

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

Desenvolvimento de Compósitos Magnéticos Macios Utilizados em Núcleos de Máquinas
Elétricas

Jorge Alberto Lewis Esswein Junior

Dissertação para obtenção do título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2009

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

Desenvolvimento de Compósitos Magnéticos Macios Utilizados em Núcleos de Máquinas
Elétricas

Jorge Alberto Lewis Esswein Junior
Engenheiro de Controle e Automação

Trabalho realizado no Laboratório de Transformação Mecânica da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação.

Porto Alegre
2009

Esta Dissertação foi julgada adequada e aprovada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Lírío Schaeffer (PPGEM/UFRGS)

Banca Examinadora:

Dr. Ing. Klaus-Dieter Lietzmann (EPI Energia Projetos e Investimentos Ltda)

Prof. Dr. Moises de Mattos Dias (FEVALE)

Prof. Dr. Vicente Mariano Canalli (PUC-RS)

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

Dedico a família o maior tesouro da vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Ing. Lírío Schaeffer pela oportunidade, confiança e orientação a mim dedicada.

Ao Prof. Dr. Eng. Moises de Mattos Dias pela mais valorosa orientação, pela dedicação como co-orientador, amizade e por muitas vezes ter sido o responsável pelas soluções que possibilitaram levar adiante este trabalho.

A todos os colegas do Laboratório de Transformação Mecânica, em especial aos grandes amigos conquistados neste período de mestrado Eng. Luciano Lohmann Cerva e Eng. Juliano Soares Barboza, sem os quais não seria possível a finalização deste trabalho.

Aos bolsistas de iniciação científica Douglas Martinazzi, Rafael Macedo e Stevan da Silveira pela amizade e colaboração nos mais diversos testes realizados no Grupo de Desenvolvimento de Energias Renováveis.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela disponibilização da infra-estrutura utilizada para experimentos e testes no período do mestrado.

A EPI Energias Projetos e Investimentos, em especial ao Dr. Ing. Klaus-Dieter Lietzmann e a Sra. Annelise Dessooy pelas oportunidades técnicas e a valorosa contribuição profissional.

A empresa Sulina pela disponibilidade em auxiliar no enrolamento do estator da máquina elétrica.

A empresa Höganäs e SI Group pelo fornecimento de matéria prima utilizada na pesquisa.

A WEG motores por muitas vezes ter disponibilizado seus profissionais para auxiliar-me na solução de questões técnicas do projeto de máquinas.

Ao Laboratório de Eletrônica de Potência e Conversão de Energia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, em especial ao Prof. Dr. Vicente Mariano Canalli, pelo apoio na pesquisa e auxílio no teste das máquinas elétricas.

Aos órgão financiadores CAPES, FINEP, FAPERGS e CNPq pelo financiamento da pesquisa e pagamento de bolsas.

Aos meus pais Jorge Alberto Lewis Esswein e Sandra Emília Ávila pela luz, apoio e confiança em mim sempre depositada.

A minha esposa Karina Klöckner e meu filho Theo Klöckner de Albuquerque por serem a razão de minhas conquistas e fiéis companheiros em todas as situações.

Por fim, agradeço a DEUS por esta maravilhosa oportunidade a qual me trouxe além da experiência profissional grandes amigos e momentos dos quais jamais me esquecerei.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS E QUADROS.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XIV
RESUMO	XVI
ABSTRACT	XVIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	6
2.1 Fundamentos Eletromagnéticos.....	6
2.1.1 Introdução.....	6
2.1.2 Permeabilidade	7
2.1.3 Domínios Magnéticos.....	7
2.1.4 Curva de Histerese.....	10
2.1.5 Circuitos Magnéticos.....	11
2.1.6 Indução Magnética e Indutância.....	12
2.2 Máquinas Elétricas	13
2.2.1 Introdução.....	13
2.2.2 Máquinas AC.....	16
2.2.3 Máquinas Síncronas com Imãs Permanentes.....	23
2.2.4 Máquinas Síncronas com Núcleos Magnéticos não Laminados.....	25
2.2.5 Testes em máquinas síncronas.....	28
2.3 Materiais Compósitos Magnéticos Macios.....	29
2.3.1 Introdução.....	29
2.3.2 Metalurgia do Pó	29
2.3.3 Características.....	42
2.3.4 Classificação.....	44
2.3.5 Ligas Ferromagnéticas.....	46
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
3.1 Materiais Compósitos Magnéticos Macios.....	49
3.1.1 Introdução.....	49
3.1.2 Resinas Termofixas	50
3.1.3 Ligas Resinadas	52
3.1.4 Projeto de Matrizes.....	52
3.1.5 Obtenção dos Corpos de Prova.....	53
3.1.5.1 Mistura e Compactação	53
3.1.5.2 Sinterização dos Corpos de Prova	55
3.1.5.3 Cura dos Corpos de Prova	56
3.1.6 Análise das Propriedades dos Materiais	57
3.1.6.1. Propriedades Mecânicas	57
3.1.6.2 Propriedades Elétricas	59

3.1.6.3 Propriedades Eletromagnéticas.....	59
3.2 Máquinas Elétricas	64
3.2.1 Projeto de Matrizes.....	64
3.2.2 Obtenção dos Núcleos Magnéticos.....	66
3.2.3 Montagem do Servomotor	67
3.2.4 Bancada de testes de máquinas elétricas.....	71
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	73
4.1 Materiais Compósitos Magnéticos Macios.....	73
4.1.1 Propriedades Mecânicas	73
4.1.2 Propriedades Elétricas	78
4.1.3 Propriedades Magnéticas.....	80
4.2 Servomotor	89
5 CONCLUSÕES.....	93
REFERÊNCIAS	96

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) representação dos domínios magnéticos em um material desmagnetizado (b) domínios magnéticos após aplicação de um pequeno campo magnético [3].	8
Figura 2 - Movimentação dos domínios magnéticos através de inclusões e contornos de grãos [3]	8
Figura 3 - Representação do alinhamento de todos os domínios magnéticos em uma única direção devido à aplicação de um campo magnético [3].	9
Figura 4 - Rotação do domínio magnético e saturação do material [3].	9
Figura 5 - Curva de magnetização de dois materiais com diferente ponto de saturação [3].	10
Figura 6 - Curva de magnetização.	10
Figura 7 - Analogia entre circuito elétrico e circuito magnético [1].	11
Figura 8 – Circuito magnético [1].	13
Figura 9 – Conjunto de enrolamentos de um estator.	14
Figura 10 - Rotor de uma máquina dc.	14
Figura 11 – Estrutura de chapas laminadas em um motor [1]. Processo de fabricação de um grande estator.	15
Figura 12 – Esquema de um motor síncrono de pólos salientes [1].	17
Figura 13 – (a) distribuição da densidade de fluxo no estator e (b) curva correspondente tensão induzida no enrolamento de armadura [1].	18
Figura 14 – Representação de um motor síncrono monofásico com 4 pólos salientes [1].	18
Figura 15 – Distribuição da densidade de fluxo no entreferro de uma máquina síncrona de 4 pólos [1].	19
Figura 16 – Motor síncrono de pólos lisos ou rotor cilíndrico [1].	20
Figura 17 – Foto de um gerador eólico síncrono de pólos salientes.	21
Figura 18 – (a) motor síncrono trifásico com dois pólos e uma bobina para cada fase, (b) motor trifásico quatro pólos e duas bobinas para cada fase e (c) ligação estrela entre as fases [1].	21
Figura 19 – Motor trifásico de indução tipo gaiola de esquilo.	23
Figura 20 – Gráfico do torque x velocidade em uma máquina de indução.	23
Figura 21 – Máquina síncrona trifásica com ímãs permanentes [1].	24
Figura 22 - Corte de uma máquina síncrona trifásica com ímãs permanentes [1].	24
Figura 23 – (a) máquina de dois polos e (b) vetor diagrama de mmf [1].	25
Figura 24 – Estator de um servomotor comercial.	26

Figura 25 - Servomotor com estator de SMC [4]	26
Figura 26 – Estator de um servomotor de SMC [4].	27
Figura 27 – Rotor (esquerda) e estator (direita) de um motor de bicicleta [5].	27
Figura 28 – (a) controle integrado, (b) servomotores e (c) servomotor comercial [6].	28
Figura 29 - Fluxograma das etapas do processo de M/P.	33
Figura 30 - Processo de obtenção de pós por atomização.	34
Figura 31 - Formato de algumas partículas (a) atomizado, (b) esponja e (c) eletrolítico [3].	34
Figura 32 - Misturadores (a) cilíndrico, (b) rotacional cúbico, (c) cone duplo e (d) dupla concha [8].	35
Figura 33 - Estágios de compactação (1 e 2) preenchimento da cavidade, (3 e 4) compactação e (5 e 6) extração e remoção do compactado verde [8].	36
Figura 34 - Formação de pescoço entre duas partículas esféricas [8].	40
Figura 35 – Permeabilidade relativa x campo magnético para um aço 3% Si laminado e um material SMC [3].	43
Figura 36 – Partícula de ferro com revestimento de material orgânico, Somaloy® Höganäs [3].	46
Figura 37 – Curva de magnetização de partículas de ferro com diferente pureza [3].	47
Figura 38 – Resina HRJ 10236.....	51
Figura 39 – Resina SBP 128.....	51
Figura 40 – (a) corpo de prova em forma de cilindro e (b) matriz para obtenção do corpo de prova	52
Figura 41 – (a) corpo de prova em forma de paralelepípedo e (b) matriz para obtenção do corpo de prova.	53
Figura 42 – (a) corpo de prova em forma de toróide e (b) matriz para obtenção do corpo de prova.	53
Figura 43 – (a) Máquina de mistura de pós e (b) Misturador utilizado.....	53
Figura 44 – Prensa Kratos	54
Figura 45 – Painel de controle da prensa Kratos	54
Figura 46 – Fotografia de uma matriz montada na prensa Kratos.....	55
Figura 47 – Prensa Eka utilizada na compactação dos toróides.	55
Figura 48 – Patamares de sinterização.	56
Figura 49 - (a) Forno tubular com atmosfera controlada e (b) controlador do forno.	56
Figura 50 – Ciclo de cura dos corpos de prova.	57

Figura 51 - Forno para cura das resinas (a) câmara (b) vista frontal (c) painel de controle.....	57
Figura 52 – Durômetro do LAFUN (Laboratório de Fundição da UFRGS).....	58
Figura 53 – Máquina Universal de Ensaio Mecânicos INSTRON (a) Equipamento de captação de dados (b) detalhe do dispositivo de ensaios.....	58
Figura 54 – Desenho esquemático e Multiteste.....	59
Figura 55 – Curva de Histerese de um material magnético.....	60
Figura 56 - Etapas de preparação das amostras:(a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolamento e (d) enrolamento do primário.	61
Figura 57 - Traçador de Curvas de Histerese (TLMP-TCH-14). (1) interruptor on/off, (2) conector AC/DC, (3) conexão do enrolamento primário e (4) conexão do enrolamento secundário.....	63
Figura 58 - Software de aquisição de dados GLB-BH 3.0 com identificação dos parâmetros de ensaio. (1) Densidade de espiras no primário, (2) espiras no secundário, (3) área da seção transversal, (4) densidade da amostra, (5) corrente aplicada e (6) frequência de medição.	63
Figura 59 – Secção transversal do estator e rotor do servomotor.....	65
Figura 60 – Matriz para obtenção do (a) (b) estator e do (c) (d) rotor do servomotor.	66
Figura 61- Misturador de dupla concha.....	66
Figura 62 – Ciclo de cura da resina HRJ	67
Figura 63 – Bolachas do estator e rotor com 10 mm de altura antes do processo de cura.	68
Figura 64 – (a) processo de montagem dos ímãs de Nd-Fe-B no rotor do servomotor e (b) perfil do rotor após montagem dos ímãs.	68
Figura 65 – Magnetizador de ímãs do servomotor.	69
Figura 66 – Esquemático para bobinagem do estator, fornecido pela WEG motores.....	69
Figura 67 – Estator bobinado.....	70
Figura 68 – Montagem do estator na carcaça.	70
Figura 69 – Componentes do servomotor SWA-40.	70
Figura 70 – Bancada de testes do servomotor.	72
Figura 71 - Gráfico relacionando o módulo elástico em função do teor de resina.....	75
Figura 72 - Gráfico relacionando deformação à compressão em função do teor de resina.....	75
Figura 73 - Gráfico relacionando Dureza Brinell em função do teor de resina.....	76
Figura 74 - Ensaio de compressão em (a) material dúctil, deformação sem ruptura, e (b) material frágil, ruptura sem deformação lateral [24].	76

Figura 75 - Amostra resinada após ensaio de compressão identificando o comportamento da fratura.....	77
Figura 76 - Gráfico comparativo da resistividade elétrica em função do teor de resina.	79
Figura 77 – Gráfico comparativo das perdas magnéticas em função da resistividade elétrica.	80
Figura 78 – Curvas de Magnetização e histerese do ferro sinterizado.	80
Figura 79 - Curvas de Magnetização e histerese da liga HRJ 0,5.	81
Figura 80- Curvas de Magnetização e histerese da liga HRJ 1,0.	81
Figura 81- Curvas de Magnetização e histerese da liga HRJ 1,5.	81
Figura 82- Curvas de Magnetização e histerese da liga HRJ 2,0.	82
Figura 83- Curvas de Magnetização e histerese da liga HRJ 2,5.	82
Figura 84- Curvas de Magnetização e histerese da liga HRJ 3,0.	82
Figura 85- Curvas de Magnetização e histerese da liga SBP 0,5.	83
Figura 86 Curvas de Magnetização e histerese da liga SBP 1,0.....	83
Figura 87 Curvas de Magnetização e histerese da liga SBP 1,5.....	83
Figura 88 - Curvas de Magnetização e histerese da liga SBP 2,0.	84
Figura 89 Curvas de Magnetização e histerese da liga SBP 2,5.....	84
Figura 90 – Curvas de Magnetização e histerese da liga SBP 3,0.....	84
Figura 91 - Comparação de curvas de histerese determinadas na condição quase estática e a 60 Hz, para (a) ferro puro sinterizado e (b) liga resinada Fe-SBP1,5.	86
Figura 92 – Gráfico comparativo do teor de resina e da permeabilidade.....	87
Figura 93 - Gráfico comparativo teor de resina e perdas magnéticas	88
Figura 94 – Gráfico Comparativo teor de resina e indução de saturação.....	88
Figura 95 Valores de tensão induzida para o servomotor convencional e resinado a 20 Hz.	89
Figura 96 Valores de tensão induzida para o servomotor convencional e resinado a 30 Hz.	89
Figura 97 Valores de tensão induzida para o servomotor convencional e resinado a 40 Hz.	90
Figura 98 Valores de tensão induzida para o servomotor convencional e resinado a 50 Hz.	90
Figura 99- Valores de tensão induzida para o servomotor convencional e resinado.	90

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Analogia entre grandezas magnéticas e elétricas [1].....	11
Tabela 2 - Analogia entre equações elétricas e magnéticas [1].....	12
Tabela 3 - Propriedades eletromagnéticas típicas de ligas por metalurgia do pó [21].	45
Tabela 4 – Valores da pressão de compactação para cada corpo de prova	54
Tabela 5 - Parâmetros de medida das amostras da liga Fe-HRJ para ensaio da curva de histerese.	61
Tabela 6 - Parâmetros de medida das amostras da liga Fe-SBP para ensaio da curva de histerese.	62
Tabela 7 – Porcentagem de material utilizado na mistura do SMC do servomotor.	66
Tabela 8 - Propriedades eletromagnéticas de interesse de ferro sinterizado.	73
Tabela 9- Medidas das propriedades mecânicas do ferro sinterizado.	73
Tabela 10 - Medidas de Dureza Brinell das amostras estudadas.....	74
Tabela 11 - Medidas do ensaio de compressão das amostras da liga Fe-HRJ.....	74
Tabela 12 - Medidas do ensaio de compressão das amostras da liga Fe-SBP.....	74
Tabela 13 - Valores de resistência elétrica, parâmetros dimensionais e resistividade elétrica das ligas resinadas.....	78
Tabela 14 – Propriedades Magnéticas das Ligas estudadas	85
Tabela 15 – Tensão induzida nas bobinas do servomotor	91
Tabela 16 – Valores de tensão induzida para o teste do servomotor com carga.	91
Quadro 1 - Especificações técnicas da resina HRJ-10236.....	52
Quadro 2- Especificações técnicas da resina SBP-128.....	52
Quadro 3 – Propriedades do Servomotor SWA – 40 da WEG Motores.....	66
Quadro 4 – Especificações dos equipamentos constituintes da bancada de testes.....	72

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- a, b, c – Enrolamentos do Estator
A - Área da seção transversal da barra [m²]
B – Densidade de Fluxo Magnético (T)
B_s – Saturação Magnética (T)
B_r = Retentividade magnética ou magnetização remanescente (T)
CA - Corrente alternada
CC - Corrente contínua
d_{ext} - Diâmetro externo do anel [mm]
d_{int} - Diâmetro interno do anel [mm]
ε - Intensidade de Campo Elétrico (V/m)
e – Tensão Induzida
f_e – Frequência Elétrica (Hz)
G – Condutância (A/V)
H – Campo Magnético (A/m)
H_c – Coercitividade (A/m)
HB - Dureza Brinell
HRJ-10236 - Nome comercial de resina fenólica
I – Corrente (A)
J – Densidade de Corrente (A/m²)
k - Constante de proporcionalidade
L – Indutância (H)
LdTM - Laboratório de Transformação Mecânica - UFRGS
l_m – Caminho Percorrido pelo Fluxo (m)
l – Caminho percorrido pela Corrente (m)
M/P - Metalurgia do Pó
mmf - Força Magnetomotriz (A.e)
N – Número de Enrolamentos
P – Permeância (Wb/A.e)
P_h - Perdas por histereze [W/kg]
R – Resistência (Ω)

R – Relutância (A.e/Wb)
S – Área da Seção Transversal (m²)
SBP-128 - Nome comercial de resina fenólica
SMC – *Soft Magnetic Composite* (Compósito Magnético Macio)
TCH - Traçador de Curva de Histerese
Tg - Temperatura de transição vítrea
TG - Análise termogravimétrica
U – Tensão (V)
x - Espessura da peça [m]
 ω_e – Frequência Elétrica (rad/s)
 ω_m – Velocidade Angular (rad/s)
 λ – Indução Magnética (Wb)
 μ – Permeabilidade Magnética (H/m)
 μ_0 – Permeabilidade Magnética do espaço livre (H/m)
 μ_r – Permeabilidade Magnética Relativa
 ρ – Resistividade (1/ σ)
 σ – Condutividade (A/V.m)
 ϕ_{\max} – Máximo Fluxo Magnético
 Φ – Fluxo Magnético (Wb)

RESUMO

Este trabalho aborda o desenvolvimento de compósitos magnéticos macios (Soft Magnetic Composites - SMC). Os materiais SMC tem sua aplicação principal em núcleos magnéticos de máquinas elétricas. Sem grandes evoluções tecnológicas nos últimos 50 anos, os materiais e a metodologia de fabricação dos rotores e estatores de máquinas elétricas permanecem inalterados devido a alta concentração de pesquisas na área de acionamentos e controle dos motores.

Diversos fatores levaram a esta pesquisa, tais como, imenso desperdício de material e processo de fabricação complexo para fabricação de núcleos magnéticos de máquinas elétricas. O processo atual de montagem de núcleos magnéticos conta com cinco principais processos: laminação, estampagem, tratamento para isolamento, empacotamento e fixação. O processo de estampagem desperdiça quarenta por cento de matéria prima, devido a geometria final do estator e rotor.

Com o uso de técnicas oferecidas pela metalurgia do pó e o avanço das pesquisas de materiais compósitos é possível reduzir o desperdício de matéria prima para menos de dois por cento enquanto que as etapas para produção dos núcleos magnéticos limitam-se a mistura, compactação e cura dos componentes.

Para que esta metodologia seja realmente aplicável foi necessário o desenvolvimento de uma liga SMC que apresentasse as propriedades magnéticas e mecânicas solicitadas em máquinas elétricas. Para tal diversas ligas metálicas combinadas a resinas fenólicas e epóxi foram testadas. A partir dos resultados, os melhores compósitos foram aplicados em núcleos magnéticos de servomotores para que as ligas fossem então analisadas em aplicações reais.

Neste trabalho, foi desenvolvido, projetado e construído, os núcleos magnéticos de uma máquina síncrona trifásica de 400 W, comercialmente construída pela empresa WEG. Nesta o rotor laminado foi substituído por um bloco maciço de uma liga SMC e o estator laminado foi substituído por um estator obtido a partir de um bloco maciço de compósito magnético macio de ferro.

Na elaboração deste projeto, foi dado ênfase aos seguintes aspectos:

Avaliação e estudo dos processos metalúrgicos para a obtenção de materiais magnéticos sinterizados e curados. Análise dos pós constituintes das ligas, que podem ser utilizados para fabricação dos núcleos da máquina. Pesquisas sobre pressão de compactação, temperatura e patamares de sinterização destes materiais. Obtenção de amostras para avaliação de propriedades físicas de interesse como a permeabilidade relativa, coercitividade magnética, resistividade elétrica e propriedades mecânicas.

Estudo sobre o funcionamento e projeto de máquinas síncronas trifásicas. Avaliação e definição de um tipo de máquina a ser construída, levando-se em consideração as propriedades físicas do material, aspectos construtivos, desempenho e propriedades eletromagnéticas. Definição de um estator e outras partes de uma máquina com alimentação trifásica.

Projeto e construção das matrizes para compactação dos núcleos magnéticos, usinagem destes, bem como todas as etapas inerentes a montagem da máquina. Teste de desempenho e obtenção de parâmetros.

Finalmente há uma comparação entre o desempenho dos protótipos desenvolvidos neste trabalho e uma máquina elétrica convencional.

ABSTRACT

The aim of this work is study a new soft magnetic material. Those materials are often used in electrical machine's magnetic core. The process and materials to build an electrical machine have not changed so much in the last 50 years, on the other hand the researches about automation and control of these machines increased significantly.

Many factors bring to this research, such as, waste of raw material and complex assembly system in magnetic core production. The actual assembly process of magnetic core has five main stages: rolling, die pressing, grouping and setting of sheets, heat treatment and electrical insulation. In the stamping process misses 40% of raw material due the stator and rotor geometry.

Trough powder metallurgy technology and soft magnetic materials research advancement is possible to reduce the waste of raw material to less than two percent while the assembly stages were going to be: mix, pressing and cure of devices.

To apply this technology it is necessary to find a soft magnetic material witch develop the properties required in electrical machines (magnetic and mechanical properties). To achieve this aim several magnetic alloys with phenolic resin were tested. From the results, the best composite was chosen to be applied in a servomotor's magnetic core from there the soft magnetic composite could be tested in a real situation.

In this research, we have chosen to develop, design and build magnetic cores of a three-phase machine, commercially fabricated by WEG Motors. In this machine the laminated cores were replaced by a bulk part made by a soft magnetic material.

In the study of this Project, emphasis was given to:

Assessment and study about metallurgical processes to obtain sintered and cured magnetic materials. Interesting powder alloys to machines' core analysis. Research about compacting pressure, temperature and sintering curves. Obtainment of samples to physical, mechanical and electromagnetic assessment.

Study about three-phase machine operation. Electrical machine assessment and definition taking into account material's physical and electromagnetic properties, electrical machine's constructive aspects and performance. Definition of a stator, rotor and other parts from an electrical machine.

Die design and construction to compact magnetic cores, machining as well all the electrical machine production stages .Performance tests to parameters obtainment.

Finally there is a performance comparison between the prototype developed and a conventional machine

1. INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas rotativas existem há mais de um século, e sua estrutura básica tem se mantido inalterada ao longo dos anos. Os avanços atingidos nas últimas décadas foram geralmente no redimensionamento elétrico da máquina, e no acionamento, havendo poucos registros sobre a utilização de novos materiais.

Com o advento de computadores mais modernos, foi possível a utilização de softwares de simulação possibilitando assim o desenvolvimento de projetos otimizados, resultando em máquinas com melhor desempenho. Como exemplo cita-se softwares que simulam a indução magnética no entreferro para diversas configurações de chapas do conjunto estator-rotor com variadas formas de ranhuras. Deve-se salientar que a visualização da distribuição da indução magnética ao longo do entreferro dos motores é muito importante para avaliação teórica do conjugado eletromagnético desenvolvido pela máquina.

Com relação ao acionamento das máquinas elétricas rotativas, este pode ser realizado diretamente a partir de uma fonte de tensão elétrica como a própria rede de distribuição de energia. O acionamento também pode ser realizado a partir de conversores estáticos, que são dispositivos construídos com componentes eletrônicos a base de silício. A partir da década de 60, houve um salto tecnológico no desenvolvimento de componentes a base de semicondutores resultando, nas últimas décadas, em um grande número de pesquisas na área de acionamentos de máquinas por meio de conversores estáticos. Paralelamente, houve também neste período um grande avanço nas técnicas de controle de máquinas, destacando-se o uso de microprocessadores e a técnica de controle vetorial.

Nota-se então que, nos últimos 30 anos, as pesquisas se concentraram basicamente no desenvolvimento de novas topologias de conversores e novas técnicas de controle. As máquinas de indução utilizadas em acionamentos sofreram poucos avanços em relação a sua topologia tradicional. Com relação as máquinas síncronas, constata-se um desenvolvimento de inúmeras novas variantes para princípios já há muito estabelecidos, tais como máquinas a ímãs, máquinas de relutância, máquinas a relutância chaveada, motores de passo e máquinas híbridas, as quais foram impulsionadas pelo desenvolvimento de novos tipos de ímãs ou super-ímãs a base de terras raras. O desenvolvimento e otimização destes novos tipos de máquinas também foi em grande parte possível graças ao desenvolvimento de técnicas numéricas avançadas de projeto e análise, entre eles o método dos elementos finitos. Estas

novas variantes utilizam, entretanto, em sua grande maioria, materiais convencionais como as chapas de aço laminadas para as partes magnéticas da máquina.

Na sua grande maioria, os núcleos do estator e do rotor das máquinas elétricas, tradicionalmente são construídas com chapas de aço baixo carbono de espessura de 0,35 a 0,5 mm. Algumas máquinas de maior rendimento são construídas com aço-silício, com um percentual de 1 a 3% de silício. O processo global para a confecção destes núcleos, também denominados de núcleos magnéticos, consiste basicamente em laminação, estampagem, tratamento para isolamento, empacotamento e fixação. No caso das chapas de aço baixo carbono, o processo para isolamento consiste num tratamento térmico, onde os pacotes de chapas são colocados em fornos durante certo tempo, havendo então a oxidação da superfície das chapas, e em consequência, a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes. Esta é a solução clássica para diminuir as perdas indesejáveis provocadas por correntes induzidas. Sob o aspecto da composição das chapas, elas representam um compromisso entre as características elétricas (resistividade) e magnéticas das chapas (permeabilidade). Existe um número consideravelmente pequeno de trabalhos publicados sobre a utilização de materiais fundamentalmente novos em núcleos magnéticos de máquinas elétricas rotativas.

Um dos maiores desafios para a engenharia dos materiais se constitui atualmente no desenvolvimento e na produção de materiais magnéticos mais baratos e com características adequadas para o regime de trabalho imposto pelas máquinas elétricas. Graças a avanços tecnológicos dos últimos anos, a engenharia de materiais tornou possível não apenas a fabricação de ímãs permanentes, mas também o desenvolvimento e fabricação de materiais magnéticos capazes de substituir os materiais tradicionais utilizadas nas partes magnéticas ativas da máquina.

Atualmente já são disponíveis processos de obtenção de materiais que apresentam alta permeabilidade magnética aliada à baixa condutividade elétrica, fazendo com que as perdas por correntes induzidas e histerese diminuam significativamente. Um destes processos é a Metalurgia do Pó (M/P), por meio da qual se pode obter peças inteiriças, sem a necessidade de laminação. Estes blocos inteiriços, obtidos a partir de ligas de ferro magnético com outros elementos como resinas fenólicas e epóxi podem substituir os núcleos do rotor e do estator. O uso dos processos da M/P na fabricação destes núcleos deverá resultar nas seguintes vantagens em relação à utilização de chapas:

Menor inércia;

Maior robustez;

Manutenção reduzida;

Menores perdas;

Menor tempo de fabricação;

Menor custo de produção;

Torque mais elevado para um mesmo volume de material ativo.

As máquinas desenvolvidas a partir desta tecnologia poderão substituir motores convencionais fabricados com chapas numa série de aplicações tais como eletrodomésticos, automóveis, motores para a indústria, onde até o momento predomina o uso de motores de indução sem controle de velocidade ou motores CC e CA de escovas. Uma aplicação de grande interesse é em automóveis, uma vez que, a partir de inversores, estes poderão substituir com vantagens os tradicionais motores de corrente contínua. Outra vantagem, reside no fato de que estas máquinas poderão ser aplicadas com vantagens em um grande número de acionamentos elétricos a velocidade variável, tais como em geladeiras, máquinas de lavar, bombas e ventiladores.

Um obstáculo à fabricação em escala industrial de máquinas com núcleos compósitos magnéticos macios reside no fato de que, a partir dos processos da M/P convencional, ainda não é viável fabricar peças de grandes dimensões, uma vez que peças, confeccionadas a partir de ligas de ferro, são compactadas com pressão em torno de 600 MPa, o que exige prensas de grande capacidade. Entretanto, segundo dados da ABINEE (Associação Brasileira de Industrias Eletro – Eletrônicas [15]), os motores elétricos fabricados no Brasil até 735 W, incluem aproximadamente 96% dos motores monofásicos e 33% dos motores trifásicos. Uma vez que a potência dos motores elétricos está relacionado com suas dimensões, e motores até 735 W possuem dimensões relativamente pequenas dos núcleos do estator e rotor, toda esta faixa de motores poderá ser fabricado a partir dos processos da M/P, ou seja, com núcleos magnéticos resinados.

Atualmente os materiais magnéticos macios sinterizados obtidos pelos processos tradicionais na M/P, com substanciais dados na literatura, são as ligas ferro-níquel, ferro-fósforo, ferro-silício e ferro-cobalto. Dados bibliográficos revelam que peças sinterizadas obtidas com estas ligas apresentam as propriedades elétricas e magnéticas que mais se aproximam, quando comparadas ao pacote de chapas dos núcleos do rotor e do estator. O material com o qual os núcleos do estator e do rotor são construídos deve apresentar as seguintes propriedades:

Alta permeabilidade magnética relativa;

Baixa coercitividade magnética;

Alta resistividade elétrica;

Elevada indução de saturação.

Como exemplo, a liga sinterizada Fe-50%Ni possui altíssima permeabilidade magnética relativa, podendo atingir até 10 vezes o valor do aço carbono, baixa coercitividade e, por ser uma liga metálica, possui alta resistividade elétrica [17]. Assim, das quatro ligas citadas anteriormente, a liga ferro-níquel é a mais indicada para confecção de um núcleo do rotor ou do estator de uma máquina elétrica, tendo como inconveniente comparado as outras três ligas, o custo elevado [16].

Neste trabalho, optou-se pelo desenvolvimento, projeto e construção, dos núcleos magnéticos de uma máquina síncrona trifásica de 400 W comercialmente construída pela empresa WEG. Nesta o rotor e o estator laminados foram substituídos por um rotor e um estator obtido a partir de um bloco maciço de composto magnético macio de ferro.

Na elaboração deste projeto, foi dado ênfase aos seguintes aspectos:

- Avaliação e estudo dos processos metalúrgicos para a obtenção de materiais magnéticos sinterizados e curados. Análise dos pós constituintes das ligas, que podem ser utilizados para fabricação do rotor da máquina. Pesquisas sobre pressão de compactação, temperatura e patamares de cura destes materiais. Obtenção de amostras para avaliação de propriedades físicas de interesse como a permeabilidade relativa, coercitividade, resistividade elétrica e dureza.

