

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

CARACTERIZAÇÃO DE LIGAS MAGNÉTICAS SINTERIZADAS PARA APLICAÇÃO
EM NÚCLEOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

SÉRGIO DEITOS BITTENCOURT

Dissertação para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M

CARACTERIZAÇÃO DE LIGAS MAGNÉTICAS SINTERIZADAS PARA APLICAÇÃO
EM NÚCLEOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

SÉRGIO DEITOS BITTENCOURT
Engenheiro de Controle e Automação

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre
2012

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

Orientador: Prof. Dr. -Ing. Lírío Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Renato Carlson
PPGEE-PG / UTFPR

Prof. Dr. Eng. Moisés de Mattos Dias
ICET / FEEVALE

Dr. Eng. Cristiano Binder
LABMAT / UFSC

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker
Coordenador do PPGE3M

"O significado das coisas não está nas coisas em si,
mas sim em nossa atitude com relação a elas."

Antoine de Saint-Exupéry

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. -Ing. Lírío Schaeffer por sua confiança e orientação no desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

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

À ULBRA-RS pela disponibilização de equipamentos e estrutura durante a execução deste projeto de pesquisa.

À EPI - Energia Projetos e Investimentos pelo fornecimento de recursos financeiros e pela parceria nos trabalhos executados neste projeto.

Aos colegas do LdTM pelo apoio, sempre que necessário e pela amizade.

Aos funcionários do LdTM, especialmente, a Srta. Agatha Bittencourt pelo suporte nas atividades administrativas.

Ao GDER, Grupo de Desenvolvimento em Energias Renováveis, o agradecimento especial aos Engenheiros Philippe Pauletti, Leandro Pelegrini e Diogo Kaoru Ito, pela dedicação em nossos projetos e parceria nas atividades desenvolvidas.

Ao Professor Vilson Gruber, da Faculdade SATC de Santa Catarina, pelo incentivo e colaboração nos trabalhos realizados.

Ao CNPq pela bolsa de mestrado que me financiou neste período.

À FINEP pelo fornecimento de recursos financeiros que proporcionaram a execução deste Projeto de pesquisa.

Aos meus familiares, por terem dado todo apoio necessário em qualquer situação e sem os quais não estaria na posição que me encontro hoje.

A todos que, de alguma forma, colaboraram no desenvolvimento deste trabalho, os sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Metalurgia do Pó.....	17
2.1.1 Metalurgia do Pó convencional.....	17
2.1.2 Obtenção e preparação dos pós.....	19
2.1.3 Mistura dos pós.....	21
2.1.4 Compactação.....	22
2.1.5 Sinterização.....	23
2.2 Propriedades magnéticas.....	24
2.2.1 Campo, indução e fluxo magnético.....	25
2.2.2 Permeabilidade magnética relativa.....	26
2.2.3 Curva de histerese.....	27
2.2.4 Magnetização.....	29
2.2.5 Relutância e força magnetomotriz.....	32
2.3 Máquinas elétricas rotativas.....	32
2.4 Fatores que determinam o desempenho das máquinas elétricas.....	35
2.5 Características dos materiais magnéticos macios sinterizados.....	36
2.6 Aplicação de materiais magnéticos macios sinterizados em núcleos magnéticos e motores.....	39
2.7 Ímãs permanentes e sua aplicação em máquinas elétricas.....	41
3 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	43
3.1 Ligas utilizadas.....	43
3.2 Matrizes utilizadas para compactação dos corpos de prova.....	44
3.3 Obtenção dos corpos de prova.....	48
3.3.1 Obtenção da matéria-prima (mistura dos pós).....	48
3.3.2 Compactação dos corpos de prova.....	49
3.3.3 Sinterização dos corpos de prova.....	49
3.3.4 Dimensões e densidades dos corpos de prova.....	50
3.4 Obtenção das propriedades físicas.....	53
3.4.1 Resistividade elétrica.....	53
3.4.2 Propriedades magnéticas (curva de histerese e magnetização).....	56
3.4.3 Propriedades mecânicas.....	63

3.4.4 Microestrutura dos corpos de prova.....	65
3.4.5 Ensaio de perdas magnéticas com a variação da frequência em núcleos na forma de um transformador de tensão convencional.....	68
3.4.5.1 Construção dos núcleos.....	68
3.4.5.2 Ensaio de perdas com a variação da frequência.....	70
3.5 Simulação de uma máquina elétrica rotativa.....	73
3.5.1 Simulação em software de elementos finitos.....	73
3.5.2 Características da máquina elétrica simulada.....	73
3.5.3 Procedimentos de simulação.....	76
3.5.4 Simulações da máquina síncrona.....	78
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	80
5 CONCLUSÕES.....	82
6 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE.....	84
REFERÊNCIAS.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas da Metalurgia do Pó.....	19
Figura 2 - Obtenção de pós por atomização.....	20
Figura 3 - Moinho de bolas.....	21
Figura 4 - Alguns tipos de misturadores (a) Cone duplo, (b) Dupla concha ou “V”.....	22
Figura 5 - Sequência de compactação de duplo efeito.....	23
Figura 6 - (a) Sinterização por fase sólida, (b) Sinterização por fase líquida.....	24
Figura 7 - Ciclo de histerese para um material magnético.....	28
Figura 8 - Ciclo de histerese para materiais magnéticos duros e macios.....	29
Figura 9 - (a) Curva de magnetização, (b) Relação entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado.....	30
Figura 10 - Regiões de magnetização fácil e difícil da curva de magnetização inicial.....	31
Figura 11 - Estágios de magnetização de uma amostra policristalina com o crescimento do campo.....	31
Figura 12 - (a) Rotor polos lisos - (b) Rotor polos salientes.....	33
Figura 13 - Vista em corte de um motor síncrono com ímãs permanentes.....	34
Figura 14 - Matriz para compactação dos corpos de prova na forma de cilindro.....	44
Figura 15 - Geometria da matriz de compactação dos corpos de prova na forma de cilindro.....	45
Figura 16 - Matriz para compactação dos corpos de prova na forma de anel.....	45
Figura 17 - Geometria da matriz de compactação dos corpos de prova na forma de anel.....	46
Figura 18 - Matriz para compactação do núcleo tipo T.....	46
Figura 19 - Geometria da matriz do núcleo tipo T.....	47
Figura 20 - Matriz para compactação do núcleo tipo E.....	47
Figura 21 - Geometria da matriz do núcleo tipo E.....	48
Figura 22 - Curva de sinterização.....	50
Figura 23 - (a) Cilindro, (b) Anel, (c) Núcleos do transformadores tipo T e E.....	50
Figura 24 - Densidade dos corpos de prova na forma de cilindro.....	53
Figura 25 - Exemplo de material utilizado no ensaio de resistividade.....	54
Figura 26 - Sistema para ensaio de resistividade.....	55
Figura 27 - Resistividade (ρ) dos corpos de prova na forma de anel.....	56
Figura 28 - Anel de Rowland bobinado e corte mostrando as camadas presentes.....	57
Figura 29 - Esquema de conexão para ensaio de histerese.....	57
Figura 30 - Curva de histerese da liga Fe1%P.....	58

