].....	63
Figura 3.16 - Intensidade do fluxo magnético geométrico para 50Hz [76].....	63
Figura 4.1 - Fluxograma do procedimento experimental da Tese.....	63
Figura 4.2 - Desenho em perspectiva arquiteturas de núcleo: (a) núcleo completo; (b) núcleo reduzido [79].....	64

Figura 4.3 - Esquema representativo das ligações elétricas das bobinas no primário: (a) enrolamento do eixo X no núcleo completo; (b) enrolamento do eixo Y no núcleo completo e (c) enrolamento do eixo X no núcleo reduzido [1].....	65
Figura 4.4 Desenho esquemático da vista inferior do API com identificação da localização das bobinas e das direções dos campos transladantes: (a) núcleo completo; (b) núcleo reduzido.....	66
Figura 4.5 - Núcleo reduzido fabricado em Aço ABNT 1020 com as bobinas alocadas: (a) Vista inferior; e (b) Translador.....	67
Figura 4.6 - Núcleo reduzido fabricado em Ferro resinado com as bobinas alocadas: (a) Vista inferior; e (b) Translador.....	68
Figura 4.7 - Núcleo reduzido fabricado em 1P Somaloy 500 <sup>®</sup> com as bobinas alocadas: (a) Vista inferior; e (b) Translador.....	68
Figura 4.8 - Núcleo completo com as bobinas alocadas: (a) Vista inferior; e (b) Translador.....	69
Figura 4.9 - Visão geral do protótipo construído para testes do Atuador Planar de Indução.....	70
Figura 4.10 - Visão geral do protótipo construído para testes do Atuador Planar de Indução.....	71
Figura 4.11 - Circuito eletrônico de acoplamento do inversor de frequência.....	72
Figura 4.12 - Detalhe do acoplamento da célula de carga para medição de força linear do API.....	73
Figura 4.13 – Circuito de condicionamento da célula de carga.....	74
Figura 4.14 - Translador do atuador planar de indução composto com núcleo reduzido....	75
Figura 4.15 - Corrente elétrica de saída em função da variação da corrente elétrica de entrada, com manutenção do entreferro em 5 mm.....	76
Figura 4.16- Corrente de saída em função do entreferro, para correntes de entrada (Real e Simulação) de 1, 2 e 3A.....	76
Figura 4.17 - Translador do atuador planar de indução composto com núcleo completo...77	77
Figura 5.1 - Modelo de núcleo reduzido em projeção do plano de simetria inserido no software MAXWEL V13.....	83
Figura 5.2 – Visualização da malha gerada para o modelo reduzido no software FEMM 4.2.....	84
Figura 5.3 – Modelo completo implementado no MAXWELL V13[86].....	85
Figura 5.4 – Aspectos da simulação com núcleo reduzido.....	86

Figura 5.5 – Resultados das simulações referente ao Coeficiente Geral do núcleo reduzido [87].....	88
Figura 5.6 – Resultado das simulações referente à força no eixo x, desenvolvido pelo núcleo reduzido [87].....	89
Figura 5.7 – Resultado das simulações referente à força no eixo z, desenvolvido pelo núcleo reduzido [87].....	90
Figura 5.8 – Resultado das simulações referente às perdas no núcleo reduzido [87].....	90
Figura 5.9 – Resultado das simulações referente à força no eixo x, desenvolvido pelo núcleo completo [87].....	91
Figura 6.1 - Força planar de propulsão linear no eixo $x$ sob diferentes níveis de tensão para os núcleo reduzido, obtidos por medições experimentais e numéricos.....	93
Figura 6.2 - Corrente elétrica consumida obtidas por medições experimentais e numéricos sob diferentes níveis de tensão para os núcleo reduzido.....	94
Figura 6.3 – Resultados computacionais comparativos da força planar de propulsão no eixo $x$ sob diferentes níveis de tensão aplicadas nos núcleos reduzido e completo.....	95
Figura 6.4 - Força de propulsão planar no eixo $X$ sob diferentes níveis de tensão para os núcleo reduzido confeccionado com Aço ABNT 1020, obtidos por medições experimentais e numéricos.....	97
Figura 6.5 - Força de propulsão planar no eixo $x$ sob diferentes níveis de tensão para os núcleo reduzido confeccionado com Ferro resinado, obtidos por medições experimentais e numéricas.....	98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1- Parâmetros de comparativos dos quatros tipos de Somaloy® [21, 61, 62].....	50
Tabela 3.2 - Características elétricas e magnéticas do SMC 1P Somaloy 500® [12, 62] ....	50
Tabela 3.3 - Resistividade elétrica $\rho$ e densidade $\varphi$ de amostras de Supermalloy [67]. ....	55
Tabela 3.4 - Propriedades do Permendur e Supermendur (Alta pureza CoFe-2%V) [72,73].....	58
Tabela 4.1: Características Técnicas da Célula de Carga.....	73
Tabela 4.2- Comparativo entre o núcleo em Aço ABNT 1020 completo real e simulado..	78
Tabela 4.3 - Comparativo entre o núcleo reduzido em Aço ABNT 1020 e simulado.....	78
Tabela 4.4 - Comparativo entre materiais aplicado na confecção núcleo completo simulado.....	79
Tabela 5. 1 - Resultados das simulações do API com Núcleo Reduzido [87].....	87
Tabela 6.1- Comparação dos resultados médios de força de propulsão planar entre os resultados experimentais e numéricas para deslocamento no eixo x.....	93
Tabela 6.2- Comparação entre a força de propulsão planar gerados pelos núcleos reduzido e completo.....	95
Tabela 6.3- Comparação entre a força de propulsão planar gerados pelos núcleos reduzido e completo.....	96
Tabela 6.4- Comparação dos resultados numéricos e analíticos, obtidos com núcleo completo [1].....	96
Tabela 6.5- Comparação entre a força de propulsão planar gerados pelos núcleos reduzido e completo.....	98
Tabela 6.6- Comparação entre a força de proppulsão planar gerados pelos núcleos reduzido	

e completo.....	99
Tabela 6.7 - Comparativo entre o consumo dos três materiais aplicado na confecção núcleo reduzido simulado.....	100
Tabela 6.8 – Consumo energético do núcleo completo fabricado com 1P Somaloy 500® .....	100
Tabela 6.9 – Consumo energético do núcleo completo fabricado com Aço ABNT 1020.....	100
Tabela 6.10 – Consumo energético do núcleo completo fabricado com Ferro Resinado.....	101

## LISTA DE ABREVIATURAS

2D	Bidimensional;
API	Atuador Planar de Indução Trifásica;
CA	Corrente Alternada;
Curva BH	Gráfico da intensidade da Indução Magnética em função do módulo do Campo Magnético aplicado em determinado material
FEMM	Metodo dos Elementos Finitos Magnéticos ( <i>Finite Element Magnetics Method</i> );
HR	Alta Resisitividade ( <i>High Resistivity</i> );
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica;
MP	Metalurgia do Pó;
FEM	Metodo dos Elementos Finitos ( <i>Finite Elements Methods</i> );
PWM	Modulação por Largura de Pulsos;
RMS	Valor eficaz ( <i>Root Mean Square</i> );
SMC	Compósito Magnético Macio ( <i>Soft Magnetic Composite</i> );
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Corrente elétrica	[A]
$B_x$	Densidade de fluxo magnético no eixo x	[T]
$B_y$	Densidade de fluxo magnético no eixo y	[T]
$B_z$	Densidade de fluxo magnético no eixo z	[T]
$B$	Densidade de fluxo magnético	[T]
$B_{mag}$	Indução magnética	[T]
$B_{gz}$	Componente z da densidade de fluxo magnético	[T]
$B_{max}$	Indução por Saturação Máxima	[T]
$B_{pico}$	Máxima Indução Magnética	[T]
$B_r$	Magnetização remanente	[T]
$BH$	Produto energético	[J/m <sup>3</sup> ]
$G_g$	Coefficiente Geral	[N/W]
$C_1$	Força no eixo x em função da corrente elétrica	[N/A]
$C_2$	Força no eixo z em função da corrente elétrica	[N/A]
$C_3$	Perdas elétricas	[W/A]
$C_g$	Coefficiente Geral	[N/W]
$C_I$	Corrente Induzida	[A]
$C_L$	Perdas no Núcleo	[W/kg]
$C_{cons}$	Consumo de energia elétrica do API	[W/N]
$f$	Frequência	[Hz]
$E$	Tensão Elétrica	[V]
$E_{ferro}$	Entreferro	[mm]
$E_T$	Tensão Elétrica Trifásica por Fase	[V]
$F_z$	Força no Eixo z	[N]
$F_x$	Força no Eixo x	[N]
$F$	Força de propulsão planar	[N]

$F_{px}$	Componentes x da Força planar de propulsão	[N]
$F_{rx}$	Força resultante no Eixo x	[N/A]
$F_{rz}$	Força resultante no Eixo z	[N/A]
$H$	Intensidade campo magnético	[A/m]
$H_c$	Coercitividade magnética ou força coercitiva	[A/m]
$H_x$	Campo magnético no eixo x	[kA/m]
$H_y$	Campo magnético no eixo y	[kA/m]
$H_z$	Campo magnético no eixo z	[kA/m]
$I$	Corrente elétrica na fase x	[A]
$I_{ent}$	Corrente elétrica aplicada no API	[A]
$I_{input}$	Corrente Elétrica de Entrada	[A]
$I_{real}$	Corrente Elétrica de Saída Real	[A]
$I_{sim}$	Corrente Elétrica de Saída Simulada	[A]
$O_l$	Perdas no Núcleo	[W/A]
$R$	Resistência	[ $\Omega$ ]
$V$	Tensão elétrica trifásica	[V]
$V_{ent}$	Tensão aplicada no API	[V]
$V_f$	Tensão Elétrica Trifásica, por fase	[V]
$Perdas_{el}$	Perdas elétricas totais no API	[W]
$P$	Múltiplo de unidade de pressão, Mega Pascal	[MPa]
$P_{el}$	Perdas Elétricas no Translador	[W/A]
$T$	Temperatura	[ $^{\circ}$ C]
$t$	Tempo	[s]

### Símbolos Gregos

$\sigma_e$	Condutividade elétrica	[s/cm]
$\lambda$	Condutividade térmica	$W(mK)^{-1}$
$\mu_{material}$	Permeabilidade magnética do materia	[H/m]
$\mu_{m\acute{a}x}$	Permeabilidade magnética máxima	[H/m]
$\mu_r$	Permeabilidade magnética relativa	[ - ]
$\mu_o$	Permeabilidade magnética do vácuo	[H/m]
$\gamma$	Peso Específico	[N/m <sup>3</sup> ]
$\rho$	Resistividade elétrica	[ $\mu\Omega.m$ ]
$\varphi$	Densidade do material	[g/gm <sup>3</sup> ]



## RESUMO

O trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia denominada modelo de núcleo reduzido, aplicada para avaliar o desempenho de máquinas elétricas no que tange a geometria e materiais empregados na fabricação do núcleo completo. Para fins de validação da metodologia utiliza-se um Atuador Planar de Indução Trifásico com dois graus de liberdade, comparando os resultados numéricos e experimentais. Através desta metodologia, pode-se realizar a análise dos fenômenos eletromagnéticos ocorridos no núcleo completo por meio da avaliação de seu modelo reduzido, composto neste caso por 33% do núcleo completo empregado no Atuador Planar de Indução Trifásico. A comprovação da metodologia do modelo de núcleo reduzido ocorreu através da fabricação de uma bancada de testes, composta por uma célula de carga para realizar aquisição da força de propulsão planar, interface de potência e os núcleos reduzidos com seguintes materiais ferromagnéticos: compósitos *SMC 1P Somaloy 500*<sup>®</sup>, Ferro resinado e Aço ABNT 1020. Com auxílio da estrutura de testes, validou-se o modelo numérico dos três núcleos reduzidos quanto a força de propulsão planar. Na análise dos dados experimentais e numéricos, o material Ferro resinado apresentou a diferença 14% referente a força de propulsão planar, sendo a maior diferença entre os materiais estudados. Com a convergência dos resultados experimental e numéricos, realiza-se a comparação numérica entre os núcleos reduzidos e completos utilizando-se os três materiais ferromagnéticos. A análise numérica do núcleo reduzido com o material *SMC 1P Somaloy 500*<sup>®</sup> apresentou o fator de relação médio da força de propulsão planar de 2,65 em relação ao núcleo completo. O núcleo completo com Aço ABNT 1020 resultou no consumo médio de 56,7Watts para gerar a força de propulsão planar de 1 Newton.. Dessa forma, proporciona-se uma ferramenta de maior rapidez para fabricação e avaliação do desempenho de materiais ferromagnéticos utilizados no núcleo completo da máquina elétrica.

**Palavras-chave:** Atuador Planar de Indução Trifásico, Compósitos Magneticamente Macios, Metalurgia do pó, Força de Propulsão Planar, Consumo Energético

## ABSTRACT

This paper presents the development of a methodology denominated low core model applied to evaluate the performance of electrical machines with respect to geometry and materials used in manufacturing of the complete core. For validation purposes of the methodology is used a Planar Three-phase Induction Actuator with two degrees of freedom, comparing the experimental and numerical results. Through this methodology, it is possible to perform the analysis of electromagnetic phenomena occurring in the complete core based evaluation of the reduced model, made in this case with 33% of the full core employed in the Planar Three-phase Induction Actuator. The verification of the reduced core model methodology occurred through the manufacture of a testing bench, which is composed of a load cell to realize the acquisition of the planar propulsion force, potency interface and reduced cores with the following ferromagnetic materials: SMC 1P Somaloy 500<sup>®</sup> composites, resinated Iron and Steel ABNT 1020. With the help of the test structure, it was validated the numerical model of the three reduced cores regarding to the planar propulsion force. In the analysis of experimental and numerical data, the resinated Iron material showed a 14% difference concerning the strength of the planar propulsion, which is the biggest difference between the materials studied. With the convergence of the experimental and numerical results, a numerical comparison is performed between the reduced and complete cores using the three ferromagnetic materials. The numerical analysis of the reduced core with the SMC 1P Somaloy 500<sup>®</sup> material showed the average ratio of the planar factor propulsive force of 2.65 when compared with the complete core. The complete core with ABNT 1020 Steel resulted in an average consumption of 56.7 Watts to generate a planar propulsive force of 1 Newton. Thus, it is provided a faster tool for manufacturing and evaluation of ferromagnetic materials performance used in the complete core of the electric machine.

**Keywords:** Planar Three-phase Induction Actuator, Soft Magnetic Composites, Powder Metallurgy, Propulsion Planar Force, Energetic Consume.

## 1. INTRODUÇÃO

No século XXI têm-se verificado um aumento considerável nas pesquisas relacionadas a compósitos magnéticos empregados no desenvolvimento de máquinas elétricas especiais. O crescente interesse por essas máquinas elétricas deve-se ao surgimento de novos materiais associado a uma eletrônica eficiente que proporciona maior controlabilidade e viabilidade técnica.

Dentre as novas topologias de máquinas elétricas especiais encontra-se o Atuador Planar de Indução Trifásico (API). O interesse por essa topologia ocorre devido o seu deslocamento planar em dois graus de liberdade com base em coordenadas cartesianas. O API é projetado para ser aplicado em equipamentos que necessitem de movimentos bidirecionais planares visando substituir os complexos arranjos estruturais mecânicos.

Para executar movimentos bidirecionais o API é composto por um único núcleo denominado translador, responsável pelo deslocamento. A força eletromagnética gerada através dos enrolamentos fixados no translador é convertida diretamente em movimento planar. Esta conversão apresenta uma série de vantagens, pode-se citar: a melhora na precisão do posicionamento, redução do atrito mecânico e perdas elétricas, e conseqüentemente, uma resposta mecânica rápida e o aumento da eficiência global do sistema de deslocamento.[1]

Logo, torna-se importante o desenvolvimento de uma metodologia que, proporcione maior agilidade para validar o projeto de máquinas elétricas especiais fabricadas com materiais magnéticos macios (SMC – *Soft Magnetic Composite*). Visa-se reduzir o tempo de pesquisa, insumos e o dispêndio técnico empregado na montagem de núcleos complexos empregados nas máquinas elétricas. Diante deste cenário, esta tese propõe uma nova metodologia que contribui de modo direto no desenvolvimento de máquinas elétricas especiais, através da validação do desempenho do circuito magnético, por meio da construção experimental de uma fração que apresente as principais características do núcleo completo utilizado em máquinas elétricas.

A proposta da metodologia denominada modelo de núcleo reduzido, apresenta-se

como uma ferramenta inédita para validação numérica e experimental dos resultados obtidos em dispositivos eletromagnéticos complexos. Esta metodologia é aplicada para avaliar a força de propulsão planar e consumo energético do API utilizando compósitos 1P Somaloy 500, Ferro resinado e Aço ABNT 1020 na fabricação do núcleo reduzido. Neste caso, o modelo de núcleo reduzido será composto de 33% dos itens usuais empregados no translador do Atuador Planar de Indução Trifásico.

### 1.1 Justificativa e Relevância

No processo de construção de máquinas elétricas especiais torna-se importante estimar no projeto parâmetros referentes as perdas elétricas, rendimento e força de propulsão planar. No entanto, prever tais parâmetros é uma tarefa difícil, devido a complexidade geométrica e o material empregado na confecção do núcleo do API. Esses aspectos aumentam os custos de engenharia relacionado ao tempo envolvido nos projetos de máquinas elétricas, insumos, e dimensão dos equipamentos e punções especiais necessários para fabricação [2].

A intenção para fabricar o núcleo utilizado no API através da metalurgia do pó deve-se a elevada economia do material. O núcleo após as etapas de acabamento representa, aproximadamente, 97% da matéria bruta original. Diferente dos processos de fabricação tradicionais mecânicos como usinagem tradicional, que a geração de cavacos pode representar cerca de 50% da massa bruta da peça final [2, 3].

A comprovação da eficácia da metodologia denominada modelo de núcleo reduzido, ocorrerá através da modelagem numérica e experimental com os materiais magnéticos macios 1P Somaloy 500<sup>®</sup> e Ferro Resinado. A definição do uso desses dois compósitos deve-se às características desejáveis em materiais utilizados na fabricação de máquinas elétricas, tais como: boa resistividade elétrica, satisfatória permeabilidade magnética e, conseqüentemente com a redução de perdas por correntes parasitas.

### 1.2 Objetivo

A pesquisa visa validar o desempenho do Atuador Planar de Indução Trifásico (API) com deslocamento bidirecional através da metodologia do modelo de núcleo reduzido. Esta proposta de metodologia numérica e experimental permite a validação dos

parâmetros obtidos por simulação de dispositivos eletromagnéticos complexos, antes de uma onerosa proposta de construção da máquina completa com compósitos magnéticos macios. O trabalho foi conduzido de forma teórica e experimental com os seguintes objetivos específicos:

- a) Elencar as características dos circuitos magnéticos (translador) sobre a óptica dos *SMC 1P Somaloy 500*<sup>®</sup> e Ferro-Cobalto, com ênfase nas características eletromagnéticas (força de propulsão planar gerada no translador);
- b) Simular numericamente o comportamento do API com núcleo reduzido e completo, composto por apenas um elemento de atuação linear.;
- c) Desenvolver a instrumentação necessária para mensurar o desempenho do API construído com núcleo reduzido, referente ao deslocamento e força de propulsão planar;
- d) Avaliar e comparar os resultados obtidos através das simulações numéricas e medições experimentais referente ao API, a fim de validar a metodologia denominada modelo reduzido.

### 1.3 Organização do Trabalho

Inicia-se o primeiro capítulo apresentando a visão geral do tema proposto, os objetivos e contribuições trabalho. No capítulo 2 apresenta-se a concepção e o princípio de funcionamento do Atuador Planar de Indução com dois graus de liberdade. Neste capítulo aborda-se o estado da Arte sobre API com maior ênfase nas principais características construtivas, funcionamento materiais utilizados. No Capítulo 3 discute-se a fundamentação teórica sobre o processo de Metalurgia do Pó com maior ênfase aos materiais compósitos com propriedades magnéticas. O Capítulo 4 aborda o procedimento experimental de testes experimentais para mensurar a força de propulsão planar do API através de uma bancada de ensaios reais. Descreve-se as principais características construtivas mecânicas e elétricas e os resultados obtidos dos núcleos reduzidos com os materiais *SMC 1P Somaloy 500*<sup>®</sup>, Ferro resinao e Aço ABNT 1020. No Capítulo 5 apresenta-se as principais características dos softwares aplicados nas simulações numéricas dos núcleos reduzido e completo utilizado no API. Apresenta-se as respostas obtidas

referente a força de propulsão planar e analisa outros parâmetros que impactam no rendimento da máquina elétrica especial. O Capítulo 6 são apresentados as discussões dos resultados computacionais e experimentais obtidos nos testes realizados para validar a Metodologia do Modelo Reduzido e verificar o desempenho do sistema de controle. No Capítulo 7 são expostas as conclusões do presente trabalho e finaliza-se no Capítulo 8 sugestões para trabalhos futuros.

Dessa forma, o desenvolvimento do trabalho, segue o fluxograma exposto na Figura 1.1.

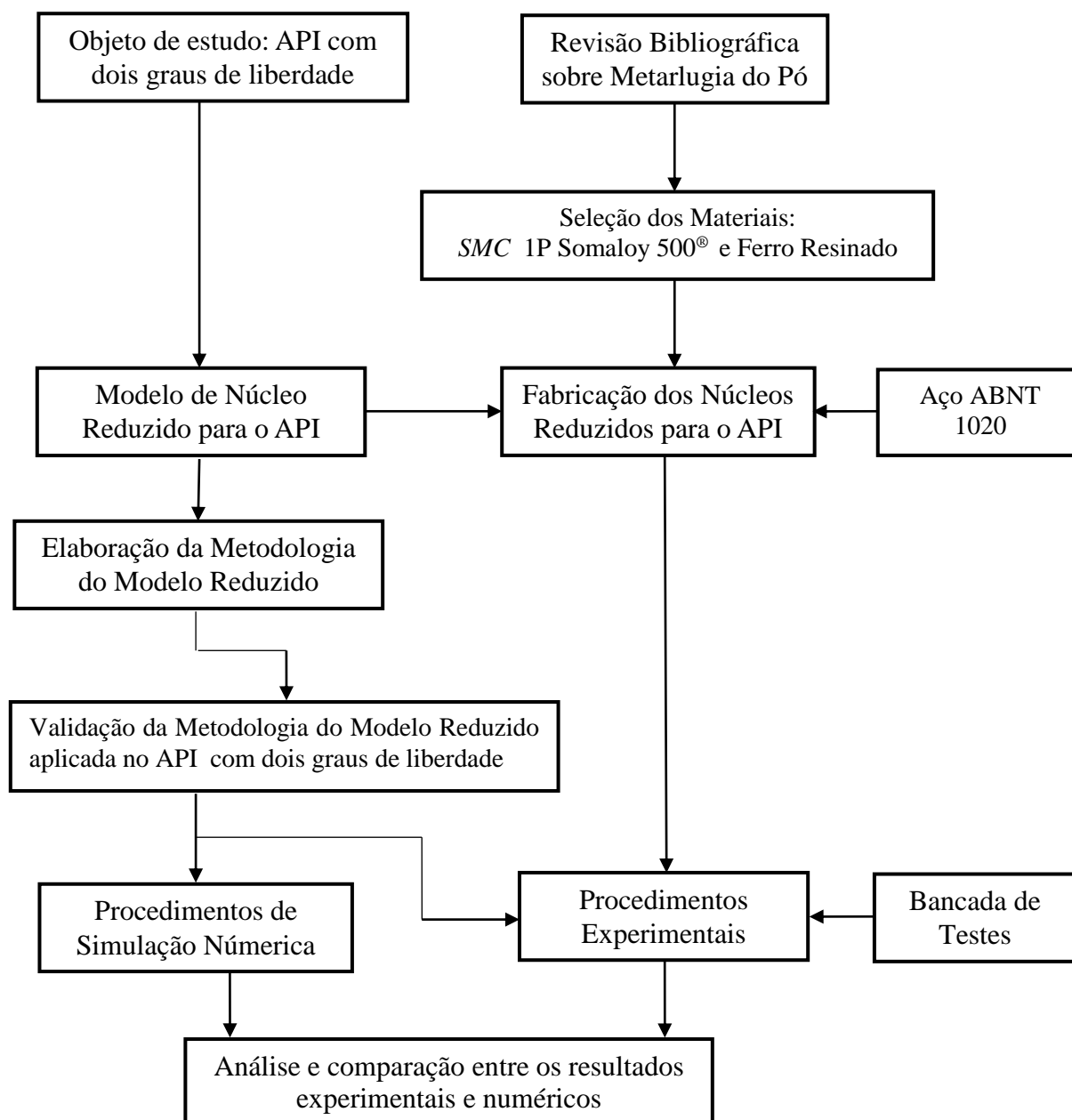


Figura 1. 1 - Fluxograma de Pesquisa e Experimento dos Estudos da Tese

## 2. REVISÃO DE ATUADORES PLANARES DE INDUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o princípio de funcionamento do Atuador Planar de Indução e os principais aspectos construtivos com ênfase no deslocamento planar. Posteriormente aborda-se as diferentes concepções de fabricação do API com movimentação planar simultâneo em dois eixos, além de descrever os resultados alcançados em cada projeto do Atuador Planar de Indução.

### 2.1 Funcionamento do Atuador Planar de Indução

A concepção de motores elétricos lineares foi norteada pela elaboração de motores do tipo rotativo. Apenas em meados do século XX, o motor linear começou a ter interesse prático, devido principalmente ao seu baixo desempenho e a complexibilidade referente ao controle de posicionamento. Os avanços na eletrônica principalmente dos microprocessadores com maior capacidade e velocidade de processamento têm contribuído para elaboração de possíveis soluções industriais utilizando o Atuador Planar de Indução (API). [4, 5].

Os Atuadores Planares de Indução pertencem ao grupo de máquinas elétricas que convertem diretamente a energia elétrica em mecânica, sob a forma de movimento planar a partir de coordenadas cartesianas. O princípio de funcionamento dessas máquinas elétricas é similar aos motores lineares. O API possibilita o deslocamento planar em dois eixos de forma simultânea, diferente do motor linear que restringe-se ao movimento em linha. A concepção de uma máquina linear pode ser compreendida como um motor rotativo aberto sobre um plano. O movimento em linha ocorre através dos mesmos princípios eletromagnéticos desenvolvidos no motor rotativo, conforme apresentado na Figura 2.1. O campo magnético produzido não apresenta-se como girante, e sim um campo transladante, conseqüentemente, a parte móvel da máquina resultará em um movimento linear [5, 6].

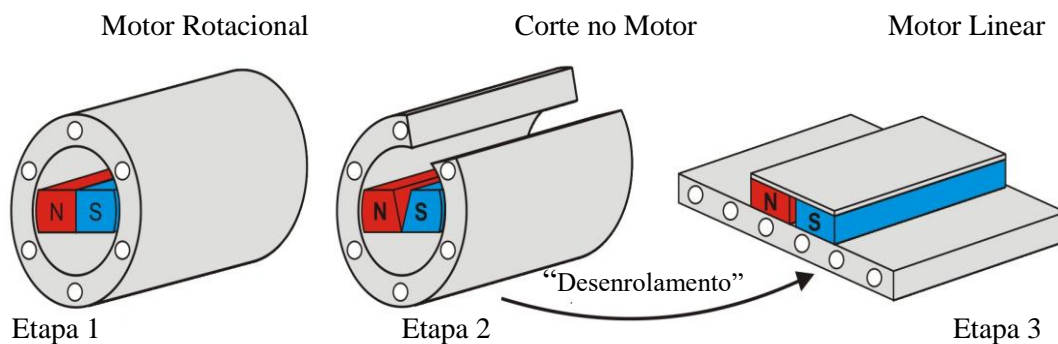


Figura 2.1 - Transformação elementar de um motor rotativo em um motor linear [7].

Com relação ao deslocamento do API podem ser inicialmente caracterizados como dois motores lineares. O API funciona pelo mesmo princípio da gaiola de esquilo dos motores rotativos de indução: um campo magnético produzido pelo primário da máquina elétrica irá induzir correntes no seu secundário. A interação desse campo com as correntes elétricas provocará o aparecimento de uma força no sentido de propagação do campo magnético, que impulsiona o deslocamento da parte do móvel (translador) no API.

Na concepção referente a construção mecânica, o API é formado por um bloco de material ferromagnético ranhurado (fig 2.2), onde são alocados os enrolamentos elétricos trifásico para produção de um campo transladante. Geralmente, o secundário é composto de uma placa de material ferromagnético, que resulta em um caminho de baixa relutância para o circuito magnético e direciona o fluxo produzido pela excitação primária na área de interesse.

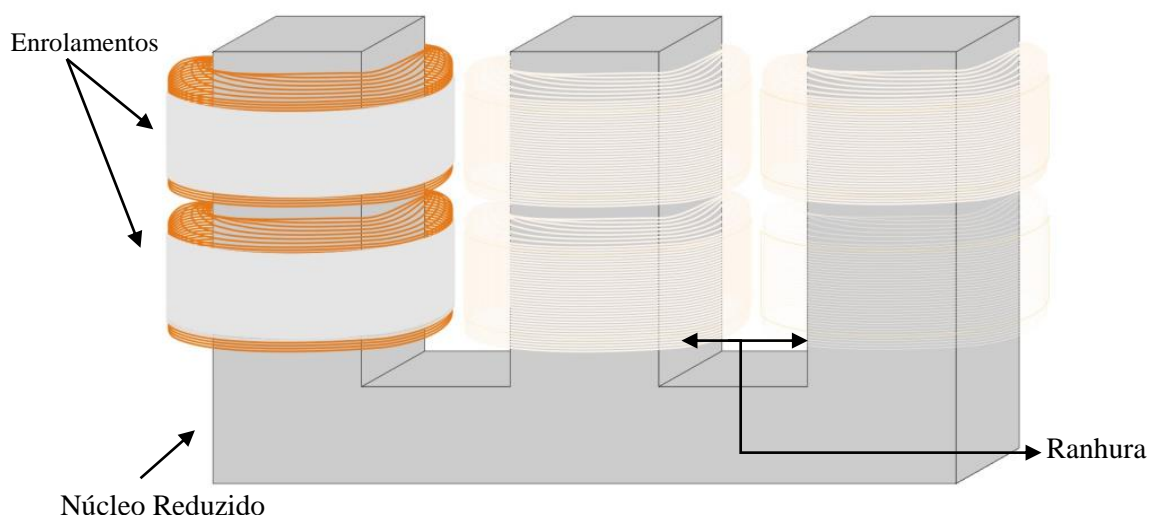


Figura 2.2 - Alocação dos enrolamentos no núcleo Reduzido

Deste modo, quando uma tensão trifásica equilibrada é aplicada nos enrolamentos do API, haverá o surgimento de correntes elétricas. Estas são responsáveis pela criação de



um campo magnético que se propaga ao longo da estrutura (fig. 2.3). Conforme a Lei de Faraday, uma força eletromotriz será induzida no secundário e, como este material possui alta condutividade, haverá uma corrente elétrica proporcional à variação de fluxo magnético nos enrolamentos.

A interação dos fluxos magnéticos nos enrolamentos provocará uma força na direção do produto vetorial entre as correntes induzidas e o campo magnético que atravessa o secundário. Essa força, no caso do API, atuará entre o primário e o secundário e resultará no deslocamento translador. O fluxo magnético no entreferro de um atuador planar de indução não pode ser analisado com a mesma abordagem aplicada aos motores elétricos rotativos, visto que, não encontra-se um caminho fechado e uniforme ao longo de sua trajetória [8].

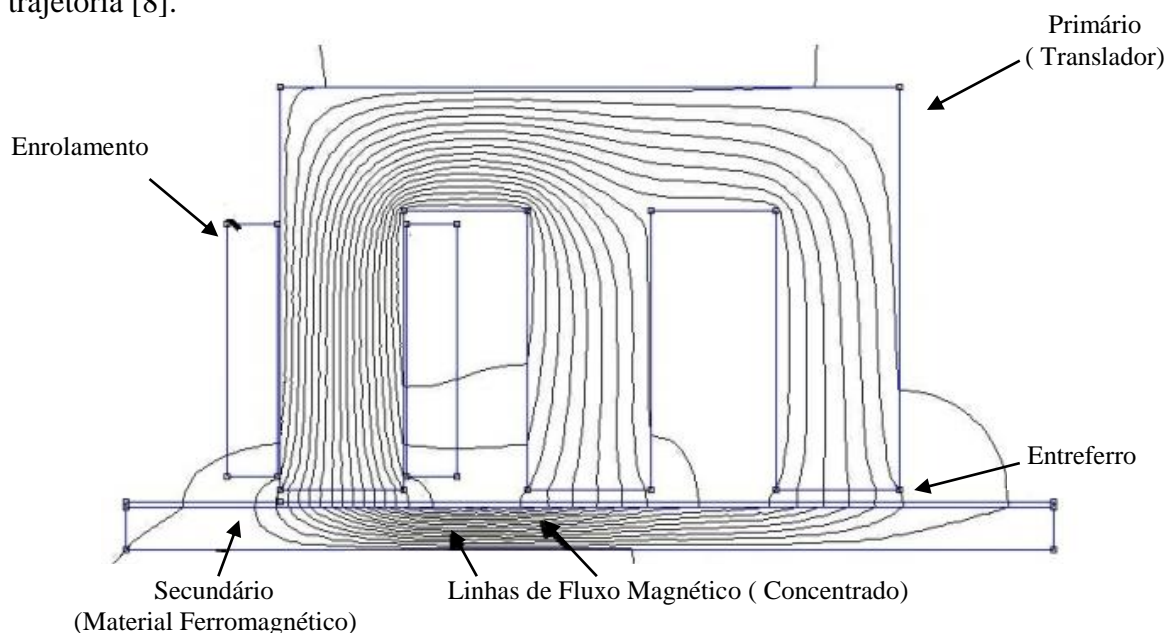


Figura 2.3. Interação do campo magnético produzido no primário com secundário.

Para maximizar a força de deslocamento no API, o secundário é composto por um material com boa condutividade elétrica, caracterizando-se por uma estrutura ferromagnética. O secundário proporciona um caminho de baixa resistência, e conseqüentemente, concentra o fluxo magnético gerado no primário em um área de interesse. Isto viabiliza a convergência de corrente elétrica transversal no sentido do fluxo magnético, concentrando neste local a força resultante. Como o API é energizado por tensão elétrica trifásica, haverá uma diferença temporal entre o ápice do fluxo magnético gerado pelos enrolamentos elétricos em cada ranhura que compõem o API. Essa diferença aliada ao espaçamento entre as ranhuras (fig. 2.4), provocará a atração do secundário ao próximo conjunto de enrolamentos energizados com uma velocidade dependente da

frequência de operação e o espaçamento das ranhuras.

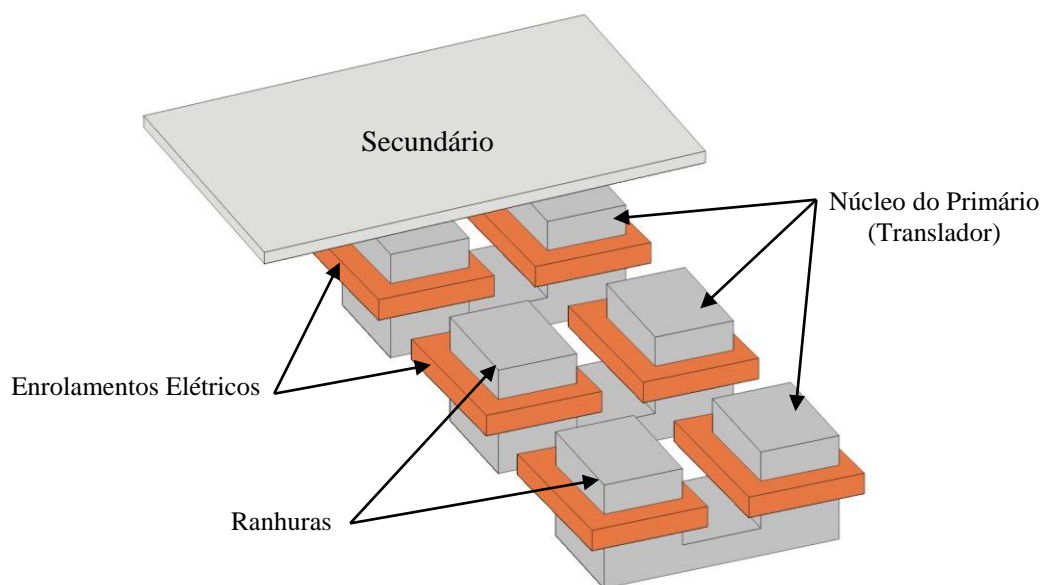


Figura 2.4 - Representação de um Atuador Planar de Indução [9]

Ao analisar o fluxo magnético nas situações apresentadas na Figura 2.5, pode-se visualizar a interação das linhas de fluxo magnético com o secundário da máquina elétrica. Com a placa ferromagnética no secundário (fig. 2.5a), o API apresentará melhor rendimento comparado ao API sem placa (fig. 2.5b). A placa ferromagnética contribui para melhorar a orientação do fluxo magnético, resulta em maior força de propulsão e, conseqüentemente, ocorre o aumento da força normal [1].

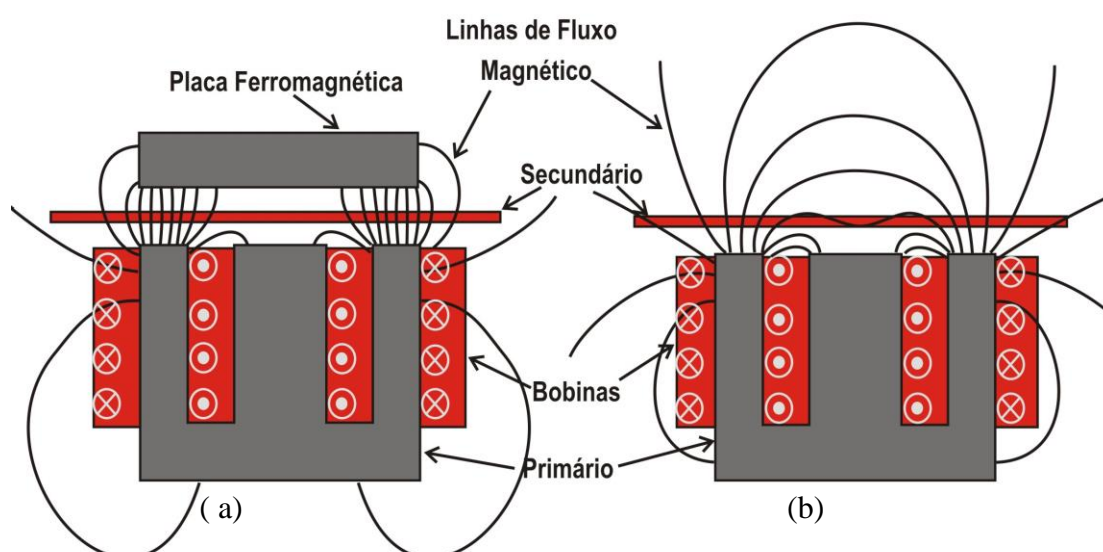


Figura 2.5 - Aspecto transversal do atuador linear de indução: (a) com placa ferromagnética; (b) sem placa ferromagnética [1].