- Estudo sobre o funcionamento e projeto de máquinas síncronas trifásicas. Avaliação e definição de um tipo de máquina a ser construída, levando-se em consideração as propriedades físicas do material, aspectos construtivos e desempenho. Definição de um estator e outras partes de uma máquina com alimentação trifásica, 4 pólos, específica para montagem do rotor.
- Projeto e construção das matrizes para compactação dos núcleos magnéticos, usinagem destes, bem como todas as etapas inerentes a montagem da máquina.
- Teste de desempenho e obtenção de parâmetros.
- Finalmente há uma comparação entre o desempenho dos protótipos desenvolvidos neste trabalho e uma máquina elétrica convencional.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Fundamentos Eletromagnéticos

2.1.1 Introdução

As máquinas elétricas são constituídas por circuitos elétricos e magnéticos acoplados entre si. Por circuito magnético entende-se um caminho para o fluxo magnético, assim como um circuito elétrico oferece um caminho para a corrente elétrica. Nas máquinas elétricas os condutores percorridos por correntes interagem com os campos magnéticos resultando na conversão eletromecânica de energia [1].

A maioria dos problemas de engenharia envolvendo campos magnéticos são resolvidos utilizando as equações de Maxwell. Embora na prática soluções exatas sejam normalmente difíceis de serem atingidas algumas simplificações quando adotadas auxiliam na solução do problema.

$$\oint_C H \cdot dl = \int_S J \cdot da \quad \text{Eq 2.1}$$

$$\oint_S B \cdot da = 0 \quad \text{Eq 2.2}$$

A equação 1 define que a integral linear da componente tangencial de um campo magnético de intensidade H em um determinado contorno C é igual a corrente total passando através de uma superfície S conectada a este contorno. Através desta pode-se notar que a fonte de H é a densidade de corrente J. Na equação 2.2 tem-se que a densidade de fluxo magnético B é conservada, isto é, em uma superfície fechada o fluxo de entrada será igual ao de saída (esta equação explica o porquê de não existir um monopolo magnético). Através destas equações pode-se notar que valores de campos magnéticos podem ser determinados a partir do conhecimento do valor instantâneo de corrente elétrica e que as variações no campo magnético são diretamente relacionadas com as alterações dos valores da fonte [1].

2.1.2 Permeabilidade

Através de algumas simplificações pode-se assumir que a intensidade de campo magnético H produz uma indução magnética B em toda região onde ela existe, sendo que B e H estão relacionadas da seguinte maneira [2]:

$$B = \mu \cdot H \quad \text{Eq 2.3}$$

Onde μ é a permeabilidade do meio e é definida em Henries por metro (H/m). Para um espaço livre tem-se que:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad \text{Eq 2.4}$$

Onde μ_0 é definido como a permeabilidade do espaço livre, tendo o valor de $4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

A permeabilidade dos materiais ferromagnéticos (Fe, Co, Ni e suas ligas) é usualmente expressa pela permeabilidade relativa, equação 2.5, pois a permeabilidade destes materiais é da ordem de 10^{10} ou mais vezes a permeabilidade do ar. Para os materiais usados em máquinas elétricas geralmente os valores de μ_r estão na faixa de 2000 a 6000 [2].

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad \text{Eq 2.5}$$

Pelo fato de a permeabilidade não ser constante em um determinado material e sim uma função de H a variação de $B \times H$ é dada pela curva de magnetização.

Para o real entendimento dos efeitos de H sobre B em uma curva de magnetização é primeiramente necessário o conhecimento sobre os conceitos de domínios magnéticos.

2.1.3 Domínios Magnéticos

Os domínios magnéticos são regiões onde o spin do elétron tem a mesma direção. Cada domínio dentro da estrutura do material é delimitado por paredes de domínio. A região de domínio magnético pode crescer ou diminuir ou ainda trocar o sentido da direção principal [3].

Materiais magnéticos macios desmagnetizados irão apresentar múltiplos domínios em diferentes direções. A soma desta rede de domínios será zero. Isto significa que pontualmente os materiais são totalmente polarizados, porém em uma visão macro os domínios irão cancelando-se e o resultado final será zero.

Iniciando-se com uma amostra desmagnetizada figura 1 (a), a primeira ação que ocorre quando um campo H é aplicado é que os domínios com a direção de fácil magnetização, direção parecida com a do campo aplicado, irão crescer sobre os outros domínios. Este primeiro crescimento acontece a baixos campos e é reversível figura 2 (b).

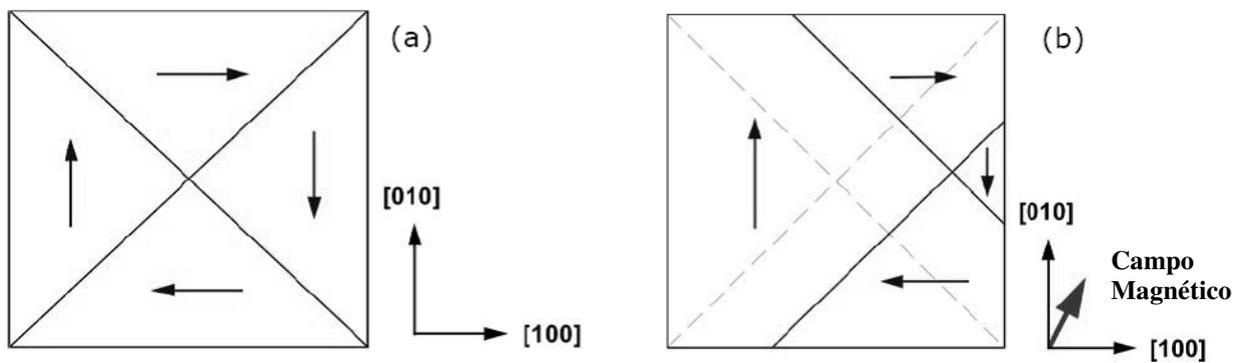


Figura 1 - (a) representação dos domínios magnéticos em um material desmagnetizado (b) domínios magnéticos após aplicação de um pequeno campo magnético [3].

Se a força do campo for aumentada, o crescimento do domínio continua nas direções mais fáceis sendo capaz de mover paredes de domínios adjacentes tais como inclusões e contornos de grão. Este crescimento é irreversível figura 2.

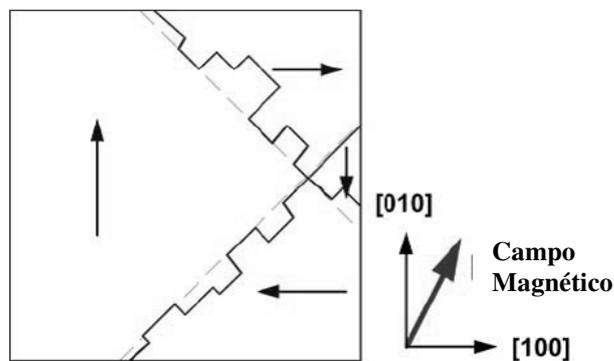


Figura 2 - Movimentação dos domínios magnéticos através de inclusões e contornos de grãos [3]

Em um determinado ponto todos os domínios transformaram-se em um simples domínio, com uma única direção, porém esta pode não ser igual a direção do campo aplicado, figura 3.

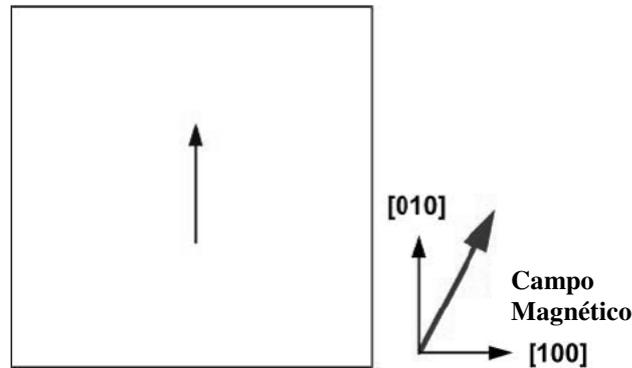


Figura 3 - Representação do alinhamento de todos os domínios magnéticos em uma única direção devido à aplicação de um campo magnético [3].

Então a partir de um novo aumento do campo magnético aplicado, este irá forçar a rotação da direção do domínio ocorrendo o alinhamento entre a direção do campo e do domínio, figura 2.4. Neste momento não há mais como o domínio se adaptar ao aumento do campo aplicado, resultando no que se conhece como saturação do material. Aços magnéticos comerciais tendem a saturar em densidades de fluxo de 1 a 2 Teslas.

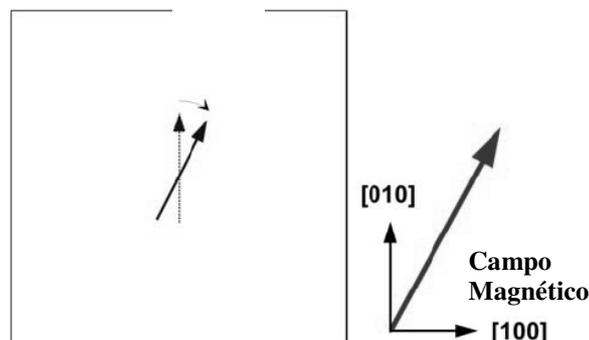


Figura 4 - Rotação do domínio magnético e saturação do material [3].

Observando-se a curva de magnetização da figura 5 é evidente que μ não é constante, caso fosse ter-se-ia uma reta. Para exercícios práticos é costume utilizar o valor μ_r considerando-se a região linear da curva de magnetização [3].

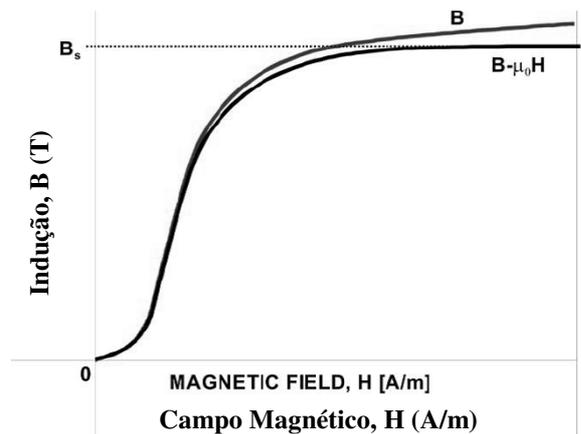


Figura 5 - Curva de magnetização de dois materiais com diferente ponto de saturação [3].

2.1.4 Curva de Histerese

Como a permeabilidade dos materiais magnéticos não é constante e sim uma função de H, a expressão $B = \mu \cdot H$, não pode ser calculada. Deve ser obtida experimentalmente, através de curvas levantadas para cada material [2].

Todo material ferromagnético após ter sido submetido a magnetização, quando não está mais sujeito ao campo externo não retorna ao seu estado original. Se uma amostra for saturada e depois o campo for removido existirá uma densidade de fluxo residual conhecido como magnetismo residual B_r , referente ao movimento das paredes dos domínios magnéticos. Para que se anule este B_r é necessário aplicar um campo magnético de força H no sentido contrário ao de magnetização, este campo é chamado de coercitividade do material, ou seja a quantidade de energia que deve ser aplicada para que a remanescência seja nula, figura 6 apresenta um exemplo de curva de magnetização.

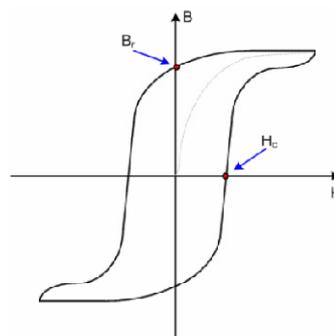


Figura 6 - Curva de magnetização.

2.1.5 Circuitos Magnéticos

Circuitos magnéticos atuam de forma similar aos circuitos elétricos. A figura 7 e a tabela 1 apresentam analogias entre circuitos magnéticos e circuitos elétricos

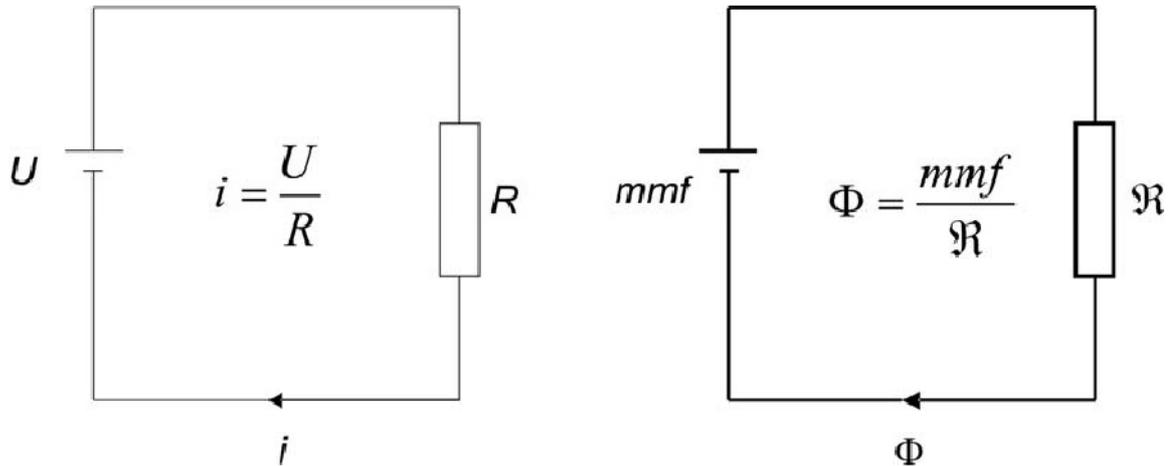


Figura 7 - Analogia entre circuito elétrico e circuito magnético [1].

Tabela 1 - Analogia entre grandezas magnéticas e elétricas [1].

Circuito Elétrico	Circuito Magnético
Densidade de Corrente: J (A/m^2)	Densidade de Fluxo Magnético: B (Wb/m^2)
Corrente: I (A)	Fluxo Magnético: Φ (Wb)
Intensidade de Campo Elétrico: ϵ (V/m)	Intensidade de Campo Magnético: H (A/m)
Tensão ou <i>fem</i> : U (V)	Força Magnetomotriz: mmf (A.e)
Condutividade: σ (A/V.m)	Permeabilidade: μ (Wb/A.m)
Resistência: R (Ω)	Relutância: \mathcal{R} (A.e/Wb)
Resistividade: ρ ($1/\sigma$)	Relutividade ($1/\mu$)
Condutância: G (A/V)	Permeância: P (Wb/A.e)

A tensão (E) corresponde a força magnetomotriz (mmf), tem suas propriedades relacionadas ao número de enrolamentos (N) e a corrente que passa por estes. A resistência (R) corresponde a relutância (\mathcal{R}), que é determinada pelo comprimento do caminho percorrido pelo fluxo magnético (l_m) dividido pela área da seção transversal (S) e pela permeabilidade. As propriedades do material e a geometria do mesmo influenciam na relutância (1).

A corrente (I) corresponde ao fluxo magnético (Φ) que é o valor da força magnetomotriz (mmf) dividido pela relutância total (R). A densidade de fluxo (B) é o fluxo (Φ) dividido pela área da seção transversal (S). O fluxo magnético (Φ) é o fluxo total que percorre a amostra enquanto que a densidade de fluxo (B) está relacionada com a quantidade de fluxo em determinada área.

Tabela 2 - Analogia entre equações elétricas e magnéticas [1].

Elétrico	Magnético
$U=R.I$	$mmf=N.I$
$R=1/\sigma.S$	$R = l_m / \mu.S$
$E.l = J/\sigma.l = U = I.R$	$H.l_m = (B/\mu) . l_m = mmf = \Phi . R$

2.1.6 Indução Magnética e Indutância

Quando um campo magnético varia no tempo, um campo elétrico é criado como determina a Lei de Faraday da equação 2.6 [1].

$$\oint_C \varepsilon . ds = - \frac{d}{dt} \int_S B . da \quad \text{Eq 2.6}$$

A equação 2.6 define que a integral linear da intensidade de um campo elétrico ε em um contorno fechado C é igual a taxa de variação da indução magnética. Em situações onde os condutores de corrente apresentam valores de condutividade elevados pode se definir que o valor de ε no fio é zero. A equação 2.6 então pode ser simplificada como é mostrado na equação 2.7.

$$\varepsilon = \frac{d\lambda}{dt} \quad \text{Eq. 2.7}$$

aonde λ é o indução magnética do enrolamento e é definido pela equação 2.8.

$$\lambda = N.\varphi \quad \text{Eq. 2.8}$$

Indução magnética é medido em unidades de webers (ou webers por voltas). O símbolo φ é usado para indicar o valor instantâneo de fluxo magnético. Para materiais magnéticos que apresentam permeabilidade magnética constante ou que possuam um gap de ar dominante, a relação entre o fluxo magnético instantâneo (φ) e a corrente (I) no enrolamento será linear e pode ser definida como a indutância do material, equação 2.9.

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad \text{Eq 2.9}$$

Outra maneira de definir-se a indutância é através de sua relação proporcional ao quadrado do número de voltas do enrolamento e inversamente proporcional a relutância do circuito magnético, equação 2.10.

$$L = \frac{N^2}{R} \quad \text{Eq 2.10}$$

A indutância (L) é dada em henries (H) ou weber-enrolamentos por âmpere.

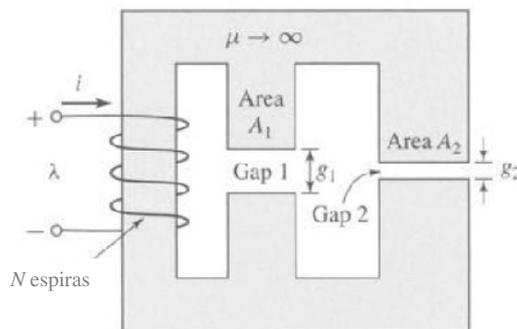


Figura 8 – Circuito magnético [1].

2.2 Máquinas Elétricas

2.2.1 Introdução

Conversões eletromagnéticas acontecem quando ocorrem mudanças da indução magnética resultado de um movimento mecânico. Em máquinas elétricas rotativas as tensões são geradas em bobinas ou conjuntos de enrolamentos quando gira-se estas bobinas mecanicamente através de um campo magnético, girando mecanicamente um campo magnético ao redor de um fio ou desenvolvendo um circuito magnético onde a relutância varia com a rotação do rotor. Por qualquer um destes métodos a indução magnética de um enrolamento muda ciclicamente e uma tensão alternada é gerada [1].

Um conjunto de enrolamentos conectados é tipicamente referido como enrolamento de armadura. Em geral o termo enrolamentos de armadura é utilizado para designar uma bobina ou um conjunto de enrolamentos em uma máquina elétrica rotacional que carregam correntes elétricas ac. Em máquinas síncronas ou máquinas de indução os enrolamentos de armadura são geralmente na parte estacionária do motor conhecidas como estator e nestes casos os

enrolamentos podem ser chamando de enrolamentos do estator. A figura 2.9 mostra os enrolamentos de um estator.

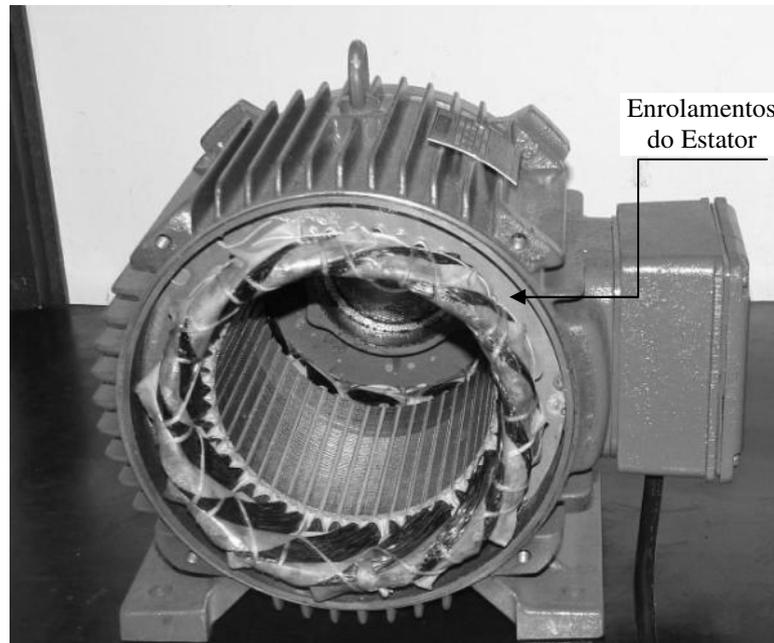


Figura 9 – Conjunto de enrolamentos de um estator.

Em máquinas dc (corrente contínua), os enrolamentos de armadura são encontrados na parte rotativa da máquina, conhecida como rotor. Figura 10 mostra um rotor de uma máquina dc. Um contato é utilizado para alimentar os enrolamentos do rotor de uma máquina dc.

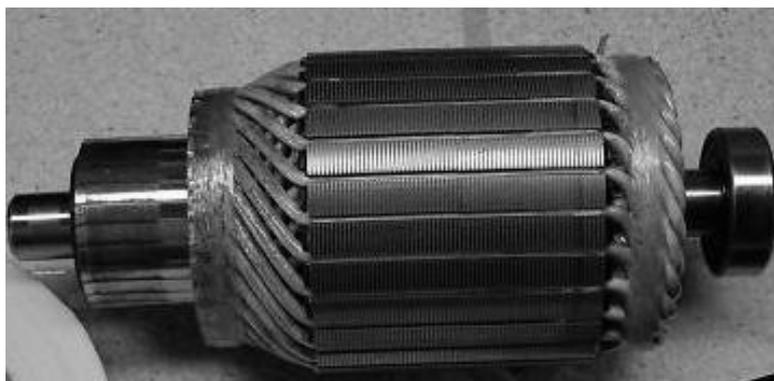


Figura 10 - Rotor de uma máquina dc.

Máquinas síncronas e dc tipicamente incluem um segundo enrolamento (ou conjunto de enrolamentos) para o fluxo de corrente dc. Estes enrolamentos são utilizados para produzir o fluxo magnético de operação da máquina. Este enrolamento é conhecido como enrolamento de campo. O enrolamento de campo em uma máquina dc é encontrado no estator enquanto que em uma máquina síncrona ele é encontrado no rotor. Em cada caso a corrente deve ser

fornecida para o enrolamento de campo via contato rotacional. Materiais magnéticos permanentes também produzem fluxo magnético dc e muitas vezes são usados para substituir os enrolamentos de campo em determinadas máquinas [1].

Na maioria das máquinas elétricas rotativas o estator e o rotor são feitos de chapas de aço e as bobinas são enroladas em determinados espaços destas estruturas. Sabe-se que quanto maior a permeabilidade magnética maior a densidade de energia associada a transformação eletromecânica. O fluxo magnético variável encontrado na armadura destas máquinas tende a induzir correntes no material, conhecidas como correntes parasitas. Com o objetivo de diminuir estas correntes, as quais causam perdas energéticas, as máquinas elétricas são construídas a partir de chapas de aço. A figura 11 mostra uma máquina elétrica sendo construída a partir de um conjunto de chapas laminadas.



Figura 11 – Estrutura de chapas laminadas em um motor [1]. Processo de fabricação de um grande estator.

Em algumas máquinas tais como máquinas de relutância e motores de passo não existem enrolamentos no rotor. O funcionamento destas máquinas depende da não uniformidade do entreferro de ar com as variações na posição do rotor em conjunto com a alimentação dos enrolamentos do estator por correntes alternadas. Em tais máquinas tanto o estator quanto o rotor estão sujeitos a fluxos magnéticos alternados resultando na necessidade

de terem rotor e estator construídos com chapas laminadas para diminuir as perdas por correntes parasitas [1].

Máquinas elétricas rotativas possuem diversas formas e são conhecidas por diversos nomes: dc, síncronas, magneto-permanentes, indução, relutância-variável, histereses, brushless, etc. Embora estas máquinas pareçam operar através de metodologias completamente diferentes os princípios físicos que determinam seu funcionamento são bem similares. Um exemplo é o caso de uma máquina dc onde associado ao rotor e ao estator estão distribuições de fluxos magnéticos que são fixos no espaço. Tais fluxos têm a tendência de se alinharem caracterizando desta forma o torque gerado nesta máquina. Em uma máquina de indução apesar de muitas diferenças fundamentais, o princípio de funcionamento é exatamente o mesmo. A distribuição de fluxos magnéticos, embora nestas máquinas eles não sejam estacionários, giram com um determinado sincronismo. Como em um motor dc eles se encontram com uma constante separação angular e o torque é produzido na tendência destes fluxos se alinharem [1].

2.2.2 Máquinas AC

Máquinas ac tradicionais são classificadas em duas categorias: síncronas e indução. Em máquinas síncronas a corrente do enrolamento do rotor é suprida através de anéis condutores e escovas. Em máquinas de indução as correntes no enrolamento do rotor são geradas através de uma combinação de diferenças na posição do rotor e variações na corrente do estator.

Máquinas Síncronas A figura 12 representa um motor síncrono de pólos salientes. O enrolamento de campo desta máquina gera um par de pólos magnéticos e por isto esta máquina é chamada de motor de dois pólos [1].

Com raras exceções o enrolamento de armadura de uma máquina síncrona não é localizado no estator e o enrolamento de campo no rotor. O enrolamento de campo é excitado através de uma fonte de corrente continua conectada ao eixo através de um conjunto de anéis coletores e escovas de carbono. Os enrolamentos são dispostos desta maneira por razões práticas. É mais vantajoso ter uma única fase de baixa potência (enrolamento de campo) no rotor enquanto no estator está localizado o enrolamento de alta potência e usualmente trifásico (enrolamento de armadura).

Na figura 12 o enrolamento de armadura é representado pelas letras **a** e **-a** localizados exatamente 180° um do outro. Neste esquema o enrolamento de armadura é apenas uma bobina de N voltas. Os condutores que formam estas bobinas estão paralelos ao eixo e são conectadas em série.

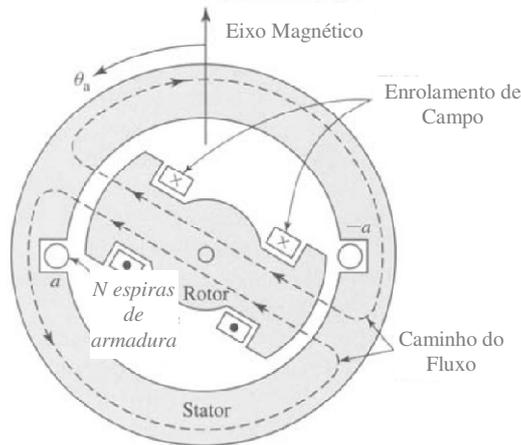


Figura 12 – Esquema de um motor síncrono de pólos salientes [1].

O caminho do fluxo magnético mostrado na figura 12 é para o caso onde o rotor é movido por uma fonte mecânica a uma velocidade constante e o enrolamento de armadura está aberto e por isto o fluxo magnético nesta máquina será apenas produzido pelo enrolamento de campo.

Em uma situação idealizada pode-se admitir que o fluxo no entreferro desta máquina é uma senóide. Na figura 13 é possível observar distribuição radial da densidade de fluxo magnético no entreferro. Na prática a densidade de fluxo no entreferro pode se aproximar de uma onda senoidal através do correto dimensionamento dos pólos salientes.

Através da rotação do rotor a indução magnética no enrolamento de armadura varia com o tempo. Assumindo-se a distribuição senoidal da densidade de fluxo e uma velocidade constante do rotor o resultado será uma tensão induzida nos enrolamento de armadura como mostrado na figura 13.

A tensão no enrolamento passa por um ciclo completo a cada rotação da máquina de dois pólos. Esta frequência em ciclos por segundo é a mesma da velocidade de rotação do motor e é esta a razão para esta máquina ser conhecida como motor síncrono. Nesta situação a máquina precisa girar a uma velocidade de 3600 RPM para que possa produzir uma tensão com 60 Hz.

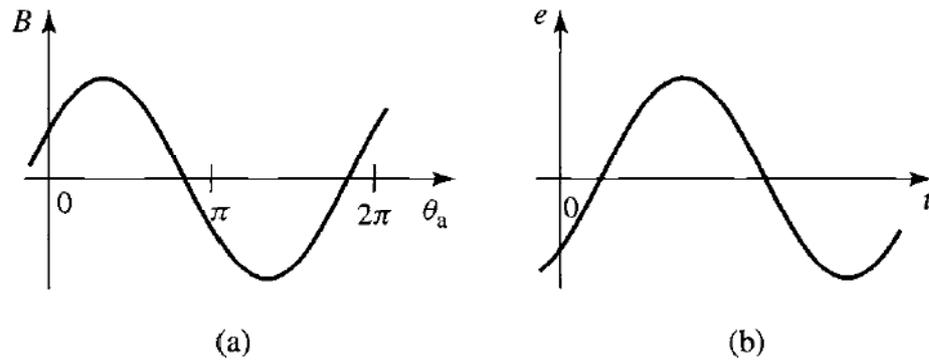


Figura 13 – (a) distribuição da densidade de fluxo no estator e (b) curva correspondente tensão induzida no enrolamento de armadura [1].

A maioria das máquinas síncronas tem mais que dois pólos. Na figura 14 é possível verificar o esquema para uma máquina com quatro pólos e uma única fase. Neste caso tem-se dois ciclos de distribuição de fluxo no estator, como mostrado na figura 14. Cada enrolamento é capaz de gerar um ciclo completo. A tensão gerada neste caso será então de 2 ciclos completos por rotação da máquina, figura 15. A frequência em Hz será então o dobro da rotação da máquina.

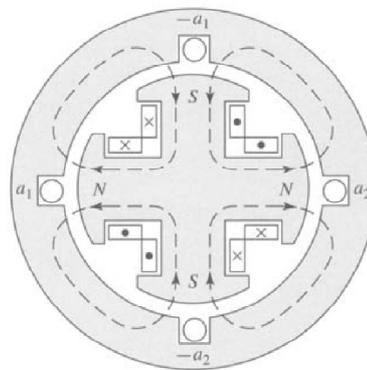


Figura 14 – Representação de um motor síncrono monofásico com 4 pólos salientes [1].

Quando uma máquina tem mais que dois pólos é interessante concentrar-se em apenas um par de pólos para estudos elétricos, magnéticos e mecânicos, pois os resultados para um par de pólos irá se repetir para qualquer outro. É conveniente expressar a distribuição de fluxo em radianos elétricos ao invés de unidades físicas. Neste caso um par de pólos em uma máquina multipolos tem um ciclo de fluxo igual a 2π radianos elétricos [1].

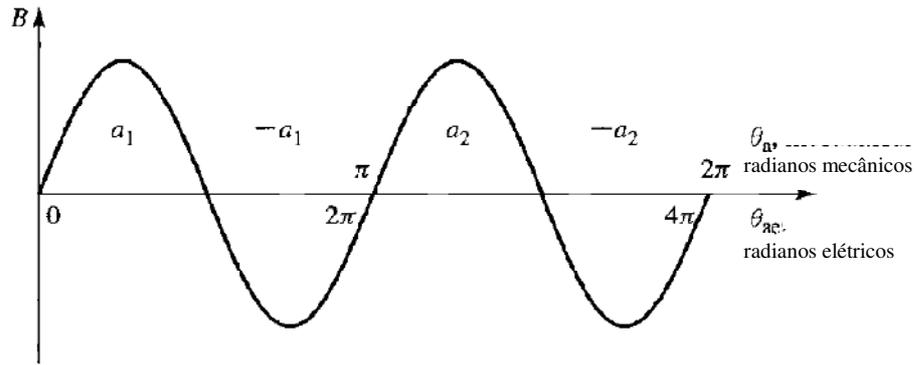


Figura 15 – Distribuição da densidade de fluxo no entreferro de uma máquina síncrona de 4 pólos [1].

A tensão induzida no enrolamento do estator completa um ciclo toda vez que um par de pólos passa por ela (ou pólos dividido por 2 para cada rotação). A frequência (f_e) da tensão elétrica pode ser representada pela equação 2.11 [1].

$$f_e = \left(\frac{\text{poles}}{2}\right) \frac{n}{60} \quad \text{Eq. 2.11}$$

Onde n é a velocidade do eixo em rotações por minuto. A frequência neste caso é dada em hertz (Hz). A frequência elétrica da tensão gerada em radianos por segundo é obtida pela equação 2.12.

$$\omega_e = \left(\frac{\text{poles}}{2}\right) \omega_m \quad \text{Eq. 2.12}$$

Onde ω_m é a velocidade de rotação em radianos por segundo.