Figura 31 - Indução de saturação.....	60
Figura 32 - Magnetismo remanente.....	60
Figura 33 - Força coercitiva.....	61
Figura 34 - Perdas por histerese.....	61
Figura 35 - Curva de magnetização da liga Fe1%P.....	62
Figura 36 - Permeabilidade relativa máxima.....	63
Figura 37 - Comparação da Dureza Brinell para ligas sinterizadas.....	64
Figura 38 - Comparativo da tensão de escoamento.....	65
Figura 39 - Amostra para análise metalográfica retirada do anel.....	66
Figura 40 - Metalografia do Fe puro.....	66
Figura 41 - Metalografia da liga Fe1%P.....	66
Figura 42 - Metalografia da liga Fe2%P.....	67
Figura 43 - Metalografia da liga Fe3%P.....	67
Figura 44 - Metalografia da liga Fe1%Si.....	67
Figura 45 - Metalografia da liga Fe3%Si.....	67
Figura 46 - Metalografia da liga Fe5%Si.....	67
Figura 47 - Metalografia da liga Fe50%Ni.....	67
Figura 48 - Núcleo obtido por M/P (esquerda) e núcleo de chapas laminadas (direita).....	68
Figura 49 - Núcleos obtidos através da M/P.....	69
Figura 50 - (a) Núcleo convencional; (b) núcleo maciço obtido por M/P.....	69
Figura 51 - Esquema da bancada de testes.....	70
Figura 52 - Rendimento dos transformadores com a variação da frequência.....	72
Figura 53 - Perdas com a variação da frequência.....	72
Figura 54 - Cotas do estator em corte transversal.....	74
Figura 55 - Cotas do rotor em corte transversal.....	75
Figura 56 - Cotas dos ímãs do servomotor.....	75
Figura 57 - Núcleo introduzido no FEMM 4.2.....	76
Figura 58 - Esquema da bobinagem do servomotor.....	77
Figura 59 - Curva de magnetização do Ferro P1%P sinterizado utilizado na simulação.....	77
Figura 60 - (a) Fluxo magnético no motor com material laminado; (b) Fluxo magnético no motor com a liga Fe1%P sinterizado; (c) Legenda da intensidade de campo em “a” e “b”.....	78
Figura 61 - Comparativo entre o torque das ligas estudadas.....	79
Figura 62 - Comparativo entre densidade de fluxo máximo das ligas estudadas.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Permeabilidade relativa de alguns materiais.....	26
Tabela 2 - Ligas sinterizadas.....	43
Tabela 3 - Força aplicada na compactação dos corpos de prova.....	49
Tabela 4 - Densidades dos corpos de prova a verde na forma de cilindro.....	51
Tabela 5 - Densidades dos corpos de prova sinterizados na forma de cilindro.....	52
Tabela 6 - Resistividade (ρ) dos corpos de prova na forma de anel.....	55
Tabela 7 - Propriedades magnéticas dos corpos de prova na forma de anel.....	59
Tabela 8 - Permeabilidade relativa máxima.....	62
Tabela 9 - Dureza Brinell para ligas sinterizadas.....	64
Tabela 10 - Tensão de escoamento.....	65
Tabela 11 – Características do servomotor simulado.....	73
Tabela 12 - Comparativo entre torque e densidade de fluxo máximo.....	78

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal	[m ²]
B	Indução magnética	[T]
BH _{máx}	Produto energético	[J/m ³]
B _m	Indução de saturação ou máxima indução	[T]
B _r	Retentividade magnética ou magnetização remanente	[T]
dl	Comprimento infinitesimal	[m]
ds	Elemento infinitesimal de superfície	[m ²]
f	Frequência	[Hz]
F	Força	[N]
ℱ	Força magnetomotriz	[Ae]
h	Altura	[m]
H	Campo magnético	[A/m]
H _c	Coercitividade magnética ou força coercitiva	[A/m]
I	Corrente elétrica	[A]
I _E	Corrente elétrica de entrada	[A]
I _R	Corrente no resistor	[A]
J	Densidade de corrente	[A/m ²]
J _S	Polarização de magnetização	[T]
l	Comprimento	[m]
P	Potência	[W]
P _p	Potência no primário	[W]
P _s	Potência no secundário	[W]
R	Resistência	[Ω]
ℜ	Relutância magnética	[Ae/Wb]
T _{Def}	Tempo de defasagem	[s]
V	Tensão elétrica	[V]
V _e	Tensão de entrada	[V]
V _R	Tensão no resistor	[V]
V _s	Tensão de saída	[V]
T	Período	[s]
Ø	Diâmetro	[m]

Símbolos Gregos:

α	Ângulo entre a perpendicular a área e a direção	[°]
η	Rendimento	[%]
$\text{Cos}\theta$	Fator de potência	[Adimensional]
μ	Permeabilidade magnética do meio	[H/m]
$\mu_{\text{máx}}$	Permeabilidade magnética máxima	[H/m]
μ_r	Permeabilidade magnética relativa	[Adimensional]
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo	[H/m]
ρ	Resistividade elétrica	[$\Omega \cdot \text{m}$]
σ_e	Tensão de escoamento	[MPa]
φ	Fluxo magnético total	[Wb]

LISTA DE ABREVIATURAS

ac	Corrente alternada
ASTM	American Society for Testing and Materials
AT	Área Total
AWG 20	Espessura do fio de cobre
AWG 23	Espessura do fio de cobre
AWG 26	Espessura do fio de cobre
cc	Corrente Contínua
FEMM	Finite Element Method Magnetics
fmm	Força magnetomotriz
GDER	Grupo de Desenvolvimento em Energias Renováveis
HB	Dureza Brinell
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica – UFRGS
m	Massa
M/P	Metalurgia do Pó
v	Volume
Vcc	Tensão de corrente contínua

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo o estudo das propriedades de ligas ferromagnéticas obtidas por Metalurgia do Pó para a construção de núcleos de Máquinas Elétricas Rotativas, usualmente, montados a partir de chapas de aço laminadas. Para o desenvolvimento das atividades empregou-se pó de ferro e ligas deste obtidas por mistura com diferentes percentuais de fósforo (1, 2 e 3%), silício (1, 3 e 5%) e níquel (50%). Os pós foram compactados em matrizes, e após, realizou-se a sinterização dos corpos de prova em forno com temperaturas controladas. Na caracterização do material foram traçadas curvas de histerese, as quais apresentaram propriedades magnéticas inferiores às dos núcleos de chapas. No entanto, observaram-se perdas menores por correntes parasitas em decorrência do aumento da resistividade pela adição de fósforo, silício e níquel nas ligas de ferro. Nas simulações de uma máquina elétrica rotativa com ímãs permanentes, especificamente, de um servomotor comparou-se os resultados entre os núcleos de chapas laminadas e os de materiais ferromagnéticos em blocos únicos, com a utilização do *software* FEMM 4.2 (*Finite Element Method Magnetics*). Os resultados da liga Fe1%P apresentaram valores próximos de torque e densidade de fluxo em relação aos dos tradicionais núcleos de chapas laminadas. Nos ensaios de perdas magnéticas em núcleos, na forma de um transformador, observou-se que em frequências baixas o material sinterizado apresentou perdas significativas, já em frequências elevadas comportou-se de forma similar aos núcleos de chapas. Desta maneira, demonstrou-se que os materiais estudados podem se constituir em alternativa viável para a construção de núcleos de Máquinas Elétricas Rotativas de aplicação especial, como servomotores, motores de alta velocidade e minimotores.