## 2.2 Atuadores Planares de Indução - API

Atualmente, na grande maioria das aplicações em que o movimento de translação é necessário, utiliza-se um motor elétrico rotativo como fonte de força motriz associado a um sistema mecânico para transformar o movimento rotativo em linear. Esses sistemas mecânicos para transmissão de energia produzem grandes perdas, acentuado desgaste devido ao atrito das partes mecânicas, mesmo com a utilização de fluidos de baixa viscosidade para a lubrificação. A utilização de um motor elétrico que desenvolva diretamente o movimento de translação para aplicações industriais, resultaria em menor custo operacional, manutenção e maior confiabilidade do processo [4, 10, 11].

Devido a necessidade de movimentos translacionais, as pesquisas concentram-se no desenvolvido do API por meio da metalurgia do pó, afim de identificar compósitos que resultem em um desempenho satisfatório nos aspectos de desempenho e controlabilidade [12]. Neste contexto, Baggio *et. al.* [1] propuseram um API com núcleo confeccionado com SMC 1P Somaloy 500<sup>®</sup>. Essa proposta consiste em uma máquina eletromagnética com dois graus de liberdade para movimentação planar sem controle de posicionamento ou velocidade, a partir de um único dispositivo de tração. A Figura 2.6 apresenta a estrutura e componentes deste equipamento.

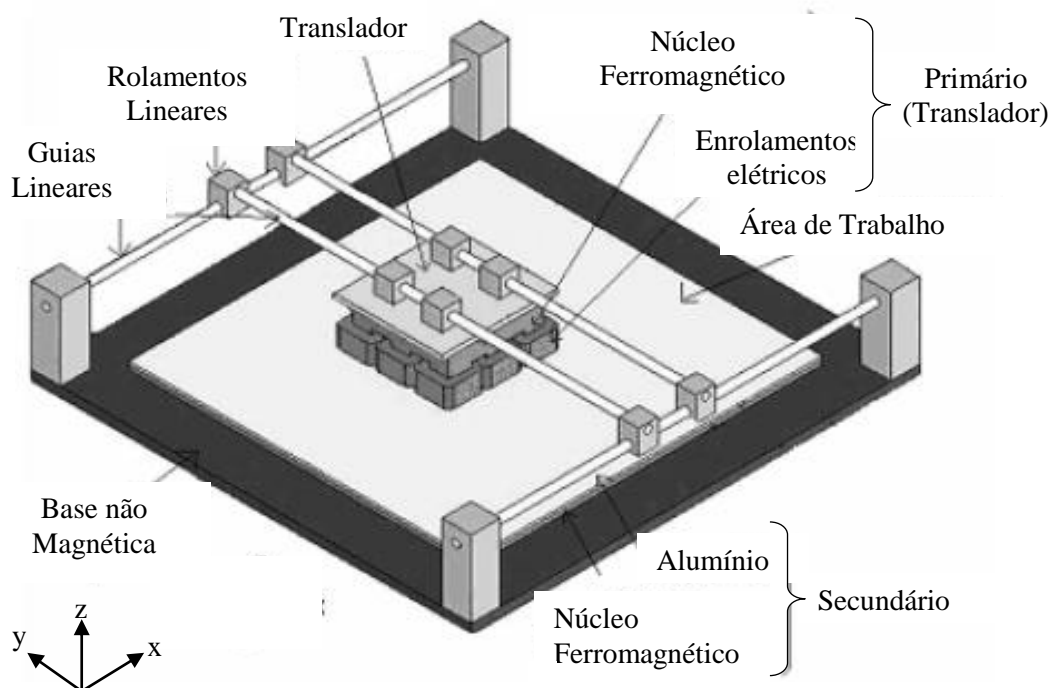


Figura 2.6 - Vista do atuador planar de Indução e suas partes [11].

Segundo Baggio *et al.* [11], o primário da máquina elétrica é composto por um núcleo constituído de um bloco ranhurado fabricado com 1P Somaloy 500<sup>®</sup>. Sendo esse

um material compósito macio ferromagnético de grão isolado obtido através da metalurgia do pó. No API proposto por Baggio *et al.* [13], o núcleo do API é composto por 9 ranhuras onde são alocadas dezoito enrolamentos elétricos independentes e o secundário fabricado com material ferromagnético para incrementar o fluxo no entreferro [11]. Para validar os resultados obtidos pelas simulações construiu-se um protótipo (fig. 2.6). Isso permitiu verificar o princípio de funcionamento em condições reais e através de uma célula de carga mensurar a força de propulsão planar em relação a excitação elétrica aplicada [13].

Para validar a modelagem analítica foram propostos dois casos de configuração do secundário para o protótipo. No caso 1, o secundário é formado por uma chapa de alumínio montada sobre uma chapa de Aço ABNT 1020. A adição da chapa de alumínio no secundário resulta no aumento expressivo da corrente induzida pois a condutividade elétrica desse material é muito superior ao Aço ABNT 1020, e conseqüentemente, aumenta a força planar de propulsão. No caso 2, o secundário é formado por apenas uma chapa de Aço ABNT 1020. Para os dois casos, a distância entre o primário e o secundário foi definida em 1 mm e a corrente elétrica de excitação manteve-se em 3 A de pico [ 14, 15].

Com os dois casos definidos, empregou-se uma ferramenta computacional referente ao Método Elementos Finitos (FEM) para obter os resultados e compará-los com os testes experimentais realizados sob as mesmas condições de excitação elétrica dos enrolamentos do primário. Em função da tensão primária de excitação por fase são obtidos os resultados experimentais e computacionais. Os resultados reference a força propulsão planar quando alimentado o enrolamento  $x$  (fig. 2.7) e, no segundo caso dois enrolamento  $x$  e  $y$  (fig. 2.8) energizados [11, 13].

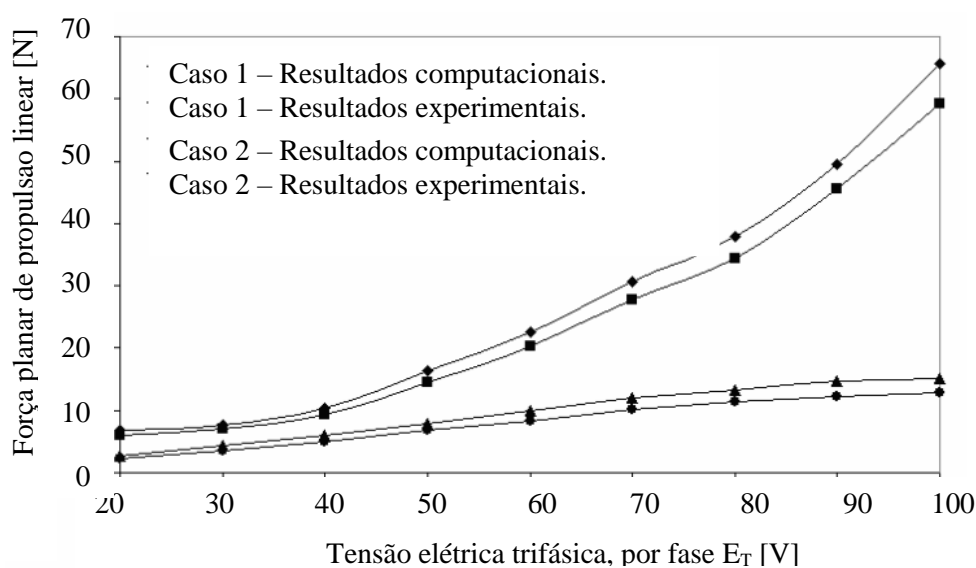


Figura 2.7 - Força de propulsão planar quando o enrolamento  $x$  é energizado com tensão primária RMS [15].

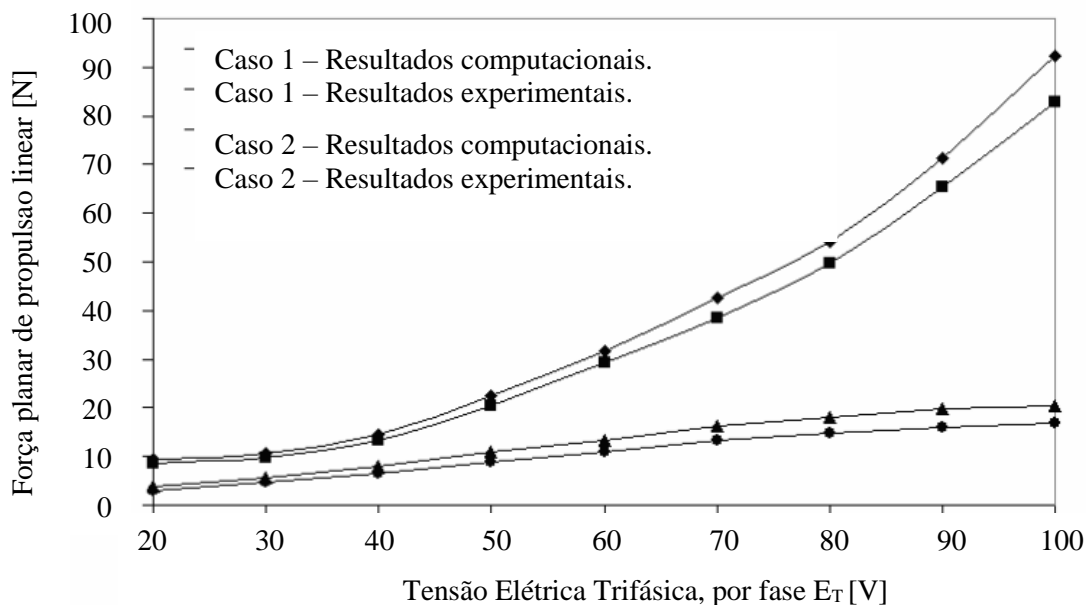


Figura 2.8 – Força de propulsão planar *versus* tensão elétrica primária RMS, quando os enrolamentos  $x$  e  $y$  são excitados [15].

Os resultados computacionais e experimentais estabeleceram uma boa concordância entre si. Ao mesmo tempo, demonstraram serem promissores e consistentes com a literatura. A estrutura projetada e ensaiada, apresenta um bom desempenho ao mesmo tempo que possibilita adaptações para funcionalidades específicas, como utilização em mesa de inspeção de chapas. O uso *SMC 1P Somaloy 500*<sup>®</sup> apresentou boa resistividade elétrica e satisfatória permeabilidade magnética, que contribuiu para uma maior densidade do fluxo magnético no entreferro, resultando diretamente na melhoria da força de propulsão linear planar [11].

Os estudos elaborados por Silveira [5] resultaram na construção de um API composto por dois ímãs permanentes de NdFeB. no primário (translador), O translador é fixado a uma estrutura mecânica sendo suspenso através de rolamentos lineares que permitem movimento bidirecional, e conseqüentemente, resulta-se em um Atuador Planar de Indução com dois graus de liberdade simultâneos (fig. 2.9).

Diferente da proposta apresentada por Baggio [1] para construção do API, onde os enrolamentos elétricos são alocadas no primário, Silveira [5] propôs um API sendo fixados os enrolamentos elétricos no secundário (fig. 2.9). Quando os ímãs permanentes encontram-se sobre uma fase do enrolamento energizado uma força de propulsão magnética será criada no primário que desloca o translador na sequência de energização dos enrolamentos elétricos. A intensidade e direção da força magnética resultante dependem dos valores da força magnética motriz do enrolamento ativado e da densidade

de fluxo de entreferro estabelecida pelos ímãs permanentes [16].

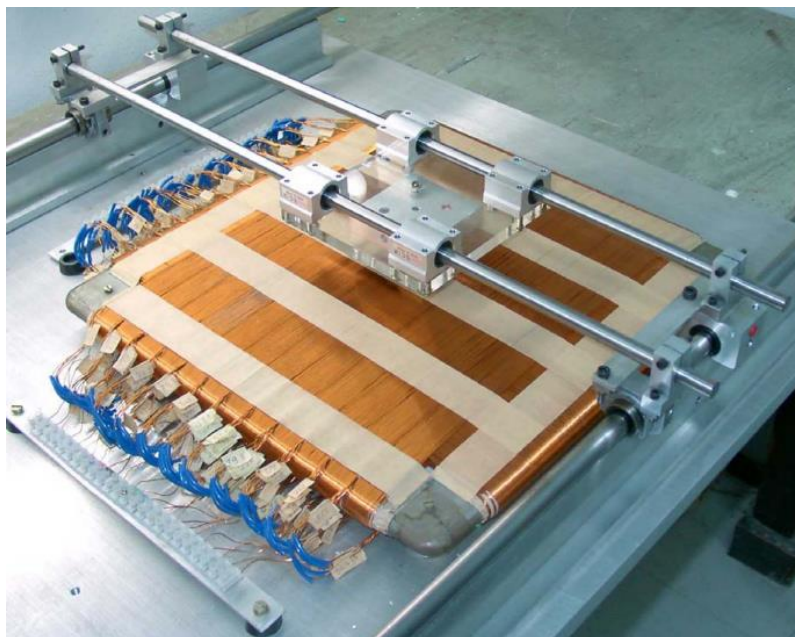


Figura 2.9 - Estrutura proposta por Silveira [62] para o atuador planar de indução trifásico (API) [5].

A Figura 2.10 apresenta a vista frontal do atuador planar, destaca-se a região do translador. Na armadura estão localizados dois conjuntos de enrolamentos ortogonais entre si, denominados de  $x$  e  $y$ . Cada enrolamento encontra-se dividido em 12 segmentos colocados em torno do núcleo de material ferromagnético [17].

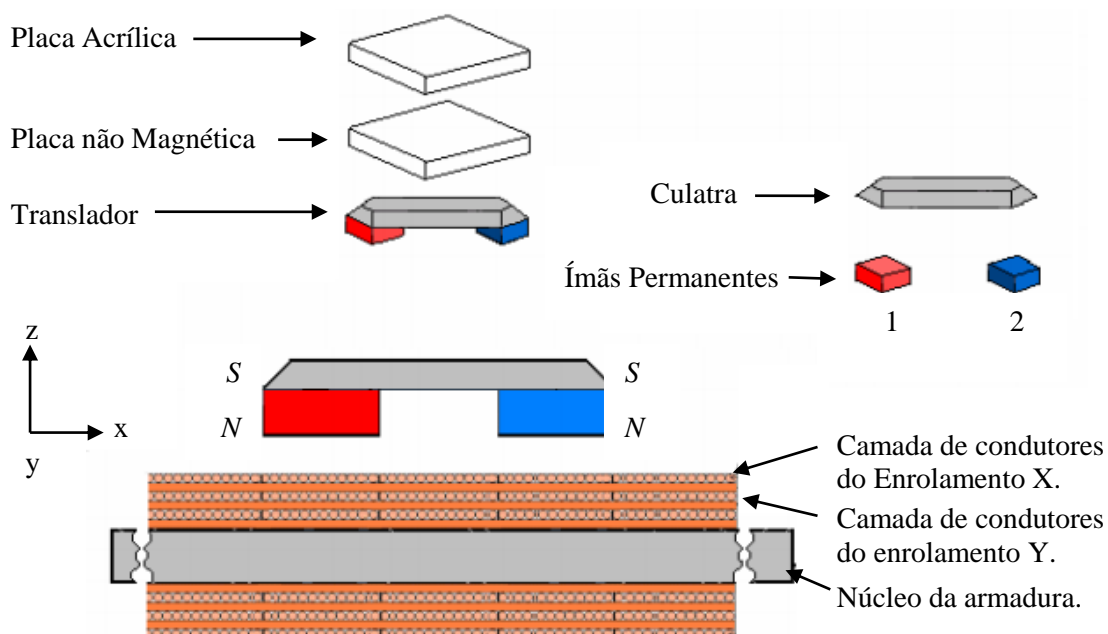


Figura 2.10 - Vista frontal do atuador planar, destacando a região do carro [5].

Desta forma, o API proposto por Silveira [5] apresenta o secundário composto por vários enrolamentos. Os dois conjuntos de enrolamentos produzidos são ortogonais, sendo um enrolamento montado para o eixo  $x$  e o outro para o eixo  $y$ , ambos responsáveis pelo movimento do API. Contudo, os enrolamentos ortogonais não apresentam conexão elétrica um com o outro e, são montados em camadas intercaladas, sendo uma camada para o deslocamento no eixo  $x$  e outra para efetuar o deslocamento no eixo  $y$ , respectivamente [15].

Definida a forma construtiva do atuador planar, o mesmo foi modelado de forma analítica com o intuito de prever o seu comportamento estático e dinâmico. Para tanto, se considerou o primário composto de ímãs permanentes de 6,0 mm de comprimento axial. Determinado os parâmetros construtivos relevantes, buscou-se validar o protótipo por meio das seguintes variáveis: densidade de fluxo no entreferro, força normal e planar de propulsão. A Figura 2.11 apresenta os resultados experimentais com o auxílio de uma célula de carga, modelo analítico e análise numérica da força de propulsão planar  $F_x$ , em função da corrente injetada no enrolamento  $x$  localizado sob os ímãs permanentes [18].

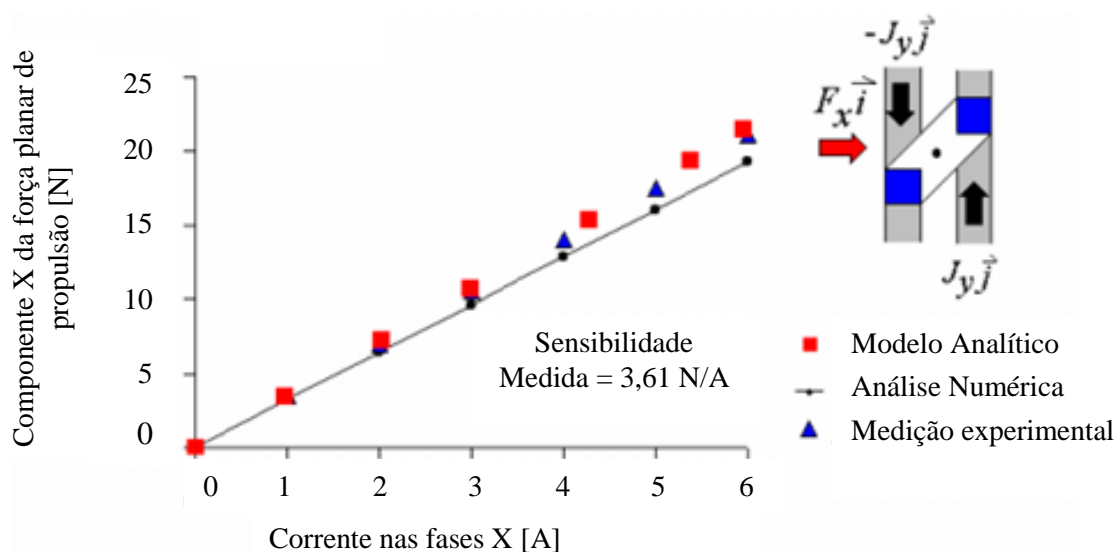


Figura 2.11 - Força de propulsão planar *versus* correntes nas fases de bobina empregada no eixo  $x$  localizada sob os ímãs permanentes [18].

A Figura 2.12 mostra o comportamento no eixo  $z$  do vetor da densidade do fluxo magnético no entreferro em relação à posição no plano da abertura de ar sob os ímãs permanentes, no momento que as correntes nas fases da armadura são zero [18].

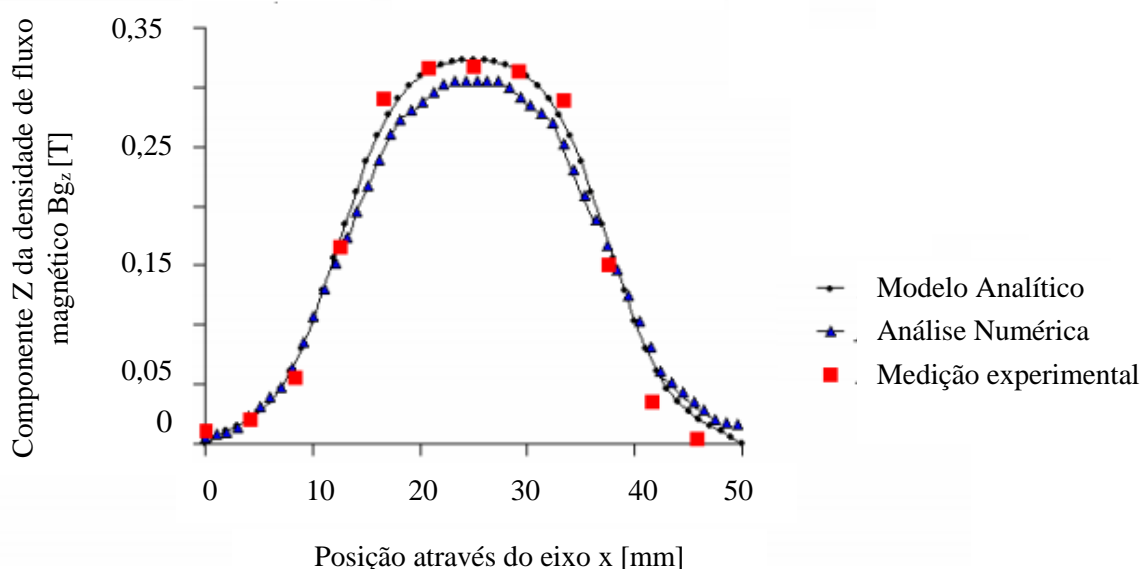


Figura 2.12 - Densidade de fluxo magnético no eixo z [18].

Os pesquisadores Jung e Baek [19] apresentaram uma nova concepção de atuador planar de indução sem contato mecânico que emprega as forças magnéticas e Lorentz (fig. 2.13). O translador é levitado pela força de magnetização entre os eletroímãs no núcleo de ferro fixados sobre o estator ferromagnético que compõe a estrutura de movimentação do API. O Deslcoamento do API ocorre pela força de Lorentz que atua sobre ímãs permanentes com a polaridade idêntica inserida sobre o campo magnético dos enrolamentos elétricos alocados no núcleo. O API é acionado diretamente, sem qualquer mecanismo de transmissão mecânica, e conseqüentemente, é adequado para trabalhos que exijam alta precisão e pequeno espaço de operação. A concepção do API proposta por Jung e Baek [19] é aplicável em ambientes de atmosfera controlada em virtude de sua construção não apresentar elementos mecânicos móveis passíveis de desgaste.

A proposta de Jung e Baek [19] possibilita o deslocamento do translador em seis graus de liberdade, diferente das propostas anteriores que permitem a movimentação de forma simultânea nos eixos  $x$  e  $y$ . Essa limitação deve-se a concepção construtiva, onde o deslocamento nos eixos  $x$  e  $y$  é realizado de forma independente por dois conjuntos de enrolamentos elétricos.

O deslocamento do translador não tem a necessidade de sistemas mecânicos auxiliares. Na movimentação emprega-se a força de atração entre o eletroímã no núcleo de ferro e a placa ferromagnética, e conseqüentemente, é compensando o peso do translador controlando-se constantemente a distância do entreferro independentemente do movimento do translador [19].



Ao energizar os enrolamentos elétricos nos pontos I, II e III (fig. 2.13), as forças magnéticas atuam sobre a placa ferromagnética no sentido das setas conforme a figura 2.14. A suspensão do eixo z ocorre através das forças  $f_{z1}$ ,  $f_{z2}$ ,  $f_{z3}$  e  $f_{z4}$ , resultado da interação dos elementos magnéticos que compõem a concepção do API.

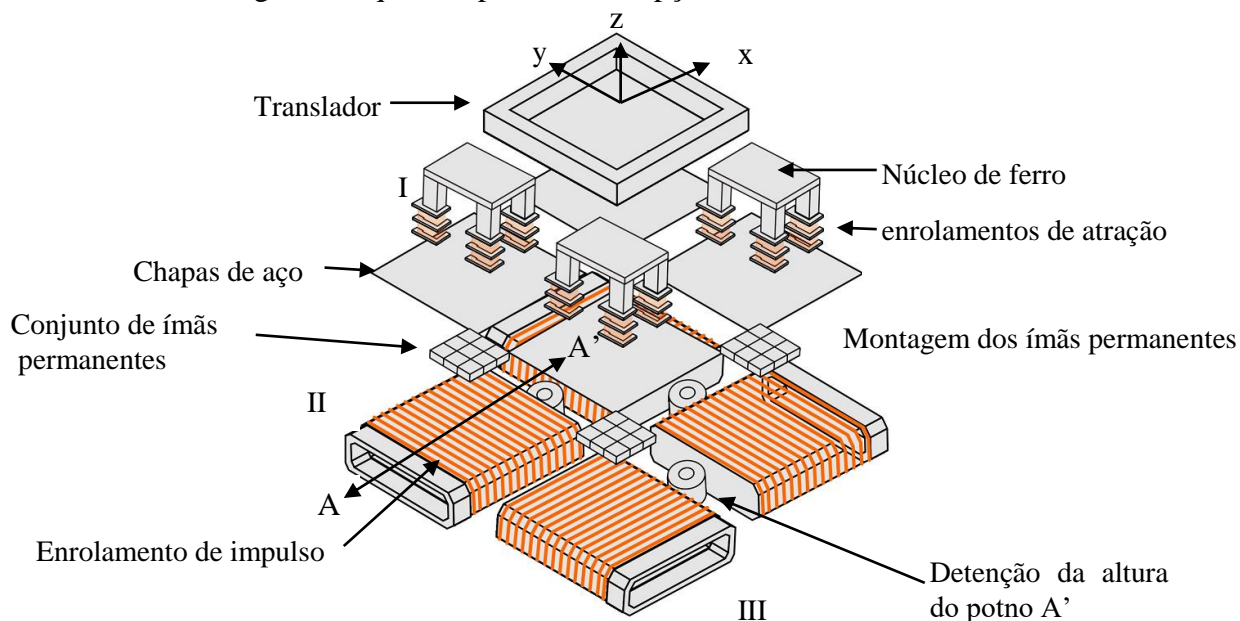


Figura 2.13 - Layout simplificado da concepção do atuador planar [19].

A força de propulsão planar  $f_{x1}$ ,  $f_{x2}$ ,  $f_{y1}$  e  $f_{y2}$  realizam os movimentos nos eixos  $x$  e  $y$  respectivamente. O deslocamento do translador no plano cartesiano ocorre pela aplicação da força de Lorentz, que atua sobre os enrolamentos elétricos inseridos sob o campo magnético produzido pela matriz de ímãs permanentes. Os movimentos de levitar e planar do API apresenta seis graus de liberdade em relação à sua base, realizado pela combinação destas três forças dos eixos controlados [19].

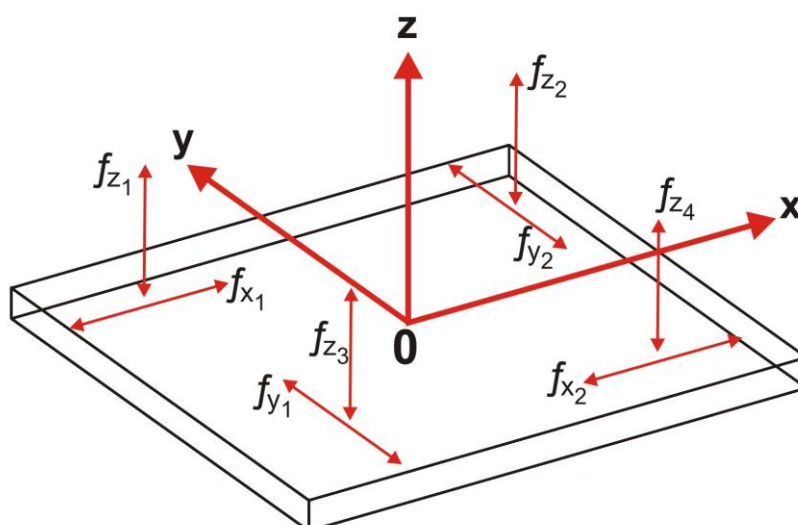


Figura 2.14 – Suspensão e Diagrama de Força de Impulso do Atuador Planar Indução [19].

Os pesquisadores Jung e Baek [19] realizaram experimentalmente a manipulação da posição do translador com alta precisão. O protótipo foi construído com a área de trabalho em torno de 40 milímetros nos eixos  $x$  e  $y$  respectivamente e 2 milímetros na direção do eixo  $z$ . A princípio o seu funcionamento apresentou-se adequado para a realização de movimentos de alguns milímetros ou centímetros.

Conforme Diedrich [8], apresentou uma topologia de núcleo API formada por 72 bobinas elétricas divididas em dois enrolamentos trifásicos eletricamente independentes e ortogonais entre si. O núcleo do API é composto de 36 ranhuras confeccionado com *SMC* 1P Somaloy 500<sup>®</sup> fixados em um chapa de Aço ABNT 1020 (fig. 2.15). A estrutura do secundário é composta por uma chapa de alumínio sobre uma chapa de Aço ABNT 1020 e configura-se com o item estático do API.

Com o acionamento trifásico dos enrolamentos elétricos se obtém campos magnéticos de curso linear e ortogonais entre si, que resulta em correntes elétricas induzidas na estrutura secundária. A interação entre as correntes do enrolamento e das chapas metálicas, gera a força de propulsão planar que movimenta o translador [8, 20].

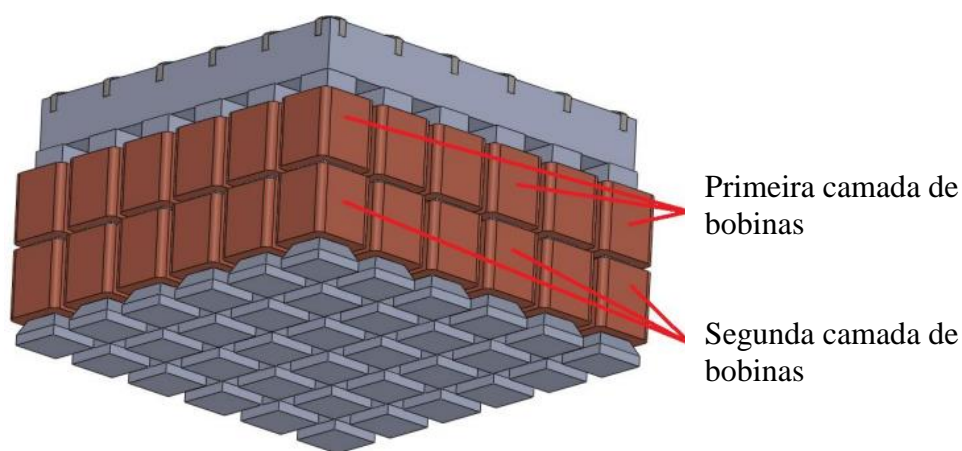


Figura 2.15 - Topologia proposta para o Núcleo Primário composto por 36 ranhuras [8].

Essa topologia referente ao atuador planar de indução com maior quantidade de ranhuras, difere da proposta de Baggio [1] pela forma construtiva do núcleo e a concepção de ligação elétrica dos enrolamentos. Cada ranhura é composta por um enrolamento elétrico responsável pelo deslocamento do primário nos eixos  $x$  e  $y$  respectivamente. Quando o API é acionado dois conjuntos enrolamentos são energizados por fase. Cada conjunto é constituído de seis bobinas ligadas em série com polaridade invertida em relação ao primeiro arranjo de enrolamentos resultando no surgimento de um polo na região do entreferro do API.

O princípio de funcionamento do primário no atuador planar de indução é baseado na Força de Laplace [8]. O campo magnético gerado pelas correntes elétricas trifásicas nos enrolamentos do primário induz uma força eletromotriz no secundário, especialmente, no alumínio que possui maior condutividade elétrica. Esta força eletromotriz produz corrente elétrica no secundário que interage com o campo magnético do primário. Este efeito resulta em uma força de propulsão planar e contribui com a força normal entre o translador e o secundário.

Devido à livre movimentação planar do primário em relação às chapas de alumínio e Aço ABNT 1020 o translador se movimenta conforme a intensidade da corrente elétrica e a frequência da excitação trifásica. O sentido dos movimentos pode ser controlado pela sequência da excitação trifásica e a intensidade da força que movimenta o translador pode ser controlada pela corrente elétrica e frequência [14].

Para validação inicial, realizou-se testes com base em dois parâmetros: frequência e tensão elétrica trifásica de excitação dos enrolamentos. A faixa de tensão elétrica eficaz aplicada nos ensaios foi de 45 V até 105 V, com frequências entre 45 Hz e 60 Hz. As leituras dos valores de tensão elétrica eficaz e frequência aplicada nos testes foram realizadas com dois osciloscópios. Para mensurar a força empregou-se uma célula de carga do tipo S. A Figura 2.16 apresenta a bancada de testes que realizou-se os ensaios descritos acima.

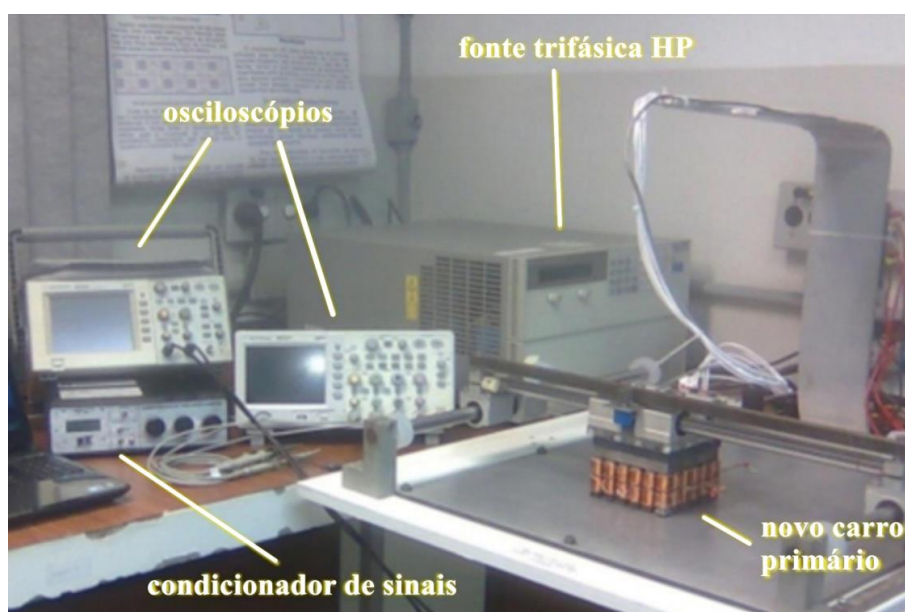


Figura 2.16 - Estrutura da bancada de testes para validação da proposta do API com 36 ranhuras [8].

Os resultados das forças translacionais desenvolvidas pela topologia apresentada por Diedrich comparado com a proposta elaborada por Baggio foram inferiores e ambos

confeccionaram a API com mesmo material. Ao considerar: a forma ligação dos enrolamentos, número de espiras e a quantidade de bobinas em cada fase dos enrolamentos  $x$  e  $y$ , fixação das ranhuras na chapa de aço ABNT 1020, justifica-se a intensidade do campo magnético resultante menor [8]. Conforme, o estudo desenvolvido por Treviso *et. al* [20], empregou-se na confecção do API com 36 ranhuras o SMC 1P 700 Somaloy<sup>®</sup> da empresa Höganäs, com objetivo comparar a força planar propulsão (fig. 2.17) e normal (fig. 2.18) de modo experimental, simulação e analítica.

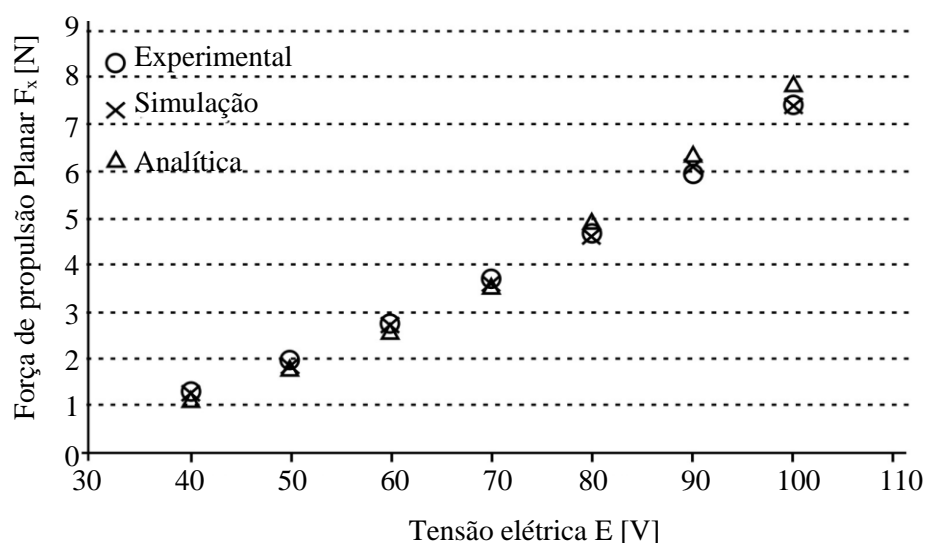


Figura 2.17 - Força de propulsão gerada pelo Atuador Planar de Indução [20].

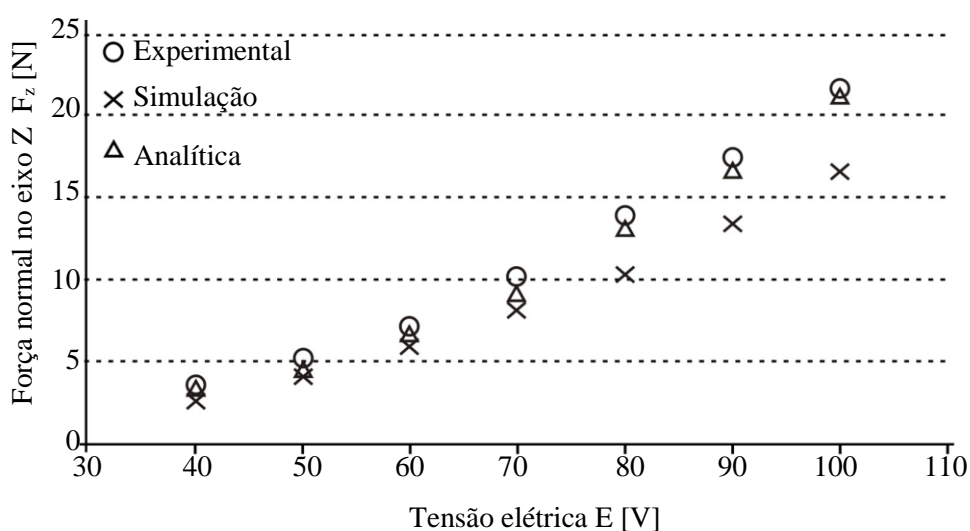


Figura 2.18 – Força normal gerada pelo Atuador Planar de Indução [20].