O rotor mostrado nas figuras 12 e 14 têm pólos salientes, porém é possível também que uma máquina síncrona tenha pólos lisos ou ainda rotor cilíndrico. A figura 16 representa um motor de pólos lisos. O enrolamento de campo está distribuído de forma a gerar dois pólos e produzir aproximadamente uma onda senoidal na distribuição de fluxo no entreferro do motor.

As relações entre frequência elétrica e velocidade do rotor servem como base para o entendimento, porque alguns motores síncronos têm pólos saliente e outros têm pólos lisos. A maioria dos sistemas elétricos no mundo ou tem a frequência de 50 Hz ou 60 Hz. Uma máquina com pólos salientes é característica de geradores hidráulicos, pois estas turbinas operam em relativa baixa velocidade e por isto um grande número de pólos é necessário para produzir a frequência desejada. Quando é necessário um grande número de pólos é mais

vantajosa construção de máquinas com pólos salientes. A figura 17 mostra um rotor de pólos salientes de um aerogerador de grande porte. Turbinas de vapor ou gás operam a altas velocidades e normalmente são turbinas de dois ou quatro pólos lisos.

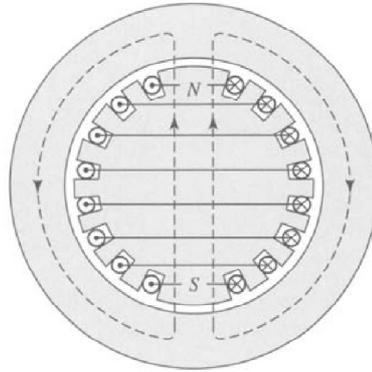


Figura 16 – Motor síncrono de pólos lisos ou rotor cilíndrico [1].

A maioria dos sistemas no mundo é trifásica e como resultado disto, com raras exceções, geradores síncronos são máquinas trifásicas. Para a produção de um conjunto de três fases atrasadas de 120° elétricos é necessário o uso de no mínimo três enrolamentos afastados de 120° no estator da máquina. A figura 18 (a) mostra um esquema para uma máquina de dois pólos e trifásica, com um enrolamento por fase. As três fases são designadas pelas letras **a**, **b** e **c**. Em uma máquina síncrona trifásica se deve ter no mínimo dois enrolamentos para cada fase como mostra a figura 18 (b). Em uma máquina multipolos o número mínimo de enrolamentos por fase é o da metade do número de pólos.

Os dois enrolamentos para cada fase da figura 18 (b) são conectados em série e as 3 fases devem ser conectados em estrela ou triângulo (Y ou Δ). A figura 18 (c) mostra uma conexão do tipo estrela. Embora tenha se falado apenas em ligações série entre fase uma ligação paralela também é possível, como por exemplo (a, -a) paralelo com (a', -a').

Quando um gerador síncrono alimenta uma carga, as correntes nos enrolamentos de armadura geram um fluxo magnético que gira a velocidade constante. Este fluxo interage com o fluxo gerado pelos enrolamentos de campo e um torque eletromecânico tende a ser criado como resultado da tendência destes dois fluxos se alinharem. Em um gerador este torque se opõe a rotação do motor e o torque da fonte mecânica deve ser aumentado. Este torque eletromecânico é o mecanismo responsável em um gerador síncrono pela conversão de energia mecânica em elétrica.

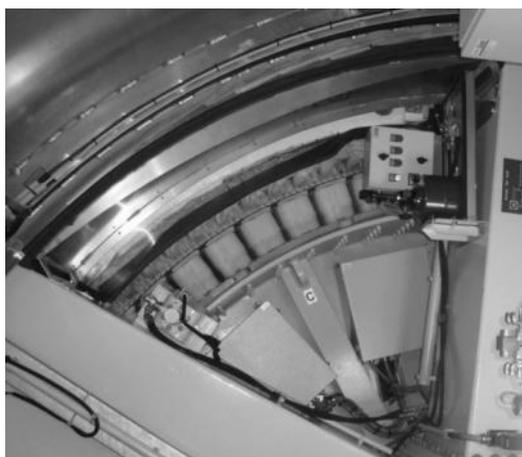


Figura 17 – Foto de um gerador eólico síncrono de pólos salientes.

Em contrapartida pode-se utilizar uma máquina síncrona como um motor. Neste caso a corrente alternada é fornecida aos enrolamentos de armadura e a corrente dc aos enrolamentos de campo. O campo magnético produzido pela corrente no enrolamento de armadura movimenta-se a uma velocidade constante “puxando” o rotor. Para que seja possível a produção de um torque constante, as amplitudes dos campos magnéticos do estator e do rotor devem ser mantidas constantes. Em um motor síncrono a velocidade constante do motor é determinada pelo número de pólos e a frequência da corrente do enrolamento de armadura, isto significa que se a frequência ac é constante o motor atuará em velocidades constantes.

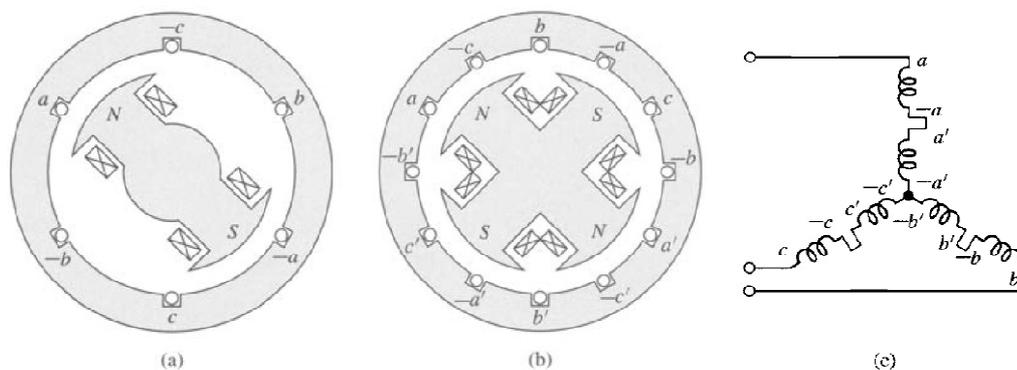


Figura 18 – (a) motor síncrono trifásico com dois pólos e uma bobina para cada fase, (b) motor trifásico quatro pólos e duas bobinas para cada fase e (c) ligação estrela entre as fases [1].

Em um motor o torque eletromecânico está na mesma direção da rotação do eixo e se contrapõem ao torque requerido para movimentar a carga. O fluxo produzido pelas correntes de armadura de um motor síncrono rotacionam a frente do campo produzido pelo enrolamento de campo esta diferença é a responsável pela rotação do motor tendo em vista que o campo do estator atrai o do rotor realizando o trabalho. Esta situação é oposta em um gerador, aonde o

enrolamento de campo produz o fluxo magnético girante e o enrolamento de armadura acompanha. Estes são os fenômenos fundamentais para conversão eletromecânica de energia.

Máquinas de Indução – o segundo tipo de máquinas ac são as máquinas de indução. Como acontece com máquinas síncronas os enrolamentos do estator de uma máquina de indução são alimentados com corrente alternada, porém diferentemente de máquinas síncronas nas quais os enrolamentos de campo são alimentados com correntes dc, correntes alternadas estão presentes no rotor de uma máquina de indução. Em máquinas de indução correntes alternadas são aplicadas diretamente aos enrolamentos do estator as correntes do rotor são produzidas através da indução gerada pelo estator, como em um transformador. Máquinas de indução podem ser consideradas como transformadores nos quais potência elétrica é transformada entre o rotor e o estator com mudanças na frequência e um fluxo de potência mecânica. Embora o motor de indução seja o mais usual ele é pouquíssimas vezes utilizado como gerador, suas características como gerador na maioria das vezes são insatisfatórias para a maioria das aplicações embora tenha sido muito utilizado em aplicações como gerador em turbinas eólicas. A máquina de indução também pode ser utilizada como um conversor de frequência [1].

Em motores e indução, os enrolamentos do estator são essencialmente os mesmos de um motor síncrono embora os enrolamentos do rotor sejam curto circuitados e freqüentemente não tenham ligações externas correntes são induzidas no rotor.

A figura 19 mostra um corte em um motor de indução, nesta figura pode-se observar que os enrolamentos do rotor são na verdade barras de alumínio fundido que estão em curto através de anéis de alumínio localizados no final do rotor. Este tipo de construção de rotor resulta em um motor de indução relativamente barato e altamente confiável fatores que contribuem para a popularidade e larga aplicação deste tipo de máquina elétrica.

Como em motores síncronos o fluxo magnético de armadura move o rotor e produz o torque eletromecânico, porém diferente de um motor síncrono o rotor da máquina de indução não gira em sincronia com o fluxo de armadura existe um escorregamento o que gera um aumento da indução no rotor e por isto um aumento também no torque na ponta de eixo. Motores de indução atuam em velocidades inferiores ao das máquinas síncronas. Um gráfico representando características típicas velocidade x torque em motores de indução pode ser visto na figura 20.

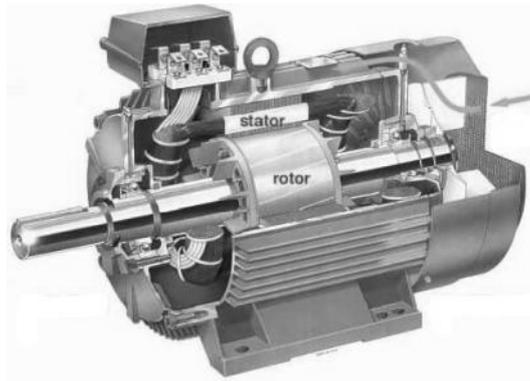


Figura 19 – Motor trifásico de indução tipo gaiola de esquilo.

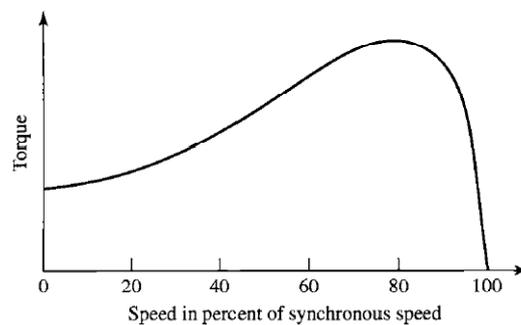


Figura 20 – Gráfico do torque x velocidade em uma máquina de indução.

2.2.3 Máquinas Síncronas com Imãs Permanentes

Motores ac com imãs permanentes são máquinas polifásicas síncronas com imãs permanentes localizados no rotor. Estas máquinas têm seu funcionamento similar com máquinas síncronas trifásicas de rotor bobinado.

A figura 21 representa uma máquina ac trifásica com imãs permanentes. Na prática uma máquina com imãs permanentes pode ser analisada com as mesmas técnicas empregadas para máquinas onde a armadura de campo é gerada por uma fonte de corrente dc assumindo os valores de permeabilidade de um imã permanente.

A figura 22 mostra a vista de um corte em uma típica máquina de imãs permanentes, nesta figura também é possível verificar os sensores de posição e velocidade localizados no eixo. Estes sensores são utilizados para o controle da máquina. Inúmeras técnicas podem ser utilizadas para controle de posição do eixo em uma máquina incluindo:

- sensores de efeito Hall.

- diodos emissores de luz.
- foto transistores.
- Sensores indutivos.

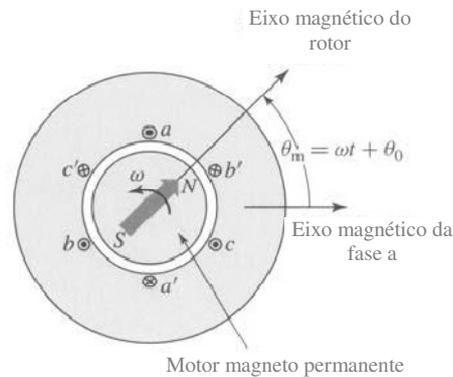


Figura 21 – Máquina síncrona trifásica com ímãs permanentes [1].

Motores com ímãs permanentes são tipicamente operados com drives de frequência variável. Sob condições de frequência constante e excitação polifásica senoidal uma máquina com ímãs permanentes tem o comportamento similar ao de uma máquina síncrona trifásica com alimentação dc nos enrolamentos de campo.

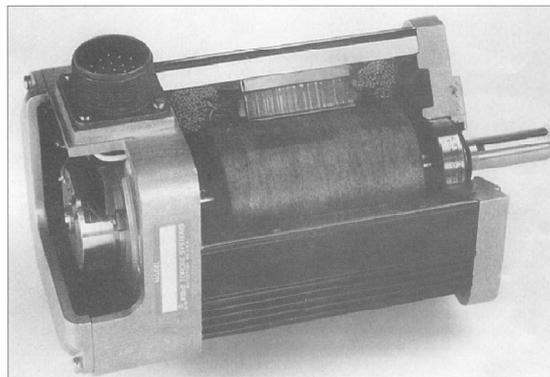


Figura 22 - Corte de uma máquina síncrona trifásica com ímãs permanentes [1].

Motores com ímãs permanentes são normalmente referidos como motores sem escovas ou ainda motores dc sem escovas. Esta terminologia vem do fato que estes motores são muito similares, quando combinados com conversores de frequência e drives de controle de tensão. Estes motores têm também em comum as características de torque e velocidade.

Em condições de operação permanente, correntes polifásicas no estator produzem um fluxo magnético girante enquanto que no estator os ímãs permanentes geram um fluxo que é estacionário em relação ao rotor. Torque constante é produzido apenas quando o rotor gira com sincronismo em relação ao estator. Nestas condições existe um deslocamento constante angular entre os fluxos do estator e do rotor e o resultado disto é um torque com valor proporcional ao seno do ângulo de deslocamento, figura 23.

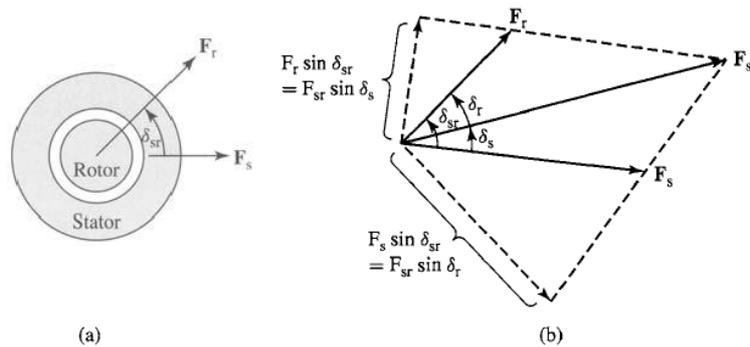


Figura 23 – (a) máquina de dois polos e (b) vetor diagrama de mmf [1].

2.2.4 Máquinas Síncronas com Núcleos Magnéticos não Laminados

Diversos estudos já foram realizados na área de máquinas elétricas com núcleos magnéticos não laminados. Alguns com resultados positivos e outros nem tanto. Pode-se verificar, inclusive, que já existem alguns casos onde os compósitos magnéticos macios encontram-se em produtos comercializados. O estudo de alguns casos será mostrado para que seja possível refletir sobre as metodologias de obtenção de núcleos de máquinas elétricas obtidas através da metalurgia do pó e mais especificamente com o uso de compósitos magnéticos macios – SMC (*soft magnetic composite*).

Servomotor – neste caso um estator laminado de um servomotor comercial com distribuição de enrolamentos do tipo *full pitch*, o estator desta máquina pode ser visto na figura 24, foi redesenhada e substituída por um estator obtido através da compactação de um compósito magnético macio [4].

Algumas alterações foram feitas para que as propriedades magnéticas do novo material se adequassem as solicitações do motor, figura 25:

- alto fator de preenchimento com cobre,

- bobinas foram pré-enroladas e pressionadas antes de serem adaptadas ao estator,
- os cantos do estator foram arredondados.



Figura 24 – Estator de um servomotor comercial.

Para aumentar-se a concentração de cobre no espaço reservado para este no estator foi realizado um pré-enrolamento das bobinas e logo após fora as bobinas compactadas em uma pressão a 450 MPa, nota-se que o isolamento dos fios não foi rompido no processo. Para que seja possível a introdução destas bobinas o núcleo e a parte traseira do dente do estator foi dividida em duas peças, permitindo a fácil inserção das bobinas que após a compactação tem o tamanho exato para que se encaixem perfeitamente sobre os dentes do estator, este fato melhora o fluxo térmico na máquina, na figura 26 é possível observar a geometria do estator e sua separação.

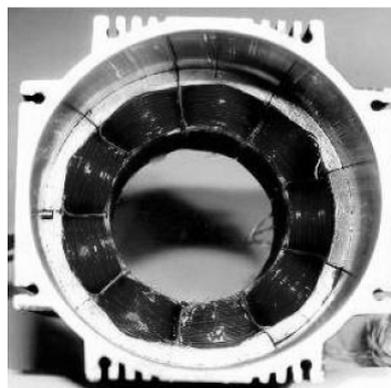


Figura 25 - Servomotor com estator de SMC [4]

Como resultado esta máquina obteve um valor de densidade de torque 3.7 vezes maior do que o motor original ($3600\text{Nm/m}^3 \times 13200\text{Nm/m}^3$).

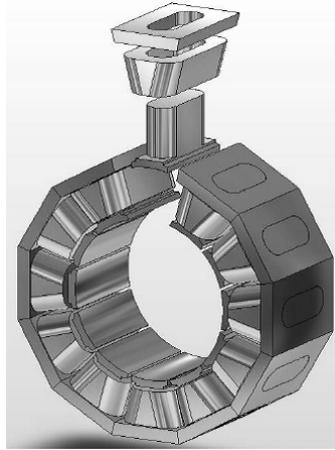


Figura 26 – Estator de um servomotor de SMC [4].

Motor de bicicleta – o projeto deste motor para bicicleta deveria atender aos seguintes requisitos: baixo custo de material, baixo peso, fluxo concentrado e alto valor de preenchimento com cobre do espaço no estator [5].

Neste motor tem algumas características especiais como baixa tensão de alimentação, o motor deve ser do tipo *direct drive*, ou seja, sem caixa de reduções, com enrolamentos concentrados no estator e no rotor o fluxo é gerado por ímãs permanentes.

Neste motor o rotor é localizado na parte externa e o estator no centro da máquina como pode ser visto na figura 27.



Figura 27 – Rotor (esquerda) e estator (direita) de um motor de bicicleta [5].

Para este motor os resultados obtidos nos testes apresentaram um valor de pico de eficiência de 96% e um valor de torque de 2.7 Nm/Kg, sendo que o peso total do motor é de 3.5 kg.

Servomotor comercial BLDC - os motores da BLDC são de última geração. São ultra compactos e apresentam excelente densidade de torque. O motor foi reduzido em dois terços de sua dimensão original utilizando uma nova forma de enrolamentos em conjunto com estator feito a partir de compósito magnético macio. Apesar de seu tamanho reduzido o torque entregue por este servomotor é o mesmo que o modelo de aço laminado. Pode-se optar ainda por um modelo com um encoder e drive senoidal integrado. Para este caso não foram encontradas maiores informações, pois este é um modelo de servomotor comercial e devido as competições empresariais os dados sobre a pesquisa neste motor são limitadas. A figura 28 apresenta este motor com e sem o encoder senoidal [6].



Figura 28 – (a) controle integrado, (b) servomotores e (c) servomotor comercial [6].

2.2.5 Testes em máquinas síncronas

Sabe-se que é possível determinar as características de uma máquina síncrona com diversos testes, incluindo o teste de reatância síncrona. Estes testes são realizados com circuito aberto no qual a tensão é medida em relação ao valor da corrente de campo, e o teste de curto circuito ou circuito fechado no qual o enrolamento de armadura é curto circuitado e a corrente na armadura é medida em relação com a corrente no enrolamento de campo. Estes testes são variações de técnicas aplicadas não somente para máquinas elétricas, mas para qualquer circuito que pode ser aproximado por um circuito equivalente linear no qual os teoremas de Thevenin podem ser aplicados.

A partir do teorema de Thevenin um teste de circuito aberto resulta no conhecimento da tensão interna e um teste de curto circuito mostra a impedância interna. Para o caso

específico do teste em uma máquina rotativa elétrica com o teste de circuito aberto é possível identificar a excitação necessária, perdas nos núcleos e perdas mecânicas por atrito. No teste de circuito fechado pode-se verificar informações sobre as reações magnéticas da corrente introduzida e perdas associadas a corrente tal como perdas no fio $I^2.R$.

2.3 Materiais Compósitos Magnéticos Macios

2.3.1 Introdução

Compósitos magnéticos macios (SMC – da sigla em inglês *soft magnetic composites*) são materiais utilizados em aplicações eletromagnéticas e podem ser descritos como partículas de pó de ferro, ou suas ligas de ferro, circundadas por material orgânico isolante. Componentes SMC normalmente podem ser produzidos por técnicas convencionais de metalurgia do pó (PM – *powder metallurgy*) com ou sem aplicação de novas metodologias, tais como, dupla compactação, compactação a quente, tratamentos térmicos de recozimento, entre outras. Estes materiais compósitos na maioria das aplicações oferecem uma série de vantagens quando comparados com as tradicionais chapas laminadas, como por exemplo [7]:

- comportamento ferro magnético isotrópico (fluxo tri-dimensional);
- baixo nível de perdas por correntes parasitas;
- baixas perdas totais no núcleo a média e alta frequência;
- possibilidade de melhorias nas características térmicas da máquina;
- flexibilidade no formato dos núcleos magnéticos;
- possível redução de peso e dos custos de produção.

2.3.2 Metalurgia do Pó

A produção de componentes magnéticos por metalurgia do pó, além de oferecer as vantagens típicas associadas a minimização de usinagem, permite obter características únicas de desempenho. A metalurgia do pó é o processo de fabricação de peças metálicas ou cerâmicas, que se distingue dos processos metalúrgicos convencionais pelos seguintes característicos [8]:

- utilização de pós metálicos e não-metálicos como matérias-primas;

- ausência de fase líquida ou presença apenas parcial de fase líquida durante o processo de fabricação;

- produção de peças com formas definitivas ou praticamente definitivas, dentro de tolerâncias muito estreitas, geralmente sem necessidade de operações de usinagem posteriores ou de qualquer outro tipo de acabamento;

- produção de componentes com características estruturais e físicos impossíveis de se obter por qualquer outro processo metalúrgico;

- obtenção de peças em grande série, tornando o processo altamente competitivo em relação aos processos convencionais.

A partir dos pós, obtidos através de várias técnicas de fabricação, são duas as etapas fundamentais do processo [8]:

- moldagem ou compactação pela aplicação de pressão nos pós, à temperatura ambiente ou a quente, no interior de matrizes, cujas cavidades correspondem normalmente à forma e dimensões das peças finais;

- cura ou sinterização a uma temperatura abaixo da temperatura de fusão do metal ou liga metálica considerada, sob condições de temperatura, tempo e ambiente.

Esta última operação confere a resistência mecânica e outras propriedades aos compactados obtidos na etapa anterior, os quais, apenas compactados, não possuem as características físicas e mecânicas que permitem seu emprego imediato.

A compactação e a sinterização são as duas operações básicas, podendo sofrer na prática algumas modificações, sobretudo no que se refere a compactação.

Outras operações típicas da metalurgia do pó consistem na mistura dos pós, antes da compactação, quando se trata de vários componentes, e na calibração ou calibragem, após a sinterização. Além dessas, podem ser realizadas outras operações, tais como tratamento térmico, tratamento superficial, além da usinagem.

As vantagens do processo podem ser resumidas [8]:

- possibilidade de produzir e conformar metais impossíveis ou muito difíceis de serem obtidos pelos processos metalúrgicos convencionais. Exemplo: metais refratários (tungstênio, molibdênio, tântalo), metal duro (carbonetos sinterizados de tungstênio, tântalo, titânio e outros), metal pesado, etc.;

- possibilidade de obtenção de características estruturais especiais, como porosidade controlada. Exemplo: materiais para mancais auto-lubrificantes, filtros metálicos, etc.;

- possibilidade de obtenção de materiais caracterizados pela associação de metais com materiais não-metálicos. Exemplos: compósitos magnéticos, discos e materiais de fricção, escovas coletoras de corrente, combinação de materiais metálicos com materiais cerâmicos, etc.;

- possibilidade de associarem-se metais diferentes para a obtenção de materiais em que ficam mantidos os característicos próprios de cada componente metálico. Exemplos: contatos elétricos de tungstênio-prata, tungstênio-cobre, etc.;

- possibilidade de ser exercido rigoroso controle do produto acabado, em vista da capacidade de partir-se de metais extremamente puros;

- eliminação prática de rebarbas ou de qualquer excesso de material da forma de rebarbas.

Em função do constante aperfeiçoamento da técnica de consolidação dos pós, ou seja, da compactação e da sinterização, da aplicação de infiltração metálica e de outras técnicas de conformação, como forjamento-sinterização, além das inovações constantes na produção dos pós, de modo a resultarem pós com características superiores de compactação, foi possível tornar a metalurgia do pó técnica competitiva com os processos metalúrgicos tradicionais, não somente sob o ponto de vista econômico, como igualmente pelo fato de conseguir-se, no produto final, propriedades mecânicas comparáveis com às dos materiais fundidos, conformados mecanicamente ou usinados, ao mesmo tempo em que as operações de tratamento térmico superficial podem ser aplicadas com êxito e relativa facilidade [8][9].

É necessário, contudo, que as séries a serem fabricadas na maioria dos casos sejam grandes, dado o elevado custo do ferramental empregado como matrizes e componentes de compactação, principalmente quando as peças apresentam formas complexas.

Há, portanto, limitações para a técnica de metalurgia do pó, uma das quais é exatamente a quantidade de peças a serem produzidas, para que o processo seja competitivo com as técnicas convencionais [10].

Outra limitação importante é quanto a dimensão e ao formato da peça, porém este problema está sendo superada pela aplicação de técnicas de compactação isostática e compactação a quente. De qualquer forma, à medida que as dimensões das peças aumentam, torna-se necessário o emprego de prensas de compactação de capacidade cada vez maior, resultando em equipamentos que oferecem dificuldades técnicas muito grandes, custo elevado, podendo tornar o processo antieconômico.

Contudo, já tem sido possível fabricar peças com pesos superiores a cinco quilos, o que demonstra que até mesmo a dificuldade dimensional está sendo ultrapassada. Em resumo, está se tornando comum a substituição de processos tais como fundição sob pressão, forjamento, fundição de precisão, estampagem, usinagem e outros, pela técnica de metalurgia do pó [8].

A produção de milhares de peças por hora, de formas complexas, com forma definitiva ou próxima da final, com tolerâncias estreitas, combinada com a eliminação de operações de acabamento e, portanto, com economia de matéria-prima, tempo e energia, tem levado a essa tendência.

Além disso, a fabricação do ferramental necessário, assim como o suprimento de matéria-prima, não constitui mais um problema. Por esse motivo, as aplicações de peças sinterizadas vêm se estendendo aos mais diversos campos industriais e avançando para áreas tecnológicas cada vez mais sofisticadas.

Na produção de materiais magnéticos, tanto magneticamente macios para aplicações em máquinas elétricas, como magneticamente duros para ímãs permanentes, tem sido empregada a técnica de metalurgia do pó, porque ela permite que sejam obtidas peças com forma definitiva de usinagem e retificação, além de conseguir-se as propriedades magnéticas desejadas.

A figura 29 mostra, esquematicamente, as várias etapas da técnica de metalurgia do pó.

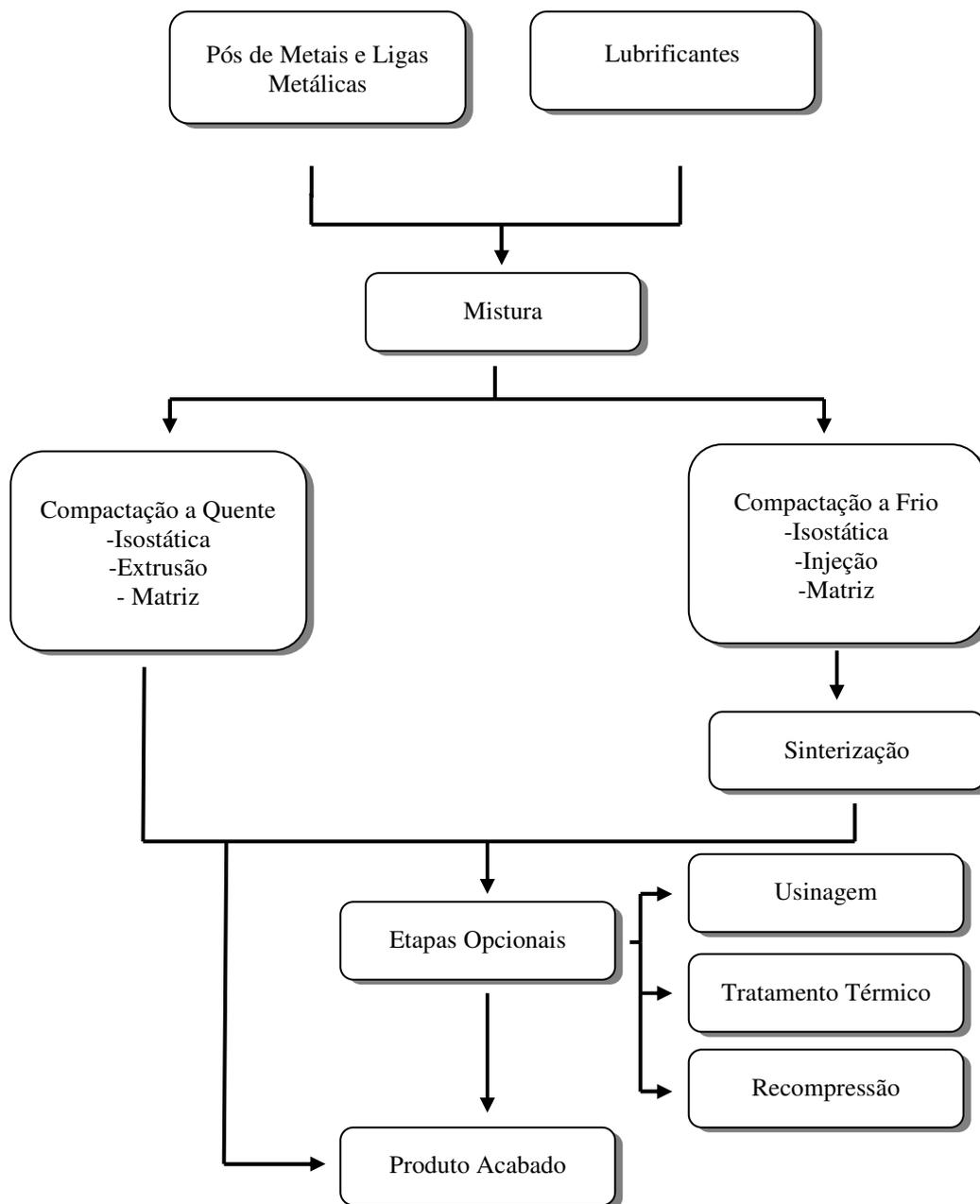


Figura 29 - Fluxograma das etapas do processo de M/P.

Para obtenção dos pós foi desenvolvido uma série de processos, em função das propriedades do material (fragilidade, ponto de fusão, comportamento químico), e das características que a aplicação pretendida requer do pó. Há processos mecânicos como a quebra e moagem, processos de atomização (pulverização), processos físicos, processos químicos e termoquímicos. Cada processo de produção do pó leva a um pó com um conjunto de propriedades distintas e a escolha do método de fabricação do pó depende de características, tais como, tamanho e distribuição de tamanho de partícula, superfície específica, compressibilidade, escoabilidade e densidade aparente do pó necessárias à obtenção do sinterizado com as propriedades mais adequadas a cada aplicação específica.

Características dos Pós Metálicos [9]:

- a pureza e a composição química são muito importantes, pois um nível muito elevado de impurezas pode alterar as propriedades do produto final levando a resultados indesejáveis;

- a forma e o tamanho da partícula são as duas características mais importantes no pó metálico devido às influências que causam como densidade aparente, densidade verde, velocidade de escoamento, compressibilidade e superfície aparente. A resistência dos compactados decresce com o aumento do tamanho de partícula do pó, ao passo que a densidade verde cresce.