ABSTRACT

The purpose of this work is to study the properties of ferromagnetic alloys obtained by Powder Metallurgy to construct cores of Rotary Electric Machines, usually mounted on rolled steel sheets. To perform these activities, iron powder and their alloys obtained by a mixture with different percentages of phosphorus (1, 2 and 3%), silicon (1, 3 and 5%) and nickel (50%) were used. The powders were compacted in dies and then the test specimens were sintered in an oven at controlled temperatures. When the material was characterized, hysteresis curves were traced, which present magnetic properties inferior to those of the sheet cores. However, smaller losses were observed from parasite currents as a result of resistivity increased by adding phosphorus, silicon and nickel to the iron alloys. In simulations of a rotary electric machine with permanent magnets, specifically belonging to a servomotor, the results were compared between the cores of rolled sheets and those of ferromagnetic materials in single blocks, using FEMM 4.2 (*Finite Element Method Magnetics*) software. The results of the alloy Fe1%P presented some values close to torque and flow density as related to the traditional cores of rolled sheets. In the trials on magnetic losses in cores, in the form of a transformer, it was observed that at low frequencies the sintered material presented significant losses. On the other hand, at high frequencies it behaved similarly to the sheet cores. It was thus demonstrated that the materials studied can constitute a viable alternative to construct cores of Rotary Electric Machines for special application, such as servomotors, high velocity motors and minimotors.

1 INTRODUÇÃO

Existe busca constante para o desenvolvimento de novos materiais e processos que apresentem maior rendimento, eficiência e menores custos na construção de máquinas elétricas rotativas. Com o intuito de colaborar com a área, este trabalho tem por objetivo o estudo das propriedades de ligas ferromagnéticas obtidas por Metalurgia do Pó para a construção de núcleos de Máquinas Elétricas Rotativas, usualmente, montados a partir de chapas de aço laminadas.

Os materiais compósitos magnéticos macios são utilizados em motores ou geradores de aplicação especial na construção do núcleo de servomotores e minimotores. Nesta metodologia da Metalurgia do Pó os compósitos de ferro puro são misturados com resina fenólica, a qual atua como isolante elétrico e adesivo entre as partículas metálicas. Os materiais compósitos são curados e não sinterizados. Neste caso, deve ser empregada temperatura que não destrua a resina. No caso da sinterização, por outro lado, o tratamento térmico ocorre em temperaturas elevadas, porém, abaixo do ponto de fusão do metal base [1, 2, 3].

O Laboratório de Transformação Mecânica - LdTM da UFRGS, em parceria com outras instituições como a FEEVALE-RS, a ULBRA-RS, o CEFET-RS e a UCS-RS vem de longa data realizando projetos de pesquisa com materiais magnéticos obtidos pela Metalurgia do Pó, para aplicação em núcleos de máquinas elétricas.

Foram preparadas misturas de pó de ferro com diferentes percentuais de fósforo, silício e níquel com a finalidade de analisar suas propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas. As ligas sinterizadas estudadas foram: Ferro Puro, Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si, Fe5%Si e Fe50%Ni.

Na obtenção dos corpos de prova empregou-se misturador tipo cone para a mistura dos pós, os quais foram compactados com a utilização de prensa hidráulica em matrizes com distintas formas geométricas e, após, sinterizados em forno com temperaturas controladas. As propriedades de interesse estudadas para aplicação em Núcleos de Máquinas Elétricas e as respectivas formas geométricas dos corpos de prova foram:

- Resistividade Elétrica – corpos de prova na forma de anel.
- Propriedades Magnéticas: Permeabilidade Magnética, Indução de Saturação, Retentividade e Coercitividade obtidas a partir da Curva de Histerese - corpos de prova na forma de anel.
- Propriedades Mecânicas: Dureza e Metalografia - corpos de prova na forma cilíndrica e de anel, respectivamente.
- Perdas Magnéticas totais com variação da frequência, obtidas a partir de ensaios em corpos de prova na forma de núcleos de transformadores.

Na sequência do trabalho foi simulada em software de elementos finitos FEMM 4.2. uma máquina elétrica síncrona com ímãs permanentes baseada nas dimensões de um servomotor da WEG Motores. O corte transversal do núcleo do gerador foi inserido no *software* de elementos finitos, com bobinagem para um motor de oito polos utilizando corrente nominal de 2A.

A seguir, as propriedades magnéticas dos corpos de prova sinterizados foram inseridas no programa, na forma de bloco maciço. Os núcleos obtidos por Metalurgia do Pó foram, então, simulados contra o núcleo de aço elétrico laminado. Os resultados da liga Fe1%P apresentaram valores próximos de torque e densidade de fluxo em relação aos tradicionais núcleos de chapas laminadas.

Nos ensaios de perdas magnéticas em núcleos na forma de um transformador observou-se que em frequências baixas o material sinterizado apresentou perdas significativas, já em frequências elevadas comportou-se de forma similar aos núcleos de chapas. Desta forma, demonstrando que os materiais estudados podem se constituir em alternativa viável para a construção de núcleos de Máquinas Elétricas Rotativas de aplicação especial, como servomotores, motores de alta velocidade e minimotores.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Metalurgia do Pó

2.1.1 Metalurgia do Pó convencional

A Metalurgia do Pó é um processo que consiste na obtenção de pó metálico e na sua transformação, através de etapas como compactação e sinterização (tratamento em temperaturas abaixo do ponto de fusão do metal base), de modo a resultar em produtos de elevada precisão dimensional e com as propriedades almejadas [1].

A Metalurgia do Pó possui as seguintes características que se distinguem dos processos metalúrgicos convencionais [1, 2]:

- Produção de peças com formas definitivas ou praticamente definitivas, dentro de tolerâncias muito estreitas, geralmente sem necessidade de operações posteriores de usinagem ou acabamento.
- Utilização de pós metálicos e não metálicos como matérias-primas.
- Produção de componentes com características estruturais e físicas impossíveis de se obter por outros processos metalúrgicos.
- Obtenção de peças em grande quantidade, tornando o processo altamente competitivo em relação aos processos convencionais.
- Compactação dos pós à temperatura ambiente no interior de matrizes, cujas cavidades, normalmente, correspondem às formas e dimensões das peças finais.
- Sinterização abaixo da temperatura de fusão do metal ou liga metálica considerada, sob condições controladas de temperatura, tempo e ambiente.

Os materiais fundidos apresentam falhas resultantes das diferentes capacidades dos constituintes de se solidificarem a partir da fase líquida. Nas peças sinterizadas a mistura de pós e a sinterização com transformações na fase sólida permitem um alto grau de uniformidade do material, com microestrutura homogênea e melhores propriedades mecânicas [3].

O número reduzido de operações na produção da peça acabada e o aproveitamento quase total da matéria-prima são fatores econômicos que contribuem para que a Metalurgia do Pó venha sendo utilizada em larga escala [2, 3].