Ambas as forças em análise apresentaram boa correlação, em especial a comparação força de propulsão planar, em que o erro médio entre o simulado e o valores experimentais foi de 2,2% e entre valores analíticos e experimentais 0,9%. O maior erro

ocorreu na força normal com 23,4% de diferença entre o simulado e experimental, 6,2% entre valores analíticos e medidos [20].

Com o objetivo de contribuir com as pesquisas relacionadas à controlabilidade dos atuadores planares, os pesquisadores Hao, Bai e Xing [21] propuseram uma nova topologia de API, com seis graus de liberdade de alta velocidade e precisão. Esse API é composto por um primário (estator) e o secundário (translador), sendo o estator fixo, enquanto o secundário é atribuído a dinâmica do sistema (fig. 2.19). O estator é composto por oito enrolamentos elétricos fixados na base e 32 ímãs permanentes alocados sob o plano da parte móvel. O diagrama de propulsão (fig. 2.14) e a energização dos enrolamentos e suas ações sobre API são similares a proposta de Jung e Baek [19].

Com base na lei Lorentz, alguns parâmetros incluindo o comprimento de ímãs permanentes, correntes elétricas e altura de levitação, que pode comprometer a estabilidade, são analisados para determinar a posição de equilíbrio.

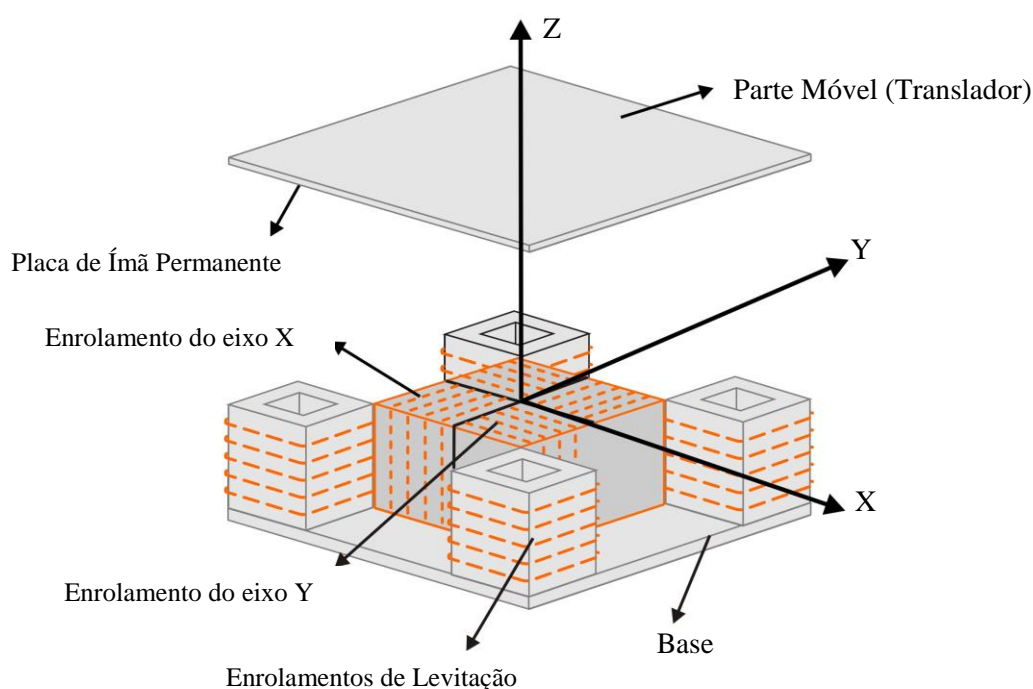


Figura 2.19 - Proposta do atuador planar com seis graus de liberdade [21].

Para avaliar o comportamento dinâmico do API quando submetido as lei de controle, esse foi modelado como um sistema de terceira ordem com parâmetros de variação-rigidez e amortecimento referente ao deslocamento no eixo z. Afim de validar sua proposta de API, associada a estrutura de controle, realizaram-se testes em malha aberta e fechada. Dessa forma, avaliaram a dinâmica do sistema quando submetido a essas duas

estruturas de controle. A Figura 2.20 apresenta os resultados em malha aberta para o posicionamento do eixo  $z$  e observa-se que o sistema apresenta erros de estabilidade perceptíveis.

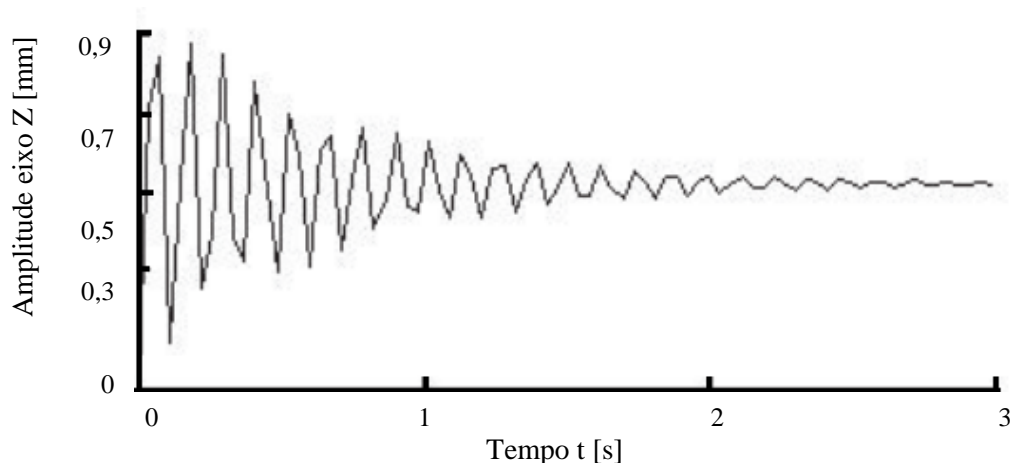


Figura 2.20 - Resposta do sistema em malha aberta no eixo  $z$  do API de seis graus de liberdade [21].

A Figura 2.21 mostra o resultado da simulação do controle de posição usando o sistema de controle. O degrau de entrada do sistema de controle foi 0,5 milímetros para o movimento de translação.

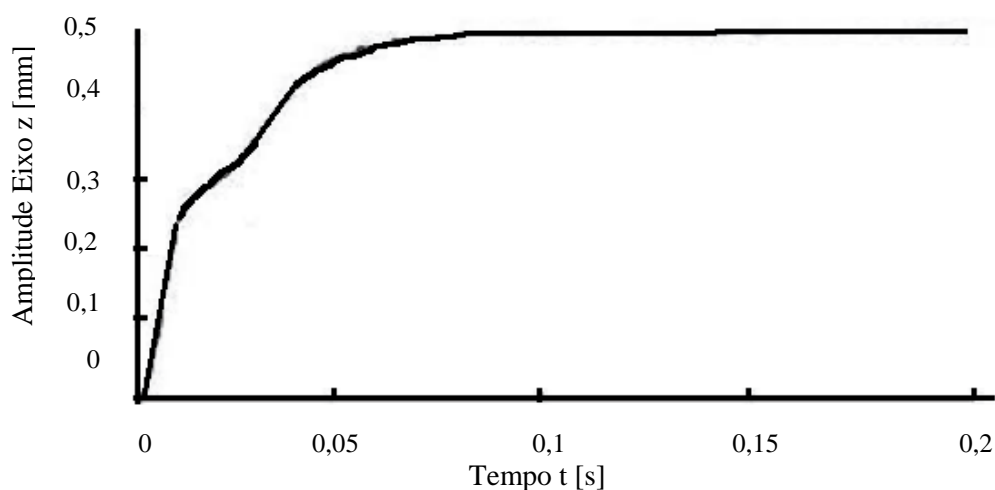


Figura 2.21 - Resposta do sistema com estrutura de controle proposta em malha fechada do eixo  $z$  do atuador planar de seis graus de liberdade [21].

Quando submetido ao sistema em malha aberta visando o posicionamento do translador resultou no comportamento não linear e instável. Contudo, quando empregado a estrutura de controle em malha fechada, apresentou-se estável às repostas de posicionamento nos seis graus de liberdade. Os resultados verificados no modelo demonstraram a viabilidade do sistema de controle implementado.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os principais tópicos relacionados ao material compósito 1P Somaloy 500® e Ferro-Cobalto obtidos por meio das técnicas da metalurgia do pó. Posteriormente, são descritas as principais características desses dois materiais que motivam seu emprego na fabricação de máquinas elétricas com ênfase em atuadores planares de indução.

#### 3.1 Metalurgia do Pó

A metalurgia do pó é amplamente empregada na manufatura de peças metálicas ferrosas, não ferrosas e cerâmicas. Atualmente, a obtenção de peças metálicas por meio deste processo tem ganhado espaço comparado aos processos metalúrgicos convencionais, como a fundição, estampagem e usinagem. Isto se deve ao alto aproveitamento da matéria-prima, geralmente acima de 95%, que impacta diretamente nos custos de fabricação. O processo da metalurgia do pó, a princípio não necessita de operações secundárias e posterior acabamento [22, 23, 24].

As características específicas deste processo de fabricação possibilita controlar com elevada precisão a composição, impurezas, em consequência à etapa de compactação permite a obtenção de peças com alta densidade. O produto final com alta densidade é uma característica desejada pelos fabricantes de máquinas elétricas rotativas e planares, em virtude de concentrar o fluxo magnético, conseqüentemente aumenta-se o torque [25, 26].

A metalurgia do pó difere dos processos convencionais pelo uso de matérias-primas formuladas a partir de pós metálicos e não metálicos. Durante o processamento dos pós, considera-se apenas a presença parcial de fase líquida dos elementos que constituíram a peça. Isto permite equacionar durante a produção de componentes as características estruturais e físicas necessárias a serem conferidas ao produto final, sendo impossível de obtê-las por meio de qualquer outro processo metalúrgico. A fabricação de peças através das técnicas da metalurgia do pó permite a obtenção de produtos com formas definitivas

(fig. 3.1), dentro de determinadas tolerâncias restritas [22, 27]. Fatores como esses tem motivado a pesquisa na área da metalurgia do pó com intuito de aumentar o rendimento de máquinas elétricas especiais.

Entretanto, algumas limitações tornam a metalurgia do pó uma solução inviável em determinadas situações. A fabricação de peças de dimensões elevadas, atualmente apresenta-se como limitador nesse processo. Contudo este problema está sendo solucionado por meio da aplicação de técnicas de compactação isostática e compactação a quente [11, 12, 13]. Consequentemente, os produtos confeccionados através da metalurgia do pó com dimensões elevadas e geometrias complexas, como furos, necessitam de processos secundários posteriormente a etapa de sinterização ou cura da resina [28, 29].

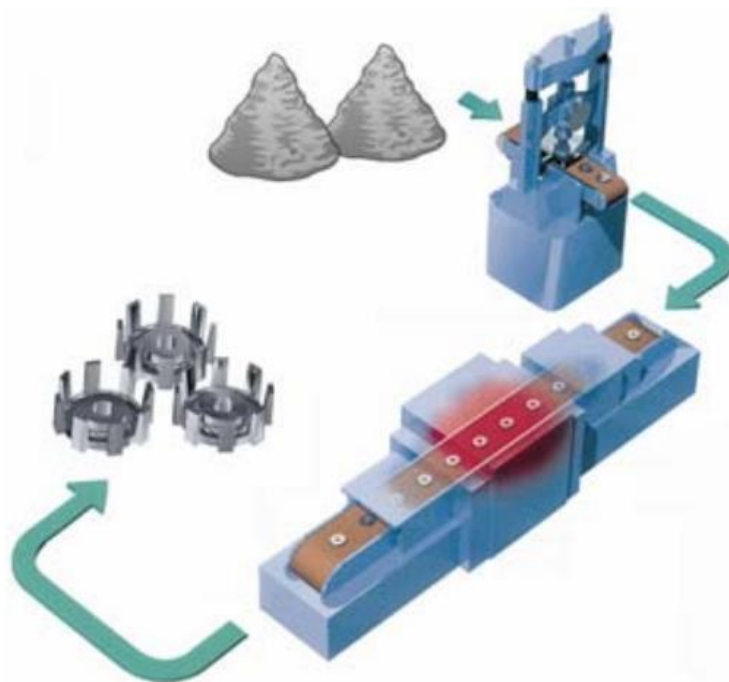


Figura 3.1 - Processo da metalurgia do pó [30]

Em função do constante aperfeiçoamento da técnica que proporciona a resistência mecânica necessária aos pós, como a sinterização e a cura, além das inovações contínuas na produção, resulta-se em pós com maiores densidades quando compactados. A metalurgia do pó tornou-se uma técnica competitiva com os processos metalúrgicos tradicionais, não somente sob o ponto de vista econômico, como igualmente pelo fato de obter, no produto final, propriedades mecânicas comparáveis com materiais fundidos, conformados mecanicamente ou usinados, ao mesmo tempo em que as operações de tratamentos térmicos superficiais podem ser aplicadas com êxito [31, 32].



### 3.1.1 Compactação dos Pós Metálicos

Nesta etapa do processo, define-se a geometria e as dimensões finais da peça desejada. Esta operação consiste no emprego de pressão sobre determinada quantidade de pó para sua conformação mecânica completa. Em virtude das características mecânicas dos pós aplicados na fabricação do produto, estas podem ser submetidas a pressões na faixa de 30 a 900 MPa [31, 33].

Na compactação dos pós metálicos é amplamente utilizado o emprego de prensa hidráulica com compactação de duplo efeito e matriz. Este sistema consiste em compactar o pó metálico por meio da pressão exercida pelos punções em duas direções, resultando em peças com densidade uniforme [34, 35, 36]. As dimensões da matriz influenciam diretamente sobre a força empregada na compactação, visto que a força é proporcional a área da cavidade. Outros parâmetros como: composição do pó metálico, pressão, distribuição do material na cavidade, tamanho das partículas e a utilização ou não de lubrificante impactam na densidade da peça antes da sinterização [37, 38].

Dentre os aspectos observados nesta etapa para fabricação da peça, avalia-se a resistência mecânica, devido à possibilidade de empregar outros processos de fabricação mecânica para obtenção do produto final. Outro fator importante na compactação é proporcionar o contato necessário entre as partículas de pó, para que a etapa de sinterização não comprometa a isolação elétrica das partículas, conseqüentemente, contribuindo para reduzir as correntes parasitas e a presença de espaços vazios na peça produzida. Esses fatores devem ser observados, pois impactam no rendimento das máquinas elétricas [33, 39].

No momento de elaborar o desenho mecânico da peça a ser fabricada é necessário avaliar as questões relacionadas a construção do conjunto de ferramentas. Os ângulos e tolerâncias das ferramentas apresentam diferenciação quando comparadas as empregadas em outros processos de produção mecânica. Isso ocorre, pois os pós metálicos não apresentam-se como fluido metálico e devido ao atrito das partículas com as ferramentas é necessário preencher de forma homogênea as cavidades da matriz [40].

### 3.1.2 Processo de Cura de Compósitos Metálicos

Concluída a compactação, a peça é direcionada ao processo de cura da resina. Essa etapa compreende a fase final do ciclo de consolidação dos pós metálicos, ciclo esse iniciado com a compactação. O procedimento de cura consiste no tratamento térmico que a

peça é submetida a temperaturas abaixo do ponto de fusão do compactado verde. A etapa de cura confere as características físicas e mecânicas que permitem a utilização imediata da peça. Como resultado ocorre a união metalúrgica das partículas do pó, sendo a resina responsável por conferir as características de isolamento elétrico e estabilidade mecânica da peça. Devido a composição dos pós metálicos empregados na fabricação da peça, essa adquire características mecânicas e magnéticas necessárias para aplicações em máquinas elétricas especiais. [41, 42].

A metalurgia do pó neste contexto, apresenta-se como uma alternativa viável para elaboração de projetos direcionados para máquinas elétricas especiais. Devido a possibilidade de utilizar os materiais magnéticos macios (*SMC*) e compósitos a base de ferro para obtenção de peças na forma final para uso, sem a necessidade de usinagem e/ou retificação [39]. As etapas da metalurgia do pó proporcionam o desenvolvimento de compósitos magnéticos para aplicações eletromagnéticas. Esses compósitos são constituídos por partículas de ferro circundadas por material orgânico ou inorgânico isolante.

Os materiais compósitos na maioria das aplicações oferecem uma série de vantagens quando comparados as tradicionais chapas laminadas utilizadas na fabricação de motores elétricos rotativos, como por exemplo: comportamento ferro magnético isotrópico (fluxo tri-dimensional), baixo nível de perdas por correntes parasitas, baixas perdas totais no núcleo quando submetido a média e alta frequência, possibilidade de aperfeiçoar as características térmica da máquina, flexibilidade no formato dos núcleos magnéticos e possível redução do peso e custos de produção [31, 43].

### 3.2 Propriedades Magnéticas

As características dos materiais obtidos pela metalurgia do pó, como propriedades magnéticas e elétricas influenciam em fatores como rendimento e torque. Deste modo, a elaboração da mistura de pós metálicos para fabricação de máquinas elétricas é considerada de extrema relevância [39].

No caso do *SMC* 1P Somaloy 500® e o material Ferro Cobalto, esses possuem resistividade elétrica elevada, devido principalmente a porosidade e a oxidação superficial das partículas [39]. Para aumentar a resistência elétrica total das peças fabricadas pela metalurgia do pó é adicionado outros materiais, como resinados, que conseqüentemente alteram a porosidade da peça [33]. Ao reduzir a porosidade ocorre o aumento da permeabilidade magnética e da indução por saturação, em conseqüência, maior será o fluxo

magnético no circuito e proporcionalmente maiores serão as intensidades de campo magnético (H) no entreferro [23, 43]. Esse incremento no fluxo magnético possibilitará ao API maior força de propulsão planar.

A fabricação de núcleos para máquinas elétricas especiais através da metalurgia do pó destaca-se por apresentarem perdas magnéticas comparáveis aos materiais estampados nas frequências de 50 Hz ou 60 Hz e inferiores quando submetidos em médias e altas frequências. Essa característica ocorre devido a menor perda do núcleo com o material compactado, devido a redução de perdas por *Foucault* [43, 44]

### 3.2.1 Comportamento dos Materiais Magnéticos Quanto a Permeabilidade

A diferença entre a resposta de indução magnética no material sob a incidência de um campo magnético externo define seu comportamento magnético entre materiais com naturezas distintas. A Permeabilidade Magnética Relativa ( $\mu_r$ ) de qualquer material magnético é expresso pela Eq. (1).

$$\mu_r = \frac{\mu_{\text{material}}}{\mu_0} \quad \text{Eq (1)}$$

Onde:

$\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo; e

$\mu_{\text{material}}$  refere-se à permeabilidade magnética do material em análise.

Conforme a Permeabilidade Magnética Relativa ( $\mu_r$ ) do material é possível classificá-lo em três tipos: ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos [4, 45]. Os materiais diamagnéticos apresentam uma permeabilidade relativa menor que o vácuo. Na prática, as linhas de campo magnético não utilizam o material diamagnético como meio condutor, pois o meio externo permitirá um caminho com menor relutância magnética [46, 47].

Os materiais paramagnéticos são totalmente inertes aos campos magnéticos dentro do espaço livre. O material paramagnético perfeito será, naturalmente, o vácuo. Entretanto, o hidrogênio em condições normais de temperatura e pressão detém o mesmo comportamento ( $\mu_r = 1$ ). Alguns materiais como o alumínio ( $\mu_r = 1,000021$ ) são considerados paramagnéticos, mesmo que sua permeabilidade relativa seja superior a 1, em razão da proximidade com o valor unitário, o efeito ferromagnético desses materiais é desprezível.

Os materiais que apresentam uma permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ) muito superior a 1 são classificados como ferromagnéticos. São materiais que permitem elevadas magnitudes de indução magnética quando submetidos a campos magnéticos externos. Essa característica resulta no direcionamento das linhas de fluxo magnético através do material.

Os materiais ferromagnéticos constam como as melhores opções para a montagem de circuitos magnéticos, e conseqüentemente, para máquinas elétricas. Entretanto, ressalta-se que mesmo nesses materiais a resposta em indução magnética ( $B$ ) sob a incidência de um campo magnético ( $H$ ) não é linear.

### 3.2.2 Indução por Saturação Máxima ( $B_{max}$ )

A Indução por Saturação Máxima ( $B_{max}$ ) dependerá da intensidade do campo magnético ( $H$ ) que está sendo aplicado no material. Entretanto, caso ocorra o aumento significativo na intensidade do campo magnético ( $H$ ) não ocasionará um incremento expressivo linear da indução magnética ( $B_{mag}$ ). A resposta não linear da indução magnética ( $B_{mag}$ ) é responsável pela existência das curvas do produto energético ( $BH$ ), extraídas experimentalmente dos materiais magnéticos estudados para aplicações em dispositivos eletromagnéticos [46]. Os dados das curvas de magnetização são imprescindíveis para análise das propriedades magnéticas dos materiais, pois relacionam a densidade de fluxo magnético ( $B$ ) com o campo magnético ( $H$ ), sendo importante para a determinação do ponto de saturação do mesmo. A Figura 3.2 apresenta uma curva de magnetização do material *SMC 1P Somaloy 500*<sup>®</sup> [48, 49].

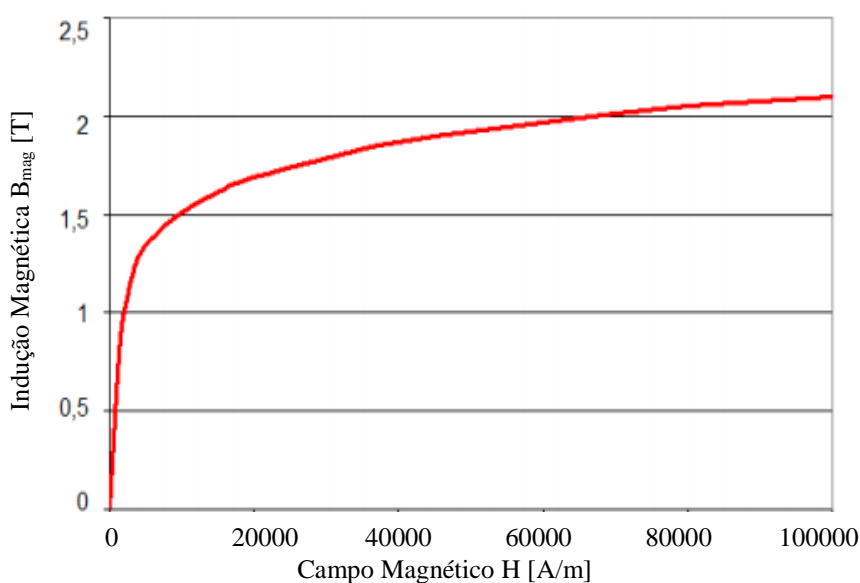


Figura 3.2 - Curva BH com excitação em corrente contínua para *SMC 1P Somaloy 500*<sup>®</sup> [48].

### 3.2.3 Curva de Histerese

Nos materiais ferromagnéticos quando é interrompida a ação de magnetização, o mesmo não retorna ao seu estado original. Deste modo, caso uma amostra de material ferroso for saturada magneticamente, conseqüentemente a remoção do campo magnético resultará em uma densidade de fluxo residual denominado de Magnetismo Residual ( $B_r$ ), esse fluxo residual refere-se ao movimento das paredes nos domínios magnéticos (fig 2.3) [31]. Contudo, para anular  $B_r$  é necessário aplicar um campo magnético de intensidade contrária denominado de coercitividade específica do material, que impacta diretamente na Curva de Histerese

Com a aplicação de campos magnéticos ( $H$ ) no núcleo fabricado para API, haverá mesmo em materiais magneticamente macios ( $SMC$ ) uma indução residual ( $B_r$ ) e um campo coercitivo ( $H_c$ ) dependentes das propriedades do material. A Figura 3.3 apresenta a curva de histerese característica do ferro puro, sendo indicados os pontos de  $B_r$  e  $H_c$ . Para fabricação de máquinas elétricas busca-se utilizar materiais que apresentem curva de histerese ideal, ou seja praticamente uma reta com a menor área possível em seu interior [38, 47].

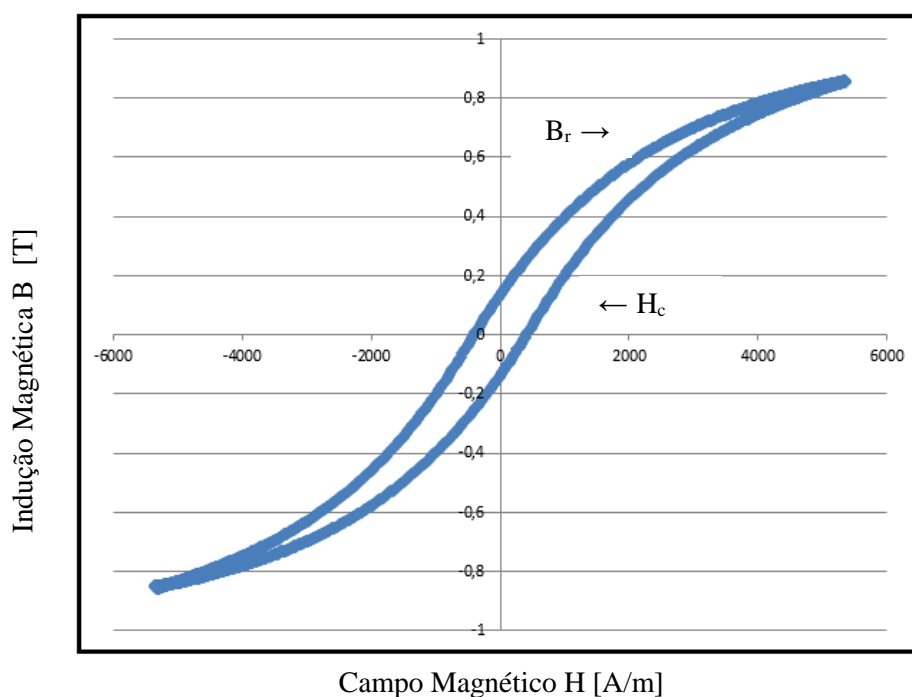


Figura 3.3 - Exemplo de curva de histerese (Ferro puro) [39].

### 3.3 Considerações Gerais sobre Materiais Compósitos

Um material compósito é definido como a associação entre dois ou mais materiais com características diferentes, visando como resultado um material com propriedades que não podem ser encontradas nos componentes de forma isolada. As propriedades dos compósitos dependerão dos materiais constituintes e seus volumes utilizados na sua elaboração. A compactação em temperaturas controladas ocorre abaixo do ponto de fusão dos pós metálicos. Dessa forma, promove-se a ligação metalúrgica entre as partículas e o material isolante, criando assim um composto ligante que une os pós, contudo não proporciona o contato direto entre eles [50, 51].

Diversas propostas de compósito a base de ferro-resina isolante tem despertado o interesse de muitos pesquisadores devido a capacidade desses materiais de melhorar o rendimento das máquinas elétricas. Essa possibilidade de maior performance dos motores elétricos deve-se as características dos compósitos magnéticos comerciais apresentarem redução das correntes de *Foucault*, maior densidade do fluxo magnético e elevada resistividade elétrica.

Os compósitos utilizados na fabricação de máquinas elétricas, em sua maioria são constituídos de partículas de ferro com alto teor de pureza envolvidas por material isolante. Nas aplicações eletromagnéticas o material isolante tem papel relevante, pois impacta diretamente no valor das correntes elétricas parasitas. Dessa forma, diversas pesquisas apresentam alternativas de material isolante visando o maior rendimento das máquinas elétricas.

Neste cenário destacam-se os progressos alcançados pela metalurgia do pó referentes aos Compósitos Magnéticos Macios (*Soft Magnetic Composites - SMC*). Os *SMC* quando aplicados em dispositivos eletromagnéticos, podem ser utilizados para fabricação de máquinas elétricas com geometrias complexas. Componentes *SMC* normalmente podem ser produzidos por técnicas convencionais de metalurgia do pó (*PM*) (*Powder Metallurgy - PM*), com ou sem a aplicação de novas metodologias tais como, dupla compactação, compactação a quente, tratamentos térmicos [52, 53].

Conforme os estudos desenvolvidos por Schoppa *et. al* [54], os compósitos permitem a elaboração de máquinas elétricas com fluxo magnético tridimensional para aplicações em motores de alta eficiência. Simultaneamente, o desenvolvimento de *SMC* através da metalurgia do pó conferindo boas propriedades magnéticas em frequências elevadas que contribuem para o aumento da densidade de energia e miniaturização de

máquinas elétricas. Dessa forma o *SMC* viável para aplicações com espaço limitado, por exemplo, na indústria de automóvel, robótica, equipamentos médicos. Nestes campos de aplicações, o *SMC* pode até mesmo superar os aços elétricos comerciais [55].

### 3.3.1 Benefícios de Compósitos Magnéticos Macios

A maioria dos pesquisadores visa a elaboração de novos compósitos magnéticos com características específicas direcionadas para máquinas elétricas. Esses novos *SMC* apresentam como característica maior concentração das linhas de fluxo magnético em consequência os projetos de máquinas elétricas de geometrias complexas são beneficiados [56]. Dentre estas características destaca-se a permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ) dos *SMC* ser apenas 10 à 20% quando comparados as chapas de aços laminados utilizadas para construção de núcleos magnéticos. Contudo, o *SMC* permite confeccionar núcleos com formas complexas inviáveis com aços laminados. Desse modo, pode-se aplicar o *SMC* à base de Ferro em substituição do núcleo laminado convencional em máquinas elétricas, devido aos seguintes benefícios [57]:

- a) devido as tolerâncias restritas durante o processo de obtenção do *SMC*, reduzem-se as lacunas de ar no material em relação ao laminado;
- b) redução nas perdas relacionadas ao cobre, consequência da diminuição do volume de cobre empregado na máquina elétrica;
- c) minimização das perdas em alta frequência e por correntes de *Foucault*;
- d) construção mecânica modular que permite a possibilidade de fácil remoção de uma unidade para rápido reparo ou substituição;
- e) possibilidade de produzir três fluxos dimensionais padrões no material *SMC* e consequentemente, aumentar o desempenho da máquina elétrica;
- f) ausência do isolamento por fase, devido o resultado da utilização de enrolamentos sem sobreposição;
- g) no caso do estator laminado, depois de montar a pilha ocorre perda de produtividade em virtude de etapas para alívio de tensão; e
- h) diminuição nas correntes elétricas induzidas devido ao emprego de técnicas Modulação por Largura de Pulsos (PWM), visto que o *SMC* atua como isolamento contra este tipo de fluxo de corrente.

Essas vantagens são acompanhadas por certo número de inconvenientes, ressalta-se a permeabilidade relativamente baixa, sendo aproximadamente de 500 para o *SMC* 1P

Somaloy 500<sup>®</sup>. Nas desvantagens dos *SMCs* incluem-se a baixa resistência mecânica devido ao processo de cura da resina, bem como perdas no ferro em baixas frequências, devido ao aumento da perda por histerese, embora as perdas de corrente de *Foucault* sejam desprezíveis [32, 52].

### 3.3.2 Material Compósito Macio 1P Somaloy 500<sup>®</sup>

O 1P Somaloy 500<sup>®</sup> produzido pela empresa sueca Högans é um material ferromagnético compósito magneticamente macio, que se aplica em frequências no intervalo de 5 Hz até 400 Hz, por apresentar perdas magnéticas totais baixas nesta faixa (fig. 3.4) [12]. O material é composto por pós metálicos, lubrificantes e aglutinantes. A quantidade adicionada de lubrificantes e/ou de aglutinantes ao pó metálico, após compactação e tratamento térmico determina as propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas do material [58, 59].

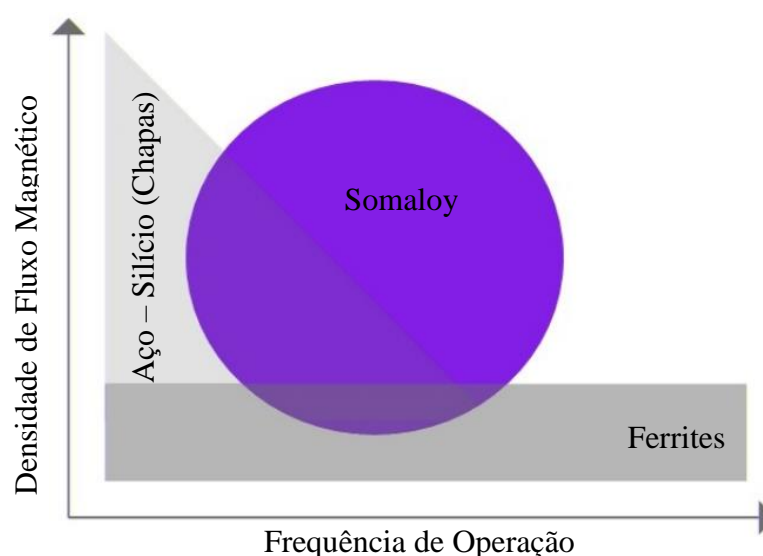


Figura 3.4 – Posicionamento do Somaloy<sup>®</sup> entre outros materiais quanto Indução x Frequência [44, 49].

O 1P Somaloy 500<sup>®</sup> apresenta-se como Compósito Magneticamente Macio (*SMC*) de grão isolado orientado. Na elaboração básica deste compósito é empregado ferro em elevado nível de pureza [60]. As partículas de pó são ligadas por um material aglutinante que confere ao material características de isolamento elétrico. Concluída a composição do 1P Somaloy o mesmo é compactado no formato desejado e submetido ao tratamento térmico, para obter as características mecânicas necessárias.

A adição de lubrificantes na etapa de elaboração do compósito resulta na redução da fricção durante as etapas de compactação. A primeira compactação é realizada a uma



temperatura em torno de 130 °C, provocando um pequeno adensamento do composto . A Figura 3.5 apresenta a partícula e a disposição da camada isolante do SMC 1P Somaloy 500® [17].

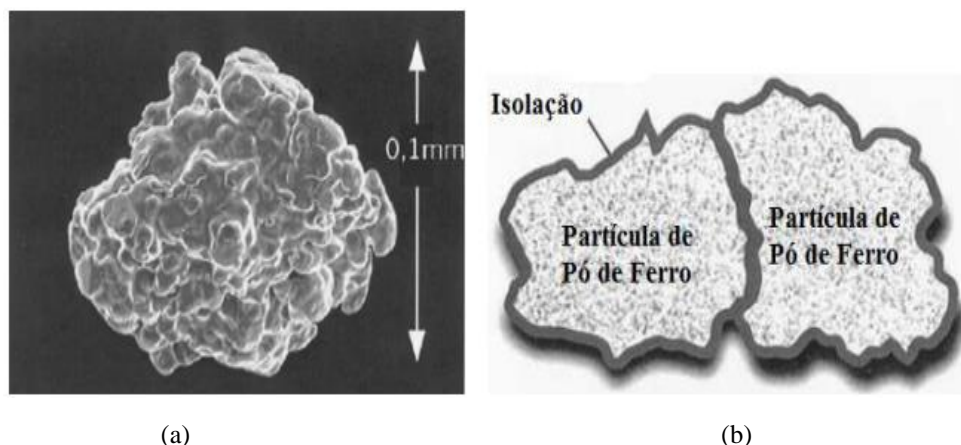


Figura 3.5 – Características do Somaloy: (a) Tamanho aproximado da partícula de ferro; e (b) Disposição da camada isolante entre partículas [59].

Nas faixas de operações em frequências baixas, suas propriedades vantajosas são: isotropia elétrica, magnética e térmica, baixas correntes parasitas, alta permeabilidade magnética, redução em tamanho e peso, baixa coercitividade e alta temperatura de Curie. Essa isotropia magnética permite que se estabeleça uma distribuição de campo magnético no seu volume, com a permeabilidade e resistividade independentes da direção e sentido desse campo, mantem-se um bom desempenho por conta das demais características [12].

A denominação “1P” e “500”, que acompanham o Somaloy, são referentes às características específicas dos materiais e dependem do processo de fabricação e que apresentam diferentes propriedades elétricas e magnéticas. O termo “P” representa a quantidade de vezes que o Somaloy foi submetido a um tratamento térmico e de compactação após a primeira fase do processo. Essa recompactação ajuda, dentre outras características, a obter um aumento da resistência ao cisalhamento transversal e ao aumento da permeabilidade magnética relativa. A empresa Högans definiu o termo “HR” indica que o Somaloy possui uma alta resistividade elétrica (*High Resistivity* – HR) [60]. A numeração posterior ao termo “Somaloy” identifica o produto conforme as características descritas abaixo [12, 60 ]:

- a) 1P Somaloy 500, com 0,5% de Kenolube, passa por um segundo estágio de compactação de 800MPa com um tratamento térmico final de 500 °C por um período de 30 minutos, obtendo uma força transversal de ruptura de 50 Mpa;
- b) 1P Somaloy 700, com 0,4% de Kenolube, resulta de um segundo estágio de

- compactação de 800MPa com um tratamento térmico final de 530 °C por um período de 30 minutos, proporciona uma força transversal de ruptura de 40 Mpa;
- c) 3P Somaloy 700, com 0,3% de Kenolube, realiza-se por um segundo estágio de compactação de 800 MPa com um tratamento térmico a vapor, obtendo uma força transversal de ruptura de 125 MPa e,
- d) 3P Somaloy 700 HR, com 0,3% de Kenolube, que passa por um segundo estágio de compactação de 800MPa com um tratamento térmico a vapor, obtendo uma força transversal de ruptura de 125 MPa.

O peso específico do material apresenta influência direta no desempenho da máquina elétrica, visto que, quanto maior o peso específico, maior será a permeabilidade magnética relativa. Na Tabela 3.1 observa-se a relação do peso específico, associado com outros parâmetros dos quatro tipos de Somaloy.

Tabela 3.1- Parâmetros de comparativos dos quatros tipos de Somaloy [21, 61, 62].