A figura 30 apresenta um processo de obtenção de pós por atomização com água, onde o material fundido é submetido a um jato de água, solidificando-se em partículas e a figura 31(a-c) mostram algumas formas de partículas de pó [10].

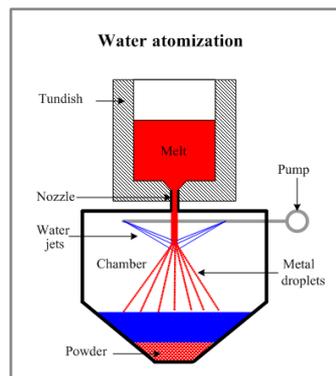


Figura 30 - Processo de obtenção de pós por atomização.

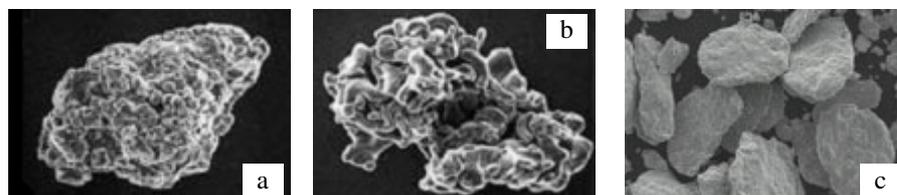


Figura 31 - Formato de algumas partículas (a) atomizado, (b) esponja e (c) eletrolítico [3].

A composição química desejada para o produto final é bastante controlável na M/P. Basicamente, pós de diferentes metais podem ser misturados nas proporções especificadas, podendo-se partir diretamente de pós pré-ligados ou podendo-se, ainda, misturar pós pré-ligados a pós de metais, para se chegar à composição química desejada.

Em sistemas de um só componente, como no caso da produção de peças com ferro puro, a etapa de mistura tem função de promover uma distribuição uniforme do lubrificante na liga desejada. O lubrificante é utilizado para reduzir o atrito entre as partículas de pó e a parede da matriz, bem como entre as próprias partículas. O lubrificante serve também para reduzir a força de extração da peça após a compactação, evitando danos ao compactado.

Quando da produção de componentes ligados ou materiais compósitos, a etapa de mistura torna-se igualmente necessária para promover a distribuição homogênea das partículas dos diversos componentes na massa do pó, além do lubrificante [11].

O lubrificante adicionado na etapa de mistura é removido dos compactados durante a etapa de aquecimento por volatilização, ou em uma operação isolada, chamada *dewaxing*, antes da sinterização.

Quando a mistura é perfeita, não ocorre a formação de aglomerados de partículas de um mesmo tamanho ou de um só tipo de metal (no caso em que se deseja a formação de uma liga).

Deve-se ter muito cuidado nesta etapa do processo, pois quando se utiliza altas velocidades de mistura dos pós, cria-se uma força centrífuga maior que o peso das partículas, fazendo com que o pó misturado fique nas paredes do misturador, não sofrendo a atuação desejada. O tempo de mistura do material também é crítico, pois este deve ser controlado de forma a promover a máxima homogeneidade da mistura. Um tempo excessivo de operação pode ter como consequência uma mistura inadequada. A figura 32 mostra algumas formas geométricas comuns de equipamentos para mistura de pós [8].

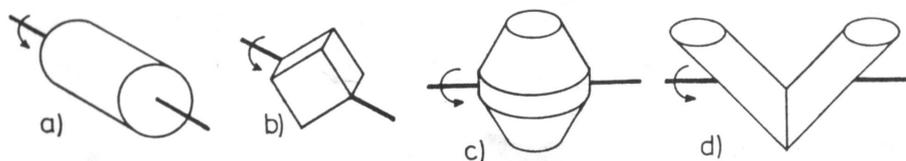


Figura 32 - Misturadores (a) cilíndrico, (b) rotacional cúbico, (c) cone duplo e (d) dupla concha [8].

A compactação a operação que consiste na aplicação de pressão sobre determinada quantidade de pó, ou mistura de pós, até sua consolidação, conforme visualização simplificada da figura 33. As dimensões da matriz são geralmente a do produto final. As pressões variam de 30 até 3000 MPa dependendo do tipo de pó.

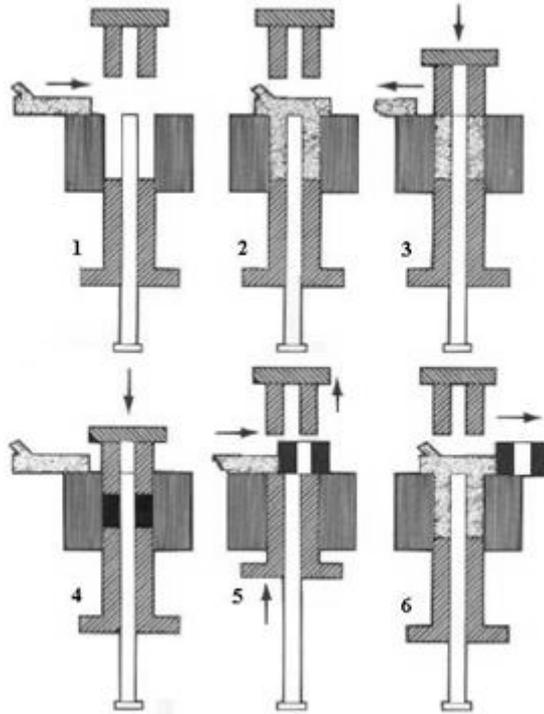


Figura 33 - Estágios de compactação (1 e 2) preenchimento da cavidade, (3 e 4) compactação e (5 e 6) extração e remoção do compactado verde [8].

Densidade verde é a densidade da peça compactada antes de ser sinterizada e é função da pressão, matéria-prima, distribuição das partículas, tamanho e forma das partículas, uso ou não de lubrificantes e da geometria da matriz. O lubrificante influencia no momento da compactação, pois [9][11]:

- diminui a carga de compactação;
- aumenta a densidade verde do compactado;
- aumenta a uniformidade da densidade;
- reduz o desgaste da matriz;
- facilita a ejeção.

A compactação convencional é sempre executada em prensas mecânicas ou hidráulicas. Uma quantidade pré-determinada é colocada numa cavidade formada pela matriz e machos, e é então compactada por uma série de deslocamentos dos punções superior e inferior, a temperatura ambiente.

No caso de utilizar pressões de compactação elevadas existe um desgaste prematuro da matriz, causado por deformação plástica entre as partículas e as paredes da matriz, elevando o atrito interno e aumentando o desgaste.

A região onde as partículas de pó sofrem menos influência do processo de compactação é denominada zona neutra. Em muitos casos, a localização da zona neutra inviabiliza a produção de uma peça sinterizada.

Os tipos de compactação mais utilizados são:

- compactação unidirecional de ação simples;
- compactação unidirecional de dupla ação;
- compactação isostática;
- laminação de pós;
- extrusão de pós;
- forjamento de pré-formas sinterizadas.

Para solucionar o problema de zona neutra citado anteriormente, utiliza-se compactação unidirecional de dupla ação, pois há uma melhora na distribuição de densidade; o punção superior e inferior neste tipo de compactação sofrem deslocamento.

As principais funções na compactação de pós metálicos são:

- consolidar o pó no formato desejado;
- atingir, tanto quanto possível, as dimensões finais, levando-se em consideração as variações dimensionais após a sinterização;
- atingir o nível e o tipo de porosidade desejada;
- atingir a resistência adequada para o manuseio.

Os métodos de compactação para técnicas com pressão podem ser divididos em:

- matriz;

- isostática;
- alta velocidade;
- forjamento;
- extrusão.

O método mais usual é a compactação em matriz, representando a técnica de consolidação mais largamente utilizada, dividindo-se em:

Compactação em efeito simples: Este sistema de compactação ocorre com ação apenas do punção superior ou inferior.

Compactação de duplo efeito: Este sistema é utilizado para peças de um ou dois níveis que devem ser pressionados com forças a partir de duas direções; produz peças com densidade mais uniformes do que na prensagem com movimento simples

Compactação de efeito simples com matriz flutuante: este sistema, o punção inferior permanece estacionário durante a compactação e a matriz é mantida em sua posição original pela ação hidráulica, pneumática ou mecânica usando molas. Durante a fase de compressão surge uma força de atrito entre os pós e as paredes da matriz que, quando supera a força que a suporta, provoca sua movimentação para baixo. Este movimento simula um deslocamento do punção para cima

Compactação de múltipla movimentação com matriz flutuante: Neste sistema, em geral há dois ou mais punções inferiores e superiores e estes são posicionados de tal forma que produzem vários níveis na peça.

O comportamento do pó durante a etapa de compactação é de importância fundamental na metalurgia do pó e dois mecanismos básicos ocorrem durante a compactação sob pressão:

- movimento das partículas;
- deformação e fraturas das partículas.

O movimento de rearranjo das partículas irá resultar em um empacotamento mais eficiente do pó ou densificação. Tal movimento é limitado pelas forças de atrito desenvolvidas entre as partículas vizinhas e os pontos de contato com a matriz, punções e machos.

Na produção de peças de alta densidade, os principais mecanismos de densificação são as deformações plásticas e elásticas, contudo a elástica é recuperada em virtude da remoção do esforço de conformação e ejeção.

A resistência a verde do compactado resulta principalmente do entrelaçamento mecânico das irregularidades das partículas. Isto é provido por deformação plástica durante a conformação superficial. A resistência a verde pode aumentar por:

- aumento da rugosidade superficial das partículas;
- aumento da área superficial do pó;
- decréscimo da densidade aparente;
- decréscimo da oxidação e contaminação do pó;
- aumento da densidade a verde ou da pressão de compactação;
- decréscimo do teor de certos aditivos interferentes (elementos de ligas, lubrificantes).

Após a compactação as peças estão prontas para o processo de sinterização que é um processo termicamente ativado que consiste na consolidação, densificação (em alguns casos), recristalização e ligação obtidas por tratamento térmico de pós (durante ou após a compactação). A temperatura no processo de sinterização está abaixo da temperatura de fusão dos componentes, e envolve o transporte de matéria em escala atômica. É o passo na fabricação que consome maior parcela de energia, e por isto tem forte influência nos custos de produção.

Nesta operação, obtém-se a ligação final entre as partículas do pó. O aquecimento é da ordem de $2/3$ a $5/4$ da temperatura de fusão do metal considerado. Esta operação deve ser realizada na presença de uma atmosfera protetora para evitar fenômenos como oxidação,

descarbonetação, entre outros. A figura 34 mostra a formação de pescoço entre duas partículas de pó esféricas.

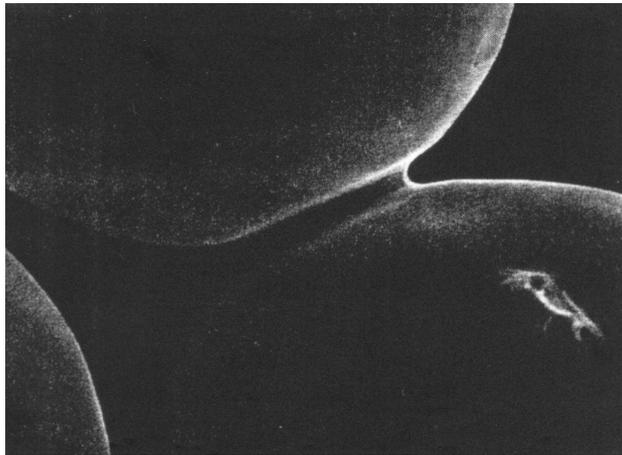


Figura 34 - Formação de pescoço entre duas partículas esféricas [8].

O objetivo é o alcance do equilíbrio das fases dadas pelos diagramas de equilíbrio, e a diminuição dos defeitos cristalinos. Os principais parâmetros a serem controlados nesta etapa são [8][12]:

- temperatura;
- tempo;
- atmosfera do forno.

A sinterização em escala industrial é comumente processada em fornos contínuos, caracterizados em três zonas de operação:

- pré-aquecimento;
- zona de aquecimento;
- resfriamento.

Fatores que afetam a operação de sinterização [8][10]:

- tamanho e forma da partícula;
- estrutura da partícula;

- densidade verde;
- temperatura;
- tempo;
- composição da partícula.

O cuidado com a atmosfera de sinterização é fundamental para prevenir qualquer reação química entre o compactado a verde e o ambiente. A oxidação é o fenômeno mais importante a ser evitado pela atmosfera. É também função da atmosfera de sinterização remover impurezas presentes, principalmente películas de óxidos superficiais ou contidas nos poros.

Quanto mais rugosidade possuir a partícula de pó metálico, maior sua área superficial. Assim a sinterização será mais eficiente, devido a maior área de contato entre as partículas.

O processo de sinterização é influenciado por diversos parâmetros [9]:

- parâmetro de geometria do sistema;
- parâmetros inerentes do material;
- parâmetros de influência externa tais como pressão aplicada, temperatura, presença de gases, impurezas e oxidação superficial.

Com o decorrer do tempo de sinterização a geometria do sistema sofre constantes alterações. Estas alterações são conhecidas como estágios, que são os seguintes:

- estágio 1 (adesão): simples contato inicial e instantâneo entre as partículas;
- estágio 2 (crescimento do pescoço): Ocorre arredondamento dos poros, mas os mesmos mantêm-se ainda interligados;
- estágio 3 (individualização e esferoidização dos poros): neste estágio, ocorre migração dos contornos de grãos entre as partículas originais pelo crescimento de grão. Por outro lado, os poros continuam a formar uma fase mais ou menos contínua através do agregado.

Após este processo, usualmente, se tem a peça acabada porém pode se ainda recorrer a processos posteriores para beneficiamento, se necessário da peça final.

2.3.3 Características

O conhecimento das propriedades dos compósitos magnéticos macios é de fundamental importância para que se possa entender as vantagens e diminuir as desvantagens deste tipo de material. Quanto as suas características os compósitos magnéticos apresentam diferenças tanto mecânicas como eletromagnéticas quando comparado com os materiais ferromagnéticos convencionais [13].

Resistência Mecânica - como os materiais SMC não podem ser sinterizados a resistência mecânica apresentada por estes materiais estão abaixo dos valores atingidos por aços laminados e ferro sinterizado. As solicitações mecânicas em uma máquina elétrica variam com o peso e a velocidade do rotor. Tipicamente o rotor sofre solicitações de duas fontes, movimento de rotação e do conjugado magnético entre os fluxos do estator e o do rotor. O estator sofre a mesma solicitação de força eletromagnética do conjugado, porém não está girando. Em motores pequenos e girando a baixas rotações nenhuma destas forças será grande. As maiores solicitações nestes casos são concentradas nas condições de produção do motor (bobinagem dos enrolamentos e montagem da máquina). Tipicamente materiais SMC podem atingir valores de 50 a 150 MPa para tensão de ruptura transversal. Estes valores podem ser melhorados dependendo das técnicas utilizadas para obtenção da peça final.

Fluxo Magnético Isotrópico – as características isotrópicas dos materiais SMC devem ser utilizadas na fase de projeto da máquina desejada, assim será possível alcançar melhores resultados e poder decidir o sucesso ou não da pesquisa. Como o fluxo magnético é igual nas três dimensões existe um grande grau de liberdade para posicionar o núcleo magnético onde ele é mais necessitado.

Permeabilidade – a máxima permeabilidade relativa em materiais SMC é significativamente baixa comparada com as dos materiais de aço laminado. A figura 35 mostra um gráfico comparativo entre a permeabilidade relativa de um aço laminado com 3% Si e um SMC Somaloy® da Höganäs em função do campo magnético. No gráfico pode-se notar que a máxima permeabilidade do material laminado é no mínimo dez vezes maior que a do compósito.

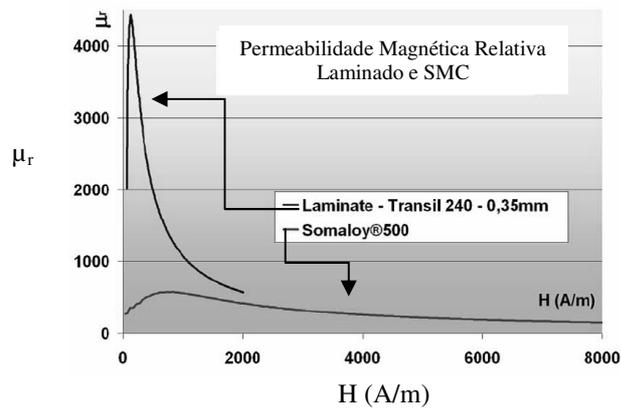


Figura 35 – Permeabilidade relativa x campo magnético para um aço 3% Si laminado e um material SMC [3].

Em materiais SMC o fluxo magnético deve passar por materiais orgânicos e poros, os quais não são ferromagnéticos e por isto diminuem o valor da permeabilidade do compósito. Pelo mesmo motivo a permeabilidade perpendicular ao plano das lâminas, eixo-z, em um pacote de chapas laminadas é menor que a de um material SMC. O baixo valor de permeabilidade do material compósito deve ser levada em conta quando projeta-se uma aplicação para este material. Portanto deve se escolher aplicações onde não seja necessário altos valores de permeabilidade ou o fluxo magnético tridimensional seja importante.

Em máquinas com ímãs permanentes, onde os ímãs podem ser considerados parte do entreferro devido a sua baixíssima permeabilidade, características de permeabilidade relativa alta não são fundamentais. Devido ao grande entreferro o fluxo magnético ficará concentrado nesta região.

Motores universais são outro tipo de máquina onde a permeabilidade não é um fator de decisiva importância. Uma vez que estas máquinas operam sobre altos campos magnéticos é possível o uso de SMC neste tipo de motor, pois a permeabilidade para altos campos magnéticos em um compósito magnéticos macio é parecida com a permeabilidade de aços laminados.

Máquinas de indução por terem um entreferro com dimensões bem reduzidas necessitam de um material com alta permeabilidade para manter a corrente de indução baixa. A baixa permeabilidade dos materiais SMC neste caso arbitriariam uma alta relutância ao caminho do fluxo magnético o que faria necessário o aumento das correntes de armadura. Por este motivo para máquinas de indução os atuais materiais disponíveis não seriam uma boa solução.

Perdas – em máquinas tem-se perdas nos enrolamentos ($I^2.R$) e perdas no material magnético macio. As perdas nos materiais magnéticos macios consistem em perdas por ciclo de histerese e perdas dinâmicas devido ao campo alternado (perdas por correntes parasitas). Comparados com materiais SMC, aços laminados tem baixas perdas por ciclo de histerese, porém apresentam altos valores para perdas por correntes parasitas.

As perdas por curva de histerese aumentam linearmente com o aumento da frequência enquanto que as perdas dinâmicas apresentam uma dependência quadrática. Isto significa que em um determinado momento devido ao aumento da frequência as perdas totais e um material laminado será maior que em um núcleo SMC. Este ponto onde os materiais compósitos apresentam melhores resultados dependem das propriedades magnéticas do material SMC, porém sabe-se que até a algumas centenas de Hz os materiais laminados apresentam melhores resultados que os compósitos magnéticos macios.

Indução Magnética – a saturação magnética dos materiais SMC é diretamente relacionada com a densidade destes compósitos. Em campos magnéticos baixos a indução depende da microestrutura do material (permeabilidade) e pode diferir dependendo da técnica de obtenção do núcleo magnéticos ou do tamanho de grão utilizado. A saturação de materiais SMC de alta densidade pode atingir valores bem próximos aos dos aços laminados. Porém é importante salientar que a maioria das máquinas são projetadas para atuarem em níveis abaixo do ponto de saturação.

2.3.4 Classificação

Materiais magnéticos macios produzidos por metalurgia do pó podem ser divididos em dois grandes grupos [14]:

- Materiais magnéticos macios sinterizados e
- Compósitos magnéticos macios curados.

Materiais magnéticos macios sinterizados – as propriedades magnéticas dos materiais magnéticos macios sinterizados são determinadas pela composição química do material, da densidade e do tamanho do grão do sinterizado. Estes materiais apresentam altos valores de densidade de fluxo magnético. Em geral, a densidade de fluxo magnético do material é fortemente relacionada com a pureza do material e a densidade da peça.

Conseqüentemente, altas densidades de fluxo podem ser obtidas utilizando-se pós de ferro de alta pureza e realizando processos de compactação a quente que tem como resultado materiais de alta densidade.

Em materiais magnéticos sinterizados a adição de uma pequena quantidade de fósforo (P) na matriz de ferro puro tem a propriedade de aumentar o crescimento de grão, o que aumenta a permeabilidade do material.

Em aplicações onde o campo seja variável no tempo os materiais sinterizados apresentam grande perda no núcleo, quase que impossibilitando sua aplicação. A tabela 3 apresenta as propriedades eletromagnéticas de materiais sinterizados.

Tabela 3 - Propriedades eletromagnéticas típicas de ligas por metalurgia do pó [21].

Liga	Resistividade [$\mu\Omega.m$]	Magnetização máxima B _{máx} [T]	Magnetização remanente Br [T]	Força coerciva [Oe]	Máxima permeabilidade
410L	0,9	1,2	4,1	3,5	960
430L	0,93	1,1	4,8	2,7	630
434L	1,04	1,1	5,7	2,3	1300
Fe	0,2	1,6	1,2	1,4	4000
Fe-49Co-2V	0,4	2,0	5,6	3,0	3000
Fe-50Co	0,6	1,7	0,56	2,0	2000
Fe-5Mo	-	1,6	1,3	1,8	2900
Fe-2Ni	0,15	1,5	1,2	1,0	-
Fe-50Ni	0,4	1,3	0,9	0,3	25000
Fe-0,45P	0,21	1,4	1,2	1,1	4000
Fe-0,8P	0,23	1,8	1,3	0,4	6100
Fe-3Si	0,45	1,4	1,3	0,9	4500
Fe-6,5Si	0,81	1,3	1,2	0,3	4000

Materiais magnéticos macios curados – ou ainda materiais compósitos magnéticos macios são materiais utilizados em aplicações eletromagnéticas e podem ser descritos como partículas de pó de ferro, ou suas ligas de ferro, circundadas por material orgânico ou inorgânico isolante. Componentes SMC normalmente podem ser produzidos por técnicas convencionais de metalurgia do pó com ou sem aplicação de novas metodologias, tais como, dupla compactação, compactação a quente, tratamentos térmicos de recozimento, entre outras. Estes materiais compósitos na maioria das aplicações oferecem uma série de vantagens quando comparados com as tradicionais chapas laminadas, como por exemplo: comportamento ferro magnético isotrópico (fluxo tri-dimensional), baixo nível de perdas por correntes parasitas, baixas perdas totais no núcleo a média e alta frequência, possibilidade de

melhorias nas características térmicas da máquina, flexibilidade no formato dos núcleos magnéticos e possível redução de peso e dos custos de produção.

Existem dois tipos básicos de materiais SMC:

- Compósitos magnéticos revestidos – são partículas de ferro com tamanho médio de 100 μ m revestidas por materiais orgânicos ou inorgânicos isolantes. A figura 36 mostra uma partícula de ferro recoberta com isolante orgânico.

- Compósitos magnéticos não revestidos – são partículas de pó de ferro ou suas ligas misturadas com uma determinada quantidade de resinas que podem ser termofixas ou termoplásticas.

A principal diferença destes compósitos para o material sinterizado é que para estes casos não ocorre o processo de sinterização e sim a cura das resinas que tem como finalidade agregar as partículas de ferro. O material orgânico é o responsável pelas propriedades mecânicas da peça. Além das propriedades mecânicas as resinas servem como material isolante elétrico diminuindo drasticamente as perdas por correntes parasitas no núcleo do motor o que possibilita o uso destes materiais em máquinas de fluxo e campo alternado.

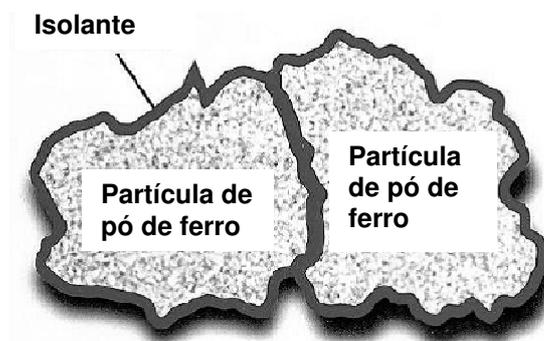


Figura 36 – Partícula de ferro com revestimento de material orgânico, Somaloy® Höganäs [3].

2.3.5 Ligas Ferromagnéticas

A escolha correta do pó metálico é um quesito importante para o sucesso do projeto. É comum que as propriedades magnéticas dos pós sejam relacionadas com a composição química da liga e o tratamento térmico realizado na peça.

As ligas magnéticas macias devem combinar o máximo das propriedades listadas a seguir:

Baixas perdas por ciclo de histerese;

Baixas perdas por correntes parasitas;

Alta permeabilidade a baixos campos;

Alto valor de saturação e

Características magnéticas uniformes.

Ferro Puro - os ferros elétricos são ligas baixo carbono que oferecem um pouco mais de permeabilidade magnética do que ligas de ferro cobalto. É usado largamente em relés, solenóides e como material magnético em equipamentos a vácuo, particularmente em equipamento de alimentação de corrente contínua.

Para aplicações como material magnético macio é importante levar em conta a pureza do ferro. Materiais com níveis de pureza de 0,01% em peso de carbono, menos de 0,01% em peso de enxofre e oxigênio bem como hidrogênio em proporções menores que 0,06% são produzidos pela Höganäs. A figura 37 apresenta resultados de uma curva de magnetização para dois ferros com diferentes tipos de pureza.

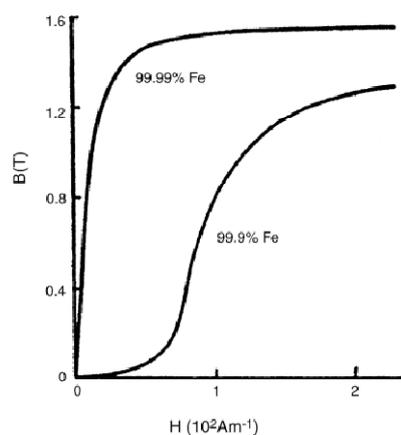


Figura 37 – Curva de magnetização de partículas de ferro com diferente pureza [3].

Ligas Fe-Ni – de todas as ligas ferromagnéticas as de ferro níquel são as que apresentam o maior valor de permeabilidade. Apresentam também os menores valores de

densidade de fluxo. Conseqüentemente são utilizadas em aplicações onde seja de interesse estas duas propriedades. Variando-se a proporção de ferro e níquel na liga obtêm-se propriedades diferentes. Ligas com grande quantidade de níquel têm uma alta permeabilidade enquanto que ligas com baixo valor de níquel apresentam alta resistência elétrica. Ligas de Fe-Ni são usualmente chamadas de permalloys. Existem três variações básicas das ligas ferro níquel. 78%Ni permalloys apresentam altíssima permeabilidade. 65% Ni permalloy apresentam excelente resposta a variações no campo magnético. 50% Ni permalloy apresentam altos valores de fluxo magnético e de saturação magnética ($B_s = 1,6$ Tesla).

Ligas Fe-Si - esta liga possui excelente resistividade elétrica e dureza. A melhor aplicação para este tipo de material é em relés e solenóides. Esta liga oferece uma baixíssima perda por ciclo de histerese, alta permeabilidade e baixo magnetismo residual.

Usualmente utiliza-se uma liga com 6.5% de silício em peso por causa das excelentes propriedades magnéticas desta liga.

Ligas Fe – Co – as ligas ferro cobalto apresentam os maiores valores de saturação magnética. Estas ligas geralmente não apresentam bons valores de permeabilidade magnética e são utilizados em situações onde existe a necessidade de alta saturação magnética e alto valor da densidade do fluxo magnético. Estas ligas são normalmente utilizadas em motores, geradores e transformadores laminados de alta performance.

Influências de uma terceira liga também pode ocorrer. Alguns outros autores citaram misturas com titânio, vanádio, cromo, níquel e cobre, porém nenhum ganho foi encontrado com o uso destas ligas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais Compósitos Magnéticos Macios

3.1.1 Introdução

Para que seja possível a substituição das lâminas eletromagnéticas dos núcleos de máquinas elétricas rotativas por núcleos maciços de compósitos magnéticos macios estes devem atender as seguintes características:

- Alta permeabilidade magnética relativa;
- Baixa coercitividade magnética;
- Alta resistividade elétrica;
- Elevada indução de saturação.
- Dureza e Resistência Mecânica

Para que a partir do processo de metalurgia do pó se obtenha estas características é proposto o estudo de ligas ferro magnéticas combinadas a resinas fenólicas [18].

A obtenção de materiais compósitos magnéticos a partir da metalurgia do pó requer a análise de algumas particularidades. No material que será misturado com o material resinado é necessário material metálico puro ou uma liga pré-ligada. Isto se deve ao fato de que no processo em questão a cura da mistura não iria difundir os metais no caso de se utilizar dois ou mais pós metálicos diferentes na mistura além da resina [19][20] A escolha correta do pó é quesito importante para a pesquisa. É comum que as propriedades magnéticas dos pós sejam relacionadas com a composição química da liga e posterior tratamento térmico.

Os materiais sinterizados de ferro puro são caracterizados por altas perdas e propriedades magnéticas médias. Seu uso é aconselhável principalmente para corrente contínua ou circuitos de excitação magnética permanente, com fluxos magnéticos de médio a alto, devido a sua baixa resistividade elétrica. O ferro puro sinterizado de alta densidade possui saturação magnética e permeabilidades altas, baixa coercitividade, propriedades essenciais para aplicação de corrente contínua [21].

3.1.2 Resinas Termofixas

Segundo dados de fabricantes, existem centenas de tipos de resinas para estas aplicações, ou seja, misturadas a pós metálicos ou cerâmicos e após, curadas, onde existem as seguintes variações:

- Temperatura de cura
- Temperatura de utilização
- Dureza
- Ductilidade
- Resistividade elétrica
- Resistência a vibração

Entre os materiais poliméricos utilizados temos resinas termofixas fenólicas adquiridas por fornecedores sendo estas descritas.

Resina Fenólica HRJ-10236

Esta é uma resina fenólica modificada em pó, tipo Novolaca, que contém hexametileno-tetramina. É indicada principalmente para fabricação de pastilhas de freios, lonas pesadas ou leves e discos de embreagem. A resina HRJ-10236 proporciona médio coeficiente de atrito ao material de fricção, com boa estabilidade térmica e baixo “fading” (perda de atrito por acréscimo de temperatura). Os demais itens, como resistência mecânica, desgaste e recuperação de atrito, são considerados bons. Na área de materiais abrasivos, a HRJ-10236 é utilizada em discos de corte e rebolos em geral. Outra aplicação para esta resina é na área de confecção do disco de alumínio em pó prensado para discos diamantados.

Quadro 1 - Especificações técnicas da resina HRJ-10236.

Fluxo à 125°C	20 - 45 mm
Cura à 154°C	50 - 90 s
Teor de Hexa	7,5 - 8,5 %
Granulometria (M#20)	mín. 97%



Figura 38 – Resina HRJ 10236

Resina Fenólica SBP-128

SBP-128 é uma resina fenólica em pó, tipo Novolaca, que contém hexametilenotetramina. É indicada principalmente para promover dureza, resistência mecânica e melhoria na resistência à abrasão em diversos tipos de elastômeros sintéticos e naturais, utilizados em compostos de cilindros, correias, protetores de borracha para barcos, amortecedores para absorver impacto de pontes na área da construção civil e outros tipos de artefatos de borracha. SBP-128 é recomendada ainda na produção de coletores de motores, materiais de fricção com amianto, como pastilhas de freio e lonas pesadas. Na fabricação de coletores de motores a SBP-128 pode ser aplicada por via úmida, devendo ser dissolvida em alcoóis. Na fabricação de materiais de fricção ou coletores pode ser aplicada por via seca em um misturador para homogeneizar a resina, fibras em gerais e cargas inorgânicas.

Quadro 2- Especificações técnicas da resina SBP-128.

Fluxo à 125°C	15 - 40 mm
Cura à 154°C	30 - 65 s
Teor de Hexa	8,5 - 9,5 %
Granulometria (M#20)	mín. 97%



Figura 39 – Resina SBP 128

3.1.3 Ligas Resinadas

Para caracterização das propriedades eletromagnéticas, propriedades mecânicas e elétricas foram criadas misturas para a confecção de corpos de prova submetidos a ensaios, sendo que esta preparação parte da mistura de pó metálico com resina, compactação da mistura e em seguida a cura do material compactado.