As principais vantagens da Metalurgia do Pó, em relação aos processos convencionais de conformação mecânica são [1, 3]:

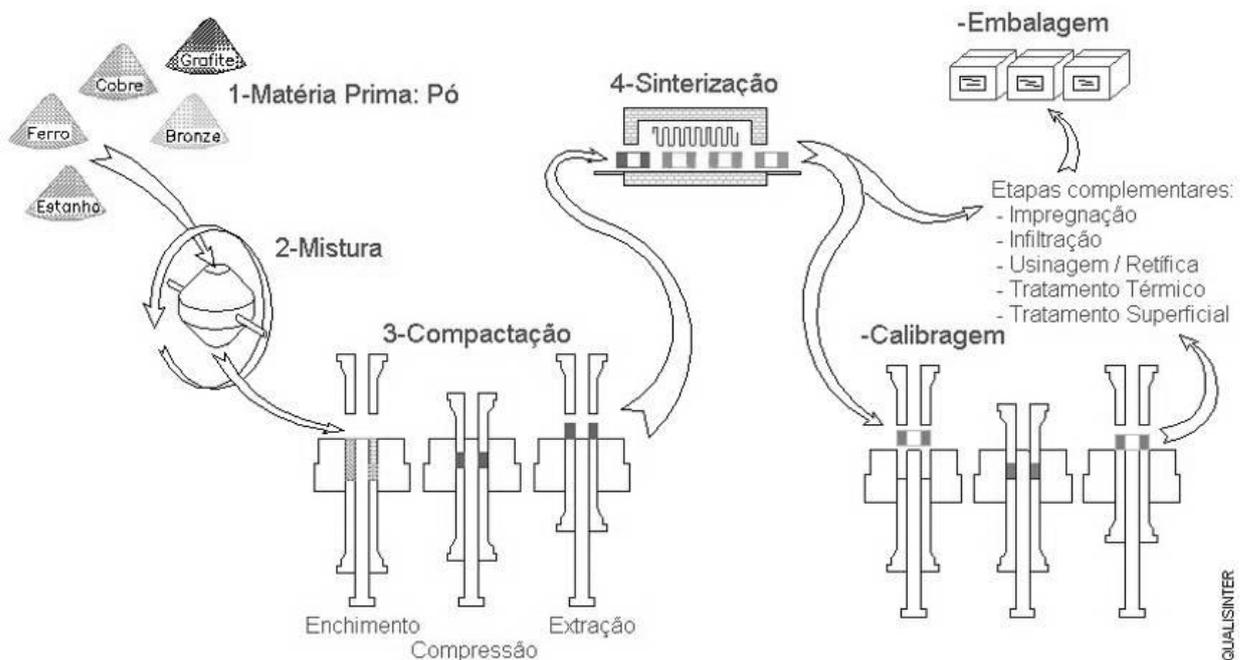
- Perda mínima de matéria-prima.
- Homogeneidade estrutural e de propriedades.
- Bom acabamento superficial.
- Processo de fácil automação.
- As temperaturas de sinterização são baixas em relação a outros processos, com utilização de fornos com menor consumo de energia.
- O produto final possui estreita tolerância dimensional e excelente acabamento superficial, na maioria dos casos não necessitando de operações posteriores.
- É possível produzir componentes com formas complexas, muitas vezes inacessíveis a outros processos de fabricação.
- Controle da composição química do material, podendo ser produzidos componentes de alta pureza.
- O processo é de alta produtividade proporcionando a fabricação de uma grande quantidade de peças em menor tempo.

No que se refere às desvantagens dos processos da Metalurgia do Pó, é conveniente destacar [2, 3]:

- Alto custo inicial do ferramental, sendo necessárias grandes produções para compensar o investimento.
- Tamanho e formato limitado das peças, de modo a possibilitar que sejam extraídas de uma matriz de compactação.
- Nos processos convencionais de compactação e sinterização o tamanho da peça é limitado, uma vez que as pressões requeridas para compactação são proporcionais a sua área transversal.
- O processo produz uma porosidade residual que deve ser eliminada, no caso de aplicações que requerem altas solicitações mecânicas.

Conforme apresentado na Figura 1, os processos básicos da Metalurgia do Pó são: obtenção dos pós, mistura, compactação e sinterização. Às vezes são necessárias etapas complementares, tais como, a retificação. Na M/P, os pós depois de serem misturados, são compactados em matrizes onde adquirem a forma da cavidade da matriz. Após, são colocados em fornos para sinterização onde adquirem consistência e resistência mecânica. Salienta-se que, pós de diferentes naturezas químicas podem ser obtidos, desde que sejam misturados homogeneamente [1, 2, 4].

Figura 1 - Etapas da Metalurgia do Pó



Fonte: Moro, 2007.

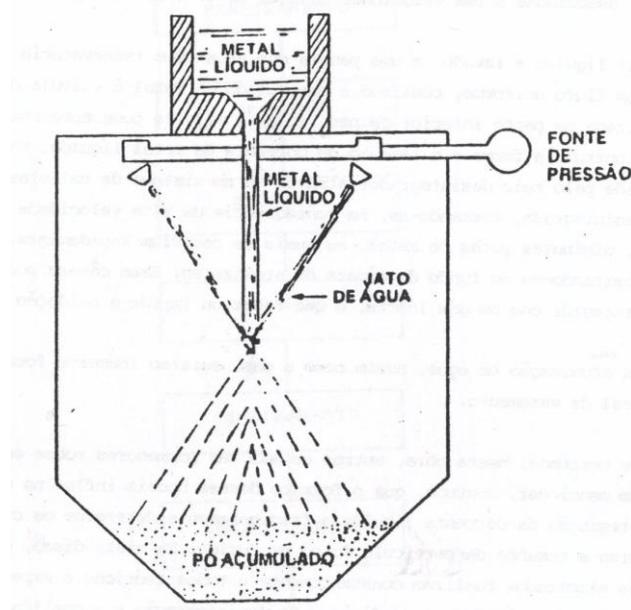
2.1.2 Obtenção e preparação dos pós

A obtenção dos pós é realizada por uma série de processos, em função das propriedades do material (resistência mecânica, ponto de fusão e composição química) e das características que a aplicação requer do mesmo. Entre as características mais importantes dos pós metálicos estão a forma, o tamanho e a distribuição granulométrica das partículas. Os vários métodos de obtenção de pós metálicos conduzem a diversas formas, tamanhos, distribuição e outras características dos mesmos, sendo imprescindível o domínio do processo de obtenção e caracterização da matéria-prima para se chegar a uma peça final que atenda os quesitos de engenharia [2, 3, 5].

São vários os processos para obtenção de pós metálicos, a forma de suas obtenções depende do conjunto de propriedades do material e das características desejadas, em função da aplicação pretendida. Os principais são [1, 2]:

- **Atomização:** o processo consiste em pulverizar líquido metálico em partículas finas (Figura 2). Essa pulverização é realizada forçando-se a passagem de um fluxo de metal líquido por um pequeno orifício, na saída do qual o fluxo de metal fundido é desintegrada por um jato de água, gás ou ar. O metal solidifica-se instantaneamente pela ação do jato e do resfriamento natural, causado pela expansão do metal ao deixar o orifício. Por sucção, o pó é recolhido em uma câmara [1].

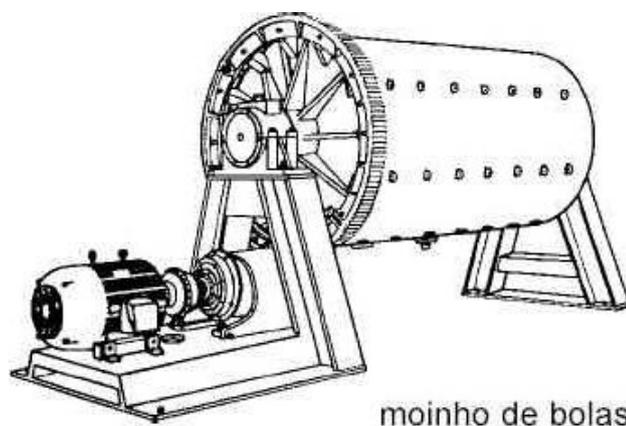
Figura 2 - Obtenção de pós por atomização



Fonte: Chiaverini, 1992.

- **Métodos mecânicos (quebra e moagem):** são mais indicados como operações complementares às de produção do pó. Tem o objetivo de reduzir o tamanho das partículas do material, com o auxílio de martelos ou moinhos até um determinado tamanho desejado. Os moinhos mais comuns são de bolas (Figura 3), vibratórios e de atrito. É comum na moagem o emprego de lubrificantes para impedir a aglomeração de partículas [1, 2].