Tipo de Somaloy	Permeabilidade Magnética Relativa $\mu_r$ [ - ]	Resistividade Elétrica $\rho$ [ $\mu\Omega.m$ ]	Peso Específico $\gamma$ [g/m <sup>3</sup> ]
1P Somaloy 500	500	70	7,32
1P Somaloy 700	540	400	7,5
3P Somaloy 700	650	200	7,57
3P Somaloy 700 HR	630	630	7,53

Com base na literatura, um dos parâmetros empregados para definir a aplicação de materiais compósitos macios, em específico o *SMC* 1P Somaloy 500, deve-se ao fato de apresentar menores perdas no núcleo em baixa frequência quando comparado ao Aço ABNT 1020. Aas características magnéticas e elétricas do compósito 1P Somaloy 500 que serão utilizadas para simulações numéricas neste estudo são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Características elétricas e magnéticas do *SMC* 1P Somaloy 500<sup>®</sup> [12, 62]

Indução de Saturação ( $B_{max}$ )	1,34 [T]	
Densidade ( $\rho$ )	7120 [kg/m <sup>3</sup> ]	
Condutividade Elétrica ( $\sigma_e$ )	3571,428 [S/m]	
Campo Coercitivo ( $H_c$ )	250 [A/m]	
Pemeabilidade Magnética Relativa Máxima ( $\mu_r$ )	500	
Perdas no Núcleo a 1T	50 Hz	5 [W/kg]
	400 Hz	45 [W/kg]
	1000 Hz	138 [W/kg]

Segundo a pesquisa desenvolvida Esswein Junior, a permeabilidade magnética dos SMC é significativamente baixa comparada com a dos materiais de aços laminados. A Figura 3.6 apresenta um gráfico comparativo entre a permeabilidade relativa ( $\mu_r$ ) de um aço laminado com 3% Si e o Somaloy da Höganäs em função do campo magnético. No gráfico pode-se notar que o máximo valor da permeabilidade relativa ( $\mu_r$ ) do SMC é dez vezes menor comparada com o material laminado [31].

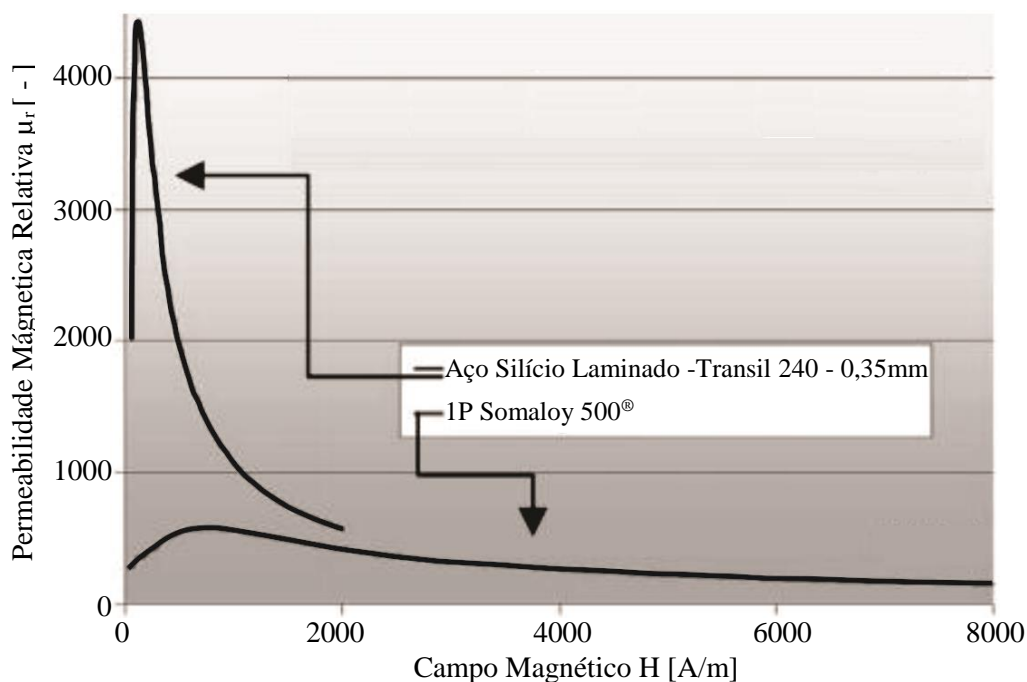


Figura 3.6 – Permeabilidade magnética relativa em função do campo magnético para aço 3% Si laminado e um material SMC [31].

### 3.3.2.1 Comparativo do 1P Somaloy 500 com Aço Silício Laminado

O aço laminado geralmente empregado na fabricação de máquinas elétricas é normalmente classificado em aço de grão orientado ou não-orientado. Sendo a aplicação típica para aços de grão não-orientados utilizados na fabricação de diferentes tipos de máquinas elétricas girantes. Este material possui elevada indução de saturação magnética ( $B_{\max}$  2T), baixa força coerciva ( $H < 100 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ ) e, é caracterizado por perdas totais baixas. Diante das perdas elétricas em máquinas girantes e lineares, os novos materiais macios obtidos pela metalurgia de pó como compósitos a base de ferro, apresenta-se como uma alternativa viável para o núcleo magnético das máquinas elétricas [62].

Segundo Vijayakumar *et al.* [62], por meio da comparação entre as curvas de B-H do materiais aço silício (M19) e o 1P Somaloy 500®, observa-se que embora apresente uma permeabilidade relativa inferior (fig. 3.7), o 1P Somaloy 500® apresenta características

desejáveis para fabricação de máquinas elétricas, conforme descrito abaixo:

- a) redução do volume de cobre devido ao aumento do fator de preenchimento, consequência na redução das dimensões do enrolamento e, preserva-se o desempenho da máquina elétrica;
- b) diminuição das perdas em alta frequência. O *SMC* praticamente não apresenta perda por correntes de *Foucault*;
- c) apresenta significativo potencial na redução das lacuna de ar, como resultado das baixas tolerâncias empregadas no processo de fabricação de *SMC*;
- d) a construção modular permite a fácil remoção de um módulo para reparação rápida ou substituição e,
- e) estator é facilmente reciclável, visto que, pode ser novamente utilizado e os enrolamentos de cobre prontamente removidos.

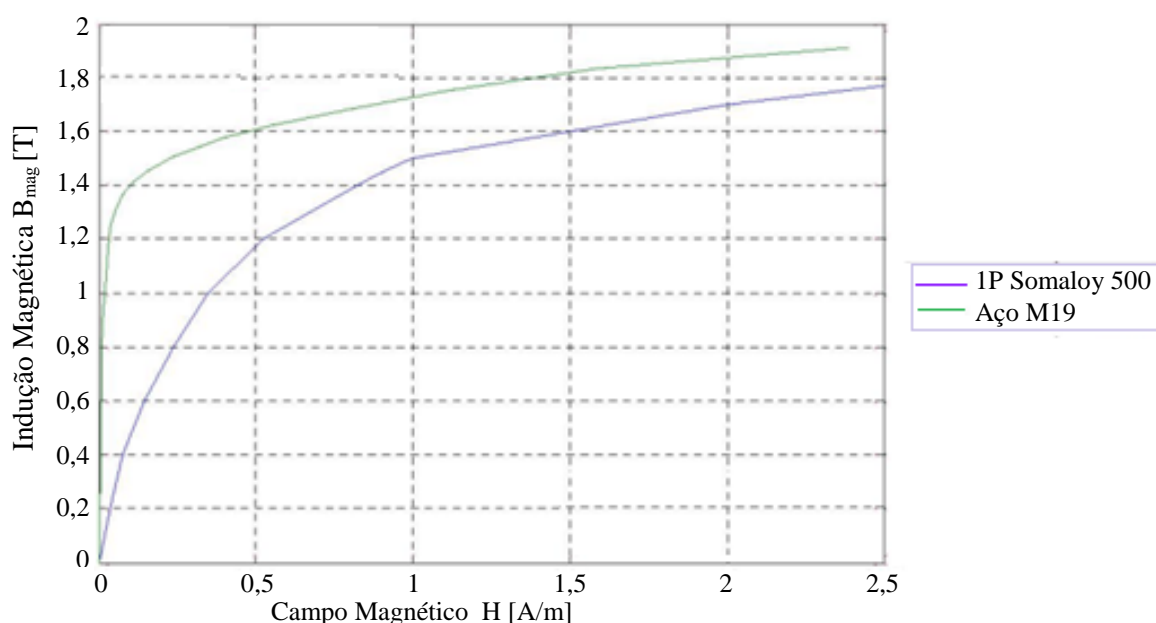


Figura 3.7 - Comparativo das Curvas B-H do Aço Laminado e 1P Somaloy 500<sup>®</sup> [62].

Diante dos pontos listados, observam-se inúmeras possibilidades de aplicação do *SMC* 1P Somaloy 500<sup>®</sup> na fabricação de diferentes topologias de máquinas elétricas passíveis de serem empregadas em diversas áreas.

### 3.3.3.2 Parâmetros que Influenciam no Desempenho dos Compósitos Magnéticos Macios

O processo de obtenção de compósitos magnéticos pode ser dividido em poucas etapas. Cada etapa é caracterizada por um conjunto de parâmetros tecnológicos, que pode afetar o desempenho final dos materiais compósitos magnéticos. Neste aspecto as

considerações sobre o processamento são relevante referente às técnicas de moldagem por compressão que são: pressão, temperatura e tempo de cura.

A pressão de compactação tem expressiva influência na densidade final que reflete em algumas das propriedades físicas dos compósitos magnéticos. Contudo, as alterações na temperatura e tempo de cura resultam na variação do parâmetro dielétrico e na camada de isolamento. A correta definição dos parâmetros para obtenção de *SMC* torna-se relevante, visto que, a seleção inadequada destes parâmetros pode resultar no aumento das perdas elétricas que impactam diretamente no rendimento das máquinas elétricas, e consequentemente, no desenvolvimento e desempenho de novas topologias [63, 64].

A influência dos três fatores principais, composição do dielétrico, curva de aquecimento e condições de tratamento térmico tem sido investigada por Pang et al [64]. Os resultados obtidos sobre esses fatores apresentaram significativo efeito no desempenho dos compósitos a base de Fe. Gilbert *et al* [65] investigaram os efeitos das variáveis de processamento e métodos sobre a densidade, estrutura e propriedades magnéticas de materiais compósitos magnéticos macios principalmente em aplicações com baixas perdas elétricas em máquinas. Constatou-se que ambas as propriedades, magnéticas e elétricas, dependem fortemente da densidade da amostra e tratamento térmico [64, 65].

Para realizar a análise desses parâmetros utilizou-se na pesquisa o 1P Somaloy 500<sup>®</sup>, produzido pela empresa Höganäs, sendo as amostras com as seguintes dimensões: diâmetro externo de 55 mm, diâmetro interno de 45 mm e a espessura de 5 mm. O gráfico das perdas elétricas foi obtido a partir de medições do ciclo de histerese em corrente alternada, de acordo com as normas IEC 60404-6, com o emprego do gráfico de histerese AMH-20K-HS produzido pelo Laboratório Eletrofísico Walker LDJ Científica.

Segundo Slusarek *et. al* [63], as perdas totais de energia foram mensuradas, sendo a densidade fluxo máximo igual a 1,3 T, em uma faixa de frequência de 10 a 5000 Hz. As medições das perdas elétricas foram conduzidas pelo registro de pontos individuais e da área de integração da curva de histerese. A otimização de perda de energia foi realizada em relação à pressão de compactação [*P*] e a temperatura [*T*], enquanto os outros parâmetros tecnológicos (composições em pó e volume) foram mantidos. Este procedimento foi realizado no conjunto de 12 amostras que foram produzidas de acordo com a matriz de medição dos parâmetros tecnológicos [63].

As amostras foram produzidas de acordo com dois métodos: primeiramente aplicou-se diferentes pressões de compactação [*P*] com a temperatura constante de cura [*T*] e o segundo momento produziu-se as amostras com diferentes temperaturas de cura [*T*] e

pressões de compactação constante  $[P]$ . Em ambos os casos ocorreu à redução das perdas de energia com o aumento da pressão de compactação e temperatura de cura. A determinação dos pontos críticos de pressão para compactação  $[P_c]$  e temperatura de cura limite  $[T_c]$  referem-se aos limites experimentais relativos a pressão de compactação e temperatura de cura que não influencia na redução das perdas. Acima destes valores as perdas de energia aumentam consideravelmente.

De acordo com Sokalski *et al.* [63] a relação correta entre a pressão de compactação e a temperatura de cura, influenciam diretamente na redução das perdas do material magnético. Três desses pontos foram determinados experimentalmente e foi traçada uma curva que representa o comportamento do SMC 1P Somaloy 500<sup>®</sup> que apresenta baixas perdas elétricas (fig. 3.8) [66].

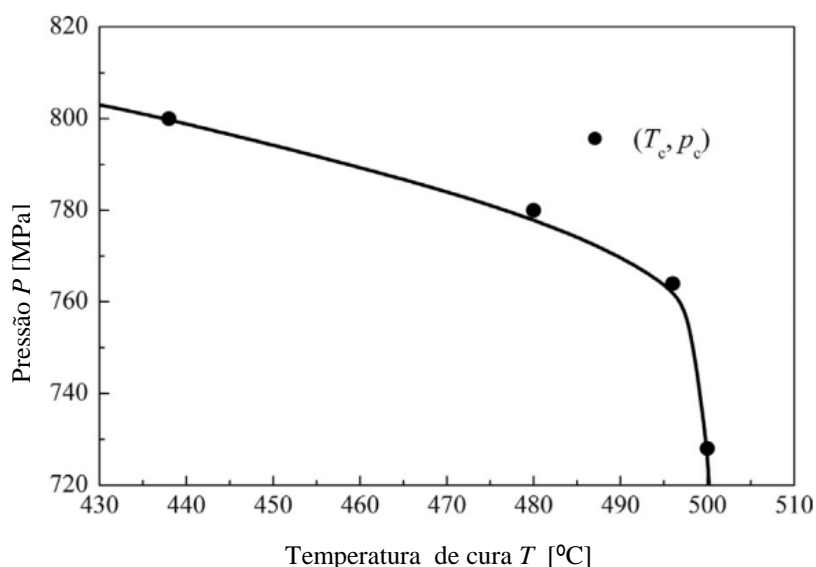


Figura 3.8 -Determinação dos pontos críticos em relação à pressão e temperatura de cura do 1P Somaloy 500<sup>®</sup> [66].

### 3.3.3 Material Superalloy

O Superalloy é uma liga ferromagnética elaborada com materiais de níquel-ferro de alta performance e permeabilidade. Existem alguns estudos visando a análise de suas propriedades para emprego no desenvolvimento de máquinas elétricas com maior performance e menor custo de produção, apoiado no interesse da indústria da metalurgia do pó, visto que o consumo de aços laminados para fabricação de motores elétricos é muito superior comparada a demanda de estruturas sinterizadas [67].

Neamt *et. al* [67] apresentam um estudo com emprego do Superalloy, no qual se analisa a influência da pressão de compactação, o teor de polímero, a adição de

lubrificantes e pós, tratamento térmico de compactação sobre a densidade, resistividade elétrica, perdas no núcleo e permeabilidade inicial relativa à nanocristalino Supermalloy pó (79Ni16Fe5Mo, wt.%) com base em núcleos compactos em forma toroidal e polimerizada, sendo submetidos à faixa de frequência de 100 Hz a 100 kHz para densidades de fluxo 0,05 e 0,1 T.

Os resultados da resistividade elétrica e da densidade obtidas por meio das amostras dos núcleos Supermalloy são apresentados na Tabela 3.3. Observou-se, em função dos seguintes parâmetros de processamento: pressão de compactação, quantidade de polímero e lubrificante, que as medições mostraram o aumento da densidade dos núcleos compactos em função do incremento da pressão de compactação de 5,96 g/cm<sup>3</sup> para pressão de compactação de 600 Mpa a 6,18 g/cm<sup>3</sup> para 800 Mpa [67].

Tabela 3.3 - Resistividade elétrica  $\rho$  e densidade  $\varphi$  de amostras de Supermalloy [67].

Parâmetros de Comparação	Resistência Elétrica $\rho$ ( $\Omega \pm 0,01$ )	Densidade $\varphi$ (g/gm <sup>3</sup> $\pm 0,01$ )
600 MPa – 1% araldite	4,62	5,96
700 MPa – 1% araldite	3,97	6,05
800 MPa – 1% araldite	3,17	6,18
700 MPa – 0,5% araldite	2,93	6,07
700 MPa – 1,5% araldite	3,15	6,10
700 MPa – 2% araldite	5,11	5,90
700 MPa – 1% araldite e 1% Zn stearate	2,61	6,18

Na Figura 3.9 observa-se que as maiores perdas no núcleo em altas frequências correspondem na compactação de menor resistividade elétrica e principalmente devido ao desenvolvimento de correntes de *Foucault*. Estas correntes são proporcionais ao quadrado da frequência e inversamente proporcional a resistividade elétrica do compacto. Com aumento das perdas do núcleo pelo desenvolvimento de correntes de *Foucault*, a permeabilidade magnética do *SMC* é sensível a densidade compacta bem quanto a sua microestrutura e pureza.

O aumento da pressão de compactação pode levar a formação de contatos elétricos entre as partículas devido à degradação da camada de polímero isolante. Logo, os contatos elétricos entre as partículas ocasionam a formação de maiores "partículas ferromagnéticas equivalentes", e conseqüentemente, favorece o desenvolvimento de correntes de *Foucault* maiores porque as perdas do núcleo são proporcionais ao quadrado da dimensão da

partícula. O aumento do tamanho de partícula "equivalente" resulta no aumento das perdas do núcleo nos compactos [68].

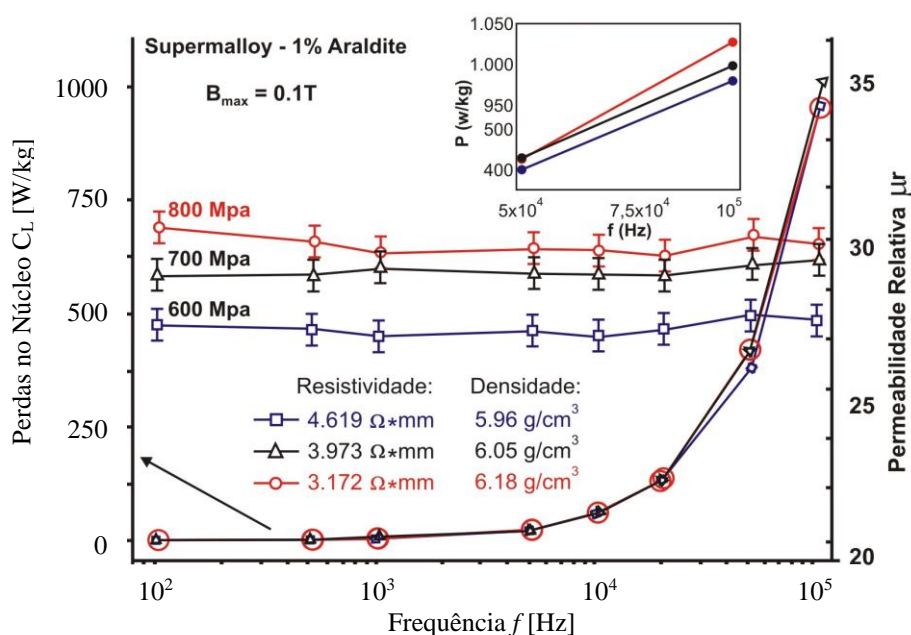


Figura 3.9 – Influência da pressão de compactação sobre as perdas do núcleo e permeabilidade relativa inicial [65].

Na Figura 3.10 pode-se visualizar a variação das perdas do núcleo e da permeabilidade relativa inicial para os quatro pós compactos obtidos com teor de polímero diferentes (0,5, 1, 1,5 e 2 em peso.%).

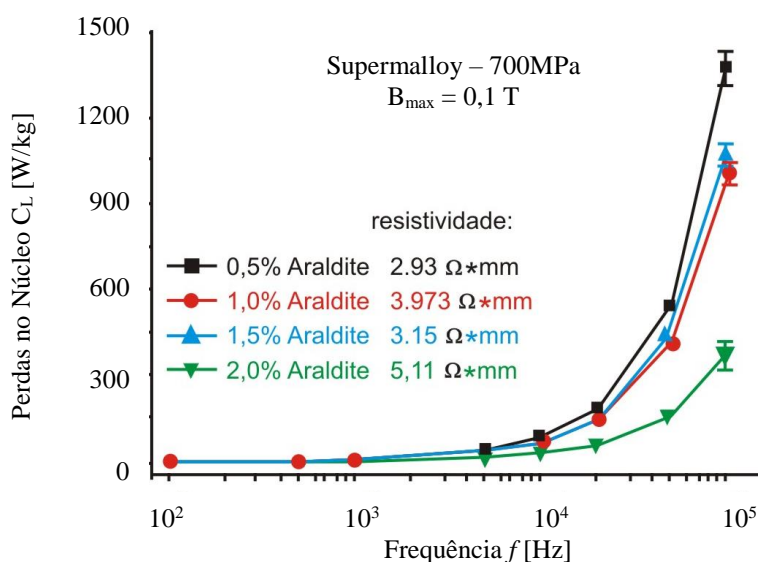


Figura 3.10 - Influência do teor de polímero sobre a evolução das perdas do núcleo e da permeabilidade relativa [68]

Pode ser visto a partir da Figura 3.11 que o aumento do teor de polímero leva a uma diminuição das perdas do núcleo. A influência positiva da camada isolante destaca-se em



altas frequências. Neste ponto a contribuição de correntes de *Foucault* para as perdas totais do núcleo é predominante [65].

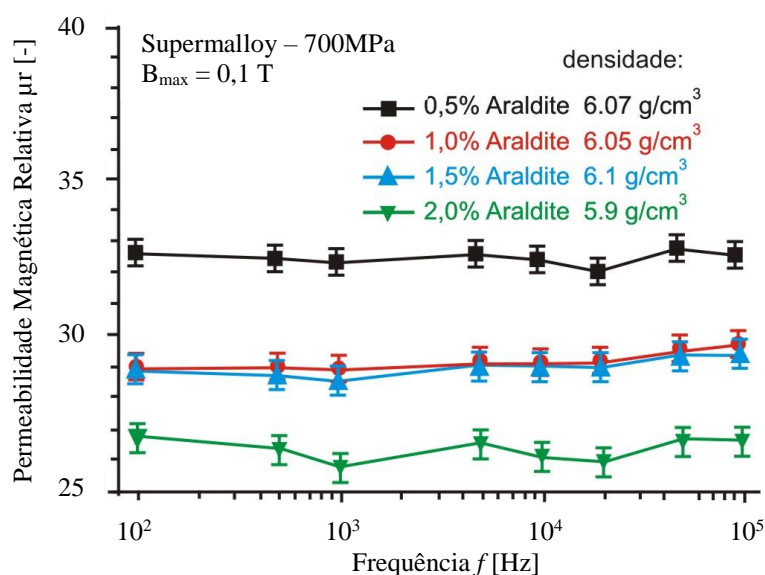


Figura 3.11 - Influência do teor de polímero sobre a evolução das perdas do núcleo na faixa de 100 Hz a 100 kHz. A pressão de compactação para todos os pó compactos é 700 MPa. [67]

### 3.3.4 Compósitos a Base de Ferro-Cobalto

Compósitos ferromagnéticos elaborados com ferro-cobalto e ferrites tem despertado o interesse nos últimos anos, resultando em estudos referente as características magnéticas e elétricas. Essas pesquisas são motivadas por características importantes como: alta permeabilidade, elevada indução por saturação, baixas perdas por histerese e correntes parasitas em aplicações com fluxo alternado.

O compósito Ferro-Cobalto (Fe-Co) apresenta maior magnetização de saturação comparado com outros materiais magnéticos à base de ferro [69]. Esse apresenta alta magnetização de saturação ( $M_s$ ) e elevada temperatura de Curie ( $T_c = 900 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Isto permite seu emprego em dispositivos que operem em altas temperaturas, como novas concepções de turbina para geração elétrica. As ligas de Fe-Co resultam em elevada saturação magnética [69], em consequência encontra-se com maior frequência empregadas em motores aero espaciais, geradores com núcleo laminado, eletroímãs, transformadores de alto desempenho, mancais magnéticos, e transformadores de corrente, ou seja, dispositivos que apresentam elevados níveis de permeabilidade em altas frequências.

O ferro não aplica-se apenas substancialmente puro, mas na composição de ligas, por exemplo, Fe-Si, Fe-Si-B, Si-Fe-Ni, Fe-Ni, Fe-Co, etc. Essas variações de composição deve-se ao fato que, o ferro puro é um bom material ferromagnético e a sua resistividade é

muito baixa, ou seja, apresenta altas perdas por correntes parasitas. Um compósito contendo ferro proporciona maior permeabilidade magnética e menores perdas totais do núcleo e resulta em dispositivos elétricos com maior eficiência quando comparados aos fabricados com ferro puro.

O material Permendur composto por somente Ferro e Cobalto é relativamente frágil. Este problema pode ser contornado com a adição de vanádio (49%Fe-49%Co-2%V), resultando em uma liga suficientemente dúctil para ser laminada e tratada termicamente. Esta liga pode ser também denominada de Vanádio Permendur. O compósito denominado Supermendur, difere-se do Permendur pelas propriedades magnéticas melhoradas durante o processo de obtenção, conhecido como “*vacuum melted*” resultando em características magnéticas e elétricas apresentadas na Tabela 3.4. Associado as propriedades magnéticas as peças confeccionadas com Permendur podem ser repressadas e resinterizadas chegando a 98% da densidade teórica da liga [70, 71]. A Tabela 3.4 ilustra as propriedades magnéticas dos compósitos permendur e supermendur obtidos através dos componentes Fe-Co-2%V resultando em compósitos com alta permeabilidade.

Tabela 3.4 - Propriedades do Permendur e Supermendur (Alta pureza CoFe-2%V)[72, 73]

Paramêtros	Materiais	
	Permendur	Supermendur
Resistividade Elétrica $\rho$ [ $\mu\Omega.m$ ]	$25 \times 10^{-6}$	$25 \times 10^{-6}$
Indução por Saturação Máxima $B_{max}$ [T]	2,4	2,4
Permeabilidade Magnética Relativa $\mu_r$ [ - ]	4000-8000	92500
Força Coercitiva $H_c$ [A/m]	398	15,92

No caso do compósito Permendur ocorre a ordenação cristalográfica em torno de 730°C, conforme mostra a Figura 3.1.2, sendo a linha pontilhada corresponde à temperatura de Curie, de acordo com a solução. O Permendur composto por 50%Fe-50%Co possui a temperatura de Curie abaixo da temperatura de transição de fases ( $\alpha$  para  $\gamma$ - Cúbica de Face Centrada). A fase acima de 730 °C é denominada de fase  $\alpha$  desordenada, devido os átomos posicionarem-se em um padrão aos extremos e ao centro da célula unitária cúbica. A fase ordenada ( $\alpha'$ ) possui uma estrutura “CsCl” onde os átomos de Fe ocupam os extremos e os átomos de Co o centro da célula unitária. Os elementos que compõem o material Permendur são ferromagnéticos, o comportamento da variação da

indução de saturação e da temperatura de Curie da amostra seguem as teorias de Kouvel, ou seja, há um acréscimo a estas propriedades em determinada solução sólida, porém suas propriedades tendem a retornar as originais dos elementos separados [71].

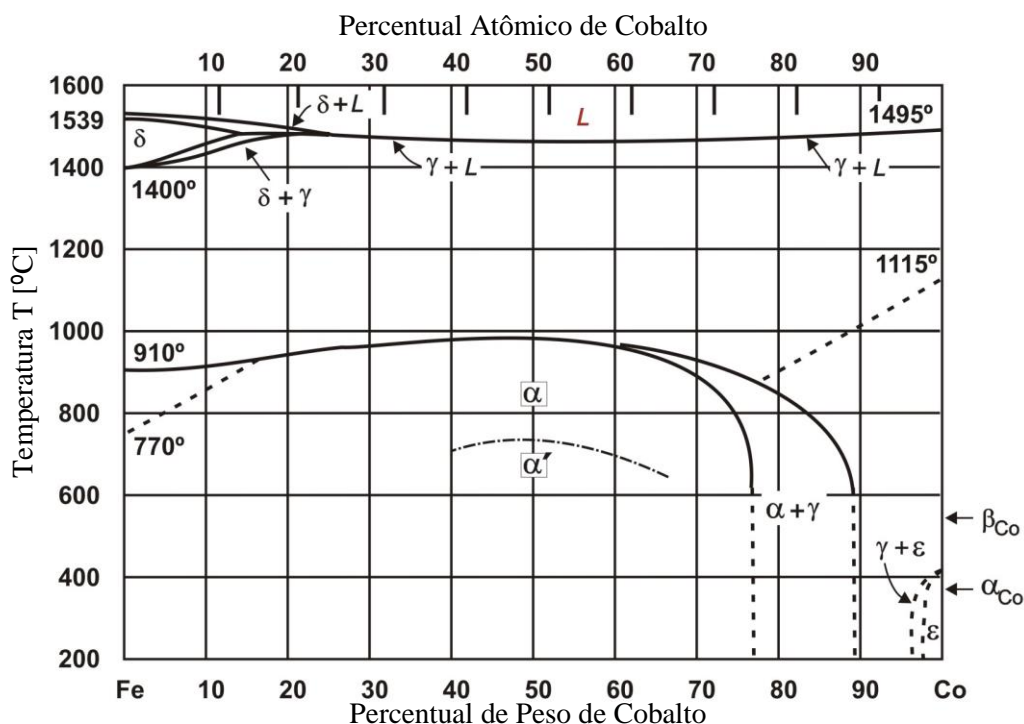


Figura 3.12 - Diagrama de fases Fe-Co [74]

O composto Permendur que principalmente apresenta na sua elaboração 2% de Vanádio do peso total, resulta em eleva indução magnética comparado com qualquer material ferromagnético. Contudo o alto preço do Cobalto é um dos fatores que restringe esse material, tornando viável em aplicações em áreas de aeronáutica e engenharia de alta tecnologia.

### 3.3.5 Propriedades Magnéticas de Materiais Compósitos Magnéticos Macios Avaliados em Ampla Faixa de Frequência de Excitação

No emprego de *SMC* no *design* de máquinas elétricas foi inicialmente mencionada por S. Kubzdela e D. Weglinski. Em 1992, P. Jansson introduziu *SMC* em motores elétricos de corrente alternada. Desde então, inúmeros motores elétricos são desenvolvidas com núcleos de *SMC*. O estator confeccionado “*claw pole*” em *SMC* apresenta complexos campos eletromagnéticos tridimensionais, alta frequência e geralmente composto por 24 polos [75].

Nas máquinas elétricas confeccionada na topologia “*claw pole*”, a construção da

estrutura torna-se complexa para ser confeccionado com lâminas de aço, devido ao campo magnético tridimensional. Contudo a complexa estrutura “*claw pole*” pode ser construída com material *SMC*, em consequência resultará em perda de performance com pouca compensação de benefícios [76].

As propriedades magnéticas, bem como curvas de histerese, fluxo magnético ( $B$ ), campo magnético ( $H$ ) e perdas magnéticas nos núcleos, são os fatores primordiais no *design* de máquinas elétricas. A correta compreensão das propriedades magnéticas dos materiais magnéticos é importante, particularmente, em condições de rotação e excitação.

Os modelos de *Epstein Tester* ou bidimensional *Single Sheet Tester* para modelagem e obtenção das propriedades magnéticas são utilizados por pesquisadores. Entretanto, os métodos de testes convencionais apresentam-se distantes de descrever com precisão as propriedades magnéticas de materiais. Os modelos tridimensionais de histerese devem ser desenvolvidos para prever as propriedades magnéticas para o *design* de máquinas elétricas especiais ao invés de serem obtidos por gráficos bidimensionais [77, 78].

Segundo Li et al. [76], as propriedades magnéticas do *SMC* 1P Somaloy 500<sup>®</sup> foram sistematicamente mensuradas e analisadas com ampla faixa de frequência de excitação (de 2 Hz a 1000 Hz), utilizando um sofisticado sistema tridimensional de testes (fig 3.13).

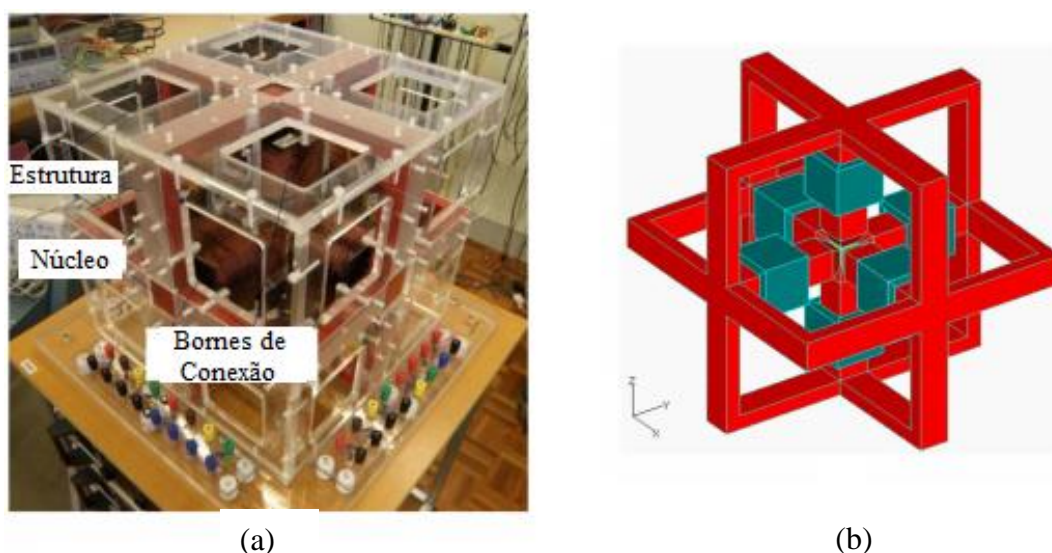


Figura 3.13 -(a) Protótipo para realização de teste [76]; (b) Modelo Numérico de Simulação tridimensional do protótipo [76].

Tanto os anéis de excitação de multicamadas ajustáveis e a alta precisão das curvas de BH são partes importantes deste sistema. Várias curvas de histerese e perdas no núcleo com diferentes frequências sob corrente alternada são analisadas. As propriedades das

perdas de núcleos rotatórios são comparadas com a alteração condicional magnetizada [76].

As perdas nos núcleos em modelos de motores “*claw poles*” com *SMC* são analisadas por meio do método dos elementos finitos e comparadas com resultados experimentais. Para a amostra cúbica de *SMC*, as propriedades magnéticas foram mensuradas e comparadas nas três direções em 50 Hz. A direção de fácil magnetização deste material ao longo dos eixos  $x$  e  $y$ . Os experimentos com alteração da frequência foram feitos para direcionar os testes tridimensionais.

A Figura 3.14 apresenta os grupos laços de histerese BH ao longo do eixo  $y$  com diferentes magnitudes de densidades de fluxos e frequências de excitação em corrente alternada aplicado no *SMC* 1P Somaloy 500®. Em regiões de baixas frequências, a não linearidade magnética é óbvia, particularmente quando abaixo de 5 Hz.

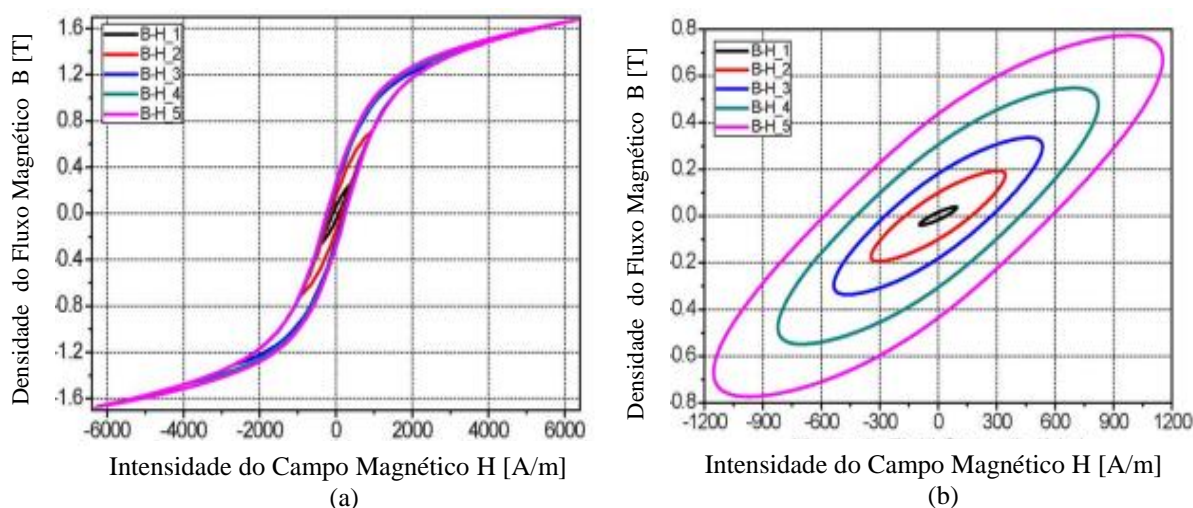


Figura 3.14- Laços de histerese para (a) 5 Hz; (b) 1000 Hz [76].

Conforme Li *et al.* [76], a principal perda dos núcleos de *SMC* é referente ao efeito da histerese, proporcional à frequência, visto que, as perdas aumentam rapidamente em altas frequências, particularmente acima de 500 Hz. Os dados experimentais implicam que as perdas por correntes parasitas aumentaram rapidamente quando excitados em alta frequência. Entretanto, para máquinas elétricas com *design SMC*, a densidade de fluxo no núcleo é geralmente definida abaixo de 0,5 T para regiões de frequências elevadas a fim de reduzir as perdas totais do núcleo. Uma série de propriedades tridimensionais da curva BH é analisada quando a frequência é 50 Hz, o controlador circular geométrico de BH é mensurado sob a crescente amplitude de  $B$  (acima de 1,6 T) nos planos  $xoy$ ,  $yoZ$  e  $zox$ , como mostrado na Figura 3.15 [76].

Na Figura 3.16 observa-se que  $BH$  local difere no mesmo plano de magnetização. O  $H$  local nos planos  $yo z$  e  $zox$  se transforma de uma elipse em *loops* retangulares, enquanto o plano  $xoy$  muda de um círculo para um quadrado. Isto pode implicar que as partículas estão próximas ao longo do eixo  $z$  em relação aos eixos  $x$  e  $y$ , ou seja, alta densidade de massa e campo de desmagnetização fortes ao longo do eixo  $z$ .