Para obtenção das amostras, os pós foram misturados nas devidas proporções das resinas em percentuais com a nomenclatura Fe-HRJxx, Fe-SBPxx, todas de acordo com o nome comercial das resinas, onde xx representa os percentuais em peso de 0,5%; 1,0%; 1,5%; 2,0%; 2,5% e 3,0%

3.1.4 Projeto de Matrizes

Para avaliação das propriedades físicas de interesse, foram construídas matrizes para obtenção dos corpos de prova, onde a geometria e a utilidade estão relacionadas a seguir:

Corpo de prova na forma de **cilindro**, figura 40. Este corpo de prova foi utilizado para ensaios de dureza e obtenção da curva de escoamento.

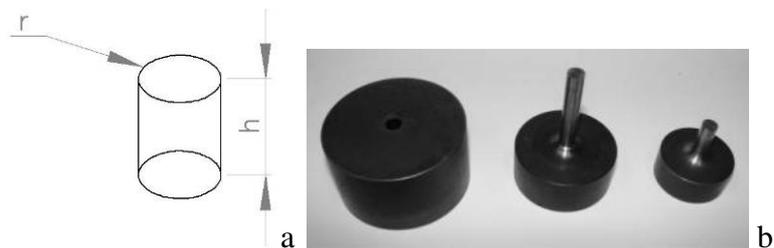


Figura 40 – (a) corpo de prova em forma de cilindro e (b) matriz para obtenção do corpo de prova

Corpo de prova na forma de **paralélepipedo**, figura 41, com comprimento maior que a área da seção transversal. Este corpo de prova foi utilizado para medir a resistividade elétrica.

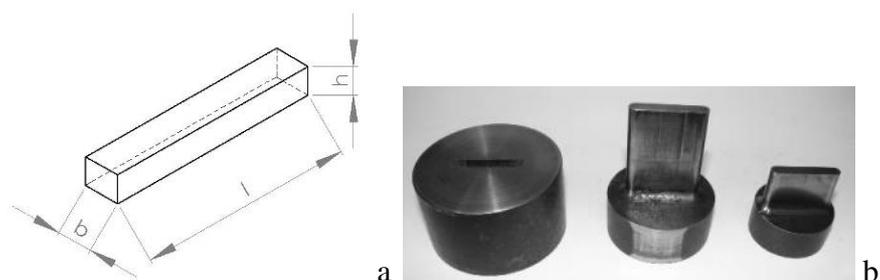


Figura 41 – (a) corpo de prova em forma de paralelepípedo e (b) matriz para obtenção do corpo de prova.

Corpo de prova na forma de **toróide**, figura 42. Este corpo de prova foi utilizado para medição das perdas magnéticas totais por unidade de massa e para obtenção da curva de histerese elementar.



Figura 42 – (a) corpo de prova em forma de toróide e (b) matriz para obtenção do corpo de prova.

3.1.5 Obtenção dos Corpos de Prova

3.1.5.1 Mistura e Compactação

Para obtenção dos corpos de prova, os pós foram pesados nas devidas proporções, e misturados juntamente com as resinas em percentuais de 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 2,5 e 3,0% de resina.

Foi utilizado um misturador convencional tipo cone com esferas, em um tempo de mistura de 20 minutos. A figura 43 mostra fotografias do misturador utilizado.

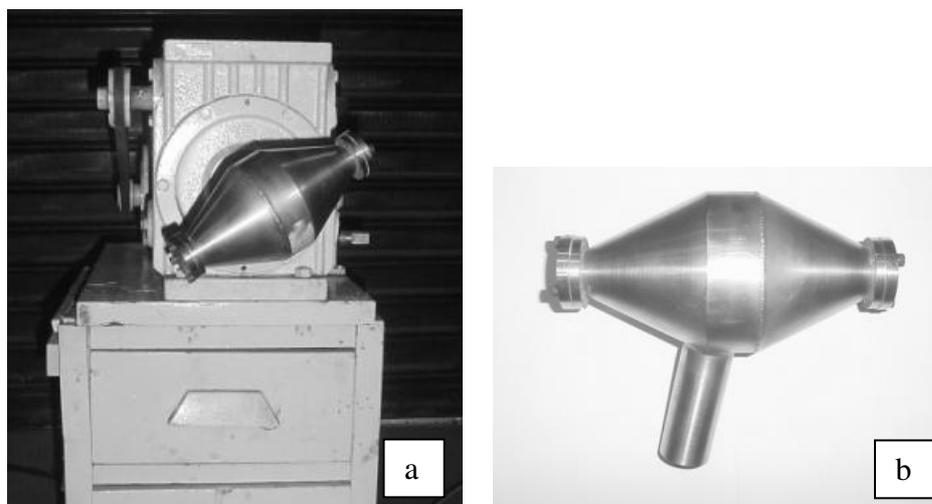


Figura 43 – (a) Máquina de mistura de pós e (b) Misturador utilizado

Os corpos de prova foram compactados a uma pressão de 600 MPa. Considerando as áreas das matrizes, resulta nos valores apresentados pela tabela 4.

Tabela 4 – Valores da pressão de compactação para cada corpo de prova

Forma	Área [cm ²]	Pressão [ton]
Cilindro	0,41	2,46
Paralelepípedo	1,45	8,70
Toróide	3,93	23,58

A compactação dos corpos de prova na forma de cilindros e paralelepípedos foram realizadas em uma máquina universal de ensaios mecânicos marca KRATOS, com capacidade de 100 kN. A figura 44 mostra fotografias desta prensa. Esta prensa possui uma célula de carga, a qual informa no painel, mostrada na figura 45, a força que está sendo aplicada.



Figura 44 – Prensa Kratos



Figura 45 – Painel de controle da prensa Kratos

A figura 46 mostra a fotografia da matriz para confecção do corpos de prova na forma de paralelepípedo montada na prensa Kratos. No processo de compactação, o volume final da peça reduz-se a metade do volume inicial.

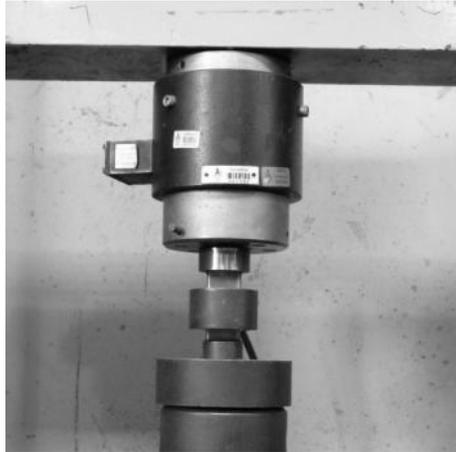


Figura 46 – Fotografia de uma matriz montada na prensa Kratos.

A compactação dos corpos de prova na forma de toróide foram realizadas em uma prensa mecânica marca EKA, com capacidade de 40 toneladas. A figura 47 mostra fotografias desta prensa. O controle de pressão foi realizado através de uma célula de carga conectada ao *data logger* da HBM Spyder, utilizando-se o software Catmann para monitoramento.



Figura 47 – Prensa Eka utilizada na compactação dos toróides.

3.1.5.2 Sinterização dos Corpos de Prova

Como o experimento previa a comparação do motor com núcleos magnéticos feitos de material resinado com um motor convencional e outro obtido através da metalurgia do pó de ferro puro, foi realizada a sinterização destes como segue a seguir, para compactação foram utilizados os mesmos parâmetros das amostras resinadas. A sinterização foi realizada em forno tubular tipo mufla, com atmosfera controlada (pressão atmosférica) e gás marrom (25% Hidrogênio e 75% Nitrogênio). Para uma boa sinterização utiliza-se uma taxa de aquecimento de 15°C por minuto, até a temperatura de 500 graus, onde as peças permanecem por 40 minutos para retirada do lubrificante sólido (estearato de zinco). A seguir a temperatura é

elevada para 1.120° C onde ocorre de fato a sinterização, permanecendo nesta temperatura por 30 minutos. Após as peças permanecem no forno para resfriamento lento ate a temperatura ambiente. A figura 48 mostra a curva de temperatura da sinterização.

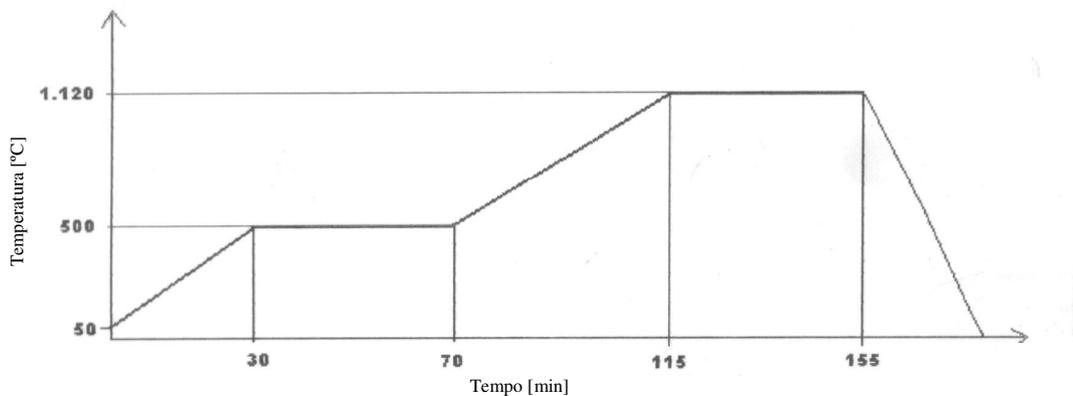


Figura 48 – Patamares de sinterização.

A figura 49 - mostra fotografias do forno utilizado.

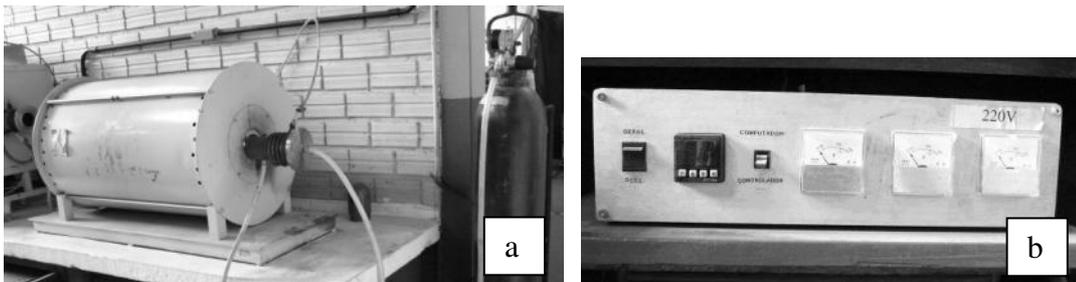


Figura 49 - (a) Forno tubular com atmosfera controlada e (b) controlador do forno.

3.1.5.3 Cura dos Corpos de Prova

A cura da resina dos corpos de prova foi realizada em um forno sem atmosfera controlada, (atmosfera ambiente). De acordo com o fabricante, para uma boa cura das resinas, este processo deve seguir o ciclo com base nas especificações das resinas testadas, onde o ciclo é ilustrado na figura 50, ou seja, aquecimento até 90°C em patamar por 2 minutos, posterior aquecimento a 155°C com patamar de 2 minutos e aquecimento final a 220°C mantendo-se por 2 minutos.

A figura 51 mostra fotografias do forno para cura das resinas, onde pode-se visualizar em (a) câmara, (b) vista frontal e (c) painel de controle.

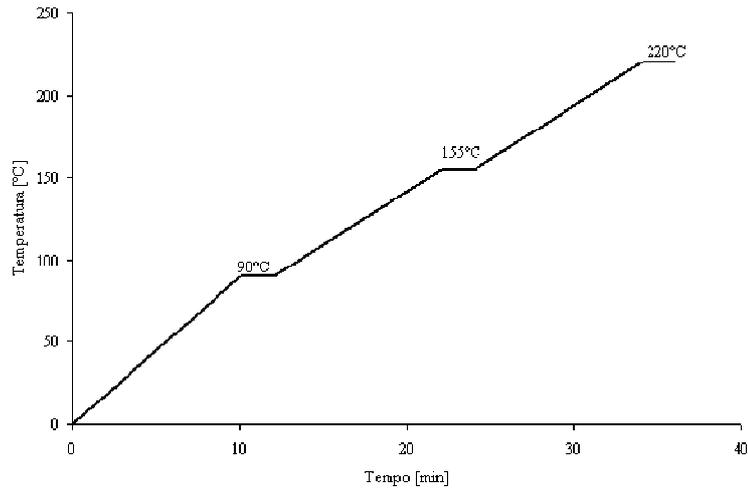


Figura 50 – Ciclo de cura dos corpos de prova.



Figura 51 - Forno para cura das resinas (a) câmara (b) vista frontal (c) painel de controle.

3.1.6 Análise das Propriedades dos Materiais

3.1.6.1. Propriedades Mecânicas

Os ensaios mecânicos são realizados pela aplicação, em um material, de um dos tipos de esforços possíveis (tração, compressão, flexão, torção, cisalhamento e pressão interna), para determinar a resistência do material a cada um desses esforços.

A escolha do ensaio mecânico mais interessante ou mais adequado para cada produto metálico depende da finalidade do material, dos tipos de esforços que esse material vai sofrer e das propriedades mecânicas que se deseja medir. Em geral, existem especificações para todo o tipo de produto fabricado e nestas especificações constam os ensaios mecânicos que devem ser realizados para saber se tal produto está em conformidade com a finalidade proposta.

Além de propriedades eletromagnéticas, para serem utilizadas em núcleo de motores elétricos, as ligas devem ser analisadas segundo suas propriedades mecânicas em virtude de

sua aplicação e a necessidade de suportar os esforços gerados quando a máquina estiver operando.

Nesta etapa as amostras foram submetidas a ensaios de Dureza Brinell e Compressão. O ensaio de Dureza Brinell foi submetido em um durômetro, utilizando endentador tipo esfera de 2,5 mm de diâmetro e carga de 30 kN, figura 52, localizado no LAFUN (Laboratório de Fundição da UFRGS). Este ensaio segue a norma ASTM E 10 (*Standard Test Methods for Brinell Hardness of Metallic Materials*).



Figura 52 – Durômetro do LAFUN (Laboratório de Fundição da UFRGS).

Os ensaios de compressão foram realizados em um Equipamento Universal de Ensaio Mecânicos, marca INSTRON, localizado no LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS), figura 53. Como parâmetro de controle do ensaio, a velocidade utilizada foi 1,5 mm/min. A norma referência é ASTM E9 (*Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*).



Figura 53 – Máquina Universal de Ensaio Mecânicos INSTRON (a) Equipamento de captação de dados (b) detalhe do dispositivo de ensaios.

3.1.6.2 Propriedades Elétricas

A determinação da resistividade das ligas resinadas foi realizada a partir da simples medição da resistência elétrica dos corpos de prova na forma de barras, a partir de um multíteste de alta sensibilidade. Importante salientar que, em última análise, um multíteste ou multímetro mede a resistência elétrica de um corpo a partir da aplicação de uma tensão e medição da corrente pelo próprio dispositivo. A figura 54 apresenta o multíteste utilizado.

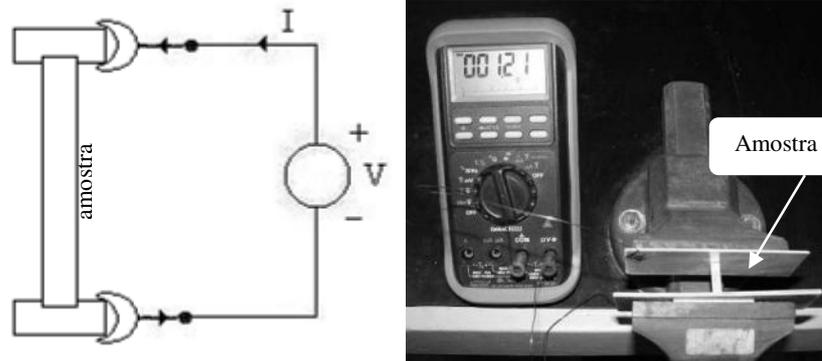


Figura 54 – Desenho esquemático e Multiteste.

Para calcular o valor da resistividade utiliza-se a equação 3.1.

–

Eq. 3.1

Onde, ρ , resistividade elétrica [$\mu\Omega.m$], l , comprimento da barra [m] e A , área da seção transversal da barra [m^2].

3.1.6.3 Propriedades Eletromagnéticas

O objetivo final deste trabalho é a construção de uma máquina elétrica rotativa a partir da avaliação das propriedades físicas de diversas ligas, possíveis de serem utilizadas em núcleos magnéticos de máquinas elétricas trifásicas (motores e/ou geradores elétricos). As propriedades físicas mais importantes são as propriedades magnéticas, obtidas a partir da curva de histerese.

A curva de histerese ou laço de histerese, apresentada na figura 55, é um gráfico que relaciona Indução Magnética B , com Campo Magnético H . As propriedades magnéticas de indução de saturação, permeabilidade magnética relativa, coercitividade e retentividade são analisadas a partir da curva de histerese

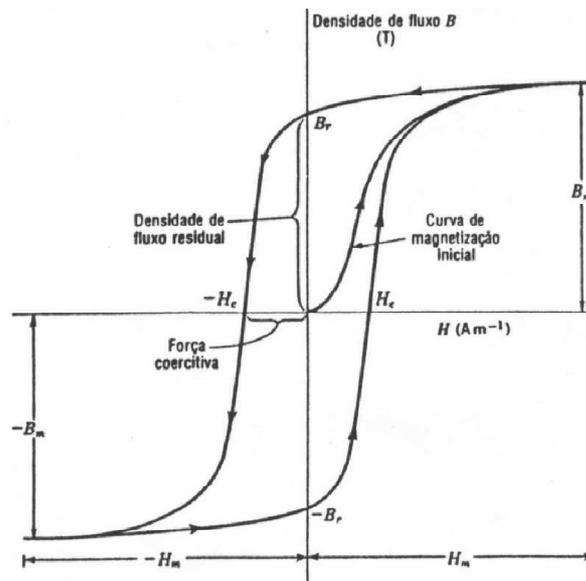


Figura 55 – Curva de Histerese de um material magnético

Esta etapa de caracterização das propriedades magnéticas foi realizada pela obtenção de curvas de histerese das amostras estudadas e da referência (ferro puro sinterizado). O método utilizado segue a norma ASTM A773 (*Standard Test Method for dc Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with dc Electronic Hysteresigraphs*). Este método fornece o procedimento de obtenção de curvas de histerese através de um Traçador de Curvas de Histerese Magnética, modelo TLMP-TCH-14, para determinação de propriedades magnéticas básicas dos materiais na forma de anel.

Para aplicação deste método é necessária a preparação de amostras, que consiste na bobinagem (enrolamento de fios de cobre) de espiras primárias e secundárias no anel, conhecido como Anel de Roland, figura 56. O procedimento consiste em: isolar o anel com filme plástico; enrolamento de espiras secundárias; novo isolamento seguido do enrolamento das espiras primárias.

Entre os parâmetros de controle para as medições das propriedades magnéticas, são necessárias algumas medidas da amostra durante sua preparação, que constam nas tabelas a seguir onde estão relacionados os parâmetros das amostras medidas. Entre estes é preciso calcular a densidades de espiras no enrolamento primário, sendo obtido pela equação 3.1. Os enrolamentos foram padronizados para 270 espiras no secundário e 160 espiras no primário.



Figura 56 - Etapas de preparação das amostras: **(a)** isolamento, **(b)** enrolamento secundário, **(c)** isolamento e **(d)** enrolamento do primário.

$$Densidade.espiras. = \frac{Np}{L} = \frac{Np}{\frac{\pi(d_{ext} + d_{int})}{2}} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde, Np é o número de espiras no enrolamento primário, L é o comprimento do circuito magnético [mm], d_{ext} é o diâmetro externo do anel [mm] e d_{int} representa o diâmetro interno do anel [mm].

Tabela 5 - Parâmetros de medida das amostras da liga Fe-HRJ para ensaio da curva de histerese.

Amostra		Área da seção $\times 10^{-5}$ [m ²]	Densidade [kg/m ³]	Densidade de espiras no primário	Espiras no secundário
Fe-HRJ0,5	A	1,95	66200	1106	270
	B	1,99		1108	
	C	1,88		1107	
Fe-HRJ1,0	A	1,85	66500	1106	270
	B	1,92		1106	
	C	2,02		1105	
Fe-HRJ1,5	A	2,05	66300	1105	270
	B	2,11		1105	
	C	2,11		1105	
Fe-HRJ2,0	A	1,74	65000	1107	270
	B	1,93		1108	
	C	1,80		1107	
Fe-HRJ2,5	A	1,87	63300	1108	270
	B	1,99		1107	
	C	1,85		1107	
Fe-HRJ3,0	A	1,60	62900	1105	270
	B	2,01		1105	
	C	1,97		1106	

Tabela 6 - Parâmetros de medida das amostras da liga Fe-SBP para ensaio da curva de histerese.

Amostra		Área da seção $\times 10^{-5}$ [m ²]	Densidade [kg/m ³]	Densidade de espiras no primário	Espiras no secundário
Fe-SBP0,5	A	2,04	67600	1106	270
	B	1,94		1107	
	C	2,00		1106	
Fe-SBP1,0	A	2,03	67000	1106	270
	B	2,01		1106	
	C	2,07		1107	
Fe-SBP1,5	A	2,03	65800	1106	270
	B	1,97		1107	
	C	1,85		1106	
Fe-SBP2,0	A	1,93	64800	1107	270
	B	1,97		1106	
	C	1,89		1106	
Fe-SBP2,5	A	2,01	64200	1106	270
	B	1,91		1106	
	C	1,84		1106	
Fe-SBP3,0	A	1,67	62700	1106	270
	B	1,93		1104	
	C	1,94		1106	

O TCH é constituído por um amplificador de corrente capaz de magnetizar pequenas amostras mantendo o campo magnetizante senoidal. Um resistor *shunt* fornece uma tensão proporcional à corrente elétrica no enrolamento primário que permite estimar o campo magnetizante H. Um circuito integrador permite gerar um sinal proporcional à indução magnética B. O TCH também permite o registro da curva de histerese, da curva de magnetização CA e estimativa das perdas magnéticas de amostras maiores utilizando fontes externas de magnetização. Um enrolamento secundário isolado deve ser providenciado para realizar a medida da indução magnética.

A obtenção da curva de histerese e as propriedades magnéticas pelo método do TCH são feitas através de um software de aquisição de dados GLB-BH 3.0. Sua interface de obtenção de dados e curvas necessita de parâmetros de controle e medição das propriedades (Tabela 5 e 6). Na figura 58 é demonstrada a interface do software com os parâmetros do ensaio.



Figura 57 - Traçador de Curvas de Histerese (TLMP-TCH-14). (1) interruptor on/off, (2) conector AC/DC, (3) conexão do enrolamento primário e (4) conexão do enrolamento secundário.



Figura 58 - Software de aquisição de dados GLB-BH 3.0 com identificação dos parâmetros de ensaio. (1) Densidade de espiras no primário, (2) espiras no secundário, (3) área da seção transversal, (4) densidade da amostra, (5) corrente aplicada e (6) frequência de medição.

Os parâmetros de controle, resistência no secundário, corrente máxima e frequência são pré-determinadas para cada ensaio. A resistência é medida através de um multíteste para cada amostra, a corrente aplicada é 3A e a frequência é de 60 Hz (frequência da rede elétrica).

3.2 Máquinas Elétricas

Para o conhecimento das propriedades do material magnético macio em um motor foi projetada e construída uma máquina elétrica, na qual o estator e o rotor laminados foram substituídos por blocos maciços de material compósito magnético macio.

Para obtenção dos núcleos magnéticos do servomotor, estator e rotor, foi escolhido o compósito magnético macio que apresentou os melhores resultados nas análises das propriedades dos materiais.

A partir da escolha do material magnético macio que será utilizado, foram pesados os póis, misturados, compactados e curados.

O motor escolhido para os testes comparativos foi o servomotor SWA – 40 da WEG. Os dados deste motor estão no quadro 3.

Quadro 3 – Propriedades do Servomotor SWA – 40 da WEG Motores.

Rotação Nominal	3000	RPM
Torque	1,6	Nm
Pólos	8	
Potência	400	W
Tensão	230	V
Corrente	2	A
Corrente máxima	7,2	A
Fio do estator	1 x 0,45	mm
Espiras por bobina	42	
Camada	Dupla	
Grupos por fase	8	
Ligação	Série	
Comprimento do Estator	40	mm
Entreferro	0,4	mm
Imã	Nd-Fe-B 25	UH

3.2.1 Projeto de Matrizes

Para que a proposta inicial do trabalho fosse atingida é necessária a confecção de matrizes que através de apenas um processo de fabricação entregasse o núcleo magnético em seu formato final.

Para tal foram projetadas e construídas duas matrizes (rotor e estator) conforme a geometria necessária para atender as solicitações eletromagnéticas do servomotor.

Devido a complexidade da seção transversal da matriz do estator, esta exigiu um processo custoso e demorado para sua confecção, a eletroerosão a fio.

Por este motivo o uso das tecnologias da metalurgia do pó para fabricação de motores só é viável economicamente quando existe um alto volume de produção e uma significativa diminuição dos custos de produção.

A figura 59 apresenta a seção transversal do estator e rotor.

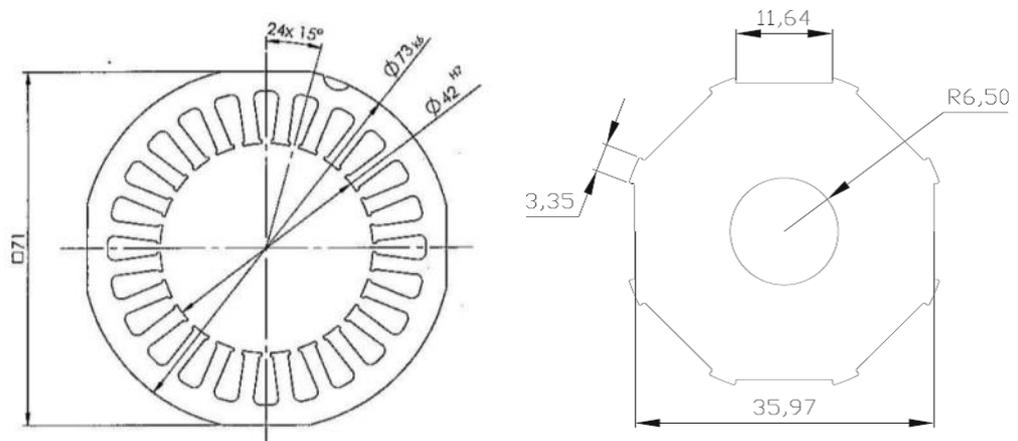
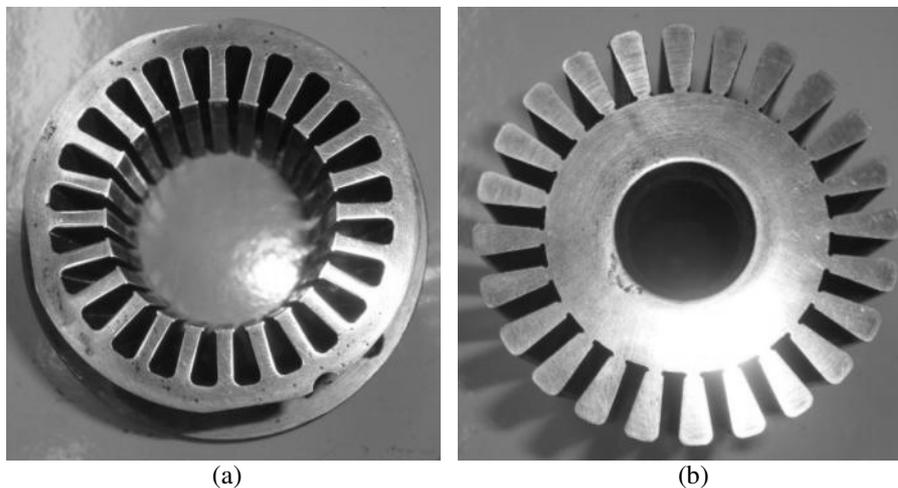


Figura 59 – Secção transversal do estator e rotor do servomotor

As unidades apresentadas nas figuras estão em milímetros

A figura 60 apresenta as matrizes para obtenção do rotor e estator. O rotor apresenta uma geometria menos complexa, tal fato torna fácil o processo de produção da mesma.



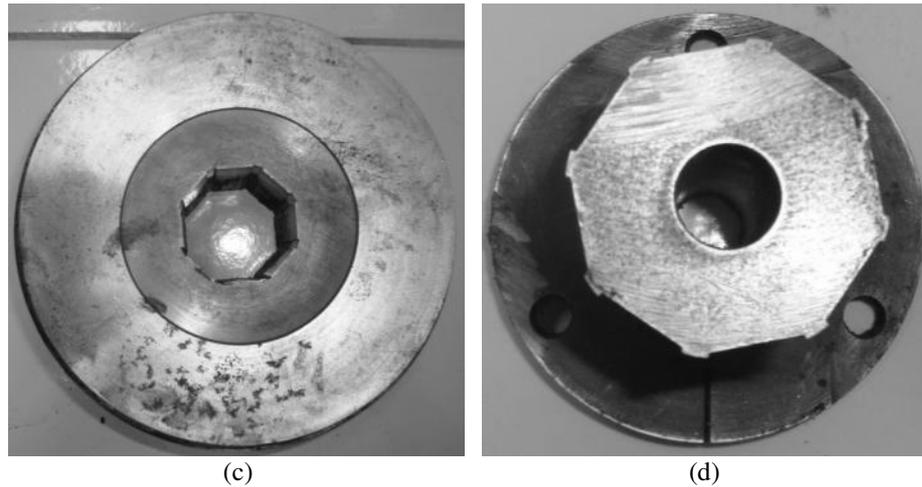


Figura 60 – Matriz para obtenção do (a) (b) estator e do (c) (d) rotor do servomotor.

3.2.2 Obtenção dos Núcleos Magnéticos

Conforme os resultados apresentados nas análises das propriedades eletromagnéticas e mecânicas, a liga que apresenta o melhor conjunto de características é a Fe HRJ 0,5 % (capítulo 4).

Para a confecção dos núcleos magnéticos os pós de Fe e da resina fenólica foram pesados, misturados, compactados e curados formando bolachas maciças de material magnético macio no formato a ser aplicado no servomotor. O material foi pesado conforme as proporções apresentadas na tabela 7, em uma balança da marca Ohaus e misturado em um misturador de dupla concha, mostrado na figura 61, por 20 minutos.

Tabela 7 – Porcentagem de material utilizado na mistura do SMC do servomotor.

	Ferro	Resina HRJ	Total
%	99,5	0,5	100
Massa (g)	4.975	25	5.000



Figura 61- Misturador de dupla concha

Após a mistura, assim como na confecção dos corpos de prova, o material foi compactado a uma pressão de 600 MPa e após isto as peças foram curadas em um forno sem atmosfera controlada conforme o patamar de temperatura da figura 62.

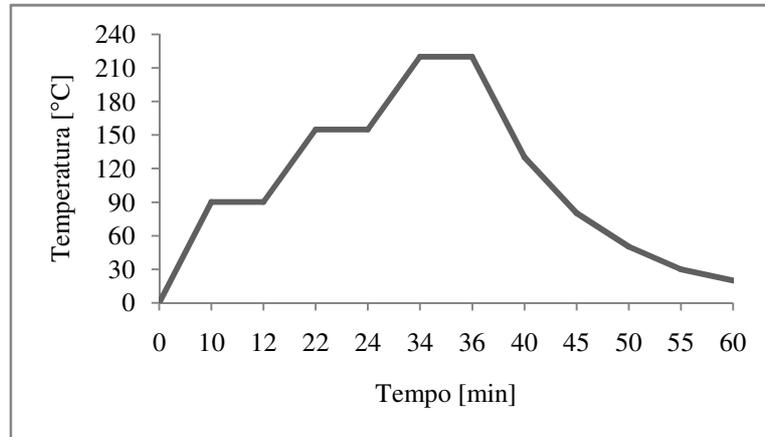


Figura 62 – Ciclo de cura da resina HRJ

3.2.3 Montagem do Servomotor

Para a montagem do servomotor foram seguidos os seguintes passos:

Colagem das bolachas do estator e rotor;

Fixação dos ímãs de Nd-Fe-B do rotor;

Magnetização dos ímãs do rotor;

Bobinagem do estator;

Inserção do estator na carcaça do servomotor e do rotor no eixo;

Montagem de rolamentos, borrachas isolantes, tampas, conectores e ajustes finais do servomotor.