Figura 3 – Moinho de bolas



Fonte: Moro, 2007.

- **Cold-stream:** aumenta a fragilidade dos metais em temperaturas baixas para a transformação em pó. O pó grosseiro é levado por um fluxo de gás submetido à alta pressão, através de um tubo, para uma câmara mantida sob vácuo. Quando atinge a câmara, o gás sofre expansão, diminuindo bruscamente a temperatura. O pó em alta velocidade colide com um alvo instalado dentro da câmara, e como se encontra relativamente frágil por causa da baixa temperatura, parte-se em partículas menores. Após, o pó é separado da fração gasosa, a qual é novamente reconduzida ao processo [2].

Cada processo leva o pó a um conjunto de propriedades distintas, as quais são importantes para o produto final. Dentre elas, a pureza e a composição química são relevantes, pois um nível elevado de impurezas pode alterar as propriedades do produto acabado. A escolha do método de fabricação do pó depende de características como tamanho e distribuição do tamanho da partícula, superfície específica, compressibilidade, escoabilidade e densidade aparente do pó, necessárias à obtenção do sinterizado com as propriedades mais adequadas a cada aplicação específica [3].

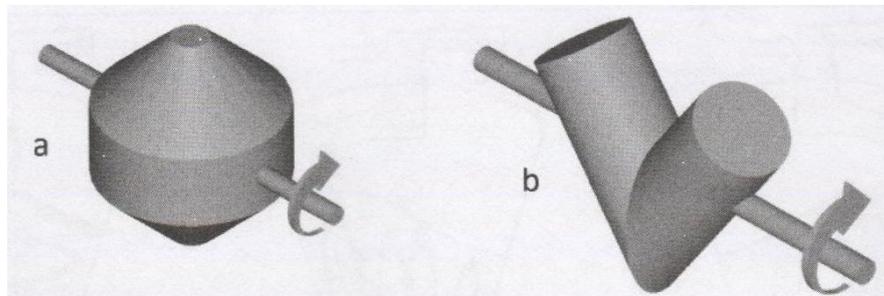
2.1.3 Mistura dos pós

Nesta etapa do processo é definida a composição química do material, pois no carregamento do misturador são adicionados os elementos de liga ao metal base nas respectivas proporções. Mesmo na produção de componentes de ferro puro se adiciona à

mistura um lubrificante, cuja finalidade é a de reduzir o atrito do pó e a força de extração das peças na etapa de compactação. Esse lubrificante geralmente é sólido e por ser facilmente removido durante a etapa de sinterização, não influi na composição química da liga (ex.: estearato de zinco) [6, 7].

A mistura realizada de forma correta evita a formação de aglomerados de pós. Outro parâmetro na mistura é o controle do tempo, para promover máxima homogeneidade da mistura. A Figura 4 mostra duas técnicas utilizadas para mistura de pós [8].

Figura 4 - Alguns tipos de misturadores (a) Cone duplo, (b) Dupla concha ou “V”



Fonte: Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, 2009.

2.1.4 Compactação

Esta etapa consiste em aplicar pressão sobre a mistura de pós, moldando o material no formato desejado. O objetivo é conformar o pó na forma projetada, conferindo as dimensões finais da peça e resistência mecânica necessária para manuseio posterior. Mas, o fator mais importante é proporcionar o necessário contato entre as partículas do pó, para que a operação de sinterização seja efetuada de modo mais eficiente [3].

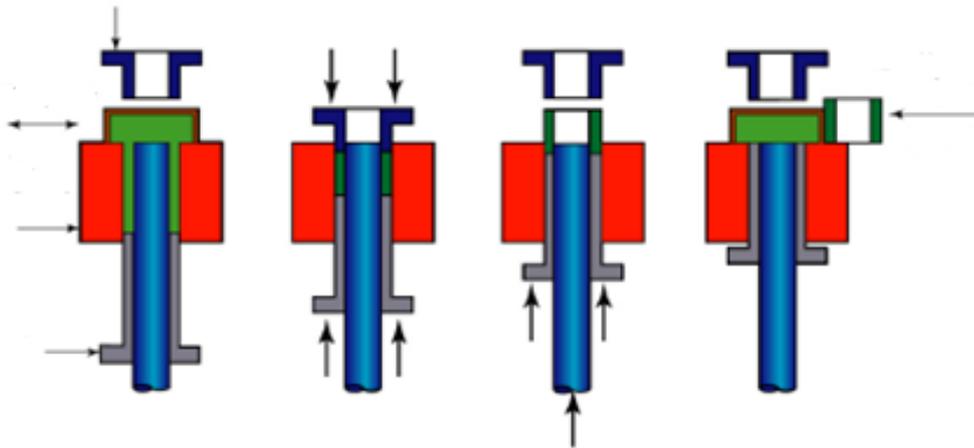
A compactação é executada em prensas mecânicas, hidráulicas ou híbridas. Pode ser realizada a quente ou a frio. De acordo com a forma da peça e as suas dimensões, são escolhidas as prensas de compactação. Sob o ponto de vista da técnica de Metalurgia do Pó, as prensas podem ser classificadas em [1]:

- Prensa de ação simples.
- Prensa de ação dupla.
- Prensas com sistema de retirada.

- Prensas de movimento múltiplo.
- Prensas rotativas.

O método mais empregado é a compactação em matriz, representado pela técnica de compactação de duplo efeito (Figura 5). Este sistema é utilizado pressionando as peças com forças a partir de duas direções, produzindo peças com densidade mais uniforme [4].

Figura 5 - Sequência de compactação de duplo efeito



Fonte: Colton, 2009.

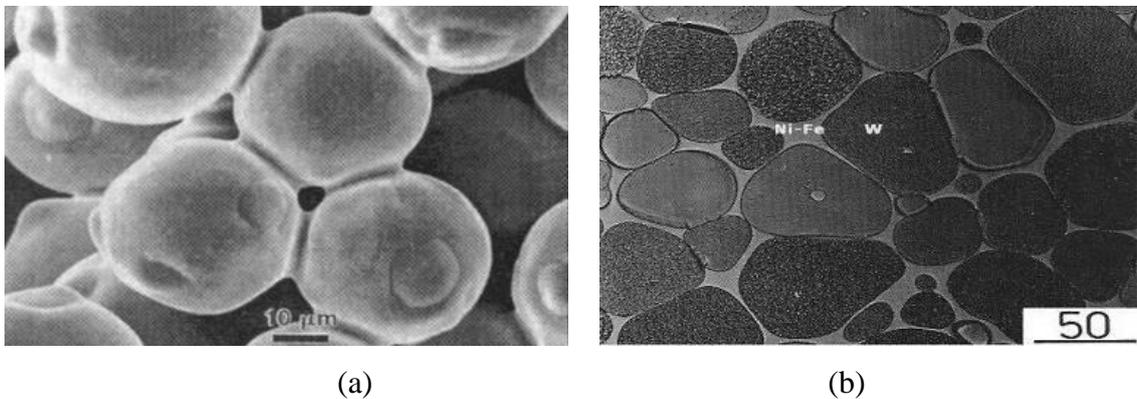
No processo de compactação, usualmente, são aplicadas pressões na faixa de 400MPa a 600MPa. Entretanto, para aumentar a densidade da peça sinterizada podem ser requeridas pressões de até 800 MPa. Porém, deve ser observado o dimensionamento da matriz, uma vez que as forças necessárias na compactação são proporcionais à área da sua cavidade. Entre os parâmetros de controle do processo, a densidade a verde é a densidade da peça compactada antes de ser sinterizada. A densidade é função da pressão, composição da mistura, distribuição, tamanho e forma das partículas e uso ou não de lubrificante [1, 9].