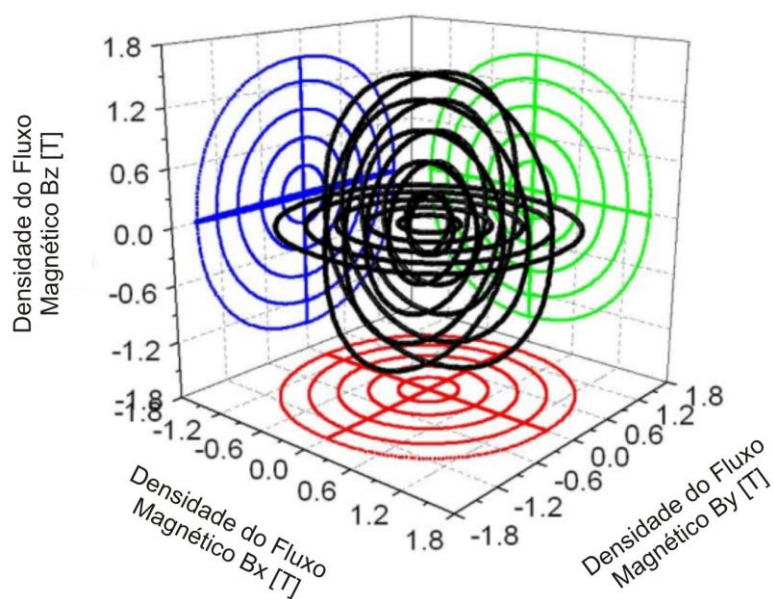


Figura 3.15 - Densidade do fluxo magnético circular geométrico [76]

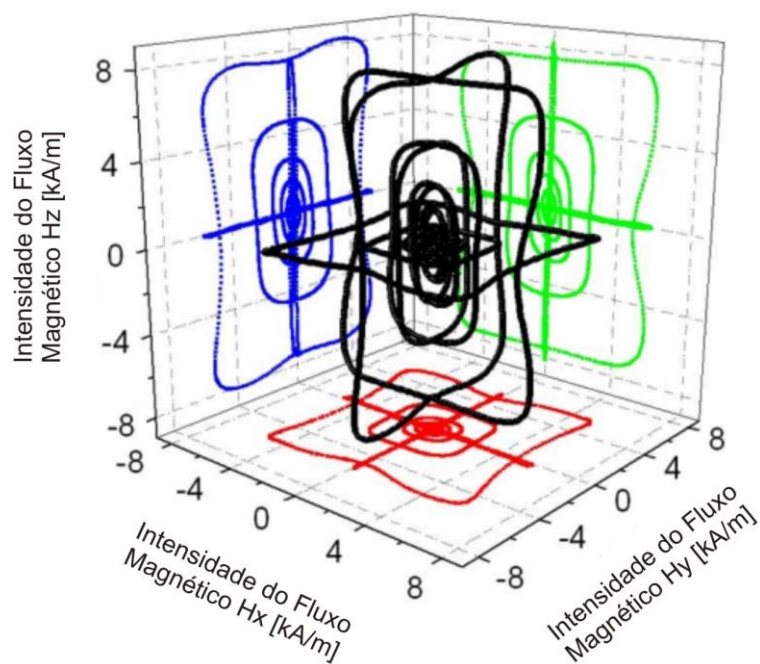


Figura 3.16 – Intensidade do fluxo magnético geométrico para 50 Hz [76].

#### 4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é descrito as etapas que contemplam o procedimento experimental que corroboram com a validação da metodologia denominada modelo de núcleo reduzido aplicado em máquinas elétricas especiais. Para comprovação de sua eficácia, definiu-se como objeto de estudo o Atuador Planar de Indução Trifásico, visto que se trata de uma máquina elétrica com deslocamento planar. Neste caso, o núcleo reduzido corresponderá a 33% dos itens usuais no API.

Para realizar os testes experimentais fabricou-se três núcleos reduzidos com seguintes materiais; *SMC 1P Somaloy 500*<sup>®</sup>, Ferro resinado e Aço ABNT 1020 com objetivo de aplicar a metodologia denominada núcleo reduzido em ligas de aço e compósitos comerciais e experimentais. Os resultados experimentais obtidos com os três núcleos reduzidos colaboram para comprovar a operacionalidade da bancada de testes, e consequentemente, o levantamento dos principais parâmetros de forma direta ou indireta da máquina. Dessa forma, o desenvolvimento do procedimento experimental é apresentado no fluxograma exposto na Figura 4.1.

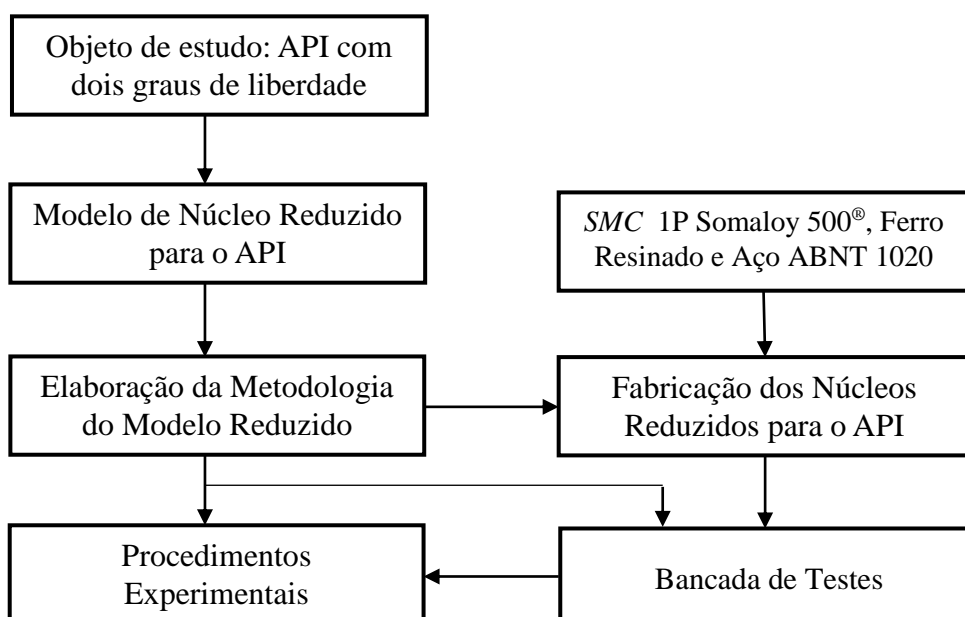


Figura 4. 1 - Fluxograma do procedimento experimental da Tese

#### 4.1 Comparações Construtivas dos Núcleos Empregados no Atuador Planar de Indução

Com propósito de atenuar os custos de engenharia, reduzir o tempo de pesquisa e o dispêndio técnico com usinagem e montagem de núcleos com relativa complexidade, elaborou-se a metodologia do modelo reduzido sendo empregada na análise do núcleo completo que compõem o API com dois graus de liberdade. O modelo reduzido trata-se de um núcleo composto por um terço dos elementos utilizado no núcleo completo. Dessa forma, simplifica-se significativamente o processo de fabricação do núcleo. A Figura. 4.2 apresenta as arquiteturas de núcleo completo (fig. 4.2a) e reduzido (fig. 4.2b).

O modelo reduzido do núcleo utilizado no API permite diminuir a complexidade da matriz e suas dimensões para compactar o *SMC* e fabricar o núcleo reduzido. Na etapa de compactação reduz-se a necessidade de prensas hidráulicas de alta capacidade para obter o núcleo conformado devido a menor geometria do núcleo reduzido, como consequência permite executar o processo de cura ou sinterização em forno com menores dimensões.

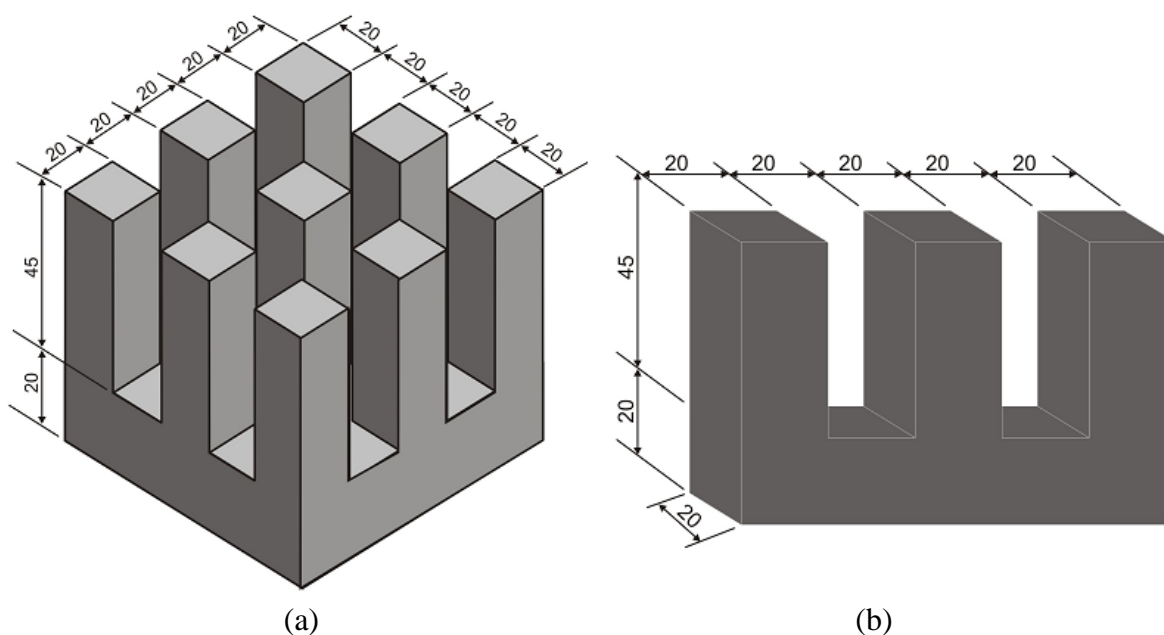


Figura 4.2- Desenho em perspectiva arquiteturas de núcleo: (a) núcleo completo; (b) núcleo reduzido [79].

Nesta concepção a metodologia do modelo reduzido resulta na redução dos insumos envolvidos nas possíveis formulações dos *SMCs*. Desta forma, permite avaliar as características elétricas que apresentam ganhos no desempenho de API. Também, pode-se fazer alterações na composição do *SMC* para avaliar o comportamento dos núcleos empregados nos transladores, com menor custo e maior agilidade para obtenção de



resultados de modo a avaliar os compósitos [79, 80].

O núcleo completo difere do reduzido em função da quantidade de enrolamentos e ligações elétricas empregadas nos mesmos, conforme apresentado na Figura 4.3. Deste modo, o API construído com núcleo completo permite o deslocamento simultâneo nos eixos x e y. Cada grau de liberdade é composto por 9 enrolamentos apresentados nas Figuras 4.3a e 4.3b para realizar os deslocamentos no plano cartesiano. No entanto, o modelo reduzido é formado por 3 enrolamentos (fig 4.3c), responsáveis pelo movimento em apenas um eixo devido a sua concepção de minimizar os custos para validação do modelo completo.

Devido o aspecto construtivo do modelo reduzido o deslocamento ocorrerá apenas no eixo x. Nas três ranhuras que compõem o núcleo reduzido são alocados os enrolamentos das fases R, S, e T, dispostos de forma similar no API referente ao modelo completo. Quando os enrolamentos são energizados é gerado um campo transladante no secundário do dispositivo, no sentido das ranhuras, porém inviabiliza a obtenção de força simultânea nos dois graus de liberdade característico do API completo. [20].

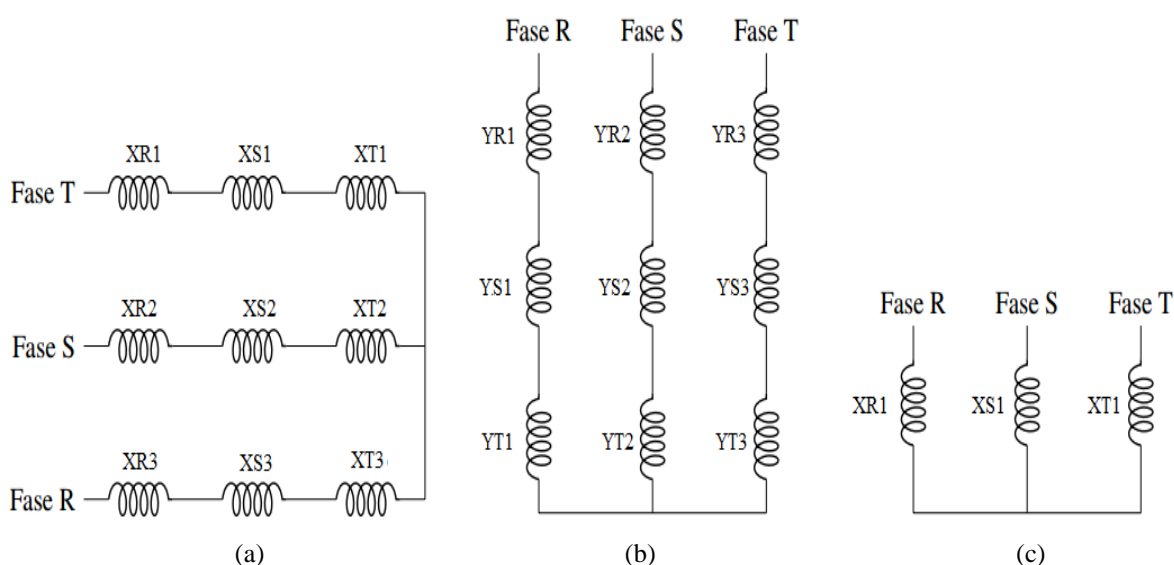


Figura 4.3 - Esquema representativo das ligações elétricas das bobinas no primário: (a) enrolamento do eixo X no núcleo completo; (b) enrolamento do eixo Y no núcleo completo e (c) enrolamento do eixo X no núcleo reduzido [1].

As Figuras 4.4a 4.4b ilustram as direções dos fluxos magnéticos para os enrolamentos x e y energizados do API, com núcleo completo e reduzido, respectivamente. Eventualmente, o sentido pode ser invertido por ocasião do potencial instantâneo de cada fase, embora esta condição seja irrelevante para a análise da direção de fluxo.

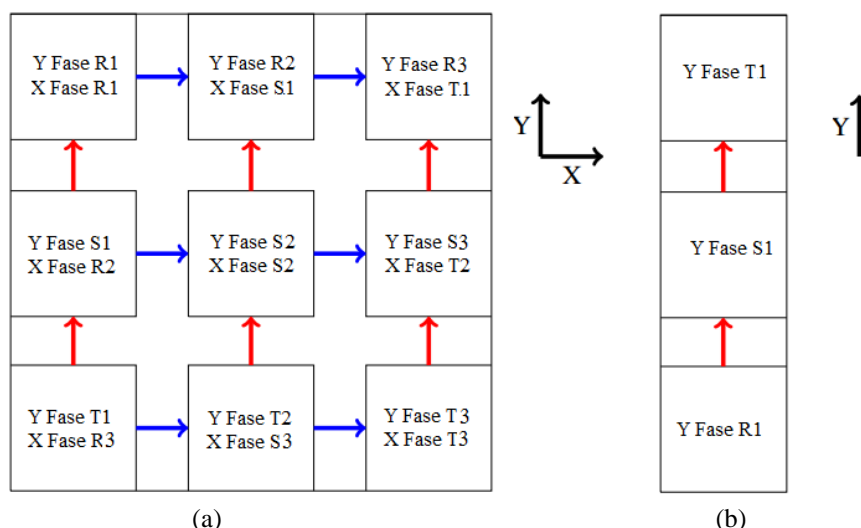


Figura 4.4 - Desenho esquemático da vista inferior do API com identificação da localização das bobinas e das direções dos campos transladantes: (a) núcleo completo; (b) núcleo reduzido.

## 4.2 Confeccção dos Núcleos Reduzidos

Na abordagem por meio da metodologia do modelo de núcleo reduzido viabiliza os ensaios experimentais com intuito de prever o funcionamento do núcleo completo indiferente do material empregado na sua construção. Visa-se minimizar a complexidade de fabricação dos núcleos através dos processos de fabricação tradicionais como usinagem, ou a confeccção de matrizes para compactação dos materiais.

Para validar a metodologia do modelo de núcleo reduzido, selecionou-se para confeccionar o núcleo os seguintes materiais; Aço ABNT 1020 e os *SMC* 1P Somaloy 500<sup>®</sup> e compósito de Ferro resinado. Através do emprego desses materiais, visa-se avaliar parâmetros como as forças de propulsão planar e perdas elétricas no núcleo reduzido do API entre outras.

Para cada material utilizado na fabricação do núcleo reduzido possuirá dois enrolamentos originais da montagem total. Para otimização do funcionamento do dispositivo, as bobinas foram ligadas em série, compondo em cada saliência, um único enrolamento com 500 espiras. O diagrama elétrico para a conexão das bobinas tornou-se bastante simplificado como visto na Figura 4.3c.

### 4.2.1 Núcleo Reduzido em Aço ABNT 1020

Fabricou-se o núcleo reduzido em aço ABNT 1020 conforme a Figura 4.5, através do processo de usinagem em um bloco único maciço. Optou-se por esse material devido a facilidade de usinagem do material e seu baixo custo para fabricação do núcleo reduzido e

completo comparado com processo de fabricação empregado no *SMC*. Deste modo, permitirá comparar o funcionamento e a força planar de propulsão da máquina elétrica com os dois modelos de núcleo (reduzido e completo), contribuindo para validar a metodologia proposta neste estudo.

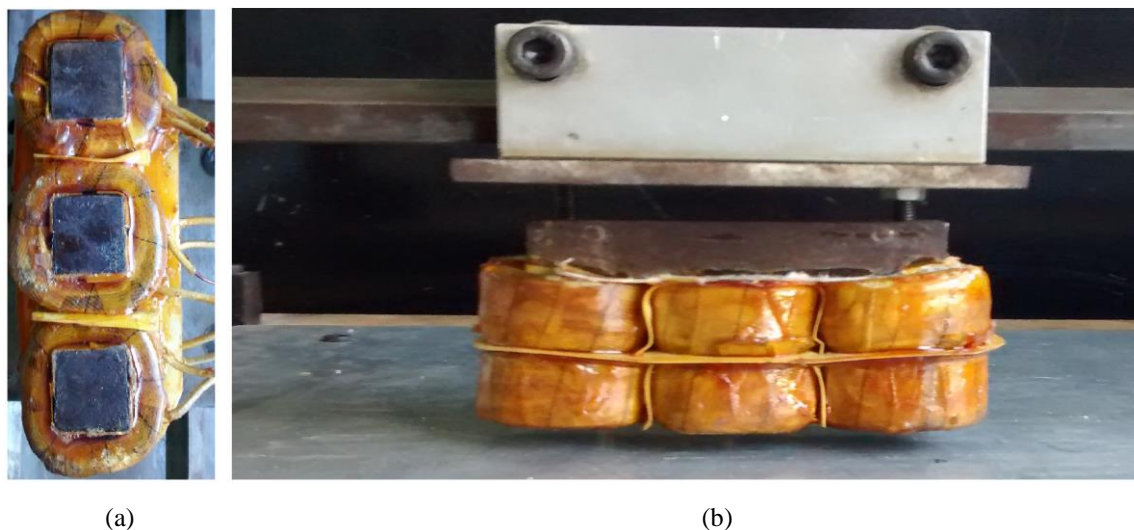


Figura 4.5 - Núcleo reduzido fabricado em Aço ABNT 1020 com as bobinas alocadas: (a) Vista inferior; e (b) Translador.

#### 4.2.2 Núcleo Reduzido em Ferro Resinado

Empregou-se na fabricação o Ferro resinado devido as características interessante para projetos de máquinas elétricas. Para reduzir os custos referente a confecção do núcleo reduzido, optou-se por montá-lo com 18 cubos com aresta de 20 mm. Logo, resulta-se na mesma forma geométrica dos outros núcleos reduzidos empregados na análise, conforme o anexo B. A composição dos cubos consiste em 98% de pó de ferro com alta pureza e 2% de resina. Sendo utilizado um misturador convencional para obter uma mistura homogênea, com tempo de mistura de 20 minutos.

Na compactação dos cubos para construir o núcleo reduzido utilizou-se uma prensa hidráulica manual. Empregou-se 30kN na compactação dos cubos, sendo a pressão indicada através de um manômetro. A etapa de cura dos 18 cubos foi realizado em um forno sem atmosfera controlada. Conforme as orientações do fabricante da resina, para obter um resultado satisfatório nessa etapa, e conquentemente, a resistência mecânica necessária para construir o API deve-se submeter os cubos a uma temperatura de 90 °C, durante 2 minutos denominado pré-cura e, posteriormente elevar ao patamar de 155 °C e 200 °C, ambos no decorrer de 2 minutos. O resfriamento da peça ocorre em temperatura

ambiente. O resultado da montagem do núcleo pode ser visualizada na Figura 4.6.

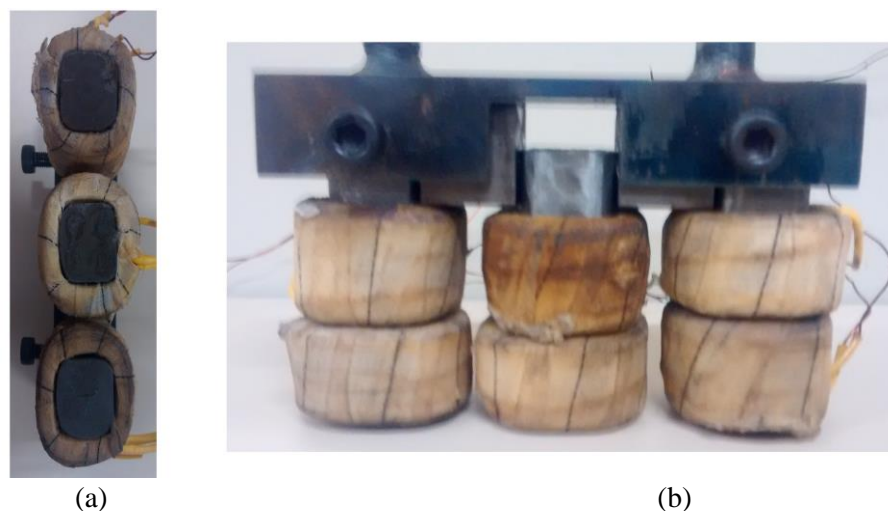


Figura 4.6 – Núcleo reduzido fabricado em Ferro resinado com as bobinas alocadas: (a) Vista inferior; e (b) Translador

#### 4.2.3 Núcleo Reduzido em SMC 1P Somaloy 500<sup>®</sup>

A utilização do SMC 1P Somaloy 500<sup>®</sup> neste trabalho deve-se a dois fatores, o significativo número de publicações que utilizam este SMC para o desenvolvimento de motores elétricos em diferentes topologias e a linha de pesquisa desenvolvida pelo Laboratório de Transformação Mecânica (LDTM) na UFRGS, que estuda os compósitos aplicados em máquinas elétricas. A obtenção do núcleo reduzido com SMC 1P Somaloy 500<sup>®</sup>, material este produzido pela empresa Höganäs no formato cilíndrico com diâmetro de 110 mm e 20 mm de espessura [60]. Empregou-se o processo de eletroerosão a fio para fabricar o núcleo, o resultado da montagem é apresentado na Figura 4.7.

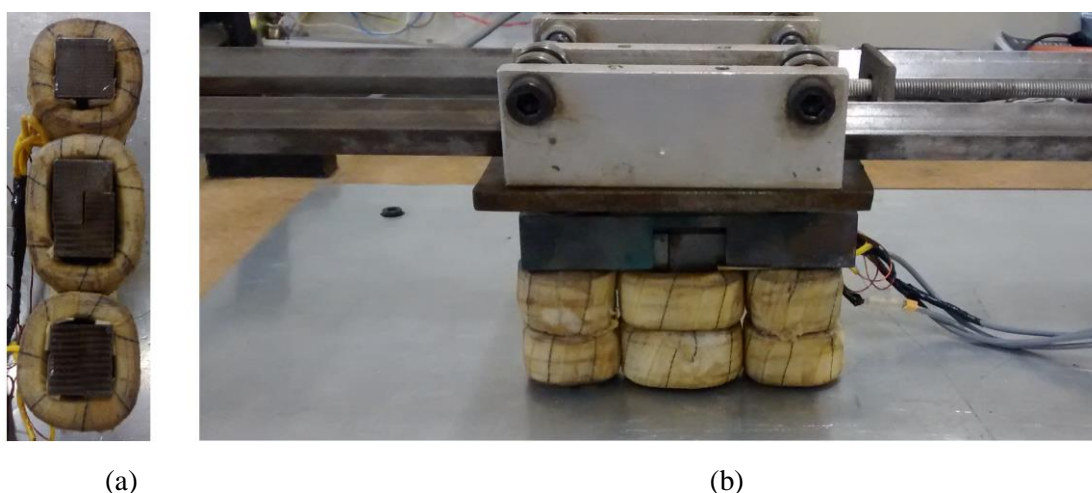


Figura 4.7 - Núcleo reduzido fabricado em 1P Somaloy 500<sup>®</sup> com as bobinas alocadas: (a) Vista inferior; e (b) Translador

### 4.3 Núcleo Completo

O material escolhido para fabricação do API com núcleo completo foi o Aço ABNT 1020. O núcleo completo empregado no translador foi fabricado em um bloco único, maciço deste material. O aço ABNT 1020 foi selecionado pela facilidade de usinagem, baixo custo para aquisição e permitirá a visualização do funcionamento do dispositivo e a avaliação dos parâmetros de desempenho, podendo compará-lo com os resultados obtidos com o núcleo reduzido físico e as simulações numéricas. A Figura 4.8 apresenta a montagem dos enrolamentos elétricos no núcleo fixado ao translador, compondo desta forma o translador completo.

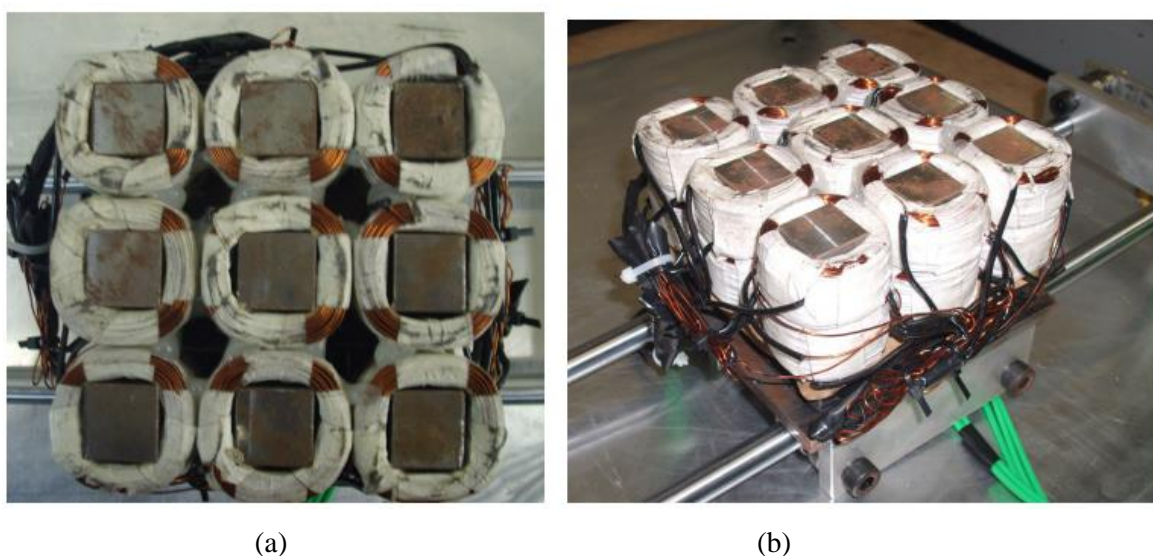


Figura 4.8 - Núcleo completo com as bobinas alocadas: (a) Vista inferior; e (b) Translador.

Depois da usinagem do núcleo no formato desejado, iniciou-se a etapa de ligações dos enrolamentos. O núcleo recebeu enrolamentos com as mesmas características utilizadas na modelagem numérica, ou seja, 250 espiras em 11 camadas de fio de cobre esmaltado 22AWG. Em cada ranhura do translador foram instaladas dois enrolamentos, possibilitando a ligação das bobinas referentes ao deslocamento no eixo x e y no mesmo núcleo, e conseqüentemente, o dispositivo poderá realizar o deslocamento simultâneo no plano cartesiano.

A ligação das bobinas foi realizada conforme a disposição projetada originalmente, apresentadas nas Figuras 4.3a e 4.3b. Desta forma, são três conjuntos de bobinas ligadas em série para cada fase, mas cada bobina é ligada a um único dente, totalizando as 9 ranhuras existentes no núcleo completo. Ambos os enrolamentos são dispostos no mesmo

formato elétrico, mas são alocados ortogonalmente entre si no núcleo. A conexão final dos grupos de enrolamentos é feita em estrela, com nó central aterrado ou ligado ao neutro da fonte de tensão trifásica.

#### 4.4 Concepção da Bancada de Testes

Para realização adequada dos testes experimentais construiu-se uma estrutura mecânica e um sistema de instrumentação para executar a validação dos resultados obtidos pela modelagem numérica referente ao funcionamento do API, independente da arquitetura de núcleo adotada. Os testes desenvolvidos com o Atuador Planar de Indução têm por objetivo caracterizar o dispositivo e suas propriedades operacionais com os dois modelos de núcleo para posterior comparação dos mesmos. Na Figura 4.9 apresenta-se a concepção da estrutura de testes com o sistema de aquisição de dados.

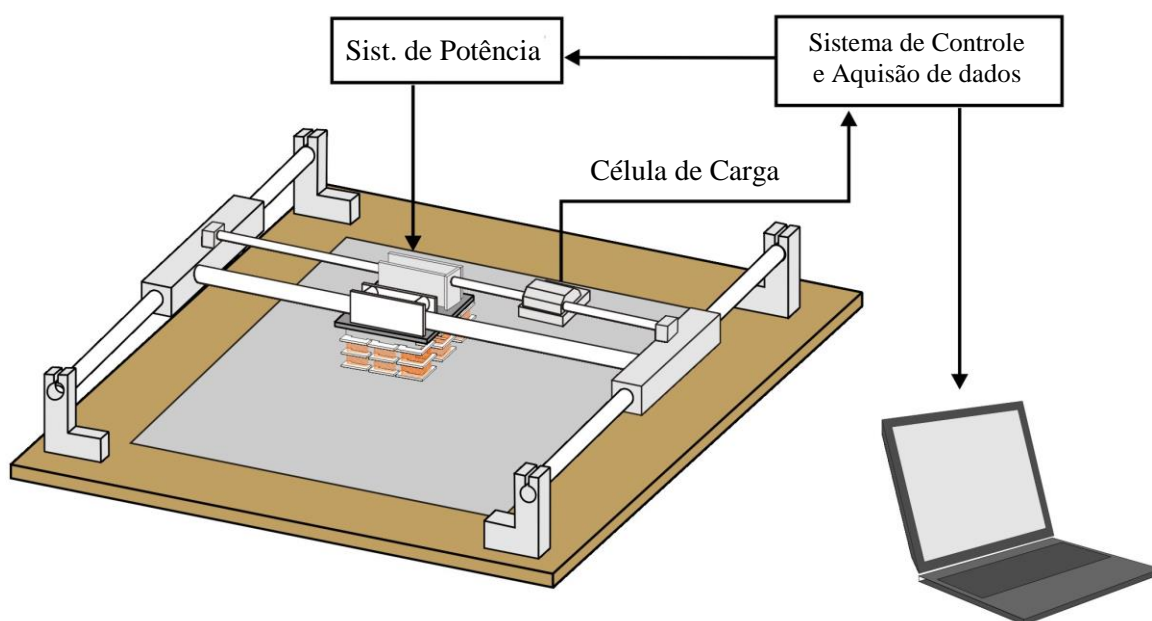


Figura 4.9 - Visão geral do protótipo construído para testes do Atuador Planar de Indução.

No translador é fixado mecanicamente a célula de carga. O sinal elétrico da célula de carga é processado pelo microcontrolador. Este processa as informações e atua por meio das interfaces de potência no translador (primário) que compõem o API. As informações de monitoramento do sistema são enviadas a um *display*, onde são apresentados os parâmetros do sistema, como por exemplo, a força de propulsão planar.

#### 4.4.1 Bancada de Testes

Para avaliar o funcionamento do API e obter com confiabilidade os resultados experimentais mensurados referentes ao desempenho do dispositivo, se construiu uma estrutura de testes com base na concepção apresentada na Figura 4.9. Esta estrutura permite monitorar diversas variáveis ao longo do processo. Entre as variáveis pode-se destacar a tensão e a frequência fornecidas aos enrolamentos, bem como o consumo de corrente elétrica pelos mesmos e a força de propulsão planar. A Figura 4.10 mostra a montagem final do protótipo, incluindo a célula de carga e a placa de aquisição de dados.

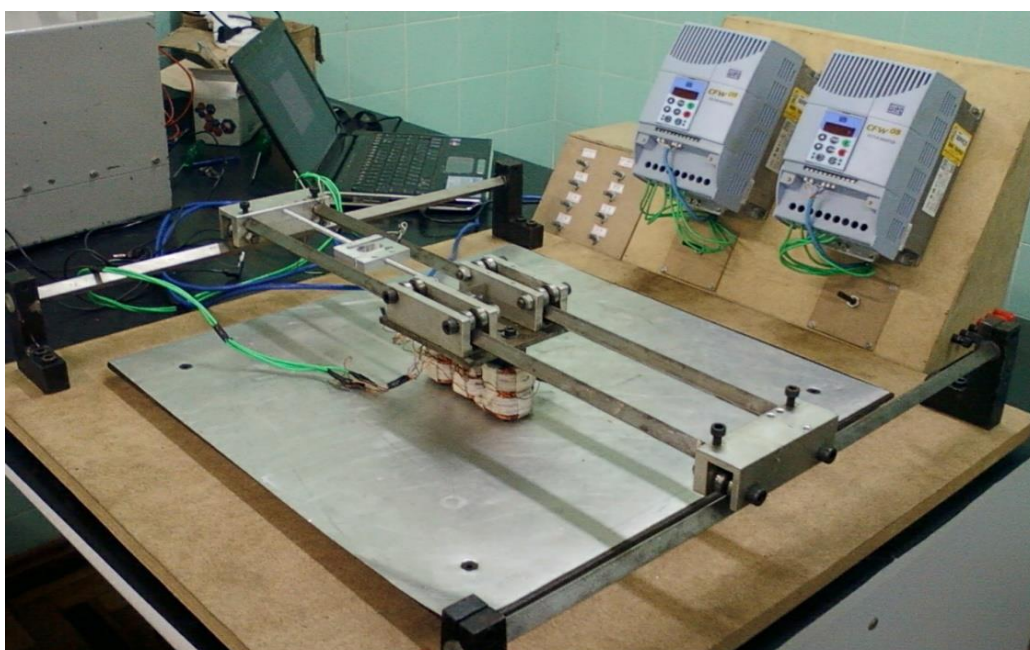


Figura 4.10 –Visão geral do protótipo construído para testes do Atuador Planar de Indução.

#### 4.4.2 Circuito de Potência

No circuito de potência, os inversores de frequência utilizados são da marca WEG<sup>®</sup>, e tem a finalidade de fornecer a tensão e a frequência conforme definidos nos testes a serem executados. Cada inversor será responsável por alimentar um conjunto de enrolamentos que compõem cada grau de liberdade. O inversor utilizado disponibiliza funções e recursos que permitem proteger e controlar o API de forma fácil e eficaz.

O circuito integrado MCP421T-E/SN é responsável pelo condicionamento do sinal analógico entre o inversor e o microcontrolador, com uma resolução de 12 bits (4096 níveis de tensão entre 0 a 5Vcc). Devido à entrada analógica do inversor de frequência ser de 0 a 10V, associado ao circuito integrado utilizou-se um amplificador operacional, na

configuração não inversora com ganho 2 (fig. 4.11). Deste modo, ocorre a compatibilidade dos níveis de tensão entre a entrada analógica do inversor e do microcontrolador PIC.

O controle do Conversor Analógico Digital (DAC) é realizado com a utilização da comunicação *Serial Protocol Interface (SPI)*, cujo microcontrolador *Programmable Interface Controller (PIC)* é o dispositivo mestre e o DAC é o dispositivo escravo. A comunicação SPI é do tipo síncrono, sendo PIC um dispositivo que envia os sinais de *clock (SCK)* com a informação desejada, gerando assim, um pulso de *clock* para cada informação. Segundo especificações do DAC, após o envio da informação é necessário encaminhar um pulso de nível lógico, baixo, por meio do pino LDAC, para que o mesmo efetivamente converta o valor digital em analógico. A taxa de atualização corresponde a 100 ms.

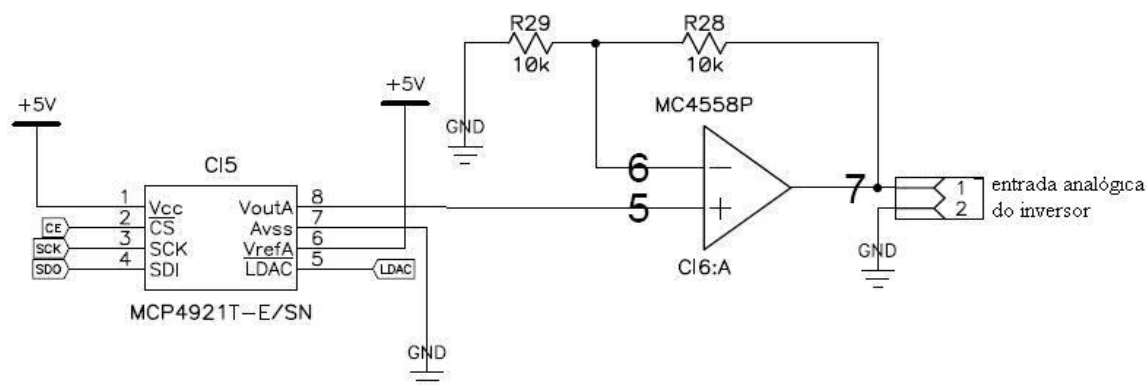


Figura 4.11 - Circuito eletrônico de acoplamento do inversor de frequência.