As bolachas de material magnético macio, após curadas, apresentam a altura de 10 mm. Portanto foi necessário agrupar quatro bolachas para que se atingisse a altura desejada do rotor e estator, 40 mm. A figura 63 mostra as bolachas na forma prontas para o processo de cura.

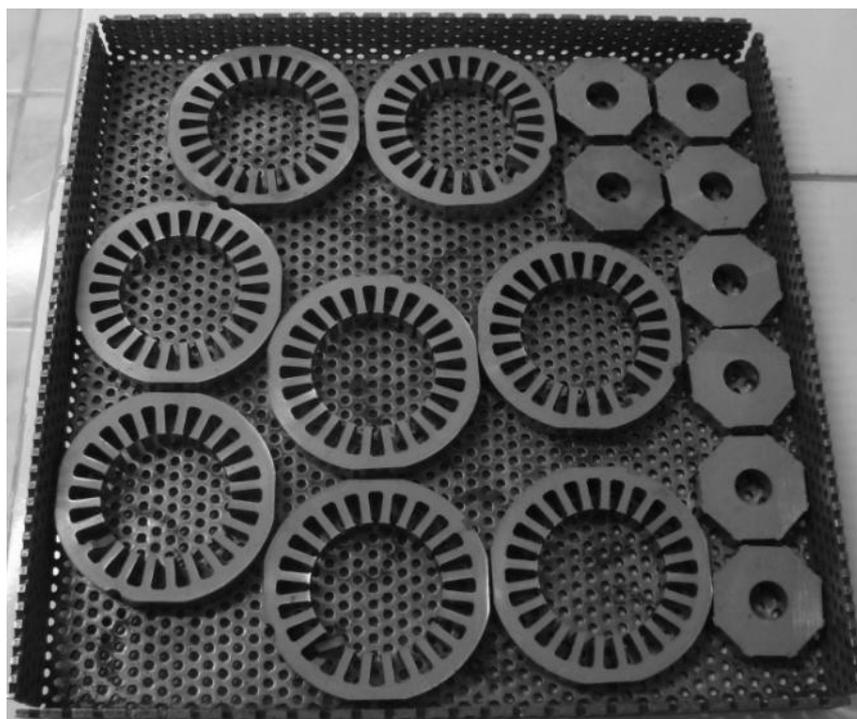


Figura 63 – Bolachas do estator e rotor com 10 mm de altura antes do processo de cura.

As bolachas foram fixadas umas as outras utilizando-se um adesivo bicomponente. Após a fixação foram colocados os imãs no rotor para posterior magnetização, como pode ser visto na figura 64.

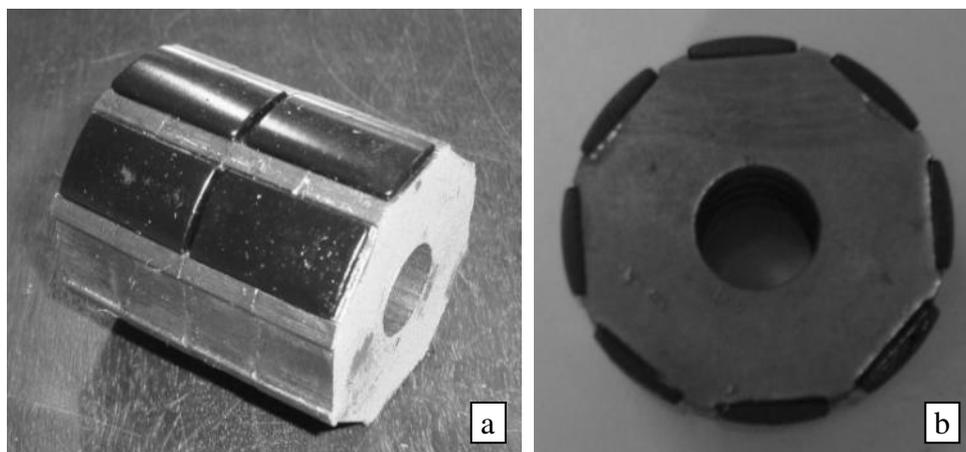


Figura 64 – (a) processo de montagem dos imãs de Nd-Fe-B no rotor do sermotor e (b) perfil do rotor após montagem dos imãs.

Para a magnetização dos imãs do rotor foi projetado e montado um magnetizador este tem como princípio de funcionamento um conjunto de espiras na qual é aplicada uma fonte de corrente contínua que fornecerá ao imã um fluxo magnético suficiente para saturar este material e magnetizá-lo. Para diferenciar pólos norte e sul é somente necessária a inversão do

sentido da corrente nas bobinas do magnetizador. A figura 65 apresenta o magnetizador e o rotor com ímãs sendo magnetizados.

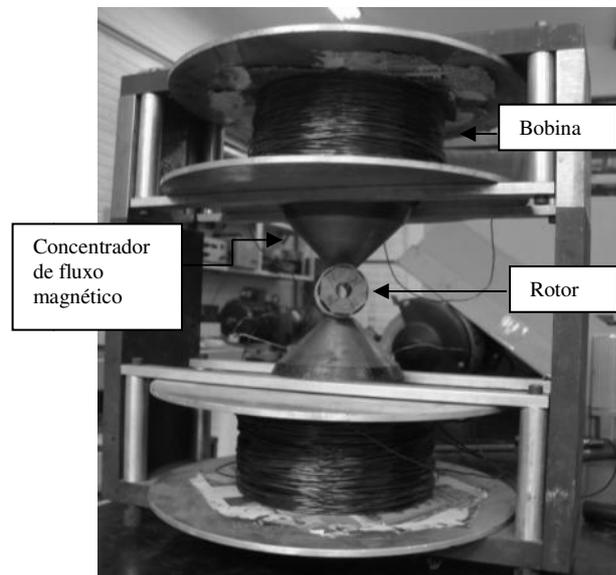


Figura 65 – Magnetizador de ímãs do servomotor.

Após a montagem do estator é necessário a bobinagem, este processo é feito seguindo o esquema de bobinagem apresentado na figura 66. Após a bobinagem, figura 67, é aplicado nas bobinas e no estator uma resina protetora a qual fornecerá para a estrutura proteção mecânica e isolamento elétrico. A figura 68 mostra o processo de montagem do estator na carcaça do motor.

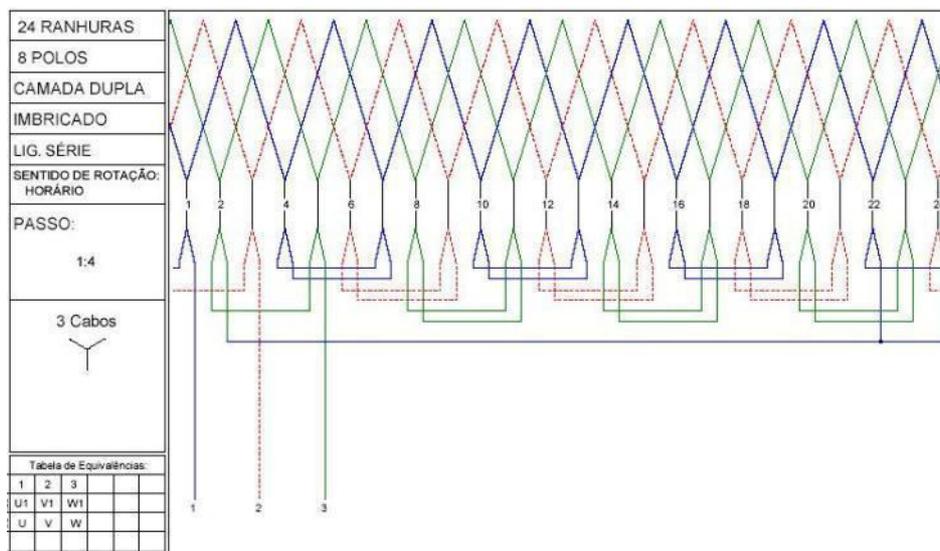


Figura 66 – Esquemático para bobinagem do estator, fornecido pela WEG motores.



Figura 67 – Estator bobinado.

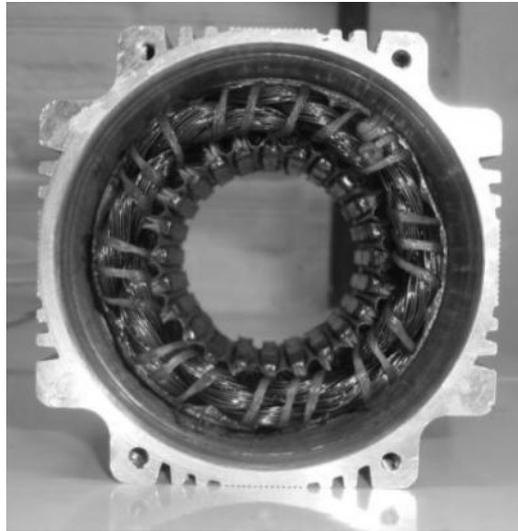


Figura 68 – Montagem do estator na carcaça.

Com os núcleos magnéticos prontos deve se proceder a montagem de todas as partes do motor. A figura 69 apresenta a fotografia do motor desmontado com todas as partes constituintes.

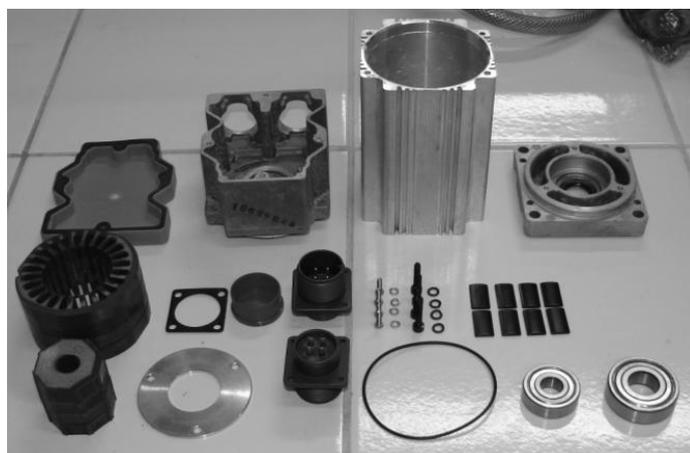


Figura 69 – Componentes do servomotor SWA-40.

3.2.4 Bancada de testes de máquinas elétricas

Para atingir o objetivo final deste trabalho, que é a comparação entre a máquina elétrica com núcleos magnéticos resinados e uma máquina elétrica convencional (as quais chamaremos respectivamente servomotor resinado e servomotor convencional) foi desenvolvida uma bancada de testes que permite a avaliação da tensão induzida nas bobinas do estator das máquinas elétricas.

Para que fosse possível a realização deste teste, as máquinas elétricas foram testadas como geradores elétricos. Apesar do teste da máquina elétrica ter sido elaborado como um teste de gerador o objetivo final deste trabalho é o desenvolvimento de um servomotor. O objetivo de propor o teste das máquinas elétricas como geradores elétricos era o de facilitar a obtenção dos resultados e a análise sobre as principais características desejadas do material magnético macio desenvolvido, as perdas magnéticas e a influência da baixa permeabilidade magnética. Para tal, um torque mecânico foi aplicado ao eixo do servomotor, o qual está ligado ao rotor com ímãs permanentes e a tensão induzida de linha nas bobinas do estator foi lida.

Um motor trifásico de indução alimentado através de um inversor de frequência foi o responsável pelo fornecimento do torque mecânico na ponta de eixo do servomotor Estes foram conectados através de um acoplamento. O inversor de frequência foi utilizado por dois motivos:

- garantir que os mesmos parâmetros fossem utilizados nos testes dos dois servomotores (servomotor convencional e resinado).
- gerar diferentes rotações no eixo dos servomotores para que fosse possível verificar o resultado para diferentes frequências de operação.

Em um primeiro momento os testes foram realizados com os enrolamentos do estator em aberto para verificar o comportamento de ambas as máquinas sem carga.

Neste teste a frequência de saída do inversor que controla a máquina de indução trifásica variou de 20 a 60 Hz com incrementos de 10 Hz e o valor da tensão induzida na saída dos servomotores foi lida.

No segundo teste, no qual foi conectado uma carga trifásica de 40W nas saídas do servomotor, ajustou-se o inversor para 60 Hz e os valores de tensão em cima de uma das cargas foi medido.

O quadro 4 apresenta as propriedades dos equipamentos utilizados nos testes das máquinas elétricas.

Para que fosse possível a leitura dos valores e a visualização da senoide de saída foi conectado aos enrolamentos do estator do servomotor um osciloscópio.

Quadro 4 – Especificações dos equipamentos constituintes da bancada de testes.

Equipamento	Especificação	Valor	Unidade
Inversor de Frequência Siemens	Tensão de entrada	208 – 240	V
	Frequência de entrada	47 – 63	Hz
	Corrente	8,3 – 14,4	A
	Tensão de Saída	0 – tensão de entrada	V
	Frequência de Saída	0 – 400	Hz
	Corrente de Saída	7,4	A
Motor de Indução Trifásico WEG	Potência Nominal	370	W
	Rotações	1680	RPM
	Tensão de Entrada	220(Δ)/380(Y)	V
	Corrente Nominal	2.04/1.18	A
	cos ϕ	0,70	
Osciloscópio Agilent	Frequência máxima	100	MHz
	Leitura da entrada	2000	1/s
	Tensão máxima	300	V
	Canais	2	

A figura 70 apresenta a bancada de testes montada no Laboratório de Conversão Eletromecânica de Energia da Pontifícia Universidade Católica.

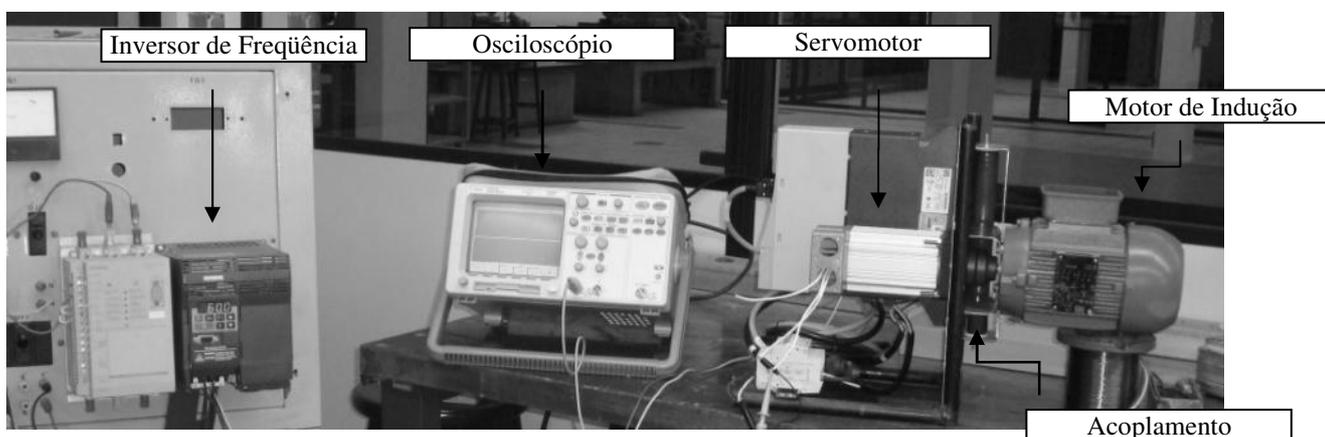


Figura 70 – Bancada de testes do servomotor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Materiais Compósitos Magnéticos Macios

O trabalho realizado é a caracterização de um material desenvolvido para aplicação como núcleo de máquinas elétricas. No desenvolvimento deste material foram utilizadas várias técnicas para avaliação do mesmo. Com base em referências bibliográficas, além dos materiais a serem desenvolvidos, os resultados obtidos da caracterização das ligas resinadas são comparados com as propriedades de ferro sinterizado, sendo estas descritas na tabela 8 para propriedades eletromagnéticas [22] e na tabela 9 para propriedades mecânicas, estas medidas foram realizadas pelo mesmo procedimento utilizado para a caracterização das ligas resinadas [23].

Tabela 8 - Propriedades eletromagnéticas de interesse de ferro sinterizado.

Liga	B_{max}		B_r		H_c		μ_r	Resistividade [$\mu\Omega.m$]
	[T]	[kG]	[T]	[kG]	[A/m]	[Oe]		
Ferro sinterizado	1,14	11,4	0,96	9,6	131	1,65	2900	0,14
	1,36	13,6	1,18	11,8	127	1,6	3700	0,12
	1,47	14,7	1,29	12,9	119	1,5	4700	0,11

Tabela 9- Medidas das propriedades mecânicas do ferro sinterizado.

Liga	Densidade [g/cm ³]		Dureza Brinell	Tensão de Compressão [MPa]	Deformação [mm/mm]	Módulo Elástico [MPa]
	verde	sinterizado				
Ferro sinterizado	6,84	6,87	65	639,12	0,4796	2316

4.1.1 Propriedades Mecânicas

As máquinas elétricas em uso são submetidas a cargas, que além de exercer um torque resistivo contrário, podem resultar em vibração no sistema carga-máquina. Estas ligas estudadas devem apresentar comportamentos mecânicos compatíveis e necessários aos esforços quando a máquina estiver operando.

Entre as propriedades mecânicas analisadas, foram obtidos dados de Dureza Brinell, tabela 10 e resistência a compressão, tabela 11 e tabela 12. Estas medidas são comparadas com ensaios feitos em amostras de ferro puro sinterizado, sendo estas confeccionadas e caracterizadas da mesma forma que as ligas resinadas. Estes ensaios mecânicos foram

realizados com três amostras para cada liga visando obter um desvio de medidas para cada resultado.

Tabela 10 - Medidas de Dureza Brinell das amostras estudadas.

Liga	Dureza Brinell de acordo com o teor de resina					
	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%	3,0%
Fe-HRJ	101	97	97	97	95	81
Fe-SBP	103	104	97	95	109	84

Tabela 11 - Medidas do ensaio de compressão das amostras da liga Fe-HRJ.

Propriedades	Teor de resina					
	0,5 %	1,0 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %	3,0 %
Força máxima [N]	9209	9896	5004	11319	10382	10920
Módulo Elástico [MPa]	7452	7085	5254	10124	11533	9321
Tensão de Compressão [MPa]	227	245	123	280	257	243
Deformação [mm/mm]	0,0639	0,0624	0,0564	0,0730	0,0575	0,0667

Tabela 12 - Medidas do ensaio de compressão das amostras da liga Fe-SBP.

Propriedades	Teor de resina					
	0,5 %	1,0 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %	3,0 %
Força máxima [N]	10146	10291	9942	10056	10374	9899
Módulo Elástico [MPa]	10196	9690	15603	16364	9284	9265
Tensão de Compressão [MPa]	250	254	205	208	257	244
Deformação [mm/mm]	0,0450	0,0449	0,0312	0,0314	0,0466	0,0441

A aplicação de um material como componente do núcleo de máquinas elétricas exige que este apresente propriedades compatíveis como dureza e ductilidade apropriadas. Para avaliação das propriedades mecânicas, o ensaio de compressão é realizado com a finalidade de caracterizar seu comportamento em relação ao tipo de fratura e mensurar sua resistência mecânica.

Os dados apresentados nas tabelas mostram os valores de resistência a compressão e módulo elástico do material, sendo estas propriedades relevantes para caracterizar um material com comportamento frágil. Este comportamento é considerado pelo fato de estar sendo utilizado um material resinado como base mecânica e os resultados comprovam seu comportamento, tanto em valores como no aspecto de fratura apresentado.

O gráfico da figura 71 faz uma relação do módulo de elasticidade do material em relação ao teor de resina, e o gráfico da figura 72 relaciona a deformação sofrida pelo material em função do teor de resina.

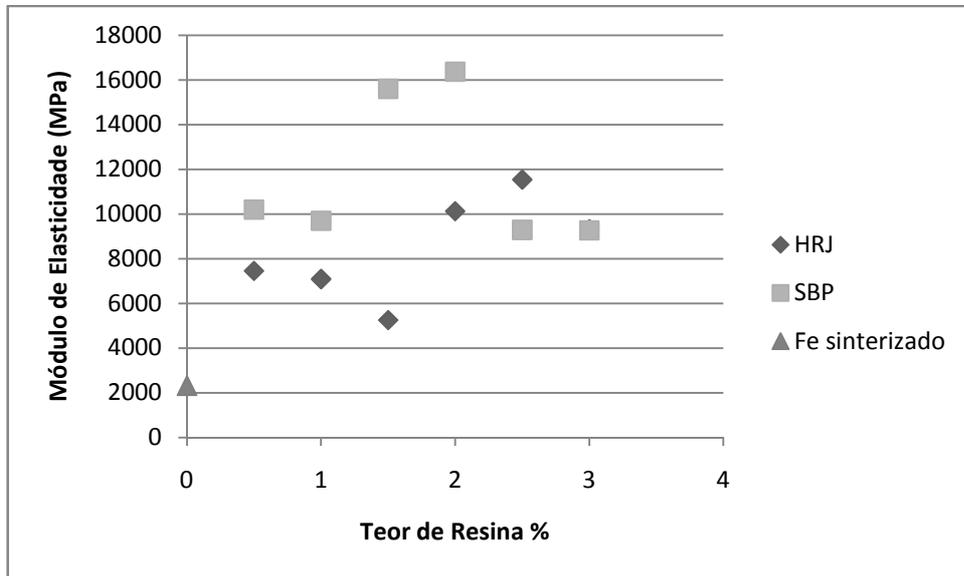


Figura 71 - Gráfico relacionando o módulo elástico em função do teor de resina.

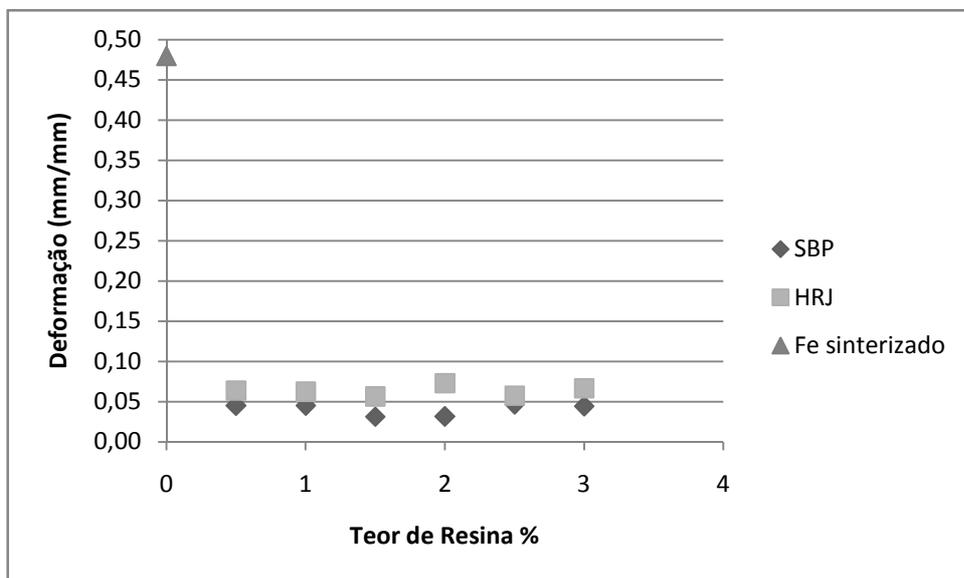


Figura 72 - Gráfico relacionando deformação à compressão em função do teor de resina.

Também é feita uma relação de dureza do material em função do teor de resina, figura 73, caracterizando o comportamento mecânico pelo comportamento elástico do material, onde todos os valores de dureza são maiores que do material referência, ferro puro sinterizado.

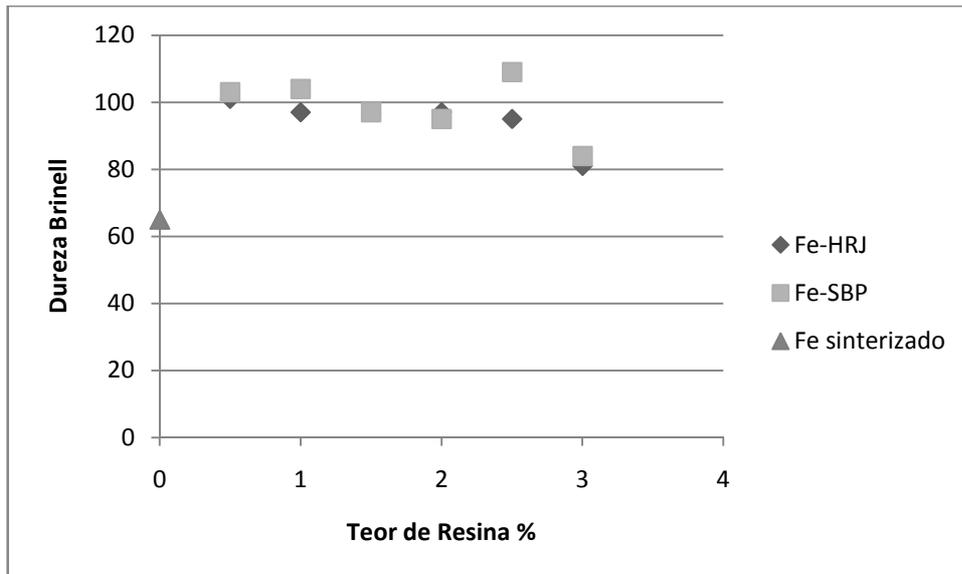


Figura 73 - Gráfico relacionando Dureza Brinell em função do teor de resina.

Para materiais onde a ductilidade é muito pequena, a propriedade mais importante é o limite de resistência à compressão, que difere em valor do limite de resistência à tração, sendo geralmente maior que esse. O limite de resistência à compressão é calculado pela carga máxima dividida pela secção original do corpo de prova. No caso de materiais frágeis, o ensaio de compressão pode ser efetuado numa própria peça acabada, obtendo-se assim apenas a carga de ruptura, desde que a peça caiba entre as placas da máquina. A figura 74(a) mostra um corpo de prova de um material dúctil (cobre, por exemplo) completamente deformado. Por outro lado, um material frágil, como ferro fundido cinzento, não tem deformação lateral apreciável e a ruptura ocorre por cisalhamento e escorregamento, ao longo de um plano inclinado de aproximadamente 45°, conforme mostra a figura 74(b).

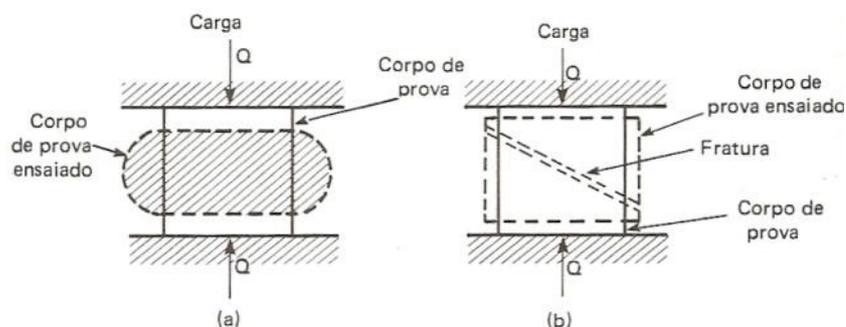


Figura 74 - Ensaio de compressão em (a) material dúctil, deformação sem ruptura, e (b) material frágil, ruptura sem deformação lateral [24].

Para caracterizar o material de comportamento frágil, utilizou-se a foto da fratura sofrida no ensaio de compressão, figura 75, sendo este um comportamento de materiais de características frágeis.

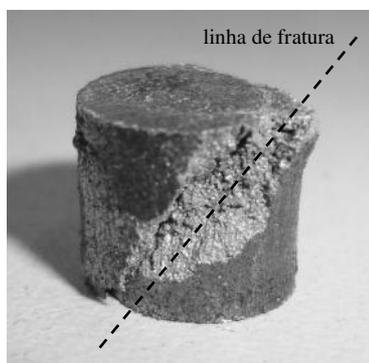


Figura 75 - Amostra resinada após ensaio de compressão identificando o comportamento da fratura.

Como bases de informação das propriedades mecânicas utilizam-se dados literários de resina fenólica do tipo Novolaca (como a utilizada neste trabalho). Através destes dados, constata-se que este tipo de resina apresenta módulo elástico com valores na faixa de 5,3GPa a 8,0GPa [25] e sua tensão de compressão fica na faixa de 117 a 179MPa [26]. Portanto é possível afirmar que o material estudado é característico de um material frágil pelo fato de que neste caso o agente mecânico é a resina e não a parte metálica do compósito. Sendo assim, a resina é considerada a matriz do compósito em estudo, onde é o responsável pelas características mecânicas de estabilidade dimensional e geométrica.

Como os materiais resinados não são sinterizados a resistência mecânica apresentada por estes materiais está abaixo de valores atingidos por aços laminados e ferro sinterizado. As solicitações mecânicas em uma máquina elétrica variam com o peso e a velocidade do rotor. Tipicamente o rotor sofre solicitações de duas fontes, movimento de rotação e do conjugado magnético entre os fluxos do estator e do rotor. O estator sofre a mesma solicitação de força eletromagnética do conjugado, porém não está em movimento. Em motores pequenos e girando a baixas rotações nenhuma destas forças será grande. As maiores solicitações nestes casos são concentradas nas condições de produção do motor (bobinagem dos enrolamentos e montagem da máquina). Geralmente os SMC's podem atingir valores de 50 a 150 MPa de tensão de ruptura transversal. Estes valores podem ser melhorados dependendo das técnicas utilizadas para obtenção da peça final.

4.1.2 Propriedades Elétricas

A determinação da resistividade das ligas resinadas foi realizada a partir da simples medição da resistência elétrica das amostras na forma de barras, a partir de um multiteste de alta sensibilidade. A **Error! Reference source not found.** 13 mostra os valores medidos de resistência elétrica e os parâmetros para o cálculo da resistividade a partir da equação 3.1. Para obtenção destes valores foram feitas medições de três amostras para cada liga obtendo uma média para demonstração dos resultados.

Tabela 13 - Valores de resistência elétrica, parâmetros dimensionais e resistividade elétrica das ligas resinadas.

Amostra	Resistência [Ω]	Área da seção [mm ²]	Comprimento [mm]	Resistividade [$\mu\Omega.m$]
Fe-HRJ0,5	3,3	12,0	25,0	1608
Fe-HRJ1,0	2,6	12,0	25,0	1248
Fe-HRJ1,5	3,6	12,0	25,0	1728
Fe-HRJ2,0	8,0	12,0	25,0	3864
Fe-HRJ2,5	6,4	12,0	25,0	3072
Fe-HRJ3,0	16,7	12,0	25,0	8040
Fe-SBP0,5	4,2	20,1	21,0	4048
Fe-SBP1,0	2,2	12,0	25,0	1056
Fe-SBP1,5	6,0	12,0	25,0	2880
Fe-SBP2,0	5,8	12,0	25,0	2784
Fe-SBP2,5	9,2	12,0	25,0	4416
Fe-SBP3,0	13,7	12,0	25,0	6576

O gráfico da figura 76 mostra o comportamento da resistividade elétrica das ligas em função do teor de resina para cada liga. Estes dados são comparados com a referência, ferro puro sinterizado, que apresenta valores de resistividade elétrica entre 0,11 e 0,2 $\mu\Omega.m$ [21][22].

Os resultados são comparados com as características do ferro puro sinterizado, sendo que suas propriedades eletromagnéticas são obtidas da mesma forma descrita para este trabalho e a amostra é confeccionada através do processo de compactação e posterior sinterização.

Neste trabalho é visada a obtenção de um material adequado para uso como núcleo magnético. Portanto, é essencial a medição das propriedades físicas de interesse. Através dos

resultados obtidos observa-se o comportamento da resistividade elétrica em função do teor de resina, onde esse aumenta com o aumento deste teor.