2.1.5 Sinterização

A etapa de sinterização pode ser definida como um tratamento térmico, com condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de aquecimento e resfriamento, em que uma massa de pós ou compactado poroso perde a sua identidade pela formação de continuidade de matéria entre as partículas e adquire as propriedades desejadas de densidade, dureza e resistência mecânica [10].

A sinterização consiste no aquecimento do compactado verde à temperaturas elevadas, porém, abaixo do ponto de fusão do metal ou do principal constituinte da liga metálica considerada. É tipicamente um processo de difusão no estado sólido, podendo ocorrer em fase sólida e líquida. Conforme pode ser observado na Figura 6, no primeiro caso, a temperatura promove a união das partículas do pó com temperaturas abaixo do ponto de fusão do material, porém, suficiente para criar um “pescoço” de ligação entre as partículas de pó. Já na ocorrência de fase líquida, sinteriza-se o material utilizando elementos com pontos de fusão diferentes e o material com menor ponto de fusão se liquefaz e interconecta a partícula do outro material [5].

Figura 6- (a) Sinterização por fase sólida, (b) Sinterização por fase líquida



Fonte: ASM Handbook, 1998.

2.2 Propriedades magnéticas

O estudo apropriado das máquinas elétricas se inicia pela compreensão das principais grandezas físicas relacionadas com o eletromagnetismo. Também, em função da natureza deste trabalho, se faz necessário um estudo sobre materiais magnéticos. Esta revisão foi realizada para esclarecer, por exemplo, as diferenças entre as unidades de campo, indução e fluxo magnético, bem como, o que diferencia um material magnético macio de um ímã permanente.

2.2.1 Campo, indução e fluxo magnético

Campo Magnético (\mathbf{H}): De acordo com a Lei de Ampère uma carga elétrica em movimento ou corrente elétrica \mathbf{I} produz, além do campo elétrico, um campo magnético \mathbf{H} [11, 12, 13].

$$\oint \bar{H}d\bar{l} = \int_s \mathbf{J}ds = I \quad (\text{Equação 1})$$

onde \mathbf{H} é o campo magnético [A/m], $d\mathbf{l}$ é o comprimento infinitesimal [m], \mathbf{J} é a densidade de corrente [A/m²], $d\mathbf{s}$ é um elemento infinitesimal de superfície [m²] e \mathbf{I} é a corrente elétrica [A]. No sistema CGS \mathbf{H} é expresso em Oersted [Oe] tal que [11, 13]:

$$0,01256 \text{ Oe} = 1 \text{ A/m}$$

Densidade de Fluxo ou Indução Magnética (\mathbf{B}): Um campo magnético \mathbf{H} induz fluxo magnético ou indução magnética \mathbf{B} , que se relacionam através da permeabilidade magnética do meio μ tal que [11, 12, 13, 14]:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} = \mu_o\mu_r\mathbf{H} = \mu_o\mathbf{H} + \mathbf{J}_s \quad (\text{Equação 2})$$

onde \mathbf{B} é a indução magnética [T], μ é a permeabilidade magnética do meio [H/m], μ_r é a permeabilidade magnética relativa [adimensional], μ_o é a permeabilidade magnética do vácuo [$4\pi \times 10^{-7}$ H/m] e \mathbf{J}_s é a polarização de magnetização [T]. No sistema CGS \mathbf{B} é expresso como Gauss [G] tal que [11, 12, 13, 14]:

$$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$$

Para a maioria dos materiais \mathbf{B} e \mathbf{H} tem mesma direção e sentido (meios isotrópicos) e μ é um escalar. Em alguns cristais \mathbf{B} pode não ter a mesma direção de \mathbf{H} (meios anisotrópicos) e μ é um tensor [11, 12].

Fluxo Magnético Total (Φ): Para \mathbf{B} uniforme e superfície plana o fluxo magnético total Φ perpendicular à superfície pode ser escrito como [11, 12, 13]:

$$\varphi = BA \quad (\text{Equação 3})$$

onde φ é o fluxo magnético total [Wb], \mathbf{B} é a indução magnética [T] e \mathbf{A} a área da seção, transversal às linhas de fluxo [m²]. Quando as linhas de indução magnética não são perpendiculares à área \mathbf{A} , a Equação 3 fica [11, 12, 13]:

$$\varphi = BA \cdot \cos \alpha \quad (\text{Equação 4})$$

onde α é o ângulo entre a perpendicular a área \mathbf{A} e a direção de \mathbf{B} . Se \mathbf{B} não for uniforme sobre uma área, a Equação 4 se generaliza de tal forma que [11, 12, 13, 14]:

$$\varphi = \iint \mathbf{B} \cdot \cos \alpha \cdot ds \quad (\text{Equação 5})$$

2.2.2 Permeabilidade magnética relativa

A permeabilidade magnética do meio é representada como [11, 12, 13]:

$$\mu = \mu_r \mu_o \quad (\text{Equação 6})$$

A Tabela 1 relaciona algumas substâncias com suas respectivas permeabilidades magnéticas relativas. Deve-se salientar que a permeabilidade magnética relativa não é constante para alguns materiais, principalmente os ferromagnéticos e, neste caso, a tabela apresenta os valores máximos [12, 15].

Tabela 1 - Permeabilidade relativa de alguns materiais

Substância	Grupo	μ_r (Adimensional)
Bismuto	diamagnético	0,99983
Prata	diamagnético	0,99998
Cobre	diamagnético	0,999991
Água	diamagnético	0,999991
Vácuo	não-magnético	1
Ar	paramagnético	1,0000004
Alumínio	paramagnético	1,00002

Paládio	paramagnético	1,0008
Pó de permalloy 2-81	ferromagnético	$1,3 \times 10^2$
Cobalto	ferromagnético	$2,5 \times 10^2$
Níquel	ferromagnético	$6,0 \times 10^2$
Ferrocube 3	ferromagnético	$1,5 \times 10^3$
Aço doce	ferromagnético	$2,0 \times 10^3$
Ferro (0,2% de impurezas)	ferromagnético	$5,0 \times 10^3$
Permalloy 78	ferromagnético	$1,0 \times 10^5$
Supermalloy	ferromagnético	$1,0 \times 10^6$

Fonte: Kraus & Carver, 1978.

Da Tabela 1 pode-se concluir o seguinte [11, 12, 13]:

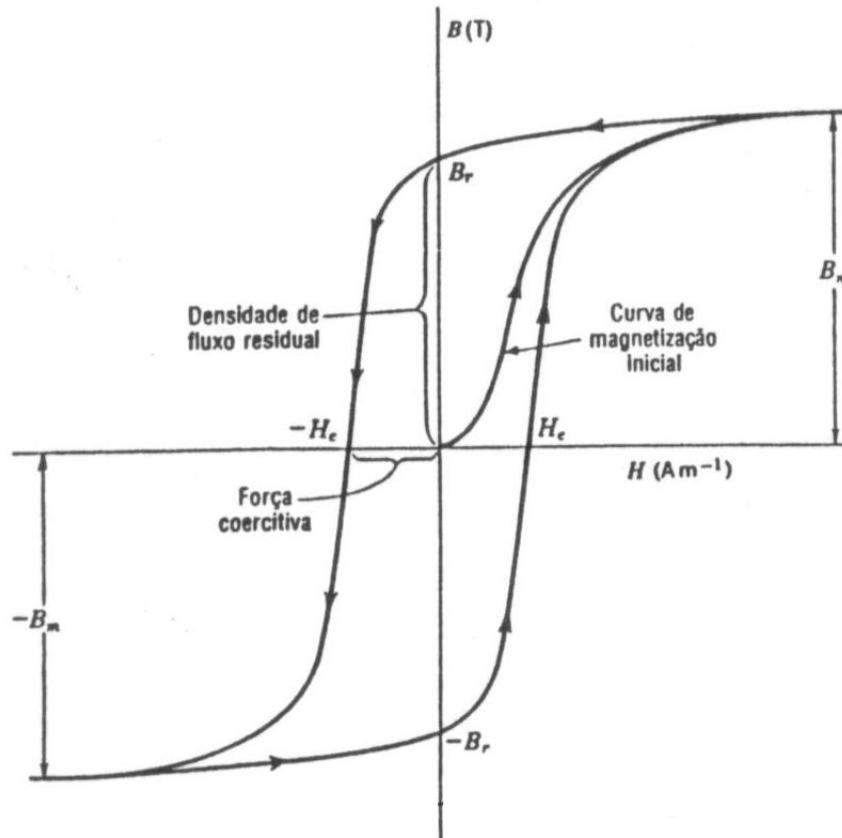
- μ_r (substâncias diamagnéticas) \Rightarrow ligeiramente menor que 1
- μ_r (substâncias paramagnéticas) \Rightarrow ligeiramente maior que 1
- μ_r (substâncias ferromagnéticas) \Rightarrow muito maior que 1

Outros tipos de materiais são os *antiferromagnéticos*, *ferrimagnéticos* e *superparamagnéticos* [11, 12].

2.2.3 Curva de histerese

Se um material for colocado dentro de uma bobina na qual circula uma corrente elétrica **I**, um campo magnético **H** será gerado no interior desta bobina, e o material irá sofrer uma indução magnética **B**. Se o material for diamagnético ou paramagnético poucas linhas de fluxo magnético serão induzidas e a relação **BxH** será aproximadamente linear. Se o material for ferromagnético muitas linhas de fluxo serão induzidas (fenômeno de magnetização) e a relação **BxH** apresenta as características de uma curva conforme a Figura 7. Observa-se que esta curva possui uma histerese sendo, portanto, denominada de *curva de histerese* ou *ciclo de histerese*. Os materiais que possuem características magnéticas semelhantes às mostradas pela curva da Figura 7 são conhecidos como *materiais magnéticos* [11, 12, 13, 14, 16].

Figura 7 - Ciclo de histerese para um material magnético

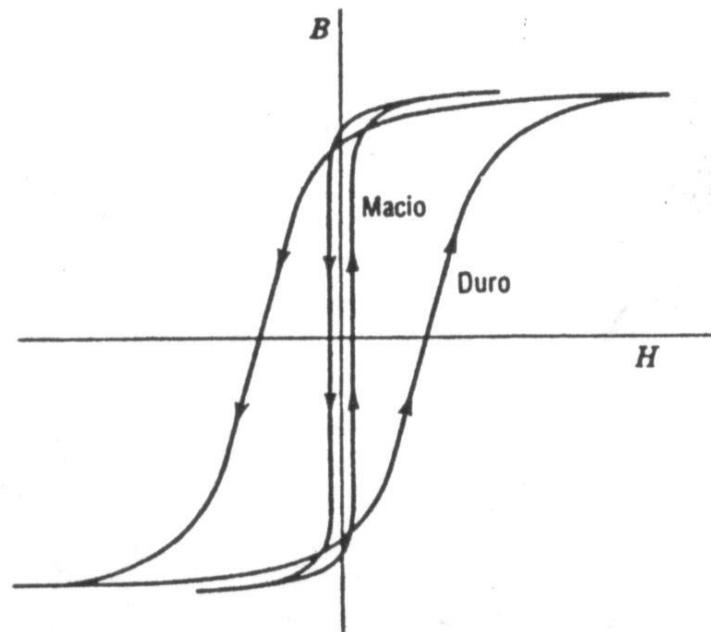


Fonte: Kraus & Carver, 1978.

O ponto em que a curva corta o eixo de \mathbf{B} , no quadrante superior esquerdo, é denominado de *magnetismo remanente* e representa a indução magnética residual que permanece no material sem campo magnético aplicado ($\mathbf{H} = 0$). O magnetismo remanente máximo é denominado de *retentividade* \mathbf{B}_r . O ponto em que a curva corta o eixo de \mathbf{H} no mesmo quadrante é denominado de *força coercitiva* e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o material ($\mathbf{B} = 0$). O campo desmagnetizante máximo é denominado de *coercitividade* \mathbf{H}_c . Outro fator importante na identificação dos materiais magnéticos é o produto energético $\mathbf{BH}_{\text{máx}}$ [J/m^3] e está associado com a densidade de energia armazenada num material magnético [11, 12, 17].

A Figura 8 mostra dois ciclos de histerese, um largo que representa um *material magnético duro* também conhecido como ímã permanente (geralmente materiais ferrimagnéticos) e um estreito que representa um *material magnético macio* (geralmente materiais ferromagnéticos) [11, 12, 13].

Figura 8 - Ciclo de histerese para materiais magnéticos duros e macios



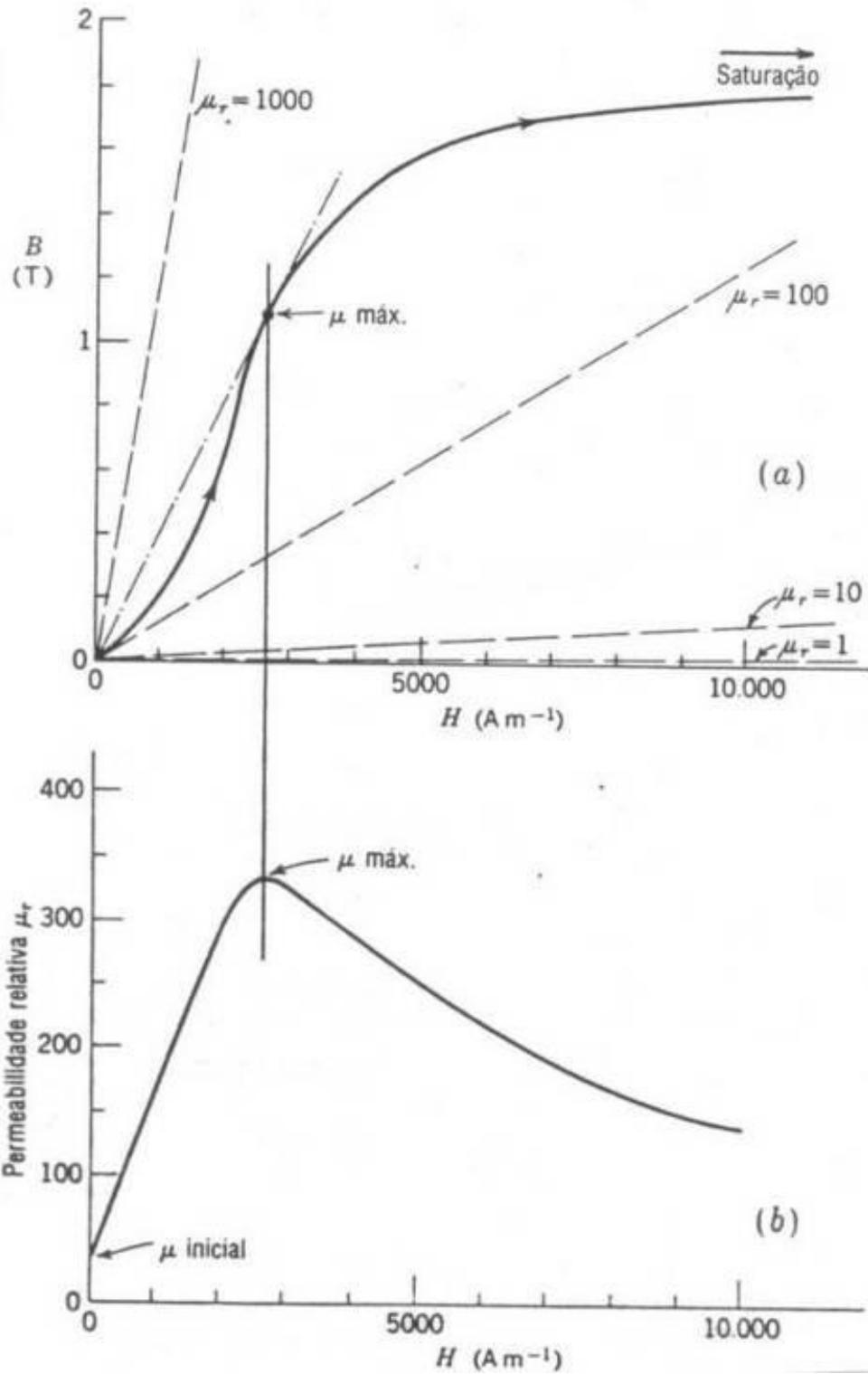
Fonte: Kraus & Carver, 1978.