#### 4.4.3 Implementação da Aquisição de Dados

A função da célula de carga é mensurar a força planar de propulsão gerada pelo translador (primário) quando os enrolamentos forem energizados. A leitura da força ocorre pela utilização de uma célula de carga do tipo “S”, a qual tem seu funcionamento baseado em extensômetros. Estes extensômetros utilizados na confecção da célula de carga são ligados a um condicionador de sinal que compõe a estrutura eletrônica do protótipo, que recebe o sinal de tensão elétrica proveniente da célula de carga, sendo informada por meio do *display* a leitura da força de propulsão.

Para realizar a leitura da força de propulsão do API, a célula de carga foi acoplada ao translador e fixada na estrutura lateral que compõe o primário, como apresentado na Figura 4.12, visto que, pretende-se comparar o núcleo completo e reduzido e desta forma energiza-se apenas um conjunto de enrolamentos do núcleo completo. Contudo, essa



configuração da leitura da força é realizada em apenas um grau de liberdade do API e não compromete a validação da metodologia proposta, devido os enrolamentos dos eixos x e y serem eletricamente independentes e ortogonais.

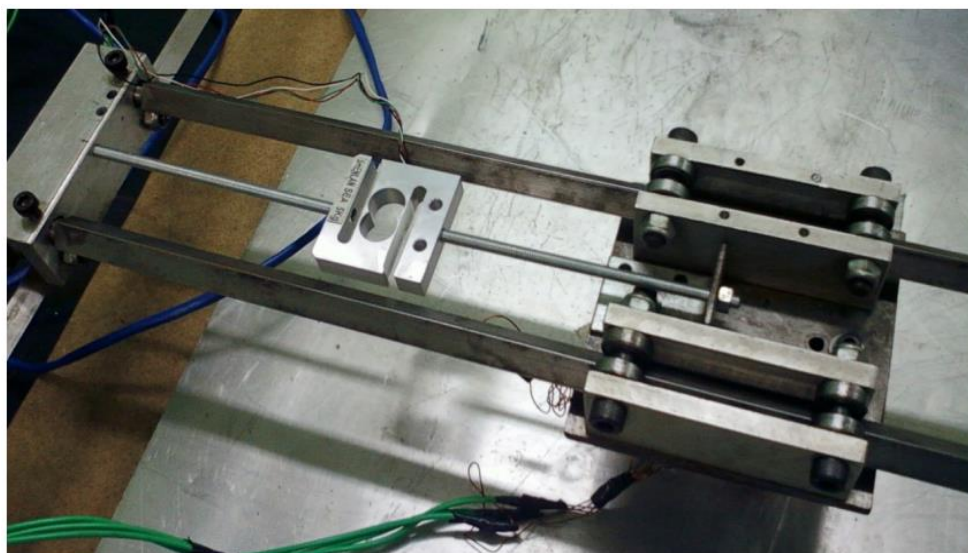


Figura 4.12 - Detalhe do acoplamento da célula de carga para medição de força linear do API

Na Tabela 4.1 apresenta-se as principais características técnicas da célula de carga empregada para mensurar a força de propulsão planar do API, sendo a faixa de leitura entre 0 e 5 kg. Nesta faixa, a célula de carga gera uma tensão elétrica por meio da ponte de wheatstone de 0 a 5 V proporcionam a força exercida. Visando garantir a integridade mecânica da célula de carga definiu-se a faixa de trabalho de 0 à 4 kg. Em virtude deste parâmetro a resolução da entrada analógica do PIC de 10bit é 4,8 mV para cada 50 gramas.

Tabela 4.1: Características Técnicas da Célula de Carga.

Modelo	Tipo S – Liga de Aço
Carga Nominal	5Kg
Saída Nominal	1,9552mV/V
Impedância de entrada	410 ± 10Ω
Impedância de saída	350 ± 3Ω
Isolamento	>5000M / 50V DC
Temperatura de operação	-10°C ~40 °C
Tensão de Excitação	5 -10 VDC
Peso	46 gramas

Com base nas características elétricas da célula de carga, foi empregado o

componente eletrônico de instrumentação INA122. O INA122 apresenta alta impedância de entrada, ganho ajustável e elevada rejeição de sinais a modo comum. Este é um elemento amplamente utilizado em sistemas de aquisição de sinais pela sua característica de amplificar uma pequena diferença de tensão entre sinais aplicados em sua entrada. A Figura 4.13 apresenta o circuito eletrônico para condicionamento do sinal elétrico da célula de carga.

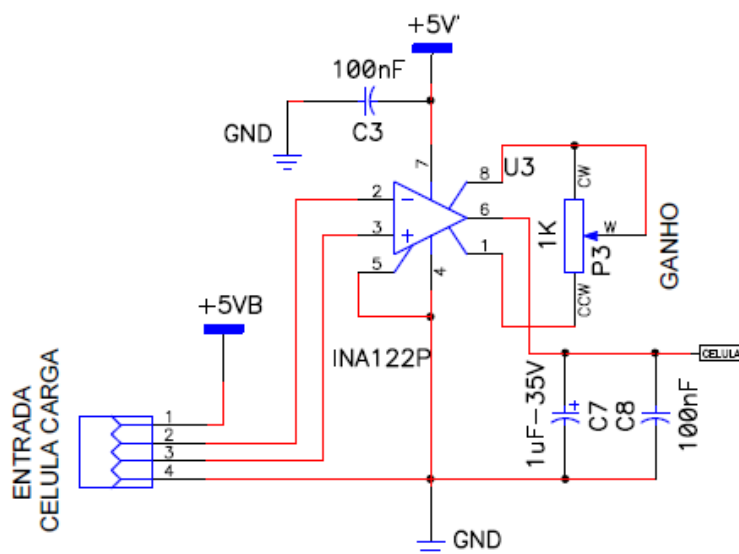


Figura 4.13 – Circuito de condicionamento da célula de carga

Ressalta-se que, com o núcleo completo empregado no API é possível realizar análises de forças nos dois sentidos de translação com apenas uma célula de carga, pois há a possibilidade de realocar o núcleo e girá-lo a 90° no carro translador e efetuar as leituras separadamente. Logo, com a configuração proposta na Figura 4.13, quando aplicada ao núcleo completo, é possível verificar a influência de uma suposta movimentação em y, mantendo a leitura da força estática no eixo x.

#### 4.5 Procedimento de Leitura da Corrente Elétrica Induzida pelo Núcleo Reduzido

A corrente elétrica induzida no secundário tem impacto direto na força de propulsão planar do API. O produto vetorial entre as correntes elétricas induzidas e o campo magnético gerados pelo enrolamentos fixados no primário que atravessam o secundário resulta no deslocamento do translador.

Devido a complexibilidade de instrumentar a chapa ferromagnética que compõem o secundário para mensurar as correntes elétricas induzidas no material, optou-se por realizar

a leitura de forma indireta deste parâmetro. Dessa forma, para realizar a análise experimental da corrente elétrica induzida adicionou-se três enrolamentos exploratórios na montagem do núcleo reduzido conforme a Figura 4.14. O emprego dos enrolamentos exploratórios auxilia na leitura do parâmetro e posterior comparação dos resultados experimentais e da simulação numérica. Para avaliar a corrente elétrica induzida, o núcleo reduzido é composto por 6 enrolamentos e fixado na estrutura da bancada de testes que permite alterar o entreferro.

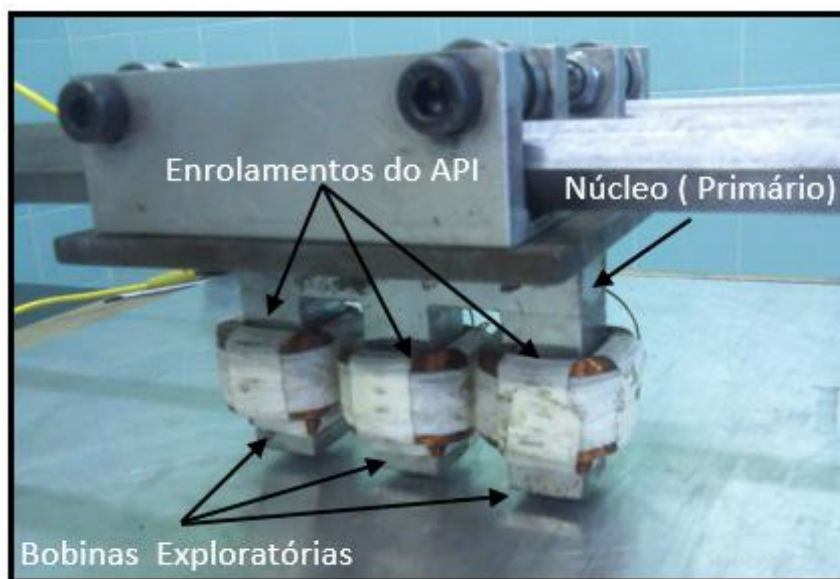


Figura 4.14 - Translador do atuador planar de indução composto com núcleo reduzido.

Para energizar os enrolamentos fixados no primário utilizou-se um inversor que compõem a bancada de testes. Ao término do transitório da corrente elétrica de entrada fornecida pelo inversor realizou-se as leituras de correntes elétricas com amperímetros da marca FLUKE® modelo 322, e consequentemente, registrou-se a corrente elétrica induzida nos enrolamentos exploratórios com a ligação em estrela.

Nessa análise fixou o entreferro em 5 mm e definiu-se a faixa de variação da corrente elétrica injetada nos enrolamentos de 1 a 3 A. Sob as condições propostas foram obtidos resultados gráficos da corrente elétrica induzida no secundário em analogia a um transformador trifásico de pequeno porte. As Figuras 4.15 e 4.16, apresentam os dados experimentais e simulados da corrente elétrica induzida pelo núcleo reduzido do API.

Há uma visível linearidade no aumento da corrente do secundário em função da alimentação do dispositivo na análise numérica. Os resultados experimentais acompanham o crescimento linear, com uma pequena redução em sua taxa de crescimento em

decorrência do acúmulo referente ao aumento de temperatura em virtude das medições sequenciadas. Nas simulações o *software* processou o modelo inserido, considerando que o núcleo do API manteve-se em temperatura ambiente ao ser energizado em toda a faixa correntes elétricas de entrada aplicada.

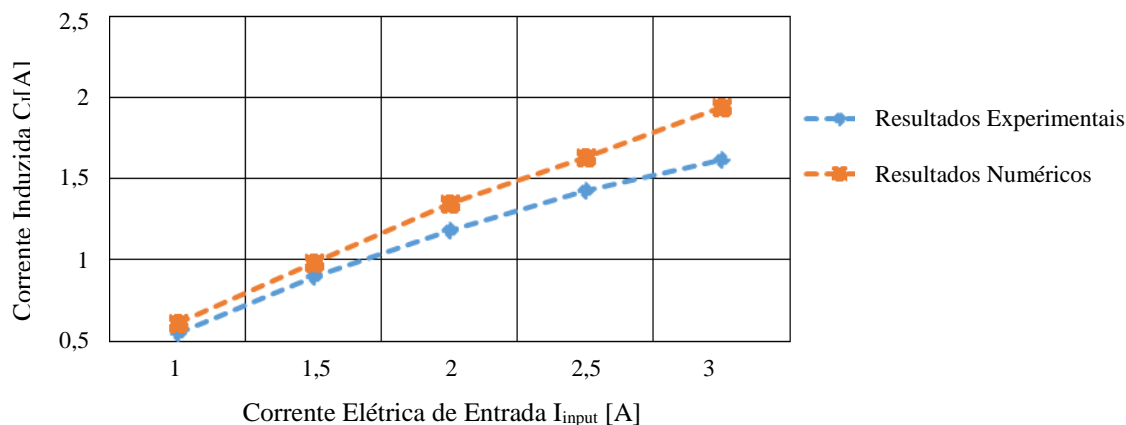


Figura 4.15 - Corrente elétrica de saída em função da variação da corrente elétrica de entrada, com manutenção do entreferro em 5 mm.

Observa-se pela Figura 4.16, uma linearidade na comparação dos dados simulados com os obtidos pelo recurso computacional. As diferenças entre os valores absolutos das medições justificam-se pelo aumento de temperatura do núcleo em decorrência das sequências de medições e pelas perdas elétricas nos enrolamentos de entrada e saída, que não são computadas pelo *software*. Nas simulações o *software* processou o modelo inserido, considerando que o núcleo do API manteve-se em temperatura ambiente ao ser energizado em toda a faixa correntes elétricas de entrada aplicada.

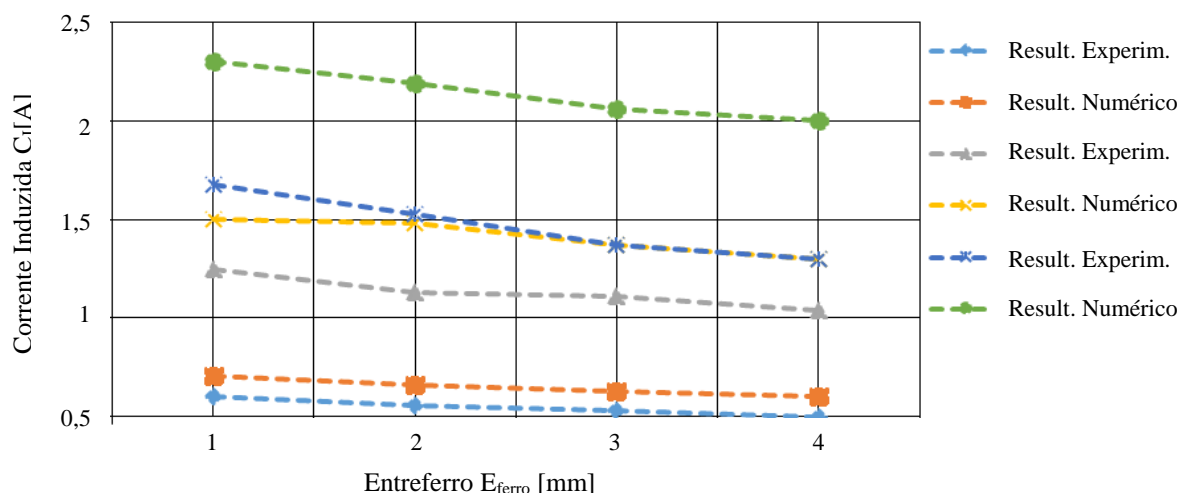


Figura 4.16- Corrente de saída em função do entreferro, para correntes de entrada (Real e Simulação) de 1, 2 e 3A.

Para validação experimental da metodologia do modelo de núcleo reduzido, replicou a leitura de corrente elétrica induzida no núcleo completo conforme a Figura 4.17, com as mesmas características de montagem e procedimento dos testes utilizadas no modelo reduzido. Sendo replicadas de forma similar no modelo completo inserido no *software* para simulação numérica, afim de, validar a metodologia no modelo reduzido referente ao parâmetro de corrente elétrica induzida.

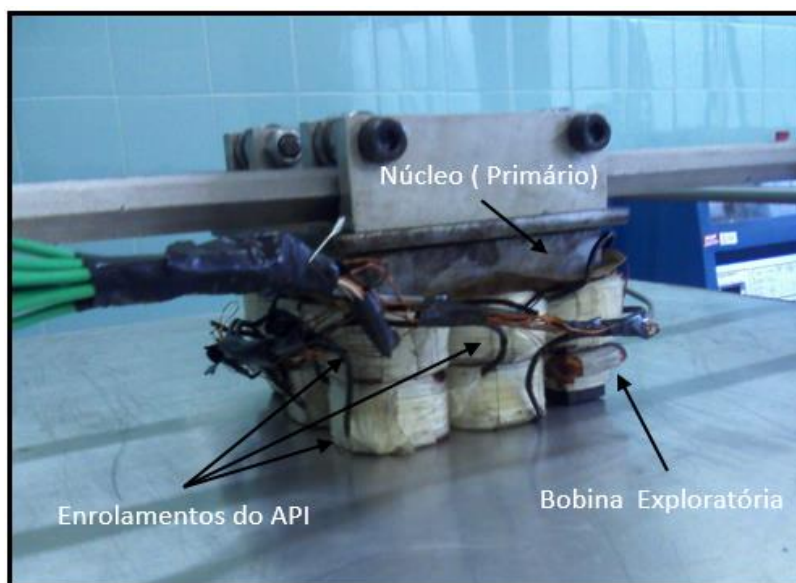


Figura 4.17 - Translador do atuador planar de indução composto com núcleo completo.

Para a validação da simulação, os núcleos permaneceram estáticos, com o contato direto entre as bordas das ranhuras e a parte secundária. A variação do fluxo magnético criará uma indução elétrica nos enrolamentos exploratórios, por isso pode ser medida a corrente elétrica induzida. O modelo inserido na simulação de maneira correta a corrente induzida será observada no método numérico. Nas Tabelas 4.2 e 4.3, verifica-se a compatibilidade entre os modelos numéricos e experimentais dos núcleos reduzido e completo fabricados em Aço ABNT 1020.

Na primeira análise experimental foi observado o aumento significativo na temperatura do núcleo confeccionado em Aço ABNT 1020 em razão da sequência de medições com correntes relativamente altas (acima de 1A). Essa característica influenciou diretamente no rendimento do equipamento físico em razão de suas consequências: aumento da corrente de *Foucault*, aumento de perdas ôhmicas e alteração do comportamento magneto dinâmico do núcleo.

Tabela 4.2- Comparativo entre o núcleo em Aço ABNT 1020 completo real e simulado.

Núcleo Completo				
Fase	Corrente de entrada I [A]	Corrente de Saída Real $I_{real}$ [A]	Corrente de Saída Simulada $I_{sim}$ [A]	Erro [%]
<i>Setpoint = 0.5 A</i>				
R1	1,43	Exploratória 1		8,12
S1	0,99	0,49	0,53	
T1	1,26	Exploratória 2		7,58
R2	1,27	1,19	1,10	
S2	1,05	Exploratória 3		1,95
T2	1,18	0,8	0,78	
<i>Setpoint = 0.1 A</i>				
R1	0,76	Exploratória 1		0,46
S1	0,51	0,28	0,28	
T1	0,65	Exploratória 2		9,64
R2	0,68	0,76	0,68	
S2	0,54	Exploratória 3		9,38
T2	0,62	0,47	0,42	

Os resultados não convergiram para os mesmos valores absolutos. Entretanto, em função da variação de corrente elétrica induzida e do entreferro, foi observada a mesma linearidade de resposta numérica e a prática: tal condição mostrou-se um indicativo de coerência nos resultados obtidos.

Tabela 4.3 - Comparativo entre o núcleo reduzido em Aço ABNT 1020 e simulado.

Modelo Reduzido				
Fase	Corrente de entrada I [A]	Corrente de Saída Real $I_{real}$ [A]	Corrente de Saída Simulada $I_{sim}$ [A]	Erro [%]
<i>Setpoint = 1 A</i>				
R	0,96	0,77	0,78	1,38
S	0,84	0,91	0,88	2,79
T	0,96	0,73	0,74	2,07
<i>Setpoint = 2 A</i>				
R	2,15	1,87	1,96	4,96
S	2,03	1,81	1,81	0,42
T	2,11	1,72	1,60	6,77

Com modelos numéricos previamente validados através do parâmetro da corrente

induzida, avalia-se os indicadores de desempenho do API composto pelo núcleo completo. Na Tabela 4.4 apresenta-se os resultados da força de propulsão planar através da alteração no modelo numérico do material do núcleo primário de Aço ABNT 1020 para o SMC 1P Somaloy 500<sup>®</sup> e o compósito de Ferro resinado.

Para estas simulações, a corrente de alimentação foi atribuída 3A, representando o mesmo consumo de energia a partir da fonte. A resposta foi mensurada em força planar de propulsão planar ao eixo x. Em todos os casos, o SMC apresenta uma melhor resposta e torna-se maior com o aumento da frequência.

Tabela 4.4 - Comparativo entre materiais aplicado na confecção núcleo completo simulado

Simulação da Força Planar de Propulsão (Comparativo de Materiais)				
Frequência [Hz]	Corrente de Entrada I [A]	Material do Núcleo	Força $F_x$ [N]	Ganho [%]
30	3	Aço ABNT 1020	5,58	0,00%
	3	Ferro resinado	12,31	200%
	3	1P Somaloy 500 <sup>®</sup>	15,79	282,70%
60	3	Aço ABNT 1020	3,58	0,00%
	3	Ferro resinado	11,41	318,71%
	3	1P Somaloy 500 <sup>®</sup>	14,83	414,43%
90	3	Aço ABNT 1020	2,93	0,00%
	3	Ferro resinado	11,08	378,44%
	3	1P Somaloy 500 <sup>®</sup>	14,59	498,16%
120	3	Aço ABNT 1020	1,49	0,00%
	3	Ferro resinado	10,12	679,40%
	3	1P Somaloy 500 <sup>®</sup>	13,32	893,75%

## 5. MODELAGEM NUMÉRICA

Neste capítulo será abordado a elaboração de soluções a partir de ferramentas computacionais para obtenção de resultados para validação do modelo reduzido aplicado à análise do API com dois graus de liberdade. A modelagem numérica de dispositivos eletromagnéticos, como API, proporciona avaliar o comportamento dos campos eletromagnéticos e a interação das forças resultantes no API. Neste contexto, os modelos numéricos do API permitem compreender o comportamento estático e dinâmico, quando analisado com núcleo reduzido e completo [79, 80].

O estudo estático e dinâmico será realizado com maior ênfase na distribuição dos campos elétricos e magnéticos atuantes na estrutura do API. Neste cenário, busca-se avaliar as correntes elétricas induzidas no secundário do dispositivo e a força eletromotriz produzida no primário, que conseqüentemente é convertida em energia cinética. No estudo será utilizado o método dos elementos finitos (FEM), através dos *softwares* MAXEWLL<sup>®</sup> V13 e FEMM4.2, ambos desenvolvidos para modelagem numérica eletromagnética [81].

### 5.1. Considerações Sobre o Método de Elementos Finitos

A análise numérica eletromagnética de um modelo computacional requer conhecimento das propriedades físicas dos materiais empregados no dispositivo real, como suas curvas de magnetização, condutividade elétrica e permeabilidade magnética relativa. Atualmente, existem *softwares* FEM aplicados para solução de problemas e análise de campos em circuitos eletromagnéticos bidimensionais e tridimensionais, com resultados que demonstram confiabilidade [81].

O estudo apresentado direciona-se para avaliação das variáveis relacionadas à força de propulsão planar, fluxo magnético gerado pela excitação trifásica do primário no API, composto pelos núcleos reduzido e completo. Devido às formas geométricas dos núcleos em análise, o núcleo completo apresenta o volume de forma assimétrica devido à ortogonalidade da disposição dos enrolamentos elétricos. Essa característica construtiva impede de estabelecer uma simetria que permita uma análise bidimensional, a fim de



aplicar o *software* FEMM 4.2. Assim torna-se necessário realizar modelagem numérica tridimensional, esse ponto apresenta-se como um diferencial do núcleo reduzido, pois sua forma fracionada confere características simétricas referente ao volume e a distribuição dos enrolamentos elétricos[82].

A definição da ferramenta computacional a ser aplicada na modelagem numérica depende basicamente da viabilidade de planificação do modelo. Essa planificação impacta na possibilidade em analisar o circuito baseado na projeção bidimensional que permita considerar iguais condições e circuitos, até uma profundidade predefinida [83, 84].

A simplicidade geométrica do núcleo reduzido aplicado no API, e as considerações anteriores, permite realizar a análise pelo *software* FEMM 4.2, que apresenta os resultados em forma gráfica e em desenhos com plotagem de densidade. O *software* possibilita criar uma escala cromática do nível da magnitude de determinada variável e confeccionar gráficos que possibilitem visualizar os pontos com maior intensidade desta variável [85]. O *software* FEMM 4.2, permite analisar campos eletromagnéticos transientes como em movimentação, avaliando parâmetros como: força, torque, indutância, correntes induzidas, entre outras grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas [1].

Contudo na análise do núcleo completo do API, será utilizada uma modelagem tridimensional do objeto em estudo. Nesse caso, a modelagem numérica será realizada com o *software* MAXEWLL<sup>®</sup> V13, componente do pacote comercial ANSYS, da empresa Ansoft<sup>®</sup>. Dessa forma, pode-se empregar o *software* MAXEWLL<sup>®</sup> V13 para análise de campos elétricos e eletromagnéticos de forma estática e dinâmica no domínio da frequência ou no tempo. Isto permite a solução de circuitos complexos com componentes não lineares e propriedades variáveis no tempo, espaço e frequência, apresentando os resultados no formato do FEMM 4.2.

A modelagem numérica através do Método dos Elementos Finitos envolve três etapas. A primeira corresponde ao pré-processamento, nesse ponto, define-se o modelo para a análise. Para inserção das condições iniciais no *software*, se faz necessário conhecimento do comportamento aproximado referente à distribuição dos campos eletromagnéticos e geometria do dispositivo. Uma vez definido o tipo de análise em termos dimensionais, a próxima etapa corresponde à construção da malha que representa o dispositivo em estudo.

Na etapa de solução, que representa a segunda fase, utiliza-se o pacote computacional de processamento. Nessa parte da modelagem numérica, emprega-se equações diferenciais de forma interativa, aplicadas no dispositivo do modelo definido. O

produto desta etapa é um conjunto de potenciais que descreve o comportamento do campo eletromagnético no modelo inteiro [81].

O pós-processamento, corresponde a terceira etapa, que fornece uma série de ferramentas para a análise da solução produzida pela simulação da modelagem numérica, como manipulação matemática para tratamento dos dados e, ferramentas gráficas para a visualização dos resultados, ou por meio do mapeamento das grandezas utilizando cores, linhas ou gráficos.

## 5.2. Modelo Numérico do Atuador Planar de Indução

Um dos objetivos do estudo, visa a elaboração de uma metodologia denominado modelo de núcleo reduzido referente à validação do API com dois graus de liberdade. Esta metodologia contempla a validação através da modelagem numérica e experimental, direcionada ao núcleo de máquinas elétricas especiais. Dessa forma, o protótipo apresentará uma fração das dimensões originais do núcleo, e conseqüentemente busca-se reduzir os custos envolvidos com manufatura e validação de novos compósitos empregados na fabricação de máquinas elétricas especiais [86].

O modelo de núcleo reduzido do API corrobora com a validação dos cálculos matemáticos do fluxo magnético em razão da relativa simplicidade em comparação com API com núcleo completo, ou seja, com dois graus de liberdade. Conforme descrito, viabiliza-se a modelagem numérica do núcleo reduzido através do modelo planejado bidimensional, e conseqüentemente, contribui para redução do tempo de simulação. O modelo reduzido pode ser construído como um plano contendo as características essenciais, ao qual é atribuído uma profundidade, sem a necessidade de informações tridimensionais assimétricas.

A malha básica ou plano básico do núcleo reduzido será gerada a partir de elementos 2D, triangulares e retangulares. No modelo os materiais no primário (núcleo) e secundário (estator) foram definidos como regiões não lineares, em função das permeabilidades magnéticas e das curvas de magnetização (BH) dos materiais empregado neste estudo.

### 5.2.1 Principais Características dos Núcleos Empregados no Atuador Planar de Indução

Nesta seção o foco principal é realizar a validação comparativa entre as dinâmicas dos modelos numéricos do núcleo reduzido e completo, enfatiza-se a região que engloba o

translador (primário). Na análise numérica estática do translador busca-se avaliar o comportamento da distribuição de fluxo magnético no atuador planar de indução trifásico. Depois, os efeitos da força de propulsão planar e normal (forças resultantes nos eixos x e z) que atuam sobre o primário, quando os enrolamentos trifásicos são excitados com tensão elétrica alternada trifásica.

O processo de simulação dos modelos foi desenvolvido nos *softwares* FEMM4.2 e MAXWELL® V13, para os modelos bidimensionais e tridimensionais, respectivamente. Ambos os programas realizam o cálculo por aproximação numérica baseado no Método de Elementos Finitos (FEM). Neste método, o domínio é discretizado em elementos triangulares e retangulares, onde são aplicadas as equações diferenciais ordinárias que definem as características como contínuas em cada elemento singular [10, 11]. Pode-se visualizar na Figura 5.1, o núcleo reduzido inserido no *software* MAXWELL® V13 e destaca-se o plano de simetria e a disposição dos componentes (núcleo, bobinas e secundário).

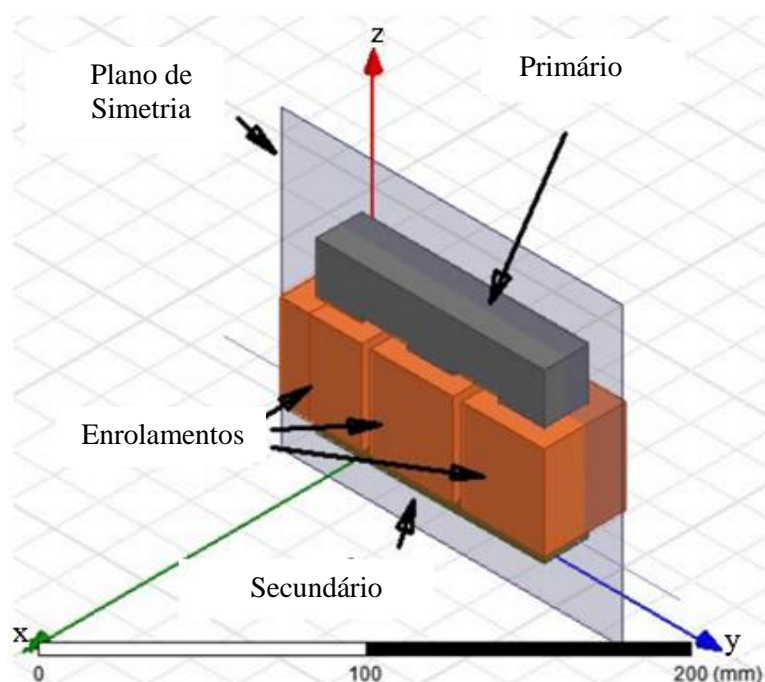


Figura 5.1 - Modelo do núcleo reduzido em projeção do plano de simetria inserido *software* MAXWEL V13.

O API com núcleo reduzido é composto por um primário (núcleo) confeccionado em um bloco único, com isolamento elétrico entre este e os enrolamentos. Os três enrolamentos são fabricados com fios de cobre 22 AWG, com 250 espiras e alocados um enrolamento por ranhura. Os enrolamentos são alimentados com corrente alternada senoidal trifásica equilibrada e defasada  $120^\circ$  entre si. O secundário é formado por uma

chapa de Aço ABNT 1020 de 8 mm de espessura, sobreposta por outra placa de alumínio com 1 mm de espessura.

A representação do modelo de núcleo reduzido no *software* FEMM 4.2, ocorre através de desenhos de pontos e retas no plano no ambiente de trabalho do software. Concluído o formato geométrico do núcleo desejado é atribuído ao componente suas características mecânicas e elétricas, a fim de iniciar a simulação. Na Figura 5.2, apresenta-se a representação bidimensional do núcleo reduzido e a disposição dos componentes (núcleo, bobinas e secundário) no *software* FEM4.2

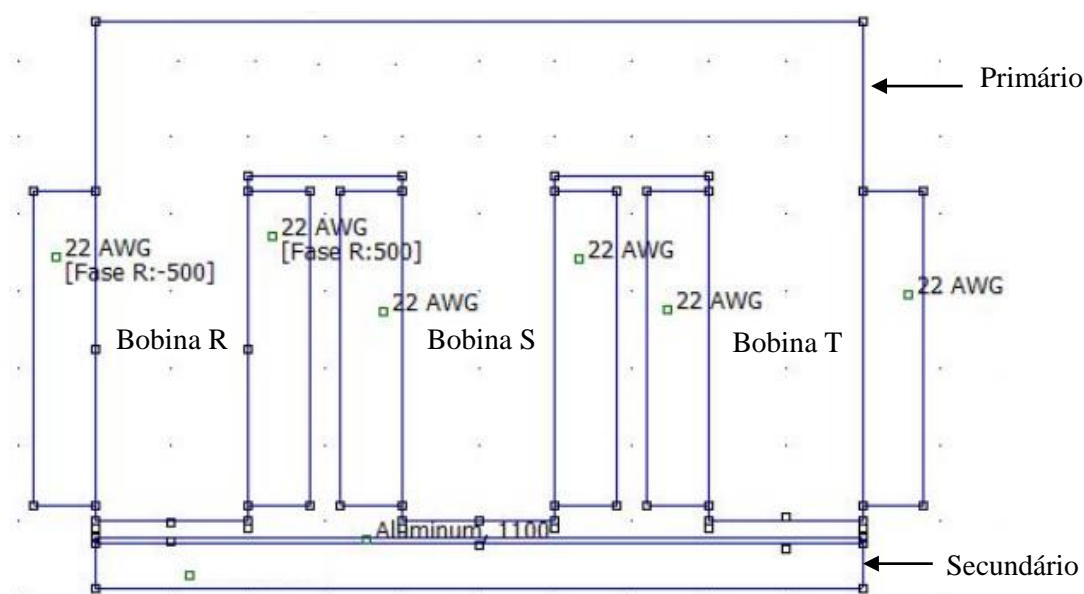


Figura 5.2 – Visualização da malha gerada para o modelo do núcleo reduzido no *software* FEMM 4.2.

O modelo completo do núcleo do API com dois graus de liberdade, foi inserido no *software* MAWXELL<sup>®</sup> V13, composto pelo primário da máquina (núcleo), formado por um único bloco, no qual os enrolamentos são alojados e isolados do mesmo. Os enrolamentos são confeccionados em cobre, com 250 espiras em cada enrolamento, sendo 3 enrolamentos por fase. No total são 18 enrolamentos idênticos entre si, dispostos de forma a permitir a alimentação trifásica senoidal, equilibrada por meio da ligação em estrela para cada conjunto de enrolamentos. O secundário da máquina constitui-se de uma estrutura plana nas dimensões de 500 mm x 500 mm em Aço ABNT 1020 e 8 mm de espessura, sobreposta por uma placa de alumínio com 1 mm, conforme apresentado na Figura 5.3. Dessa forma, definiu-se a posição inicial do núcleo em relação ao secundário em 100 mm de cada aresta (x e y) e, a distância referente à coordenada z entre o secundário e a face das ranhuras do translador definiu-se em 1 mm.

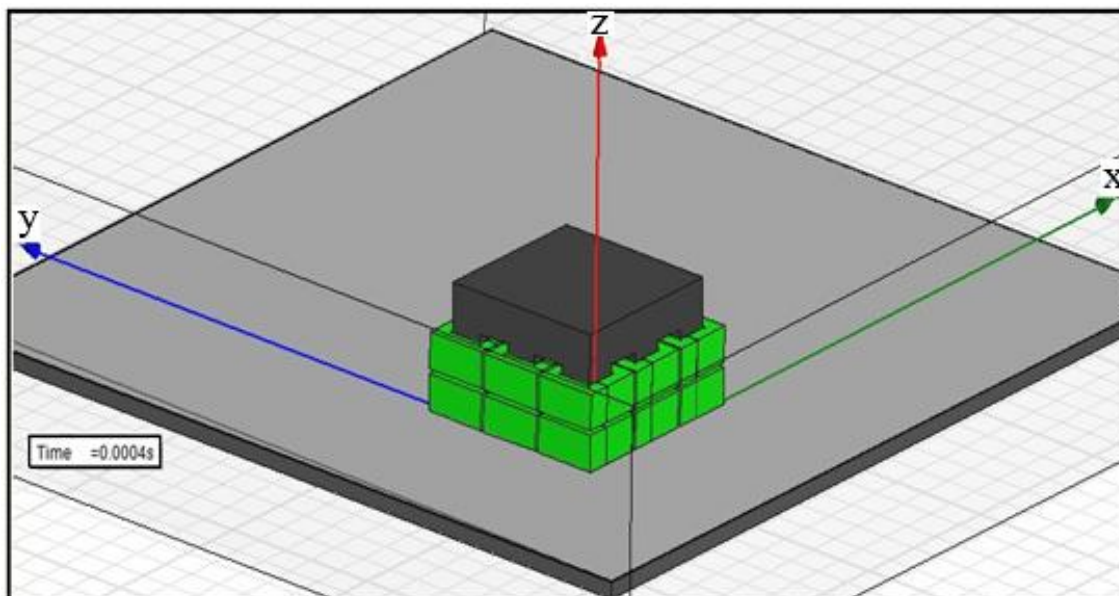


Figura 5.3 - Modelo completo implementado no MAXWELL V13 [86].

### 5.2.2 Simulações do Núcleo Reduzido Implementado no Atuador Planar de Indução

Com base nos parâmetros construtivos iniciais referentes ao núcleo reduzido e os enrolamentos, iniciou-se a análise da modelagem numérica do mesmo, sendo definido como parâmetro de entrada as seguintes frequências de 30, 60, 90 e 120 Hz, para avaliar a força resultante no eixo x (força de propulsão planar) e z (força normal). Nesta análise definiu-se como materiais utilizados no primário (núcleo) do API, no modelo reduzido e completo, o Aço ABNT 1020 devido às facilidades de fabricação e o SMC 1P Somaloy 500<sup>®</sup> e o composto de Fe, visto que, estes materiais são produtos da metalurgia do pó. Esses materiais obtidos pela metalurgia do pó apresentam características elétricas importantes relacionadas ao desempenho de máquinas elétricas, como resistividade elétrica e permeabilidade magnética, consequentemente impactam positivamente no rendimento do API.

Para validação da metodologia proposta neste estudo, será realizado a modelagem numérica do núcleo reduzido e completo com três materiais distintos. Com relação aos parâmetros construtivos, o secundário composto por uma chapa de alumínio 1 mm de espessura, montado sobre um chapa de aço maciço ABNT 1020 e 8 mm de espessura. Sendo o translador (primário) separado da secundário com entreferro de 2 mm, conforme apresentado na Figura 5.4.

A fim de observar a influência nos parâmetros referentes as forças produzidas no eixo x e z, posteriormente será substituído a chapa de alumínio por cobre com mesmas

dimensões. O objetivo de alterar o material da placa auxiliar é verificar o funcionamento do atuador sobre diferentes superfícies, a fim de avaliar o seu emprego como elemento de inspeção em chapas ou seu uso em estruturas robotizadas de soldagem.