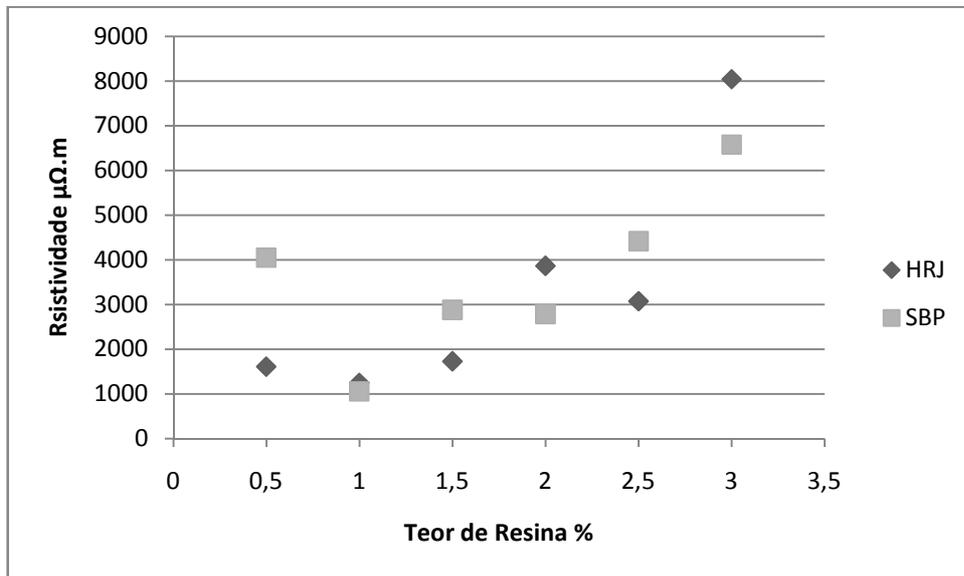


Figura 76 - Gráfico comparativo da resistividade elétrica em função do teor de resina.

Na maioria dos casos, a resistividade de um elemento metálico aumenta quando são adicionadas impurezas, uma vez que estas impurezas provocam distorções no reticulado cristalino. Por esta razão, as maiores resistividades são obtidas em ligas compostas de dois ou mais materiais. O material resinado tem função de revestimento orgânico nas partículas de pó de ferro, que produz também elevada resistividade elétrica [27].

Tanto o estator como o rotor são construídos usualmente com chapas laminadas e isoladas, uma vez que, este isolamento entre chapas restringe a circulação de correntes induzidas. As perdas por correntes induzidas ou parasitas em um núcleo maciço são consideravelmente maiores que as perdas em núcleos obtidos a partir de chapas isoladas eletricamente. Mas a redução das correntes induzidas pode ser obtida pelo aumento da resistividade elétrica do material, uma vez que, resistividade elétrica e corrente elétrica são grandezas físicas inversamente proporcionais, sendo neste caso possível de obter máquinas elétricas de alto rendimento. Outra questão a ser relacionada com a influência da alta resistividade elétrica é o fato de estas ligas estudadas apresentarem grande redução de perdas magnéticas, onde pode ser observado na relação da figura 77.

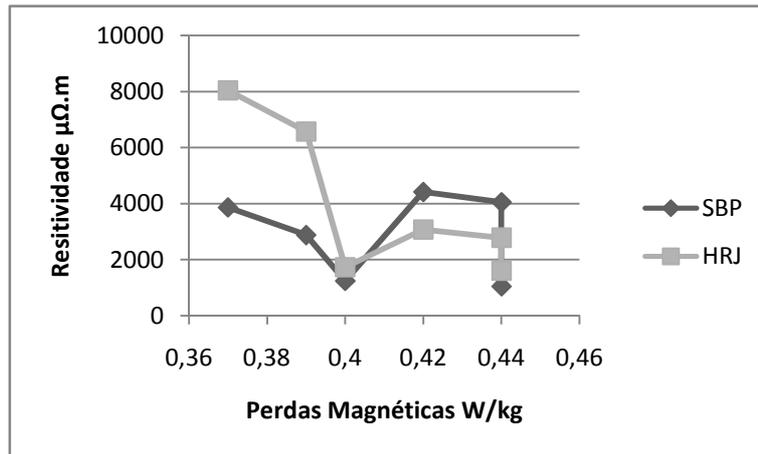


Figura 77 – Gráfico comparativo das perdas magnéticas em função da resistividade elétrica.

É importante salientar que parâmetros de preparação das amostras influenciam nos resultados em questão, como granulometria da matéria-prima, pressão de compactação e ciclo de cura.

4.1.3 Propriedades Magnéticas

A caracterização das propriedades magnéticas de interesse parte da obtenção das curvas de histerese para cada liga resinada em comparação com os dados de ferro puro sinterizado. Como dados relevantes, constam permeabilidade magnética, indução de saturação e perdas magnéticas, estas relacionadas com retentividade e coercitividade. Nas figuras de número 79 a 90 seguem as curvas de histerese de cada grupo de liga resinada em comparação com a curva de ferro sinterizado, figura 78, considerando a variação no teor de resina. Nas curvas das figuras 78 a 90 o eixo y representa a indução magnética em Tesla e o eixo x a intensidade de campo magnético em Ampêres por metro

Ferro sinterizado

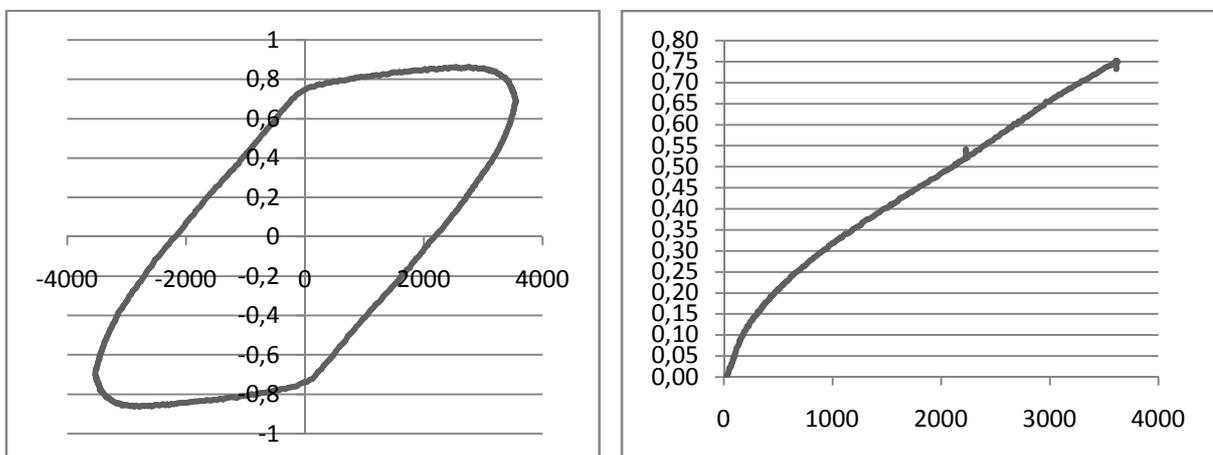


Figura 78 – Curvas de Magnetização e histerese do ferro sinterizado.

Fe HRJ 0,5

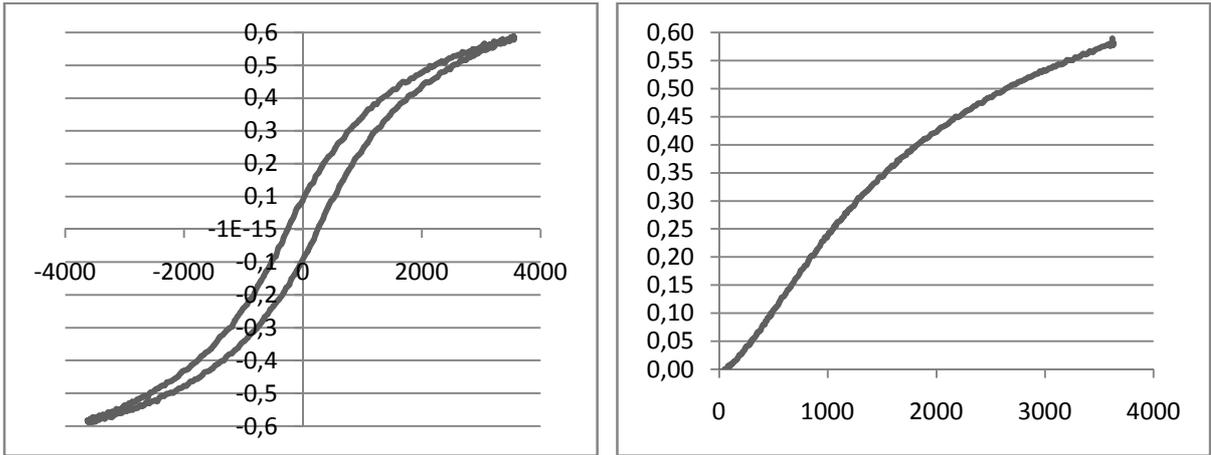


Figura 79 - Curvas de Magnetização e histerese da liga HRJ 0,5.

Ferro HRJ 1,0

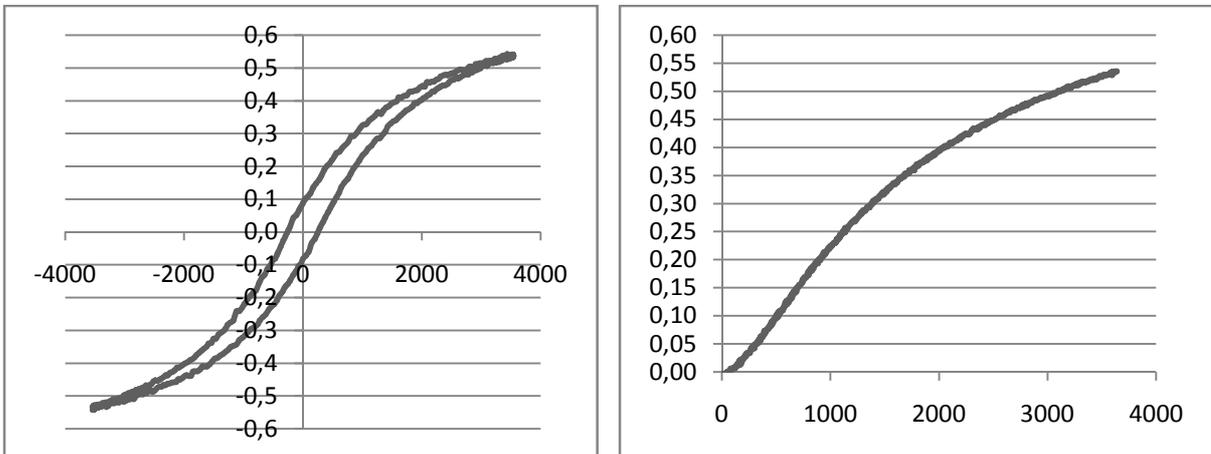


Figura 80- Curvas de Magnetização e histerese da liga HRJ 1,0.

Ferro HRJ 1,5

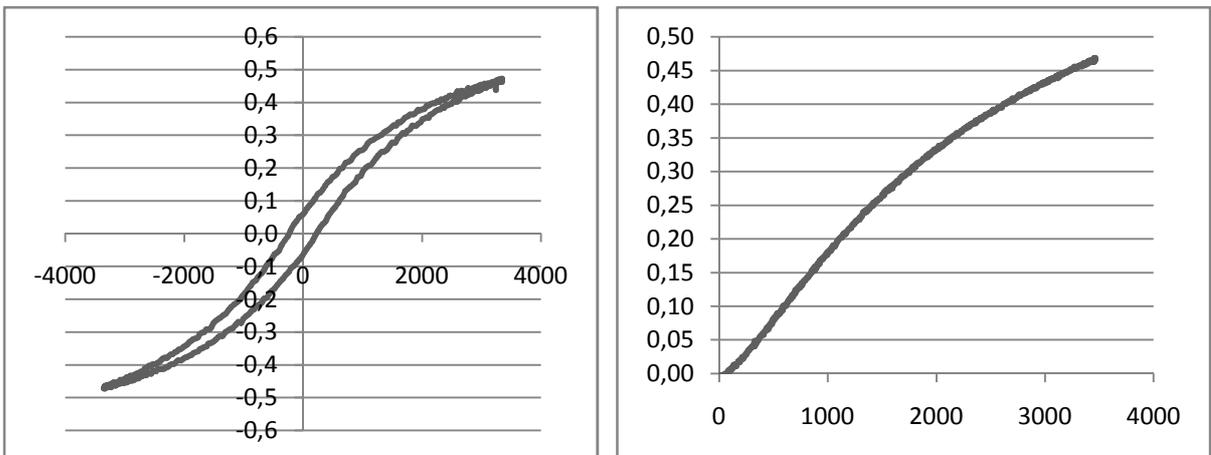


Figura 81- Curvas de Magnetização e histerese da liga HRJ 1,5.

Fe HRJ 2,0

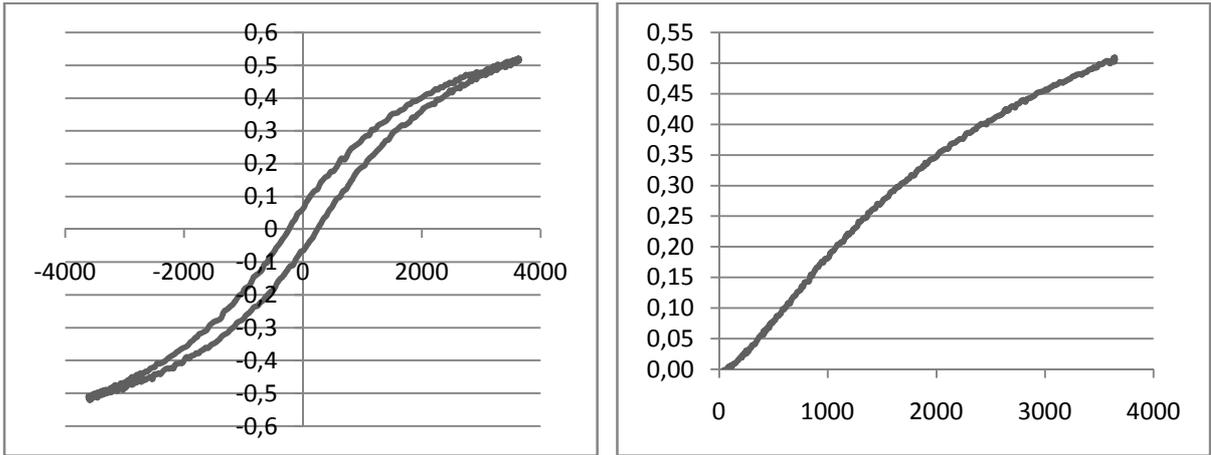


Figura 82- Curvas de Magnetização e histerese da liga HRJ 2,0.

Fe HRJ 2,5

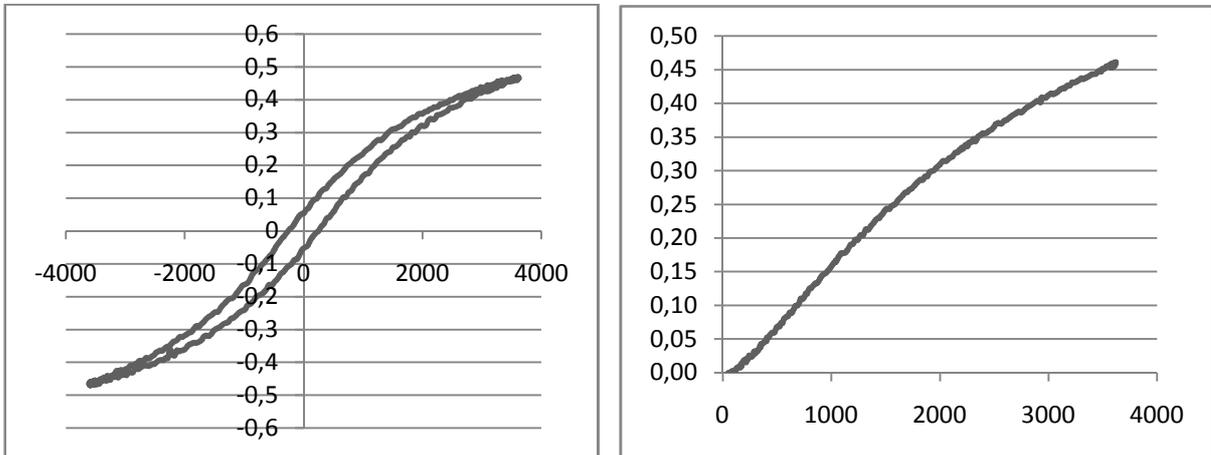


Figura 83- Curvas de Magnetização e histerese da liga HRJ 2,5.

Fe HRJ 3,0

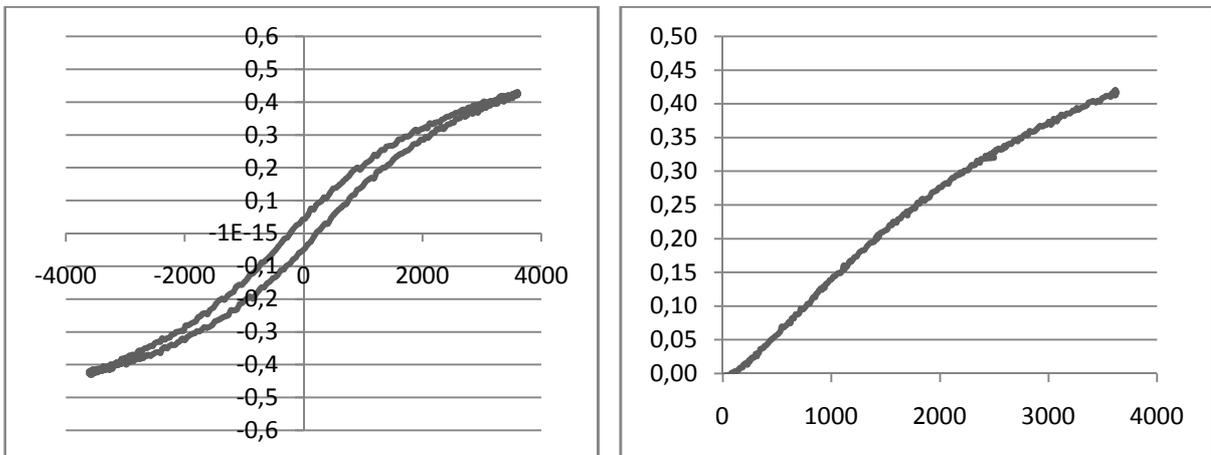


Figura 84- Curvas de Magnetização e histerese da liga HRJ 3,0.

Ferro SBP 0,5

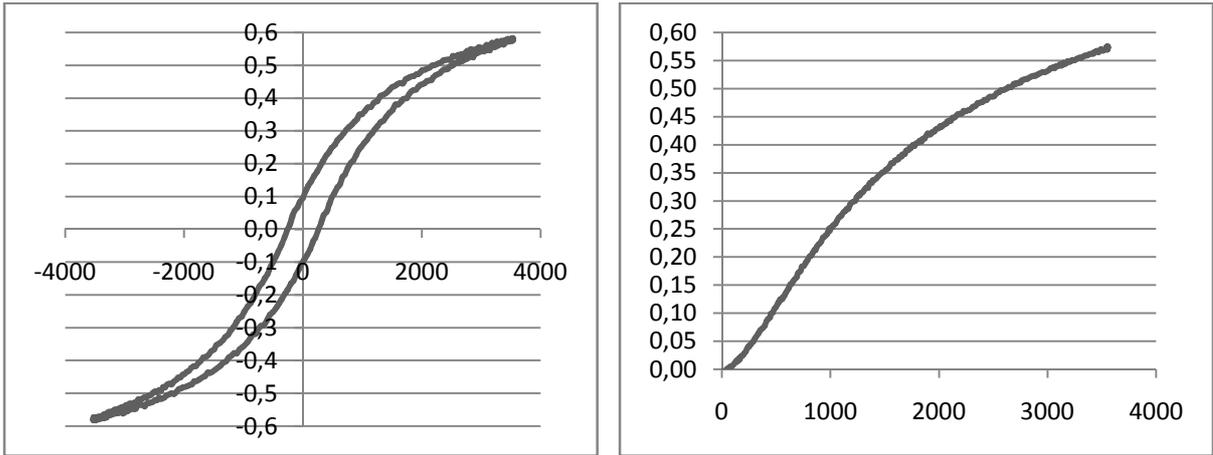


Figura 85- Curvas de Magnetização e histerese da liga SBP 0,5.

Ferro SBP 1,0

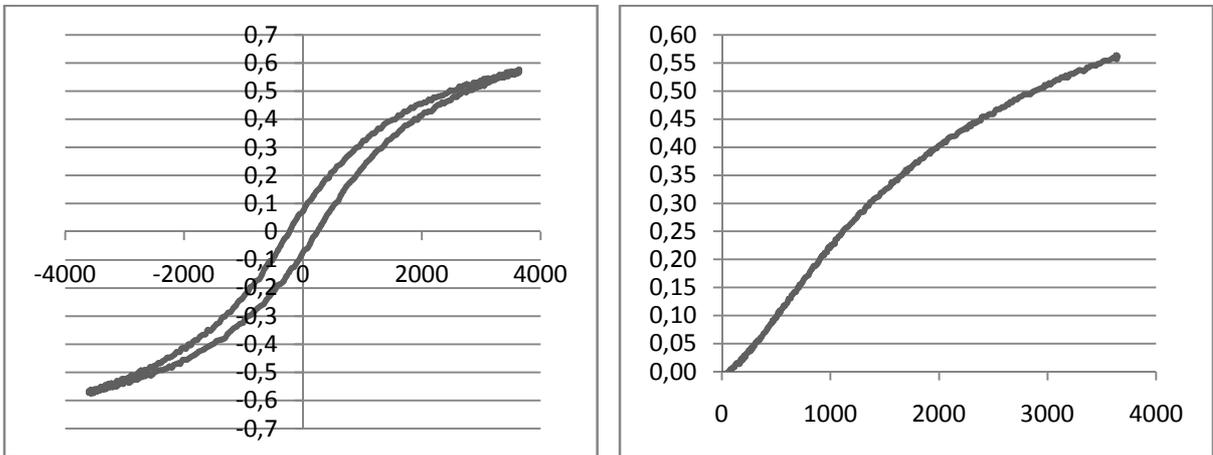


Figura 86 Curvas de Magnetização e histerese da liga SBP 1,0.

Fe SBP 1,5

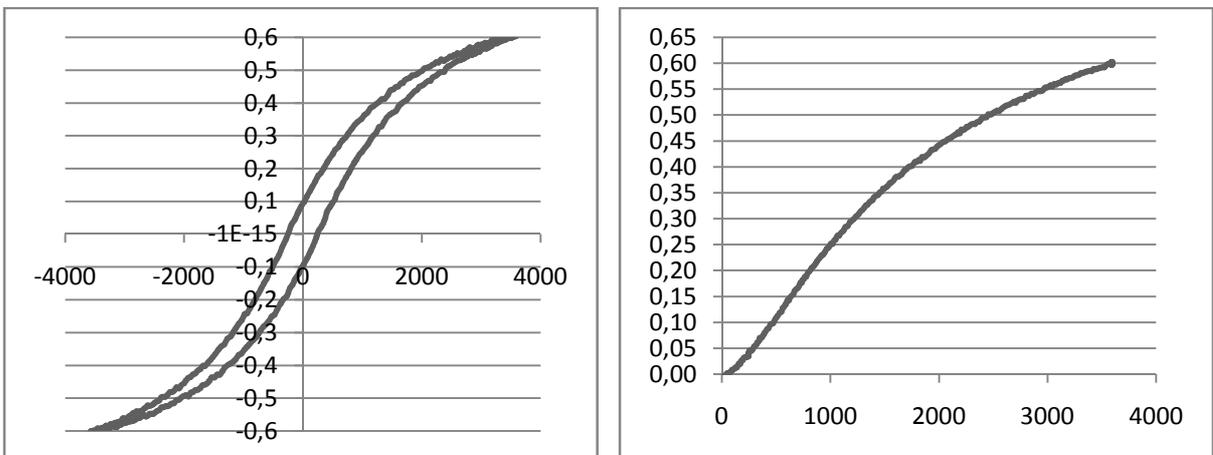


Figura 87 Curvas de Magnetização e histerese da liga SBP 1,5.

Fe SBP 2,0

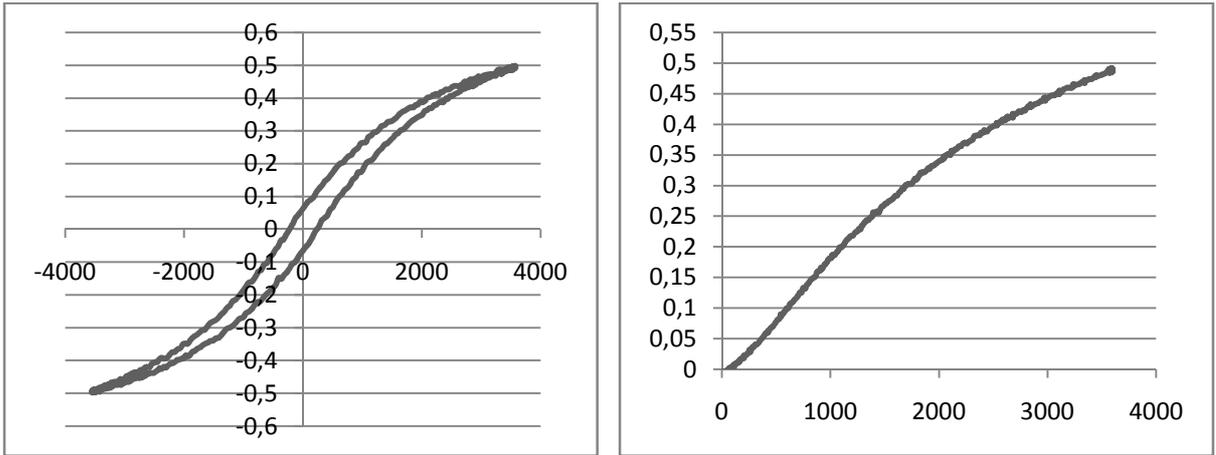


Figura 88 - Curvas de Magnetização e histerese da liga SBP 2,0.

Fe SBP 2,5

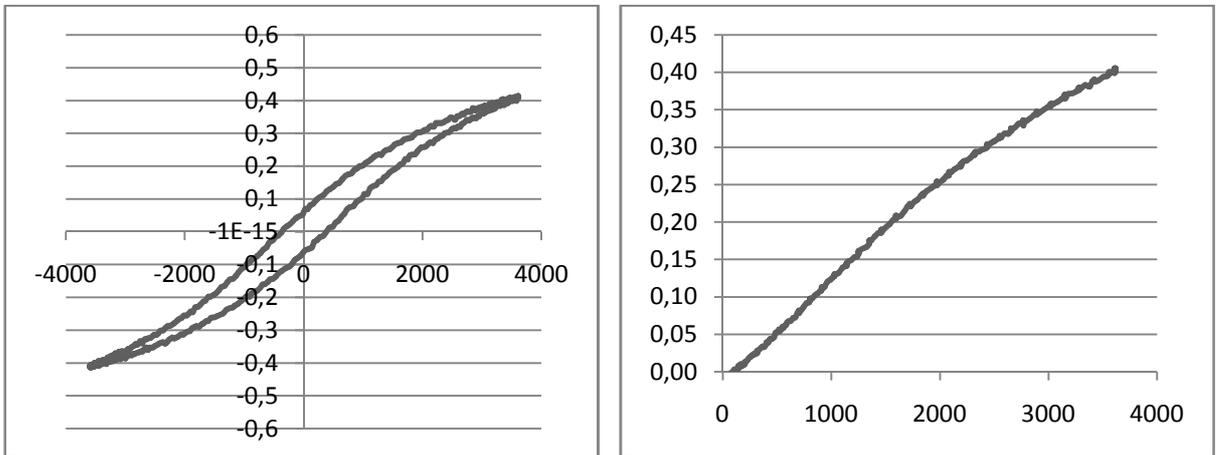


Figura 89 Curvas de Magnetização e histerese da liga SBP 2,5.

Ferro SBP 3,0

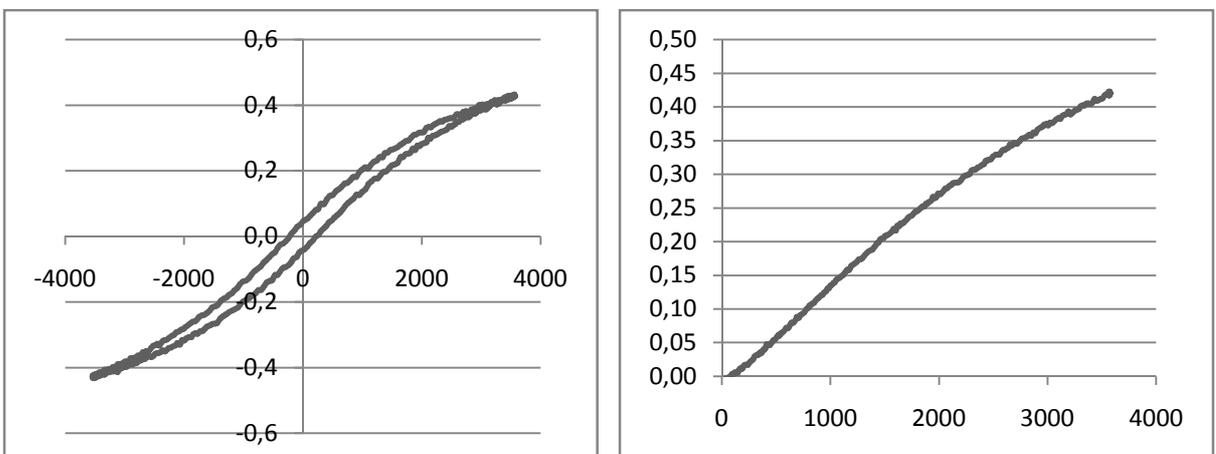


Figura 90 – Curvas de Magnetização e histerese da liga SBP 3,0.

Tabela 14 – Propriedades Magnéticas das Ligas estudadas

Amostra	H_c (B=0) (A/m)	B_r (H =0) (T)	B_s (T)	Campo Magnético para o valor B_s (A/m)	Perdas Magnéticas (W/kg)	Permeabilidade Relativa
Fe sinterizado	2178	0,74	0,86	2480	5,87	468
Fe-HRJ 0,5	258	0,090	0,58	3612	0,45	187
Fe-HRJ 1,0	240	0,087	0,54	3525	0,40	180
Fe-HRJ 1,5	220	0,056	0,47	3319	0,31	144
Fe-HRJ 2,0	235	0,062	0,51	3494	0,37	149
Fe-HRJ 2,5	249	0,052	0,47	3582	0,34	129
Fe-HRJ 3,0	227	0,042	0,428	3586	0,29	114
Fe-SBP 0,5	250	0,095	0,57	3509	0,44	176
Fe-SBP 1,0	247	0,092	0,60	3458	0,44	199
Fe-SBP 1,5	236	0,072	0,57	3537	0,39	179
Fe-SBP 2,0	230	0,062	0,49	3497	0,35	145
Fe-SBP 2,5	382	0,060	0,41	3544	0,42	103
Fe-SBP 3,0	225	0,044	0,43	3498	0,29	91

Como observado, as ligas desenvolvidas apresentam um comportamento semelhante e uma diferença significativa em relação à referência. Estas têm baixa indução de saturação e baixas perdas magnéticas.