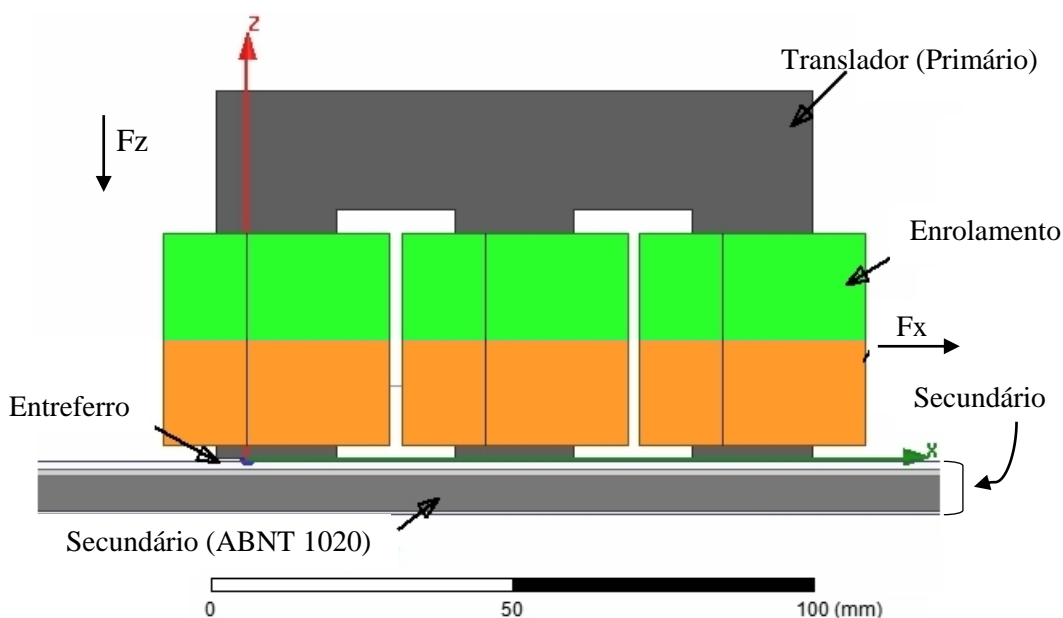


Figura 5.4 - Aspectos da simulação com núcleo reduzido.

Para cada configuração de material empregado no translador e no plano auxiliar, simulou-se nas frequências definidas. Os parâmetros de simulações foram fixados de acordo com a frequência utilizada, sendo o tempo definido de simulação o necessário correspondente a dois ciclos completos da primeira fase ascendente e o passo de simulação aproximadamente 0,33 do tempo completo.

Para a montagem de coeficientes de comparação referente aos materiais empregados na confecção do primário e secundário que compõem o API com núcleo reduzido, foi elaborada a Tabela 5.1, contendo parâmetros parciais de avaliação do desempenho da máquina elétrica. Três parâmetros foram obtidos a partir das análises:

- a) Parâmetro 1: Força  $x$  ( $F_x$ ) por corrente. Esse parâmetro faz a razão da intensidade da força  $x$  pelo módulo da corrente de alimentação. Quanto maior a força resultante por incremento de corrente, melhor o desempenho da resposta final do API e quanto maior este parâmetro, melhor o rendimento da máquina;
- b) Parâmetro 2: Força  $z$  ( $F_z$ ) por corrente. Com a divisão da magnitude de força  $z$  obtida pela intensidade da corrente injetada, obtém-se um parâmetro referente a resposta em força normal decorrente da energização do equipamento. A força  $z$  é indesejada,

- sobrecarrega a estrutura mecânica e não executa um trabalho útil; e
- c) Parâmetro 3: Perda por corrente. Ao repetir a mesma operação com as perdas sólidas e a corrente, é obtida uma proporção de perdas ôhmicas para cada ampère injetado. Essa perda sobreaquece o dispositivo, comprometendo a integridade dos enrolamentos, e consequentemente, sendo dissipada pelo efeito Joule.

Tabela 5. 1 - Resultados das simulações do API com Núcleo Reduzido [87].

Frequência $f$ [Hz]	Material no Primário	Material no Secundário	$F_x$ / Corrente Elétrica I [N/ A]	$F_z$ /Corrente Elétrica I [N/A]	Perdas Elétricas $P_{el}$ [W/A]	Coefficiente Geral G.g [N/W]
30	Aço ABNT 1020	Alumínio	1,862	31,053	15,194	0,735
		Cobre	2,051	28,203	15,576	0,958
	IPSomaloy 500	Alumínio	5,264	47,641	11,637	4,998
		Cobre	5,174	41,913	13,163	4,852
	Ferro resinado	Alumínio	4,159	37,636	11,870	3,948
		Cobre	3,984	32,273	13,031	3,736
60	Aço ABNT 1020	Alumínio	1,193	21,674	30,618	0,214
		Cobre	1,245	19,107	29,405	0,276
	IPSomaloy 500	Alumínio	4,945	37,750	27,465	2,359
		Cobre	4,123	31,433	27,416	1,972
	Ferro resinado	Alumínio	4,005	30,578	28,014	1,911
		Cobre	3,175	24,203	27,142	1,518
90	Aço ABNT 1020	Alumínio	0,977	17,900	43,520	0,122
		Cobre	0,986	15,726	40,201	0,154
	IPSomaloy 500	Alumínio	4,866	33,077	42,034	1,703
		Cobre	4,069	27,209	38,534	1,579
	Ferro resinado	Alumínio	3,844	26,131	42,454	1,345
		Cobre	3,174	21,223	38,149	1,232
120	Aço ABNT 1020	Alumínio	0,497	14,384	62,156	0,028
		Cobre	0,402	12,525	55,819	0,023
	IPSomaloy 500	Alumínio	4,442	28,139	63,542	1,104
		Cobre	3,239	22,896	54,943	0,834
	Ferro resinado	Alumínio	3,509	22,230	64,177	0,872
		Cobre	2,494	17,630	53,844	0,642

Com o intuito de elaborar um parâmetro único de análise que possibilite comparar os resultados das 24 simulações, bem como a variação da resposta de rendimento em função da frequência de excitação da máquina, confeccionou-se um coeficiente geral que contemple os parâmetros acima, com um grau de importância que valorize o primeiro parâmetro, a força de propulsão no eixo x. A formulação para o cálculo do coeficiente geral está disposta na Equação 2.

$$C.g = \frac{C1^2}{C2 * C3} \quad \text{Eq (2)}$$

Onde:

$C.g$  = Coeficiente geral [N/W]

$C1$  = Força no eixo x em função da corrente elétrica [N/A]

$C_2$  = Força no eixo z em função da corrente elétrica [N/A]

$C_3$  = Perdas elétricas [W/A]

O coeficiente geral, por ser diretamente proporcional a  $C_1$  e inversamente proporcional a  $C_2$  e  $C_3$  resulta em um parâmetro que responde diretamente a magnitude da força de propulsão planar gerada no API para efetuar o deslocamento do translador por unidade de potência dissipada no núcleo reduzido. Devido a divisão feita entre os coeficientes parciais, quanto maior o coeficiente geral da máquina, melhor sua eficiência relativa para os três parâmetros analisados.

A Figura 5.5, apresenta os coeficientes gerais ( $C_g$ ) do Aço ABNT 1020 e dos compósitos 1P Somaloy 500<sup>®</sup> e Ferro resinado utilizados na fabricação do núcleo reduzido (translador) e a influência no secundário (estator) quando composto por alumínio ou cobre. A utilização do alumínio no secundário resulta no aumento do  $C_g$  comparado ao cobre devido o alumínio apresentar a permeabilidade magnética ( $\mu_r = 1,000021$ ) ligeiramente superior a do cobre ( $\mu_r = 0,999999$ ) [88] . O *SMC* 1P Solamoy 500<sup>®</sup> demonstrou-se promissor a sua utilização em máquinas elétricas especiais por apresentar o melhor  $C_g$  dos materiais analisados. Devido as suas características como permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r = 500$ ) e o Kenolube responsável pelo isolamento das partículas de ferro, conseqüentemente aumenta-se a resistividade elétrica do *SMC* 1P Solamoy 500<sup>®</sup>

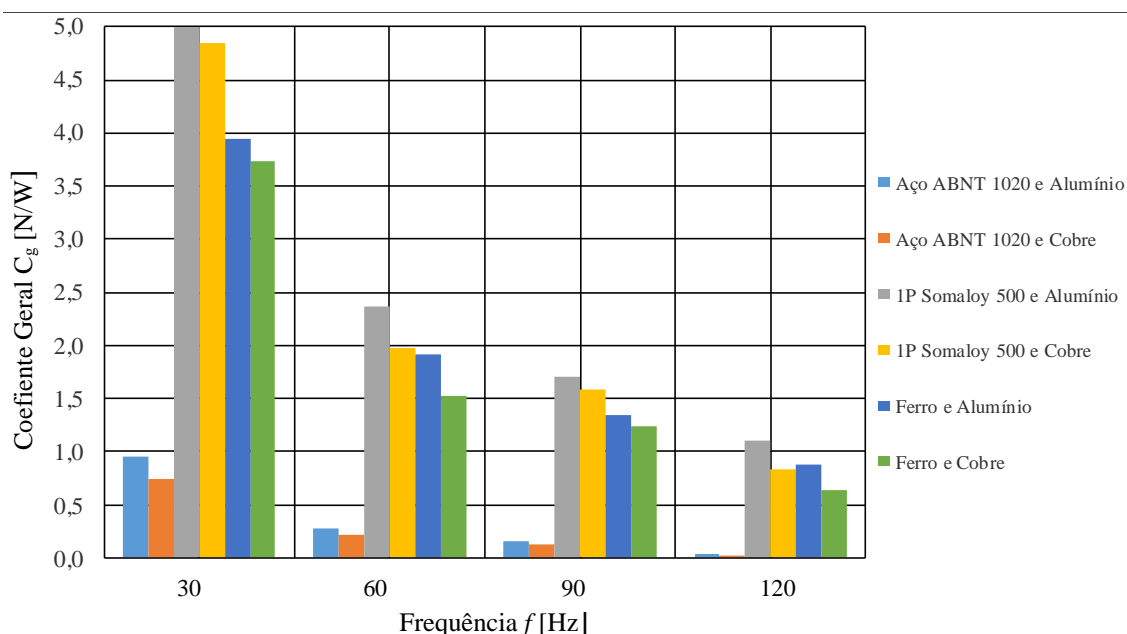


Figura 5.5- Resultado das simulações referente Coeficiente Geral do núcleo reduzido [87].

Para uma melhor análise em frequência, foram elaborados gráficos de cada



parâmetro em função dos materiais empregados no primário e secundário do API, e frequência aplicada, sendo possível relacionar a resposta dos índices quando submetidos à variação da frequência. Os valores apresentados nas Figuras 5.6 a 5.7, são absolutos e referem-se a resposta em função da mesma amplitude de 3A na alimentação do API do núcleo reduzido.

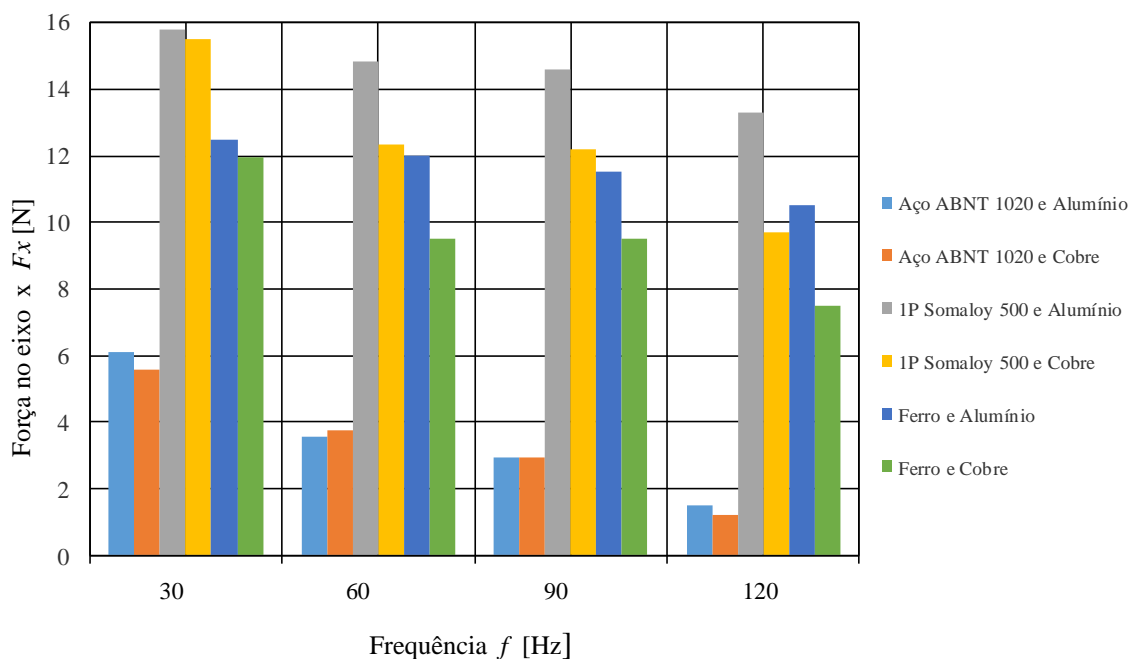


Figura 5.6 - Resultado das simulações referente à força no eixo x, desenvolvida pelo núcleo reduzido [87].

Com as informações contidas na Figura 5.6, é visível o aumento do desempenho na resposta desejada (Força de propulsão planar –  $F_x$ ) quando aplicado o *SMC* no primário do API. Em valores absolutos, é possível verificar o aumento superior a 8 vezes a força planar quando a frequência de operação situa-se em 120 Hz.

A Figura 5.7, ilustra as magnitudes da força  $Z$  em função das mesmas configurações propostas. A característica diamagnética do cobre em relação ao alumínio reduz a indução magnética no entreferro (mesmo sob uma hipotética intensidade igual ao campo), o que reduz a força de atração entre o primário e o secundário. Não houve grandes variações em função da frequência. O alívio da força normal sempre existirá para qualquer configuração de material primário e qualquer frequência de operação entre as avaliadas.

A partir dos dados apresentados na Tabela 5.1, elaborou-se comparativos para cada índice de desempenho e para o coeficiente geral de rendimento da máquina (fig. 5.8). Este parâmetro pode ser analisado como coeficiente geral de rendimento pois, indica um

aumento quadrático da força de propulsão planar no API e a redução da magnitude da força normal, em consequência diminuiu-se as potências de perdas no núcleo com o aumento do módulo deste coeficiente.

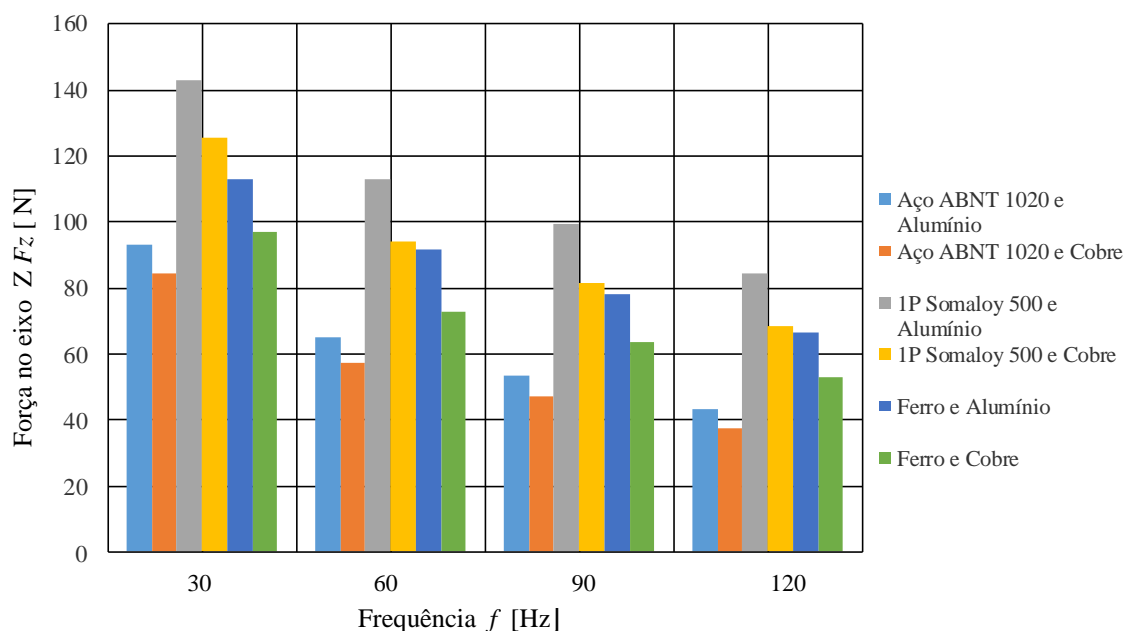


Figura 5.7- Resultado das simulações referente à força no eixo z, desenvolvida pelo núcleo reduzido [87].

A elaboração da Figura 5.8, foi baseada na análise da média de perdas no núcleo, sendo possível verificar melhoras quando o material do entreferro é substituído pelo cobre com frequências a partir de 60 Hz, para qualquer um dos dois materiais utilizados no núcleo ferromagnético do primário.

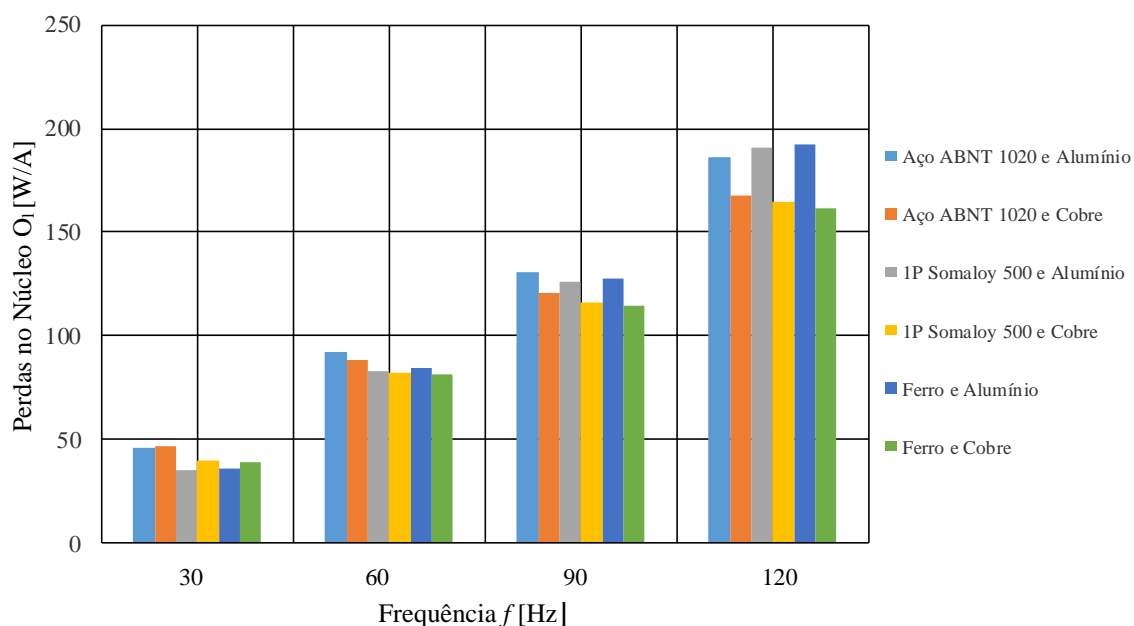


Figura 5.8- Resultado das simulações referente à perda no núcleo reduzido [87].

### 5.2.3 Simulações do Núcleo Completo Implementado no Atuador Planar de Indução

A análise das forças de propulsão planar desenvolvidas pelo dispositivo são as principais medições relacionadas ao funcionamento dinâmico do API, uma vez que o propósito principal do motor é a geração de forças planares a partir da alimentação trifásica.

Para validar o núcleo reduzido referente à metodologia para prever o funcionamento do API composto pelo núcleo completo, foram realizadas simulações com o *software* MAXWELL<sup>®</sup> V13. Neste caso utilizou-se os mesmos parâmetros aplicados no núcleo reduzido e as condições de simulação do primeiro e segundo casos, a fim de comparar os resultados.

Devido às características construtivas do núcleo completo faz-se necessário o uso do *software* MAXWELL<sup>®</sup> V13 para realizar a simulação tridimensional do dispositivo. Deste modo, demanda-se maior tempo de simulação para obter as respostas. Contudo, o propósito principal é comparar as forças de propulsão planar dos dois modelos de núcleo. Os esforços concentram-se na análise da força de propulsão, sendo observado com atenção as mesmas particularidades da inserção do modelo reduzido referente ao número de espiras utilizadas. A Figura 5.9, apresenta os resultados obtidos relacionados à força de propulsão planar no eixo x do API.

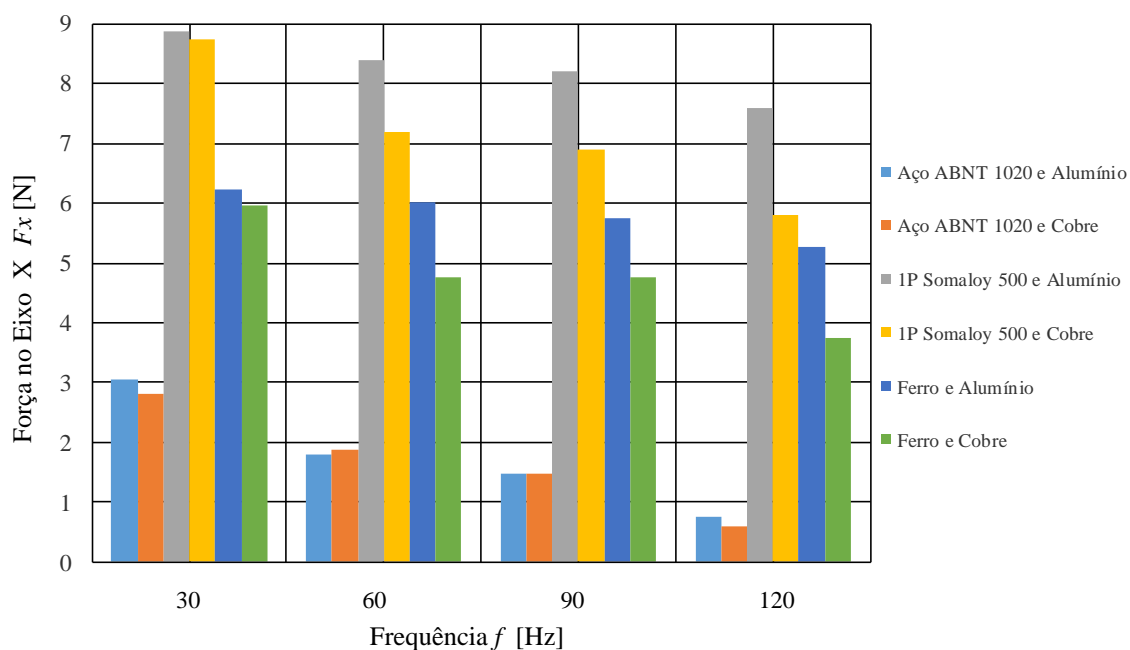


Figura 5.9 - Resultado das simulações referente à força no eixo X desenvolvida pelo núcleo completo [87].

## 6. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados referente a validação da metodologia denominada modelo reduzido. A comprovação da eficácia do modelo reduzido é demonstrada através dos dados obtidos na modelagem numérica e medições experimentais, considerando a fabricação do núcleo reduzido e completo utilizado no API, com Aço ABNT1020, *SMC 1P Somaloy 500*<sup>®</sup> e compósito Fe. Os resultados comparativos abordados referente a força de propulsão planar, consumo energético, perdas elétricas e rendimento da máquina.

### 6.1 Força de Propulsão Planar

O desempenho relacionado ao deslocamento do API depende diretamente da intensidade da força de propulsão planar. Desta forma, aplicou-se uma alimentação trifásica equilibrada nos enrolamentos do eixo x, a fim de avaliar os resultados através da modelagem numérica e medições experimentais no modelo reduzido.

#### 6.1.1 Validação do Modelo Reduzido Fabricado com *SMC 1P Somaloy 500*<sup>®</sup>

Neste estudo, definiu-se a fabricação do núcleo reduzido do API com o *SMC 1P Somaloy 500*<sup>®</sup>, visto que, apresenta características desejáveis para o projeto de máquinas elétricas especiais, como, baixas perdas elétricas, quando submetido a operação em médias frequências. Na tabela 6.1, apresenta-se os valores médios da força de propulsão planar obtidos nas medições experimentais e simulações numéricas. Pode-se observar na tabela 6.1 que, a média do erro percentual e a correlação entre os resultados experimentais e computacionais correspondem à 10% e 99% respectivamente.

A Figura 6.1, apresenta os valores médios referente à força de propulsão planar obtidos por medições experimentais e simulações numéricas do modelo reduzido. Neste caso, o núcleo reduzido do API foi fabricado com *SMC 1P Somaloy 500*<sup>®</sup>, sendo

energizado os enrolamentos com tensão elétrica trifásica de 25 V à 130 V.

Tabela 6.1 – Comparação dos resultados médios de força planar de propulsão linear entre os resultados experimentais e simulados para deslocamento no eixo x.

Força Planar de Propulsão no eixo x			
Tensão Aplicada no API V [V]	Resultados Experimentais $F_x$ [N]	Resultados Computacionais $F_x$ [N]	Erro Percentual [%]
25	0,39	0,35	10,37
40	1,01	0,89	11,91
55	1,88	1,67	10,96
70	3,00	2,69	10,29
85	4,30	3,93	8,78
100	5,84	5,37	8,04
115	7,84	7,08	9,64
130	9,93	8,98	9,62

Ao analisar os dados contidos na Figura 6.1 que, as diferenças são pequenas entre os resultados experimentais e numéricos obtidos pela metodologia do modelo reduzido. Isso corrobora para estabelecer uma confiabilidade de relação entre os dados e, conseqüentemente, possibilita utilizar a metodologia do modelo reduzido para mensurar outras situações operacionais do API.

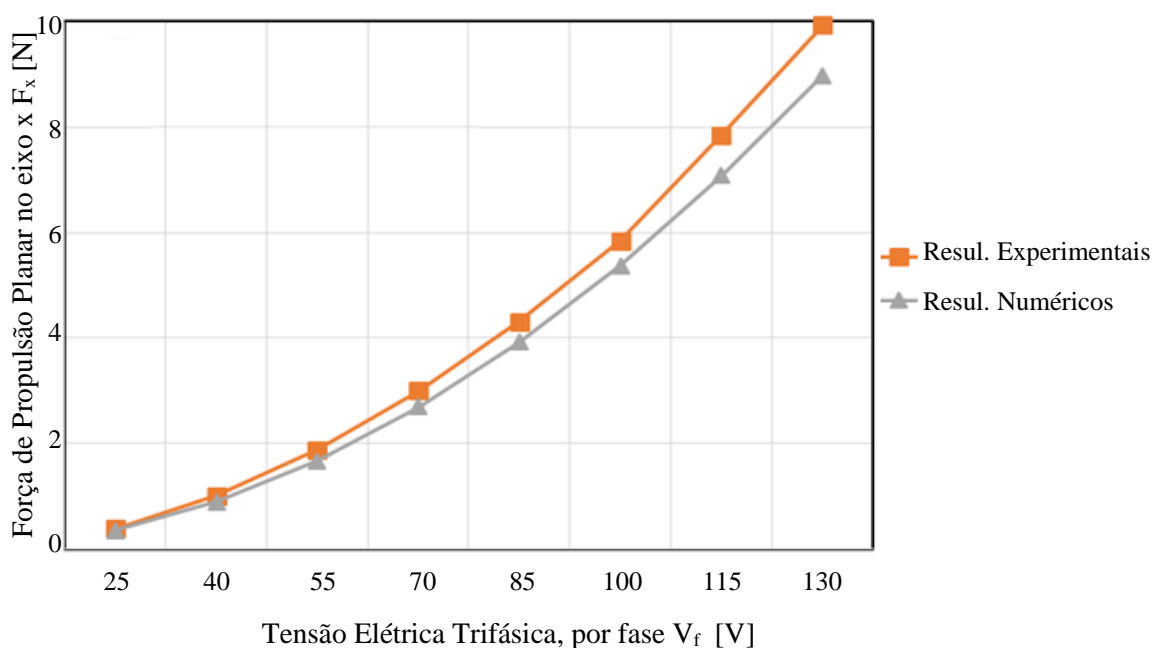


Figura 6.1 - Força de propulsão planar no eixo x sob diferentes níveis de tensão para os núcleo reduzido, obtidos por medições experimentais e computacionais.

A corrente elétrica consumida pelos enrolamentos alocados nas ranhuras do núcleo reduzido impacta diretamente no rendimento da máquina elétrica. As correntes induzidas no secundário são derivadas da variação de campo magnético, e conseqüentemente, a geração de forças de propulsão planar está relacionada ao produto vetorial entre estas correntes induzidas e o próprio campo magnético gerado na região do entreferro. Na Figura 6.2 apresenta-se a corrente elétrica consumida mensurada através dos resultados experimentais e numéricos.

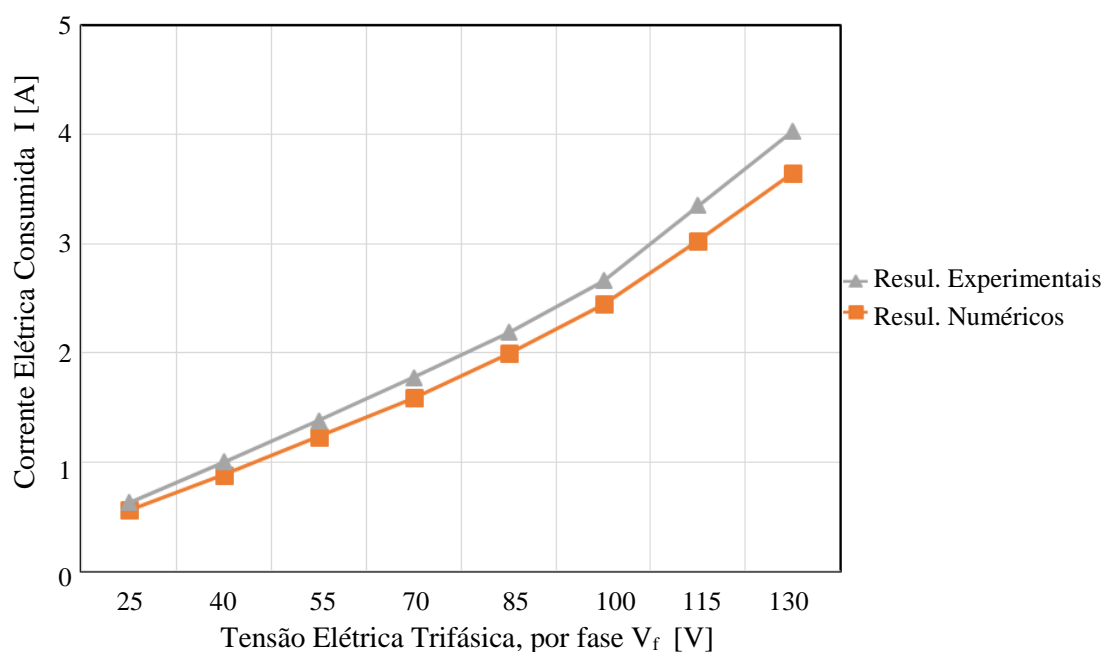


Figura 6.2 – Corrente elétrica consumida obtidas por medições experimentais e computacionais sob diferentes níveis de tensão para os núcleo reduzido,.

### 6.1.2 Validação do Modelo Completo Fabricado com *SMC* 1P Somaloy 500<sup>®</sup>

Concluído com sucesso as validações através de resultados experimentais e numéricos do modelo reduzido, aplicou-se a metodologia para analisar o núcleo completo empregado no API. Contudo, devido os custos de fabricação do núcleo completo com *SMC* 1P Somaloy 500<sup>®</sup>, foi comparado os resultados computacionais com dados experimentais e analíticos publicados em artigos [1, 10, 11, 14]. Na análise comparativa da força de propulsão planar entre os núcleos, definiu-se os parâmetros de entrada sendo: tensão e frequência de 45V à 60 V e 45 Hz à 60 Hz, respectivamente. Na tabela 6.2 apresenta-se a força de propulsão planar gerada através dos núcleos reduzido e completo, e conseqüentemente, o fator de relação entre os mesmos.

Através do parâmetro denominado de Fator de Relação ( $F_R$ ) é possível realizar uma estimativa da força de propulsão planar resultante no API quando implementado com núcleo completo com base nos dados numéricos obtidos pelo metodologia denominada de modelo de núcleo reduzido. O Fator de Relação ( $F_R$ ) é o resultado da relação entre o parâmetro da força de propulsão planar obtida dos resultados numéricos dos núcleos completo e reduzido respeitando os mesmas condições de contorno.

Tabela 6.2- Comparação entre a força de propulsão planar gerados pelos núcleos reduzido e completo.

Modelos dos Núcleos				
Frequência $f$ [Hz]	Tensão [V]	Reduzido $F_x$ [N]	Completo $F_x$ [N]	Fator de Relação $F_R$ [-]
45	45	3,57	10,06	2,81
48	48	3,83	10,51	2,74
51	51	4,07	11,47	2,81
54	54	4,29	11,13	2,60
57	57	4,45	11,26	2,53
60	60	4,60	11,33	2,46

A Figura 6.3 apresenta resultados computacionais da força de propulsão planar dos núcleos reduzido e completo no API, obtidos com *software* MAXEWLL<sup>®</sup> V13. Na comparação referente aos dados computacionais dos núcleos reduzido e completo, observa-se uma significativa linearidade entre os modelos.

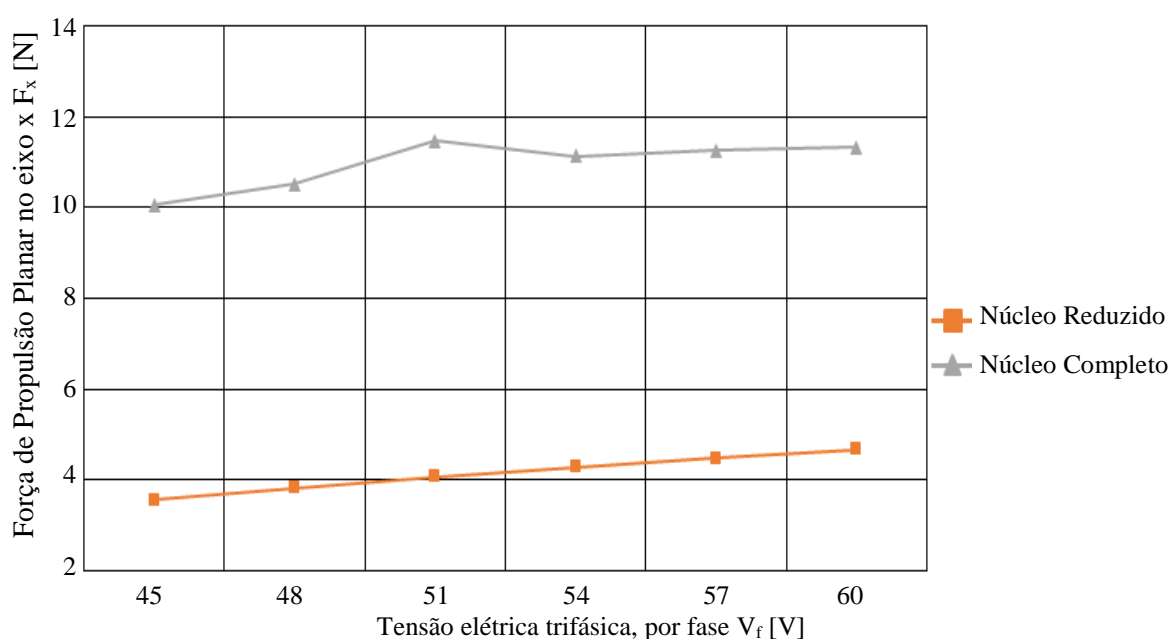


Figura 6.3 – Resultados computacionais comparativos da força planar de propulsão linear no eixo  $x$  sob diferentes níveis de tensão aplicadas nos núcleos reduzido e completo.

Observa-se na Figura 6.3 que, as não linearidades são pequenas entre os núcleos reduzido e completo, conseqüentemente corrobora para eficácia metodológica proposta neste estudo. Desta forma, elaborou-se as tabelas 6.3 e 6.4 para comparar os resultados numéricos do núcleo completo utilizando o 1P Somaloy 500<sup>®</sup> obtidos neste trabalho com dados experimentais e analíticos publicados por Baggio *et al* [1, 14].

Tabela 6.3 – Comparação dos resultados numéricos e experimentais, obtidos com núcleo completo.

Núcleo Completo				
Frequência $f$ [Hz]	Tensão [V]	Resultados Experimentais $F_x$ [N]	Resultados Numéricos $F_x$ [N]	Erro Percentual % [%]
45	45	10,15	10,06	-0,89
48	48	10,70	10,52	-1,68
51	51	11,11	10,9	-1,89
54	54	11,82	11,13	-5,84
57	57	12,06	11,27	-6,55
60	60	12,19	11,33	-7,05

Através das tabelas 6.3 e 6.4 pode-se observar, em ambos os casos o erro percentual é inferior à 8%, como resultado, indica uma forte coerência entre os valores numéricos, experimentais e analíticos obtidos por Baggio *et. al* [1]. Os resultados numéricos referente a força de propulsão planar do API completo, quando comparados aos dados da proposta de Treviso *et. al* [20] de um totpolgia de Atuador Planar de Indução Trifásico com deslocamento bidirecional composto por 36 ranhuras, apresentou um erro aproximado de 12%, corroborando para validar a eficácia da metodologia modelo de núcleo reduzido.

Tabela 6.4 - Comparação dos resultados numéricos e analíticos, obtidos com núcleo completo [1].

Núcleo Completo				
Frequência $f$ [Hz]	Tensão [V]	Resultados Analíticos $F_x$ [N]	Resultados Numéricos $F_x$ [N]	Erro Percentual % [%]
45	45	9,88	10,06	1,82
48	48	10,35	10,52	1,64
51	51	10,59	10,9	2,93
54	54	11,30	11,13	-1,50
57	57	11,65	11,27	-3,26
60	60	11,71	11,33	-3,25



## 6.2 Validação do Modelo Completo Fabricado com Aço ABNT 1020

O emprego do Aço ABNT 1020 para fabricação dos núcleos reduzido e completo devido ao custo relativamente baixo e a simplicidade de obtenção facilidade de usinagem. o Aço ABNT 1020 possui uma alta permeabilidade magnética relativa, que permite o estabelecimento de um fluxo magnético intenso, e conseqüentemente, o estabelecimento de magnitudes elevadas de campo magnético no entreferro. Essas características são suficientes para promover o funcionamento do API com os núcleos reduzido e completo corroborando para validação da metodologia do modelo reduzido.

Para a aplicação da metodologia denominada modelo reduzido para avaliar o comportamento de materiais ferromagnéticos empregados na fabricação do núcleo completo do Atuador Planar de Indução é necessário que ocorra a convergência dos resultados numéricos e experimentais do modelo reduzido. Na Figura 6.4 é apresentado o resultados numéricos e experimentais obtidos referente a força de propulsão planar com erro é inferior a 14% entre as ferramentas de análise.