Como a maioria destas aplicações se dá em máquinas excitadas em corrente alternada, surge um segundo parâmetro de seleção desses materiais: as perdas magnéticas. Como a magnetização não é um fenômeno reversível, o processo cíclico de magnetizar e desmagnetizar a cada 1/120 de segundo leva à ocorrência de histerese. Devido à existência da histerese magnética e da circulação de correntes elétricas parasitas induzidas pela variação do

fluxo magnético no interior do material, o processo de inversão da magnetização ocorre com dissipação de energia, ou seja, com perdas magnéticas, também conhecidas como perdas no ferro. Dada a importância do rendimento energético das máquinas, e como as perdas no ferro costumam ser muito maiores que as perdas no cobre, as perdas magnéticas são o principal parâmetro técnico de seleção e controle desses materiais. A figura 91 mostra curvas de histerese obtidas para ferro sinterizado e uma liga resinada, quando excitada a 60 Hz. A área interna dessa curva é a energia dissipada por ciclo, em W/kg. Conforme se reduz a frequência, a energia dissipada diminui, ou seja, a curva se estreita, mas a área nunca vai a zero. A curva de histerese mais estreita, nas mesmas figuras, foi traçada em 20s, ou seja, numa frequência da ordem de 0,05 Hz. Isso mostra que, mesmo em condições quase-estáticas, existe uma histerese e energia dissipada no processo. Essa é a chamada parcela histerética das perdas magnéticas.

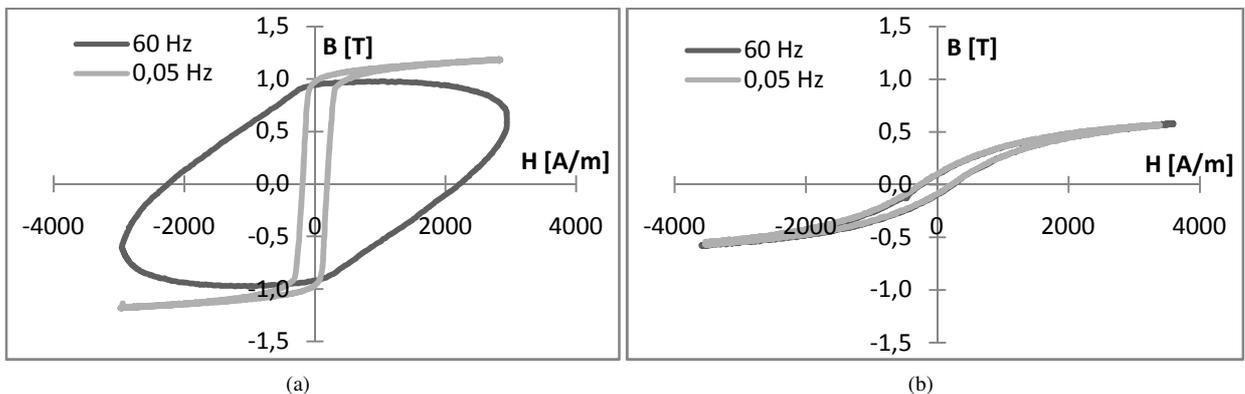


Figura 91 - Comparação de curvas de histerese determinadas na condição quase estática e a 60 Hz, para (a) ferro puro sinterizado e (b) liga resinada Fe-SBP1,5.

As figuras 92, 93, e 94 apresentam relações entre o teor de resina e as propriedades magnéticas mais importantes para os materiais, as quais se desejam aplicar em núcleos de máquinas elétricas.

Elevada Permeabilidade Magnética, quanto maior a permeabilidade magnética das ligas, menor o campo magnético no núcleo e maior o campo no entreferro (espaço localizado entre o estator e rotor em um motor). Em uma máquina elétrica rotativa o entreferro deve apresentar o maior campo magnético possível, isto porque o torque desenvolvido pela máquina elétrica é proporcional ao fluxo magnético no entreferro. Pode-se notar através dos valores apresentados pelos testes que a cada um por cento de resina que se adiciona a liga a permeabilidade diminui em torno de 27% para as ligas SBP e 23% para as ligas HRJ. A permeabilidade apresentada pelas ligas resinadas (SMC) ficou em torno de 10 vezes menor do que os valores apresentadas como referência na tabela 8, porém para o ferro sinterizado

operando nas mesmas condições das ligas resinadas o valor apresentado da permeabilidade relativa é de 468, aproximadamente duas vezes maior que os valores das ligas desenvolvidas neste estudo. O uso de materiais como o Permallyoy com permeabilidade de até 25000, tabela 3, poderia resolver o problema na baixa permeabilidade relativa dos compósitos magnéticos macios. O estudo de obtenção de materiais pré ligados na forma de pó ou a possibilidade de aquisição de partículas de ligas ferromagnéticas conhecidas facilitaria a pesquisa de materiais magnéticos macios.

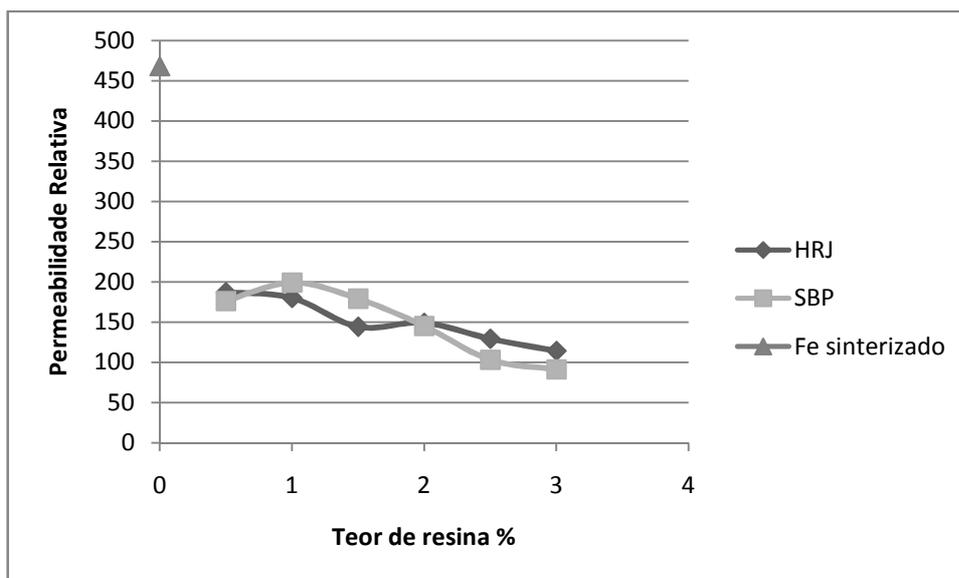


Figura 92 – Gráfico comparativo do teor de resina e da permeabilidade

Valores de baixa coercitividade e retentividade magnética dão ao material uma baixa perda por ciclo de histerese. Sendo que máquinas elétricas trabalham sobre fluxos alternados de campo magnético as perdas por ciclo de histerese devem ser os mais baixos possíveis, pois estes são inversamente proporcionais ao rendimento da máquina. As perdas por ciclo de histerese são calculadas pela área interna da curva de histerese. Conforme a curva da Figura 93 pode se notar que com o aumento no valor de resina ocorre a queda no valor de perdas magnéticas. As perdas magnéticas estão relacionadas as perdas por correntes parasitas e por perdas de histerese, tendo em vista que o material apresenta uma baixa indução fato que contribui para a formação de uma menor área no laço de histerese e também a alta resistividade o que contribui para a dificuldade do surgimento de correntes parasitas era previsível que as perdas magnéticas estariam bem abaixo dos valores apresentados por materiais sem a presença de resina, da tabela 14, ferro sinterizado apresenta um valor de 5,87W/kg aproximadamente 25 vezes maior do que as perdas magnéticas em compostos magnéticos macios.

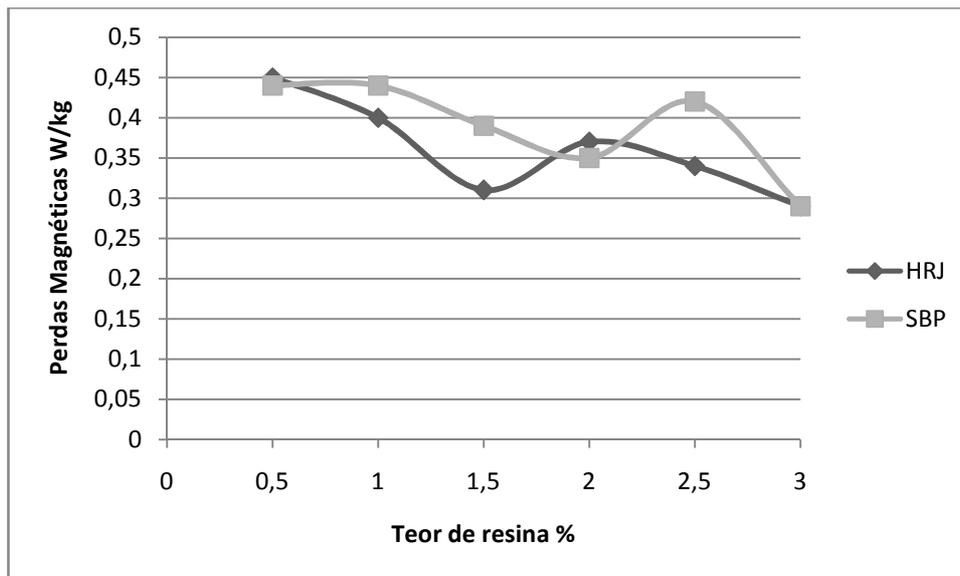


Figura 93 - Gráfico comparativo teor de resina e perdas magnéticas

Quanto maior a indução de saturação maior será o fluxo no entreferro. A saturação magnética limita a indução, ou seja, aquela região da curva de histerese do material onde mesmo com o aumento do campo magnético o fluxo magnético não se altera. Notou-se que com o acréscimo de resina ocorria a diminuição do valor de indução de saturação. Assim como para a permeabilidade o desenvolvimento de ligas com valores nominais maiores de indução de saturação podem auxiliar na melhoria dos resultados. Verificando-se o gráfico da figura 94, pode-se notar que o valor da máxima indução ficou em torno de 42% abaixo do valor do ferro sinterizado, o que indica que com a escolha de Fe Co V como liga a ser misturada a resina os valores de indução de saturação poderiam ser bem maiores, aproximadamente 1,2 T (tabela 3).

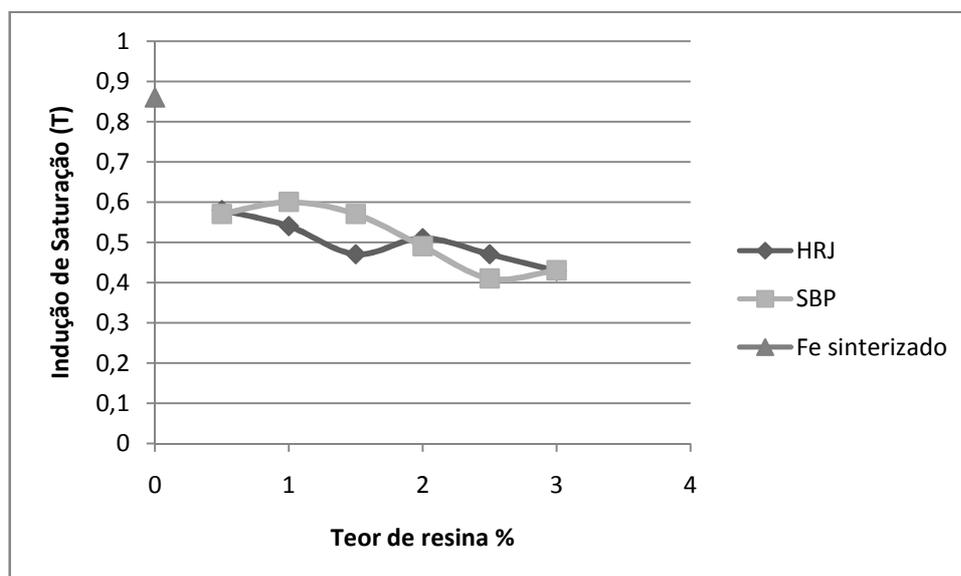


Figura 94 - Gráfico Comparativo teor de resina e indução de saturação.

4.2 Servomotor

Esta pesquisa tem como objetivo final o desenvolvimento de uma liga para aplicação em máquinas elétricas com capacidade de substituir o atual pacote de chapas laminadas.

Através dos testes do servomotor onde foi aplicada a liga Fe HRJ 0,5 como material constituinte do rotor e estator inteiriços pode se concluir sobre a aplicabilidade destes materiais magnéticos macios em larga escala para produção comercial.

As figuras 95 a 99 apresentam as curvas do servomotor resinado e do servomotor convencional.

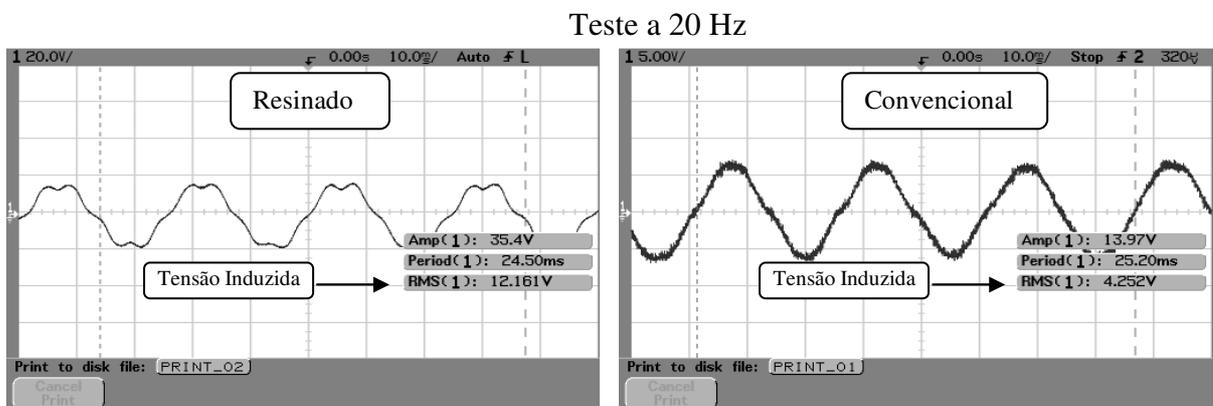


Figura 95 Valores de tensão induzida para o servomotor convencional e resinado a 20 Hz.

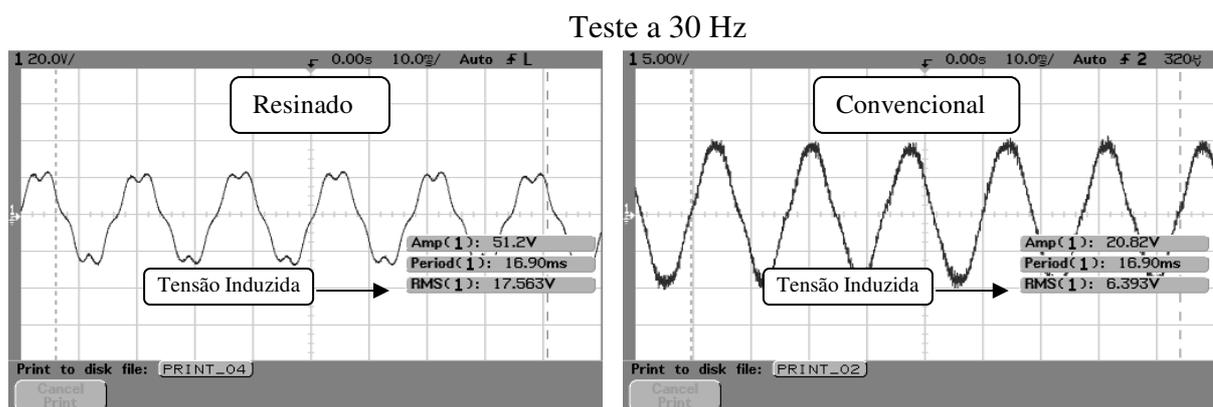


Figura 96 Valores de tensão induzida para o servomotor convencional e resinado a 30 Hz.

Teste a 40 Hz

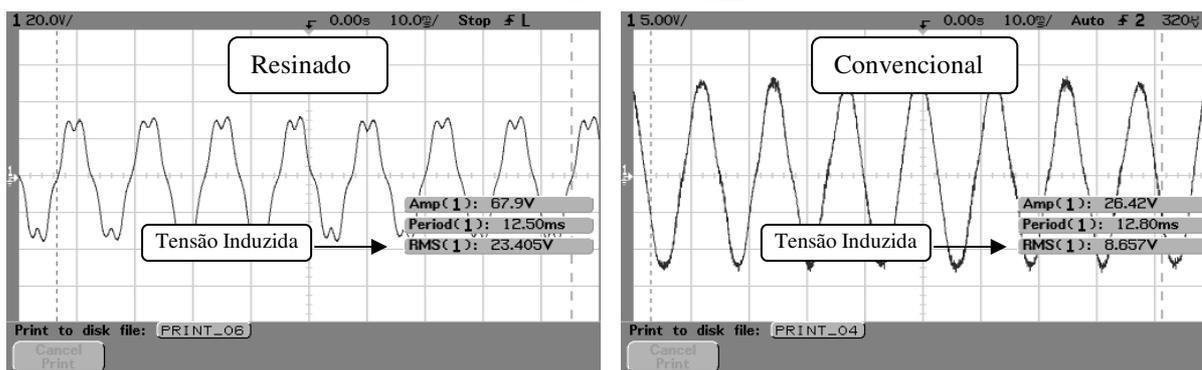


Figura 97 Valores de tensão induzida para o servomotor convencional e resinado a 40 Hz.

Teste a 50 Hz

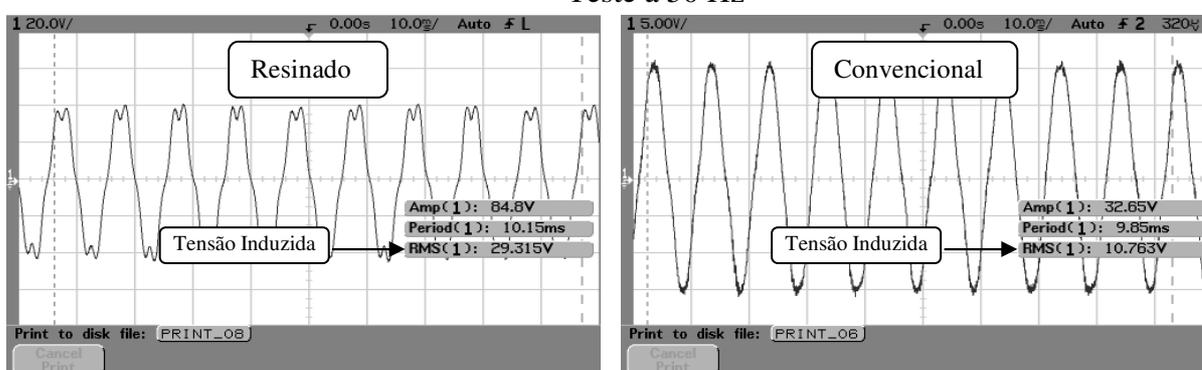


Figura 98 Valores de tensão induzida para o servomotor convencional e resinado a 50 Hz.

Teste a 60 Hz

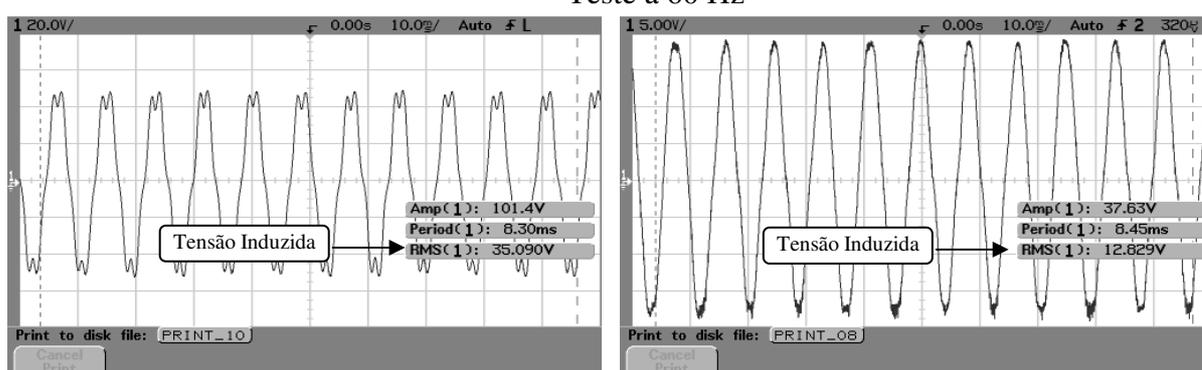


Figura 99- Valores de tensão induzida para o servomotor convencional e resinado.

Nestes testes o valor de saída nas bobinas do estator é a tensão induzida pelo movimento do rotor, o qual através da movimentação de seus ímãs permanentes e campo magnético geram um fluxo magnético alternado o qual flui pelo estator gerando uma tensão

induzida nos três enrolamentos da máquina, o que significa que quanto mais alto o valor da tensão induzida maior foi a transferência de energia.

A tabela 15 apresenta os valores de tensão induzida para cada frequência de acionamento do motor que gerou o torque na ponta de eixo do servomotor.

Tabela 15 – Tensão induzida nas bobinas do servomotor

Frequência de acionamento (Hz)	Tensão Induzida no Servomotor Resinado (V)	Tensão Induzida no Servomotor Convencional (V)
20	12	4
30	17	6
40	23	8
50	29	10
60	35	12

Com a carga de 40 W conectada nas saídas dos enrolamentos de armadura, os valores de tensão induzida lidos são os apresentados pela tabela 16.

Tabela 16 – Valores de tensão induzida para o teste do servomotor com carga.

Frequência de acionamento (Hz)	Tensão Induzida no Servomotor Resinado (V)	Tensão Induzida no Servomotor Convencional (V)
60	20	7

A tensão induzida que é gerada nos enrolamentos do estator do servomotor é proporcional ao máximo fluxo magnético φ_{max} , como mostra a equação 4.1.

$$e(t) = \varphi_{max} \cdot \omega \cdot \text{sen}(\omega t) \quad \text{Eq 4.1}$$

Analisando a equação para ambos os casos, servomotor convencional e resinado, pode-se verificar que a única variável que pode efetivamente distinguir os resultados para a mesma frequência é o fluxo magnético φ_{max} . Deve se considerar a velocidade do rotor constante.

O fluxo magnético é dependente da força magnetomotriz dividida pela soma das relutâncias (gap + ferro). Considerando-se a equação 4.2, 4.3 e 4.4 pode se ter duas soluções para os resultados encontrados.

$$\varphi = \frac{\text{mmf}}{R_g + R_f} \quad \text{Eq 4.2}$$

Onde, mmf é a força magnetomotriz e R_g R_f são respectivamente a relutância do entreferro e do material magnético.

$$mmf = NI = H_f \cdot l_f + H_g \cdot l_g \quad \text{Eq. 4.3}$$

Onde, N é o número de espiras, I corrente nos enrolamentos, H e l são o campo magnético e o caminho percorrido pelo fluxo no entreferro (subscrito g) e no material magnético macio (subscrito f).

$$R = \frac{l_m}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A} \quad \text{Eq. 4.4}$$

A relutância R é proporcional ao caminho percorrido pelo fluxo magnético l_m e inversamente proporcional a permeabilidade do material (μ_0 , μ_r) e a área da seção transversal do caminho.

Considerando-se que os valores de permeabilidade relativa, permeabilidade no vácuo e a área da seção transversal por qual o fluxo magnético atravessa sejam os mesmos nos dois servomotores, resinado e convencional, a justificativa que explicaria o fato de porque a tensão induzida ser três vezes maior no servomotor resinado é de que neste caso o entreferro é menor do que no motor convencional. E como foi visto nas equações 4.3 e 4.4 o valor do caminho magnético percorrido pelo fluxo é inversamente proporcional ao valor da tensão de indução.

A diferença no entreferro ocorre devido a dificuldade de obtenção do estator da máquina elétrica pela complexidade de sua forma. A existência de ranhuras de formato complexo e os valores de compressão e dilatação diferentes de cada material impedem que todas as peças testadas apresentem as mesmas dimensões finais, o que prejudica os resultados finais, porém não impossibilita a avaliação e o estudo destes.

5 CONCLUSÕES

Através do desenvolvimento deste trabalho foi possível apresentar conclusões quanto ao processo de obtenção do ferramental, propriedades magnéticas e mecânicas dos compósitos magnéticos macios estudados, processo de obtenção dos núcleos magnéticos e por fim montagem da máquina elétrica em um nível industrial.

Quanto ao processo de metalurgia do pó, a qual foi a metodologia escolhida por atender as especificações de redução de etapas de produção, desperdício de material e possibilidade de desenvolvimento de geometrias complexas, pode-se concluir que:

- Deve ser relacionado o custo da aquisição do ferramental com o volume de produção para verificar se é válido o investimento.

- A dificuldade na obtenção de pós pré-ligados dificulta a produção de compósitos magnéticos macios que tenham diferentes metais além do ferro.

- A peça final após processo de cura apresenta estrutura frágil devido a não ocorrência da difusão atômica, que ocorre no processo de sinterização.

- A metodologia de metalurgia do pó é um excelente processo para obtenção de materiais compósitos magnéticos macios, devido a possibilidade da composição de dois componentes com propriedades completamente diferentes.

- Apesar do processo de desenvolvimento do ferramental ser conhecido, o ajuste dimensional final dos núcleos magnéticos exige grande trabalho para ser alcançado.

As análises e os testes eletromagnéticos apresentaram resultados que permitem as seguintes conclusões:

- O acréscimo da resina ao ferro diminui consideravelmente os valores de resistividade do material.

- Os compósitos magnéticos macios apresentam valores de permeabilidade bem abaixo dos núcleos magnéticos laminados e sinterizados.

- As perdas magnéticas nos núcleos magnéticos resinados é aproximadamente dez vezes menor que em núcleos laminados.

- Outra propriedade importante é na redução de 20% dos valores de máxima indução para cada 1% adicional de resina na composição final do núcleo magnético.

A fragilidade do material gerou algumas mudanças no processo de montagem da máquina elétrica, nesta etapa tem-se:

- A bobinagem do motor ocorreu com maior delicadeza do que o usual e o tempo para esta atividade foi maior.

- Não é possível expandir a carcaça com aquecimento para a inserção do estator pois a carcaça ao retornar ao seu tamanho original pode fraturar o estator devido a ausência da deformação plástica nos compósitos magnéticos macios.

- O processo de produção dos núcleos magnéticos teve apenas 3 etapas: mistura dos pós, compactação e cura.

Dentre os diversos fatores apresentados, a tecnologia demonstrou capacidade em, se aperfeiçoada, ser uma provável alternativa aos sistemas atuais de produção de máquinas elétricas rotativas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Dimensionamento de um motor respeitando as propriedades eletromagnéticas específicas dos compósitos magnéticos macios.
- Obtenção de pós pré ligados de Fe - Ni, Fe - Si e Fe - Co - V.
- Projeto e desenvolvimento de motores utilizando as ligas acima apresentadas misturadas a resinas fenólicas ou acrílicas.
- Simulação computacional do comportamento de diferentes ligas em máquinas elétricas.
- Estudo dos micro constituintes dos materiais magnéticos macios e análise da influência destes na magnetização do material.
- Desenvolvimento de um material magnético macio com:
 - melhores propriedades mecânicas.
 - maior indução de saturação
 - maior permeabilidade.
- Realizar um estudo de viabilidade econômica da implementação de servomotores comercialmente.

REFERÊNCIAS

- [1] FITZGERALD, A.E. 1952. **Electric Machinery**. 6ª ed., New York (USA), McGraw Hill, 703p. (máquinas ac, testes)
- [2] NASAR, S.A. 1984. **Outline of Theory and Properties of Electric Machines and Electromechanics**, 1ª ed., São Paulo (Brasil), McGraw Hill do Brasil, 217p. (fundamentos magnéticos)
- [3] HÖGANÄS. 2007. **Soft Magnetic Material Handbook**. Suécia, 7 volumes, 94 p. (Fundamentos Magnéticos e SMC)
- [4]. Jack, A.G. **Permanent Magnet Machines with Powder Iron Cores and Prepressed Windings**. Phoenix, Arizona US: IEEE Industry Applications Con, 1999.
- [5] Muetze, A.; Jack, A.G. & Mecrow, B.C. **Alternate designs of brushless-dc motors using soft magnetic composites**. Proceedings of the 15th International Conference on Electrical Machines (ICEM), paper no. 237, 6 pages, Bruges, 2002. (motor bicicleta)
- [6] BLDC. Product Description and Technical Information - Phase Motion Control. [Online] 2007. <http://www.phase.eu/eng/products/ultract-tw.html>. Acessado em: 08/10/2008.
- [7] JANSSON, P. 2008. **Soft Magnetic Material – Including Present and Future Applications**. Höganäs, Suécia. Höganäs AB Publications, 11p. (SMC)
- [8] CHIAVERINI, V. 1992. **Metalurgia do Pó**. 3ª ed. Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda, São Paulo (Brasil), 352p. (P/M)
- [9] SHOKROLLAHI, H. & JANGHORBAN, K. 2007. Soft magnetic composite materials. Journal of Materials Processing Technology, London (UK), Vol. 189:1-12.(Classificação SMC)
- [10] GERMAN, R. M. 1984. **Powder Metallurgy Science**. Metal Powder Industries Federation, New Jersey (USA), 279p. (P/M)
- [11] KLAR, E. 1984. **Metals Handbook**, 9ª ed., American Society for Metals, Ohio(USA), 897p. (P/M)

- [12] LENEL, F. V. 1980. **Powder Metallurgy Principles and Applications**, 3^a ed, Metal Powder Industries Federation, New Jersey (USA), 589p. (P/M)
- [13] GERMANN, R. M. 1990. **Powder Injection Molding**, 2^a ed, Metal Powder Industries Federation, New Jersey (USA), 521p. (P/M).
- [14] KROGEN, O. 2000. **An exploration of alternative geometries and materials for induction motors**. Ph.D. Thesis. Department of Electrical and Electronic Engineering University of Newcastle (England). (características SMC)
- [15] Dias, M., Schaeffer,L., Dias,A.,César, J. Novas Perspectivas das máquinas elétricas trifásicas a partir da utilização de materiais magnéticos macios sinterizados. Fundação Liberato. <http://www.liberato.com.br/upload/arquivos/0131010716421316.pdf>. Acesso em 10/03/2009
- [16] Alfa Aesar Online Catalog. A Johnson Matthey Company 30 Bond Street Ward Hill, Massachusetts. <http://dino.wiz.uni-kassel.de/dain/ddb/x018.html>. Acessado em 05/04/2008.
- [17] DIAS, M. M. 1996. **Obtenção de Imãs de Ferrita de Estrôncio Anisotrópicos**. Dissertação de Mestrado, PPGEM - EE – UFRGS, Porto Alegre (RS), 136 p. (inédito). (P/M).
- [18] L.A. Dobrzanski, M. Drak, Properties of composite materials with polymer matrix reinforced with Nd-Fe-B hard magnetic particles, J. Mater. Process. Technol. n. 175 (149–156). 2006.
- [19] LENEL, F.V. Magnetic Applications. Metals Hadbook, v.7, 1984. p.638-641.
- [20] BAS, J. A., PUIG, J., MOLINS, C.B. Soft Magnetic Materials in P/M: Current Applications and State-of-the-Art. Modern Developments in Powder Metallurgy, Princeton, New Jersey. Metal. Powder Industries Federation, v.18. p.745-756. 1988.
- [21] ASM Handbook. Volume 7. Powder Metal Technologies and Applications. ASM International. 2000.
- [22] JANSSON, P. Soft Magnetic Materials for A.C. Applications. Hoeganes A.B.,Hoeganes Swed, Powder Metallurgy, v.35, n.1. 1992.

- [23] Barboza, J.S., Schaeffer, L., Cerva, L. L., Esswein Jr., J. A. L., Dias, M. M.. Comparative study of the mechanical properties of sinterized magnetic alloys applied to electrical machines' core. Elsevier. Powder Technology, In Press, Corrected Proof, Available online 14 November 2008.
- [24] SOUZA, Sérgio Augusto. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5ed. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1982.
- [25] Ma, H., Wei, G., Liu, Y., Zhang, X., Gao, J., Huang, F., Tan, B., Song, Z., Qiao, J. Effect of elastomeric nanoparticles an properties of phenolic resin. Polymer. n. 46 (10568-10573). 2005.
- [26] ASM Handbook. Volume 8. **Mechanical Testing and Evaluation**. ASM International. 2000.
- [27] Guo, Y.G., Zhu, J.G., Watterson, P.A., Wu, W. Comparative study of 3D flux electrical machines with soft magnetic composite core. IEEE Trans. Ind. Appl. n. 39 (1696-1703). 2006.