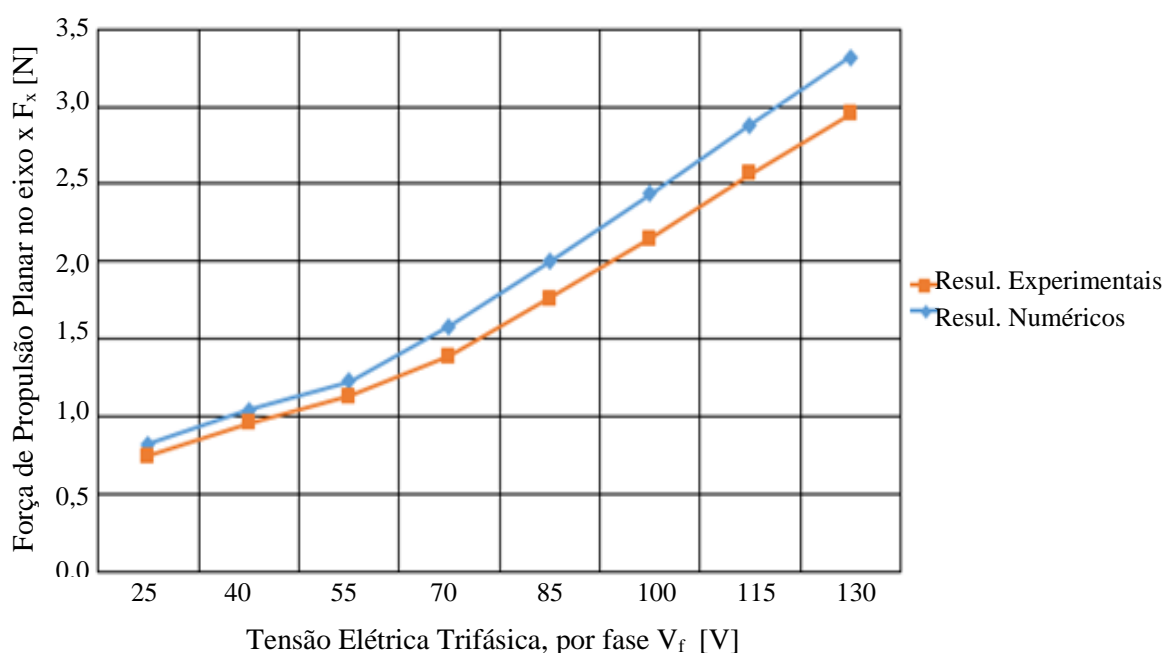


Figura 6.4 - Força de propulsão planar no eixo X sob diferentes níveis de tensão para os núcleo reduzido confeccionado com Aço ABNT 1020, obtidos por medições experimentais e numéricos.

Na tabela 6.5 é exposto a força de propulsão planar gerada através dos núcleos reduzido e completo, mantem-se constante a tensão de alimentação dos enrolamentos e varia-se a frequência, e conseqüentemente, o fator de relação entre os mesmos.

Tabela 6.5- Comparação entre a força de propulsão planar gerados pelos núcleos reduzido e completo.

Núcleos do API				
Frequência $f$ [Hz]	Tensão [V]	Reduzido $F_x$ [N]	Completo $F_x$ [N]	Fator de Relação FR [-]
60	55	1,23	2,00	1,63
60	70	1,58	2,68	1,70
60	85	2,00	3,52	1,76
60	100	2,44	4,22	1,73
60	115	2,88	5,20	1,81
60	130	3,32	5,90	1,78

### 6.3 Validação do Modelo Completo Fabricado com Ferro Resinado

Na composição do material denominado Ferro resinado utilizado na fabricação do núcleo reduzido utilizou-se resina fenólica de nome comercial HRJ-10236 que corresponde a 2% do volume total. A resina HRJ-10236 tem a função de isolar os grãos do material Fe, a fim de minimizar as correntes parasitas. Na tabela 6.6 é exposto a força propulsão planar gerada através dos núcleos reduzido e completo e, conseqüentemente o fator de relação entre os mesmos. A Figura 5.5, apresenta os resultados numéricos e experimentais obtidos referente a força de propulsão planar empregando o material compósito Ferro resinado. O núcleo reduzido com Fe resultou em um erro médio de 14% entre os resultados computacionais e experimentais.

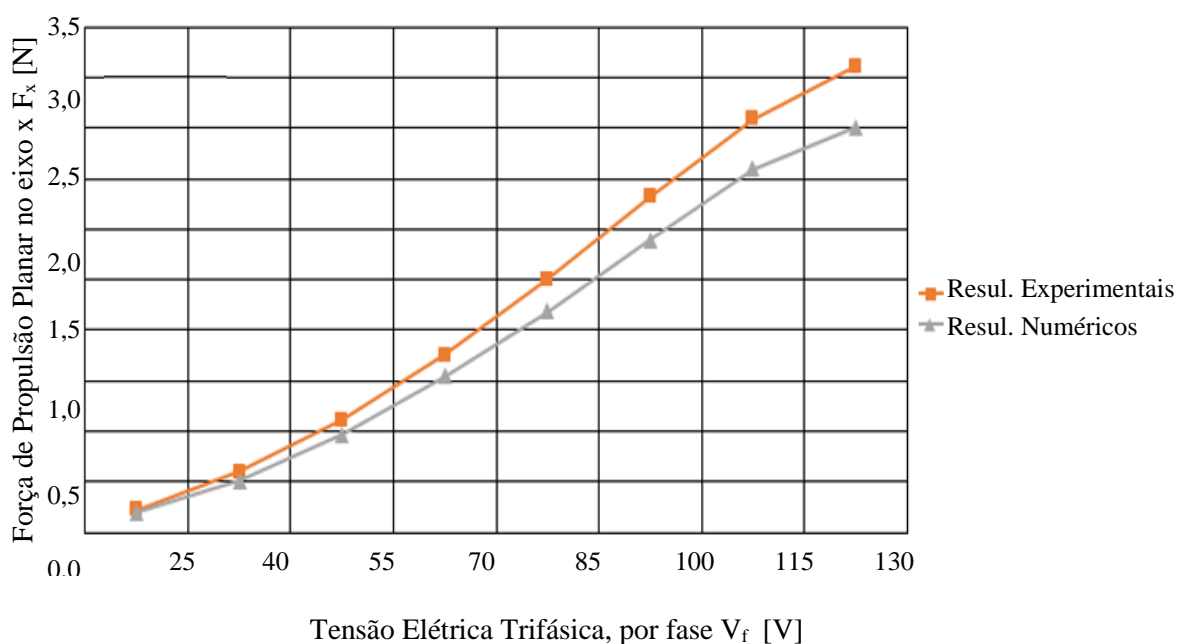


Figura 6.5 - Força de propulsão planar no eixo  $x$  sob diferentes níveis de tensão para os núcleo reduzido confeccionado com Ferro resinado, obtidos por medições experimentais e numéricas.

Tabela 6.6- Comparação entre a força de propulsão planar gerados pelos núcleos reduzido e completo.

Núcleos API				
Frequência $f$ [Hz]	Tensão [V]	Reduzido Fx [N]	Completo Fx [N]	Fator de Relação FR [-]
60	55	1,11	2,11	1,90
60	70	1,76	3,36	1,91
60	85	2,51	5,02	2,01
60	100	3,32	6,34	1,91
60	115	4,09	7,61	1,86
60	130	4,61	8,30	1,82

#### 6.4 Comparação do Consumo Energético

O consumo de energia elétrica configura-se como um parâmetro importante em projetos de máquinas elétricas devido seu impacto no rendimento do motor. A formulação para o cálculo da relação entre o consumo de energia elétrica e a força de propulsão planar está disposta na Equação 3.

$$\text{Cons} = \frac{(V_{ent} * I_{ent} * 1,73) - \text{Perdas}_{el}}{\text{Força}_p} \quad \text{Eq (3)}$$

Onde:

$C_{cons}$  = Consumo de energia elétrica no API [W/N]

$V_{ent}$  = Tensão aplicada no API [V]

$I_{ent}$  = Corrente elétrica aplicada no API [A]

$\text{Perdas}_{el}$  = Perdas elétricas totais no API [W]

$\text{Força}_p$  = Força resultante no Eixo x

Através da equação 3 elaborou-se a Tabela 6.7 apresenta-se o resultado numérico referente ao consumo energético os três materiais empregados na fabricação do núcleo reduzido empregado no API. Observa-se através dos resultados que o *SMC* 1P Somaloy 500<sup>®</sup> apresenta-se maior desempenho comparado Ferro resinado.

No processo de concepção de máquinas elétricas de uso especial, é importante estimar no projeto as perdas elétricas totais. No entanto, estimar as perdas no núcleo torna-se difícil, devido à sua complexidade. Dessa forma, a metodologia do modelo reduzido auxilia na estimativa das perdas devido o fator de relação entre os núcleos reduzido e completo.

Tabela 6.7 - Comparativo entre o consumo dos três materiais aplicado na confecção núcleo reduzido simulado.

	SMC 1P Somaloy 500 <sup>®</sup>	Fe	Aço ABNT 1020
Tensão Elétrica Aplicada no API V [V]	Consumo de Energia Elétrica no API C <sub>cons</sub> [W/N]	Consumo de Energia Elétrica no API C <sub>cons</sub> [W/N]	Consumo de Energia Elétrica no API C <sub>cons</sub> [W/N]
25	99,12	148,95	104,47
40	98,48	145,38	118,31
55	101,42	149,98	192,54
70	102,11	156,24	250,63
85	105,60	170,85	292,16
100	109,64	198,03	330,12
115	116,14	228,12	368,80
130	130,11	292,43	404,01

Através da metodologia do modelo reduzido, confeccionou-se as Tabelas 6.8 a 6.10 são apresentados os parâmetros força de propulsão planar, consumo energético e rendimento do núcleo completo fabricado com 1P Somaloy 500<sup>®</sup>, Aço ABNT 1020 e Ferro resinado empregado no Atuador Planar de Indução com dois graus de liberdade

Tabela 6.8 – Consumo energético do núcleo completo fabricado com 1P Somaloy 500<sup>®</sup>

Núcleo Completo Fabricado com SMC 1P Somaloy 500 <sup>®</sup>						
Frequência $f$ [Hz]	Tensão [V]	Corrente Elétrica I [A]	Completo Fx [N]	Perdas Totais [W]	Consumo C <sub>cons</sub> [W/N]	Rendimento [N/W]
45	45	2,60	10,06	190,91	1,14	0,87
48	48	2,76	10,52	218,05	1,06	0,94
51	51	2,82	10,90	240,01	0,81	1,24
54	54	2,84	11,13	259,70	0,50	1,98
57	57	2,94	11,27	283,04	0,61	1,64
60	60	3,11	11,33	312,65	0,90	1,11

Tabela 6.9 – Consumo energético do núcleo completo fabricado com Aço ABNT 1020

Núcleo Completo Fabricado com Aço ABNT 1020						
Frequência $f$ [Hz]	Tensão [V]	Corrente Elétrica I [A]	Completo Fx [N]	Perdas Totais [W]	Consumo C <sub>cons</sub> [W/N]	Rendimento [N/W]
45	45	0,63	0,31	17,39	10,70	0,093
48	48	1,00	0,90	25,88	48,85	0,020
51	51	1,02	1,06	28,43	63,81	0,015
54	54	1,03	1,1	30,74	69,92	0,014
57	57	1,06	1,13	33,54	73,48	0,013
60	60	1,12	1,15	37,11	73,44	0,013

Tabela 6.10 – Consumo energético do núcleo completo fabricado com Ferro Resinado.

Núcleo Completo Fabricado com Ferro resinado						
Frequência $f$ [Hz]	Tensão [V]	Corrente Elétrica [A]	Completo Fx [N]	Perdas Totais [W]	Consumo [W/N]	Rendimento [N/W]
45	45	3,43	8,84	173,41	10,59	0,09
48	48	3,58	9,07	193,98	11,39	0,087
51	51	3,73	9,26	215,32	12,29	0,081
54	54	3,88	9,38	235,35	13,55	0,073
57	57	4,06	9,45	257,04	15,17	0,065
60	60	4,19	9,46	277,41	16,65	0,060

Análise anteriores realizadas por Baggio *et. al.* [1], Treviso *et. al* [20], GUO *et al* [49] e HAMLER *et. Al* [61] suas conclusões apontaram que as propriedades elétricas contidas no SMC 1P Somaloy 500<sup>®</sup> são superiores a materiais convencionais, e conseqüentemente, na análise global dos parâmetros que compõem as Tabelas 6.8 a 6.10 o emprego do SMC 1P Somaloy 500<sup>®</sup> demonstrou maior eficiência diante dos outros dois materiais analisados mesmo operando em frequências baixas, sendo apontado por Esse resultado positivo do SMC 1P Somaloy 500<sup>®</sup> esta associado a resina utilizada na sua composição que isola os grãos orientados de ferro.

## 7. CONCLUSÕES

Esta tese apresentou uma metodologia denominada de modelo reduzido como uma alternativa para avaliar o desempenho de matérias empregados na confecção do núcleo completo que compõem o translador do atuador planar de indução. O modelo reduzido corresponde a 33% componentes usais do API, dessa forma, torna-se menor volume de material minimiza as etapas construtivas para avaliar o desempenho do núcleo completo. A metodologia do modelo reduzido apresenta-se como uma ferramenta relevante para os estudos voltados a melhoria e testes de novos compósitos magnéticos obtidos pela metalurgia do pó na fabricação de máquinas elétricas lineares.

Com intuito de validar a metodologia proposta, no âmbito numérico e experimental, definiu-se como materiais utilizados no núcleo do API em estudo o Aço ABNT 1020 devido suas características de fácil usinabilidade e os compósitos Fe e SMC 1P Somaloy 500<sup>®</sup>. Determinado os materiais a serem aplicados na confecção dos núcleos iniciou-se a avaliação dos modelos numéricos através da utilização dos *softwares* dos FEMM 4.2 e o MAXWELL<sup>®</sup> V13.

As respostas obtidas nos modelos numéricos do núcleo reduzido e completo foram comparados com dados experimentais obtidos na bancada de testes pelo emprego de enrolamentos exploratórios referente a variação do fluxo magnético criado através da bobinas no translador e responsáveis pelo deslocamento. Dessa forma observou-se que os resultados numéricos e experimentais apresentam linearidade com incrementos das variáveis de entrada como frequência da tensão de alimentação dos enrolamentos alocados no primário, que corrobora que os modelos inseridos nos *softwares* representem similaridade com os núcleos físicos reduzido e completo.

Com os modelos numéricos os núcleos reduzido e completo validados, observou-se que os resultados obtidos através dos *softwares* referente a força de propulsão planar resultante confeccionados em SMC 1P Somaloy 500<sup>®</sup> e Fe apresentaram fator de relação aproximadamente igual a 2. Devido a linearidade do fator de relação, permite a fabricação do núcleo reduzido para analisar o comportamento da máquina elétrica completa.

Assim, somado às características de menor consumo de material, simplicidade na montagem e a linearidade entre os resultados dos núcleos reduzido e completo, a metodologia proposta representa-se como uma alternativa viável, visto que, apresenta uma forte correlação entre a força de propulsão planar gerada pelos núcleos reduzido e o completo

## 8. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

A possibilidade de continuidade da metodologia do modelo reduzido para API incorpora uma série de sugestões viáveis para futuras produções técnicas e estudos nessa área. Cabe ressaltar que as sugestões nesta subseção são do autor e não estão listadas por ordem de importância ou relevância, bem como não são as únicas existentes para a continuidade do desenvolvimento do API.

O API apresenta forças lineares de atuação planar nos eixos  $X$  e  $Y$ . Contudo, em razão dos fluxos magnéticos de grande intensidade, são manifestadas forças normais no eixo  $Z$  com magnitudes extremamente superiores às obtidas nos sentidos de movimentação planar. Um estudo detalhado das forças normais pode conduzir a soluções para sua mitigação e conseqüente melhoria do rendimento do dispositivo por redução de perdas por atrito apresentadas no protótipo real.

Neste estudo todas as simulações para a obtenção das forças de propulsão planar foram realizadas com o núcleo em regime contínuo. A análise das respostas do API com o núcleo em regime transitório contribuirá na aplicação dinâmica e prática do dispositivo.

A metodologia do modelo reduzido aplicada na análise do API com dois graus de liberdade considerou o máquina elétrica sem a presença de dispositivos e/ou técnicas de controle de trajetória. A avaliação da relação do desempenho de diferentes técnicas de controle aplicadas no API quando construído com núcleo reduzido e completo permitirá mensurar tantos os parâmetros de confecção controlabilidade, em conseqüência amplia-se o range de possíveis utilizações do API.

Os melhores resultados obtidos neste estudo estão associado aos compósitos a base de partículas de ferro circundadas por material isolante. Para minimizar as perdas elétricas sugere-se o estudo de resinas com propriedades isolantes para maximizar o rendimento do API.



## 9. REFERÊNCIAS

- [1] BAGGIO FILHO, Nolvi Francisco. **Estudo de um Atuador Planar de Indução**. Doutorado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- [2] MENDONÇA, Paulo de Tarso R. **Materiais Compostos e Estruturas Sanduíche**. São Paulo: Manole, 2005. 656 p.
- [3] CHICINAS, I.; GEOFFROY, O.; ISNARD, O. P. V. **Soft Magnetic Composite Based on Mechanically Alloyed Nanocrystalline Ni<sub>3</sub>Fe Phase**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. New York, v.290-291, p.1531-1534. abr. 2005.
- [4] BAGGIO FILHO, Nolvi Francisco. **Estudo e Desenvolvimento de um Atuador Planar com Enrolamentos Planificados e Núcleo de Material Ferromagnético Compósito**. 2008. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- [5] SILVEIRA, Marília Amaral da. **Estudo de um Atuador Planar**. 2003. Tese. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- [6] ARORA N; *et al.* **“A Planar Electromagnetic Actuator Based on two Layer Coil Assembly For Micro Applications,”** IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, p. 174–179, julho 2014.
- [7] NASAR, S. A.; BOLDEA, I. **Linear Electric Motors: Theory, Design and Applications**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1987.
- [8] DIEDRICH, Valter Henrique. **Desenvolvimento de Nova Topologia de Carro-Primário de Atuador Planar de Indução**. Monografia. Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.
- [9] CHAPMAN, S. J. **Electric machinery Fundamentals**, Boston: McGraw-Hill, 1999.
- [10] FLORES FILHO, A. F. *et al.* **Estudos E Desenvolvimento De Um Atuador Planar (Motor Xy)**. Revista Ciência & Engenharia. Uberlândia, v.10, n. 2, p. 19-27, jul. 2001.
- [11] FLORES FILHO, A. F. *et al.* **Analysis Of And Induction Planar Actuator**. XIX - International Conference On Electrical Machines, Rome, p.978-984, 2010.
- [12] HOGÄNÄS. **Somaloy Prototyping Material: Typical data and Machining Recommendations**. 2010.
- [13] BAGGIO FILHO, N., F., *et al.* **An Analysis On Electric And Magnetic Behavior on an Induction Planar Actuator**. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. São Paulo, v. 12, n. 1, p. 37-49, jun. 2013.
- [14] BAGGIO FILHO, N., F., *et al.* **A Study on the Behavior of Induced Current and the Planar Traction Force on an Induction Planar Actuator**. In: Intermag 2011, Taipei. Proceedings of the Intermag 201, 2011

- [15] BAGGIO FILHO, N., F., *et al.* **Estudo, Análise e Desenvolvimento de um Atuador Planar de Indução**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 18., 2010, Bonito-MS. Anais. Bonito-MS: SBA, p. 1811-1819, 2010.
- [16] DA SILVEIRA, M., A.; *et al.* **Evaluation of the Normal Force of a Planar Actuator**. IEEE Transactions on Magnetics. Porto Alegre, v. 41, p. 4006-4008, out. 2005.
- [17] VIJAYAKUMAR, K. *et al.* **Two Dimensional Magnetic And Thermal Analysis Of High Speed Switched Reluctance Motor Using Soft Magnetic Composite Material**. In: 10<sup>o</sup> Conference Tencon 2008, p. 35-40, 2008.
- [18] FLORES FILHO, A. F.; *et al.* **An Analytical Method to Predict the Static Performance of a Planar Actuator**. IEEE Transactions on Magnetics. v. 39, n. 5, p.3364-3366, out. 2003.
- [19] JUNG, K., S. *et al.* **Precision Stage Using a Non-Contact Planar Actuator Based On Magnetic Suspension Technology**. Mechatronics. South Korea, v. 13, p.981-999, out. 2003.
- [20] TREVISO, F.; *et al.* **An Induction Planar Actuator for Surface Inspection**. IEEE Transactions on Magnetics. v. 51, n. 9, p. 1-4. setembro 2015.
- [21] HAO, Xiaohong; BAI, Lin; XING, Penghu. **Development of a Novel Magnetically Levitated Surface**. In: 16. International Workshop On Automobile, Power And Energy Engineering, 2011, Chengdu-china. Procedia Engineering, p. 185-191, 2011.
- [22] FERREIRA, Carlos Antônio. **Desenvolvimento de Núcleos para Transformadores Monofásicos de Baixa Potência pela Metalurgia do Pó**. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- [23] SONTEA, Sever; RADUCANU, Liviu. **Introduction to Powder Metallurgy: "Constantin Brâncuși" University**. Engineering Faculty University's day. In: **8 TH International Conference**. Târgu Jiu, Gorj, România. 2002
- [24] WESCHENFELDER, Franciele. **Eletrodos Porosos Obtidos Através de Metalurgia do Pó para Aplicação em Baterias**. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- [25] DAS, J. *et al.* **Novel Powder Metallurgy Technique for Development of Fe-P-based Soft Magnetic Materials**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. Índia v.320, p. 906-915, 2008.
- [26] NETO, J. M. *et al.* **Proposta de Metodologia para Validação do Núcleo do Atuador Planar Trifásico através de Modelo Físico Reduzido**. 10. Encontro De Metalurgia Do Pó - 4. Conferência Internacional de Metalurgia do Pó - COMEP. Porto Alegre, 2013.
- [27] CISESKI, T. M. **Influência da Moagem de Alta Energia da Cinza Pesada Obtida da Queima em termoelétrica no Compósito Cinza-20Fe**. 10. Encontro de Metalurgia do Pó - 4. Conferência Internacional de Metalurgia do Pó - COMEP. Porto Alegre - RS, 2013
- [28] MORO, N.; AURAS, A. P. **Metalurgia do Pó e o Futuro da Indústria: Processos de Fabricação**. Florianópolis: CEFET-SC, 2007,

- [29] FERREIRA, José M. G. de Carvalho. **Tecnologia da Pulverometalurgia**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002, 343 p.
- [30] PALLINI, M. A. T.; CARVALHO, M. A. T. d. **Cost Reduction In The Automotive Industry Through Sintering**. Society of Automotive Engineers, Inc, 2006.
- [31] ESSWEIN JUNIOR, Jorge Alberto Lewis. **Desenvolvimento de Compósitos Magnéticos Macios Utilizados em Núcleos de Máquinas Elétricas**. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [32] JANSSON, P. 2008. **Soft Magnetic material – Including Present and Future Applications**. Höganäs, Suécia. Höganäs AB Publications, 11. (SMC)
- [33] PAULETTI, Philippe. **Construção e Análise do Desempenho de um Motor de Indução Trifásico com Núcleo Construído via Metalurgia do Pó**. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- [34] COLTON, J. S. **Metal Powder Processing**. Georgia Institute of Technology, ME 4210: Manufacturing Processes and Engineering, 2009. 29p.
- [35] DELFORGE, D., Y., M., *et al.* **Sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material. Uma nova tecnologia para a reciclagem de metais?** Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 60, n. 1, p.95-100, trimestral, mar. 2007.
- [36] VIEIRA, Adriano Silva. **Ligas Ti-Sn Processadas Via Metalurgia do Pó**. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes-RJ, 2013.
- [37] CHIAVERINI, V. **Metalurgia do Pó**. 4. ed. São Paulo: ABM, 2001.
- [38] BITTENCOURT, Sérgio Deitos. **Caracterização de Ligas Magnéticas Sinterizadas para Aplicação em Núcleos de Máquinas Elétricas Rotativas**. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- [39] BARBOZA, Juliano Soares. **Caracterização de Compósitos Magnéticos Macios Desenvolvidos Através da Metalurgia do Pó Aplicados a Núcleos de Máquinas Elétricas**. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [40] MOTTA, Clayton André Oliveira da. **Verificação da Adição Ferro-Cobre-grafite para Fabricação e Anéis de selos Mecânicos Pelo Processo de Metalurgia do Pó Convencional**. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- [41] CREMONEZI, Alcides; *et al.* **A Metalurgia do Pó: Alternativa Econômica com Menor Impacto Ambiental**. 1. Ed. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009.320 p.
- [42] SMITH, Lyndon. **A Knowledge-based System for Power Metallurgy Technology**. Bury St Edmunds: Professional Engineering Publishing Limited, 2003. 174 p.

- [43] PELEGRINI, L. *et al.* **Caracterização Magnética da Liga Fe-2%Si Obtida por Metalurgia do Pó Aplicada em Núcleo de Rotores e Estatores.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos. Campina Grande, v. 62, p.103-108, ago. 2011.
- [44] RONCHI, Franciele Peruch. **Construção e Análise do Desempenho de um Motor de Corrente Contínua Utilizando Materiais Magnéticos Macios a Partir da Metalurgia Do Pó.** Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- [45] CALLISTER JR., W. D. **Materials Science and Engineering: An introduction.** 5. Ed. USA: John Wiley and Sons, 2000.
- [46] CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução.** 7. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [47] SADIKU, M. **Elementos de Eletromagnetismo.** 5 ed. Porto Alegre, Bookman, 2004. 352p.
- [48] CHICINAS, I. *et al.* **Soft Magnetic Composite Based on Mechanically Alloyed Nanocrystalline Ni<sub>3</sub>Fe Phase.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials. New York, v. 290-291, Part 2, p. 1531-1534, abril, 2005.
- [49] GUO, Y. *et al.* **3D Vector Magnetic Properties of Soft Magnetic Composite Material.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Sydney, v.302, n.2, p.511-516, julho, 2006.
- [50] Z. Ye, M. Lenberg and C. Pompermaier, “**A New Generation of SMC Materials with Low Core Loss,**” **Proceedings of Powder Metallurgy World Congress PM2012.** Yokohama, outubro, 2012.
- [51] O’HANDLEY, R. C. **Modern Magnetic Materials: Principles and Applications.** New York: John Wiley and Sons, 2000.
- [52] PENNANDER, Lars-olov. **Recent Development of Soft Magnetic Composite Materials and its Application.** Symposium Of Magnetic Bearings. Linz - Austria, agosto. 2014.
- [53] SHOKROLLAHI, H.; JANGHORBAN, K. **Soft magnetic composite materials (SMCs).** Journal of Materials Processing Technology. London, v.189, p.1-12, fev, 2007.
- [54] SCHOPPA A.; DELARBRE P. **Soft Magnetic Powder Composites and Potential Applications in Modern Electric Machines and Devices.** IEEE Transactions on Magnetics, v. 50, pp 1-4, 2014.
- [55] OLTEAN I. D., MOTOC D. L., **Experimental Research Approaches On Few Electrical Properties In Case Of Metallic Particles Reinforced Polymeric Composite Materials.** Proceedings of the 10th International Conference on Optimization of Electric and Electronic Equipments, 2006, vol. 1, pp. 165-168.
- [56] CROS, J. P, *et al.* “**A new structure of universal motor using soft magnetic composites**”, IEEE Trans. On Industry Applications, v. 40, n. 2, p.550-557, mar/abr, 2004.
- [57] LIPO, T. A. *et al.* **Soft Magnetic Composites for AC Machines—A Fresh Perspective.** 11th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC. 2005.

- [58] LIN, Z., W.; ZHU, J., G., Zhu. **Three-Dimensional Magnetic Properties of Soft Magnetic Composite Materials.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials. v. 312, p. 158-163, 2007.
- [59] SALAS, R. A.; PLEITE, J. **Simple Procedure to Compute the Inductance of a Toroidal Ferrite Core from the Linear to the Saturation Regions.** Materials, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 6, n. 6, p. 2452–2463, maio, 2013.
- [60] HOGÄNÄS. SMC Materials: Portfólio descritivo, 2013.
- [61] HAMLER, A. *et al.* **The Use Of Soft Magnetic Composite Materials In Synchronous Electric Motor.** Journal Of Magnetism And Magnetic Materials. Slovakia, v. 304, n. 2, p.816-819, set. 2006.
- [62] VIJAYAKUMAR, K.; *et al.* **Influence Of Soft Magnetic Composite Material On The Electromagnetic Torque Characteristics Of Switched Reluctance Motor.** In: Power System Technology and Ieee Power India Conference. New Delhi. p. 52 – 58, 2008.
- [63] SLUSAREK, B. *et al.* **Characteristics of Power Loss in Soft Magnetic Composites A Key For Designing the Best Values of Technological Parameters.** Journal of Alloys and Compounds. EUA, v. 9 , p. 699-704, jul. 2013.
- [64] PANG, Y.X. *et al.* **The Influence of the Dielectric on the Properties of Dielectromagnetic Soft Magnetic Composites. Investigations With Silica and Silica Hybrid Sol–Gel Derived Model Dielectric.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials., v. 310, p.83-91, 2007.
- [65] GILBERT, I. *et al.* **Effects of Processing Upon the Properties of Soft Magnetic Composites For Low Loss Application.** Journal Materials Science. v. 39, p. 457-461, 2004.
- [66] SOKALSKI, K. J. Szczygłowski, W. Wilczyński. **Scaling Conception of Energy Loss' Separation in Soft Magnetic Materials,** Acta Physica Polonica, 2011.
- [67] NEAMTU, B.V. *et al.* **AC Magnetic Properties of the Soft Magnetic Composites Based on Supermalloynanocrystalline Powder Prepared By Mechanical Alloying.** Materials Science and Engineering B. Cluj-Napoca, v. 54, p.661-665, abr. 2012.
- [68] WU, S. Wu *et al.* **Fabrication And Properties of Iron-Based Soft Magnetic Composites Coated with Parylene Via Chemical Vapor Deposition Polymerization.** Materials Chemistry and Physicsn. China p.1-6, 2015.
- [69] SOURMAIL T. **Near Equiatomic Fe-Co Alloys: Constitution, Mechanical and Magnetic Properties.** Progress in Materials Science, vol. 50 p.816-825. set. 2005.
- [70] TORRES, Fernando Withers. **Estudo da Sinterização de Ligas Permendur (Fe-Co-V) Obtidas Através do Processo de Moldagem por Injeção.** Monografia - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- [71] PINHO, Luís Carlos Almeida Bastos de. **Materiais Magnéticos e suas Aplicações.** Dissertação. Programa de Pós-graduação em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Major Energia, Universidade do Porto, Portugal, 2009.
- [72] GOLDMAN, Alex. **Handbook of Modern Ferromagnetic Materials.** The Kluwer International Series In Engineering And Computer Science, New York, 1999.

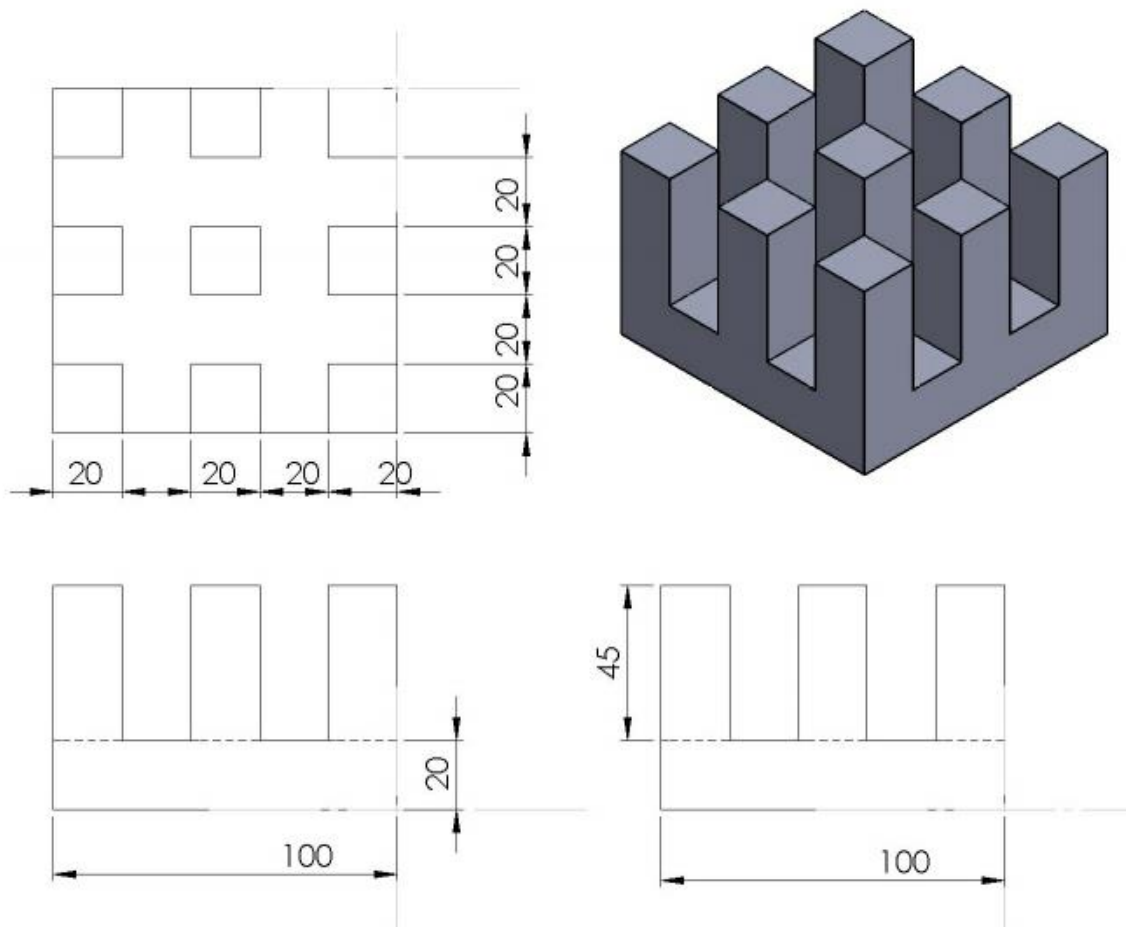
- [73] SHOKROLLAHI, H. **The Magnetic and Structural Properties of the Most Important Alloys of Iron Produced by Mechanical Alloying.** Materials And Design. U.K., vol. 30 p. 3374-3387. abr. 2009.
- [74] LUCIANETTI, Ricardo Machado. **Estudo da Densificação da Liga Permendur por Meio da Adição de Pós-Elementares de Ferro E Cobalto.** Monografia - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- [75] JACK, A. G; *et al.* **Claw Pole Armature Permanent Magnet Machines Exploiting Soft Iron Powder Metallurgy.** in Proc IEEE International Conference Electric Machines Drives, Milwaukee, WI, maio. 1997.
- [76] LI *et. al.* **Magnetic Properties Measurement of Soft Magnetic Composite Materials Over WideRange of Excitation Frequency.** IEEE transactions on industry applications. China, v. 48, n. 1, p. 88-97, jan/fev. 2012.
- [77] NAKANO, M. *et al.* **Improvement of Single Sheet Tester for Measurement of 2-D Magnetic Properties Up To High Flux Density.** IEEE Transactions on Magnetics. Boulder. v. 35, n. 5, p. 3965–3967, set. 1999.
- [78] SIEVERT, J. **The Measurement of Magnetic Properties of Electrical Sheet Steel.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials. v. 215-216, p. 647–651, Junho 2000.
- [79] NETO, J. M. *et al.* **Proposta de Metodologia para Validação do Núcleo do Atuador Planar Trifásico Através de Modelo Físico Reduzido.** 10. Encontro De Metalurgia Do Pó , p.331-341 4. Conferência Internacional de Metalurgia do Pó - COMEP, Porto Alegre, 2013.
- [80] NETO, J. M *et al.* **Numerical Analysis of Magnetic Compounds Used to Make Induction Planar Actuator Core With Two Degrees of Freedom.** Journal of Engineering and Science. New York, v.3, n.10, p.40-49, out. 2014.
- [81] BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática.** Florianópolis: UFSC, 2004, 253p.
- [82] ALCUBIERRE, M. *et al.* **Numerical Simulation of Axisymmetric Systems Using Cartesian Grids.** International Journal of Modern Physics D, World Scientific.v.10, n.03, p.273–289, julho 2001.
- [83] SARAIVA, E.; *et al.* **Three-Phase Transformer Representation Using FEMM, and a Methodology for Air Gap Calculation.** In: IEEE - Electrical Machines – ICEM. 18<sup>th</sup> International Conference on. [S.l.], p. 1-6, 2008.
- [84] NORD, G. *et al.* **Vertical Electrical Motor Using Soft Magnetic Composites.** In: IEEE. Electric Machines and Drives - IEEE International Conference p. 373-377, 2005.
- [85] NOGUEIRA, A. F. L. **Analysis of Magnetic Shielding Problems Using Finite Elements.** IEEE Latin America Transactions. v. 10, n. 5, p.2132-2137, setembro. 2012.
- [86] NETO, J. M. *et al.* **Análise Numérica de Compostos Magnéticos Aplicados na Confecção de Núcleo para Atuador Planar de Indução de dois Graus de Liberdade.** 10. Encontro De Metalurgia Do Pó. 4. Conferência Internacional de Metalurgia do Pó, Porto Alegre, 2013.

- [87] NETO, J. M. *et al.* **Energy Efficiency Evaluation of Materials Applied In Core of Three Phase Planar Actuator Through Reduced Model.** International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Cordoba - Espanha, 2014.
- [88] BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase-Estática.** Florianópolis - SC: Ed. da UFSC, 2004.
- [89] Ronchi, F. P. *et. al.* **Influência do Lubrificante nas Propriedades Magnéticas de um SMC.** International Conference On Materials And Processes For Renewable Energy, Porto Alegre. 2014
- [90] BARBOZA, J. S. *et al.* **Influência da Variação do Teor de Resina nas Propriedades Magnéticas de Compósitos Magnéticos Macios Aplicados a Núcleos de Máquinas Elétricas.** 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Porto de Galinhas - PE, 24 a 28 de Novembro de 2008.

**LISTA DE ANEXOS**



ANEXO A - Dimensões do núcleo completo implementado no Atuador Planar de Indução



ANEXO B - Dimensões do núcleo reduzido implementado no Atuador Planar de Indução