2.2.4 Magnetização

Uma curva típica de um material magnético é mostrada na Figura 9(a). Para fins de comparação, esta figura mostra quatro linhas tracejadas, correspondendo às permeabilidades relativas constantes, μ_r , de 1, 10, 100 e 1000. A Figura 9(b) apresenta um gráfico de permeabilidade relativa como função do campo H aplicado. A permeabilidade relativa máxima se encontra no ponto da curva de magnetização onde a relação de B e H é máxima, sendo designada por $\mu_{\text{máx}}$ [12].

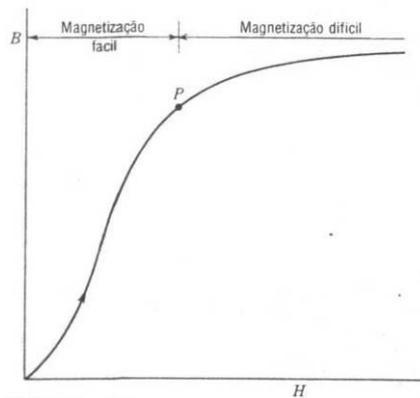
Quando o valor de H é aumentado, o de B aumenta rapidamente a princípio e depois mais lentamente. Quando aplicados valores elevados de campo magnético a curva tende a ficar assintótica. Esta condição é chamada de saturação magnética. Assim, a curva de magnetização inicial pode ser dividida em duas seções: (1) a seção íngreme e (2) a seção plana, estando o ponto P no lugar superior da parte íngreme, conforme mostra a Figura 10. A seção íngreme corresponde à condição de fácil magnetização, enquanto a seção plana de difícil magnetização [11, 12, 18].

Figura 9 - (a) Curva de magnetização, (b) Relação entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado



Fonte: Kraus & Carver, 1978.

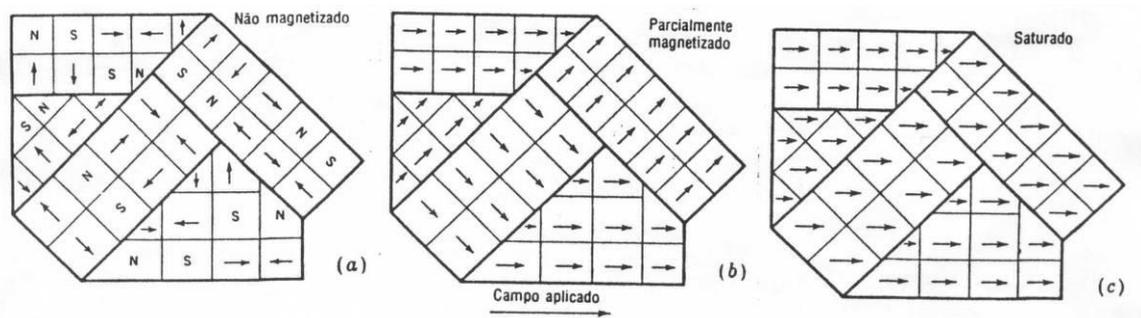
Figura 10 - Regiões de magnetização fácil e difícil da curva de magnetização inicial



Fonte: Kraus & Carver, 1978.

Para se compreender o fenômeno da magnetização, pode-se tomar em consideração um fragmento de um material magnético. Este fragmento, geralmente, não consiste de um único cristal ou grão, mas de agregados de grãos que por sua vez se dividem nos domínios magnéticos, de acordo com a Figura 11(a). Os domínios se orientam de tal forma que a energia seja mínima, ou seja, os domínios adjacentes estão com polaridade contrária, diminuindo a energia no campo magnético, e tendo como consequência uma magnetização total nula. Com a aplicação de um campo magnético H conforme Figura 11(b), alguns domínios com polaridade opostas ou perpendiculares ao campo aplicado, tornam-se instáveis e giram rapidamente para outro sentido de fácil magnetização, na mesma direção do campo ou bem próximo a este. Aumentando-se mais o campo aplicado como indicado na Figura 11(c), todos os domínios alinham-se na direção do campo. Entretanto, este aumento de magnetização é mais difícil e podem ser necessários campos muito fortes para a saturação plena ser obtida [11, 12, 18, 19].

Figura 11 - Estágios de magnetização de uma amostra policristalina com o crescimento do campo



Fonte: Kraus & Carver, 1978.

2.2.5 Relutância e força magnetomotriz

Relutância é uma “resistência” que o meio oferece à circulação do fluxo magnético, sendo uma grandeza análoga à resistência elétrica, calculada como [11, 20, 21, 22]:

$$\mathfrak{R} = \frac{\mathfrak{F}}{\varphi} = \frac{l}{\mu A} \quad (\text{Equação 7})$$

onde \mathfrak{R} é a relutância magnética [Ae/Wb], $\mathfrak{F} = \mathbf{fmm}$ a força magnetomotriz [Ae], μ a permeabilidade magnética do meio [H/m], l = comprimento [m] e A a área da secção transversal [m²].

2.3 Máquinas elétricas rotativas

As máquinas elétricas com alimentação trifásica, assim como, a maioria das máquinas elétricas podem funcionar como *motor* ou *gerador*. Como motor, convertem potência elétrica, a partir de uma fonte de energia elétrica, numa potência mecânica, que aciona uma carga acoplada ao eixo. Como gerador processa-se o contrário. Por este motivo, os motores elétricos podem ser denominados de máquinas elétricas rotativas ou, simplesmente, de máquinas elétricas [21, 22, 23].

As máquinas rotativas trifásicas podem ser síncronas e assíncronas. Nos motores síncronos a velocidade angular do eixo é constante e independe da carga acoplada ao eixo, isto até determinados valores de potência, tendo como limite de uso, a potência nominal da máquina. Nos motores assíncronos, há uma queda da velocidade angular quando é acoplada carga no eixo [21, 22, 23].

Com relação ao aspecto construtivo, as máquinas trifásicas são constituídas fundamentalmente de duas partes [11, 21, 22, 23]:

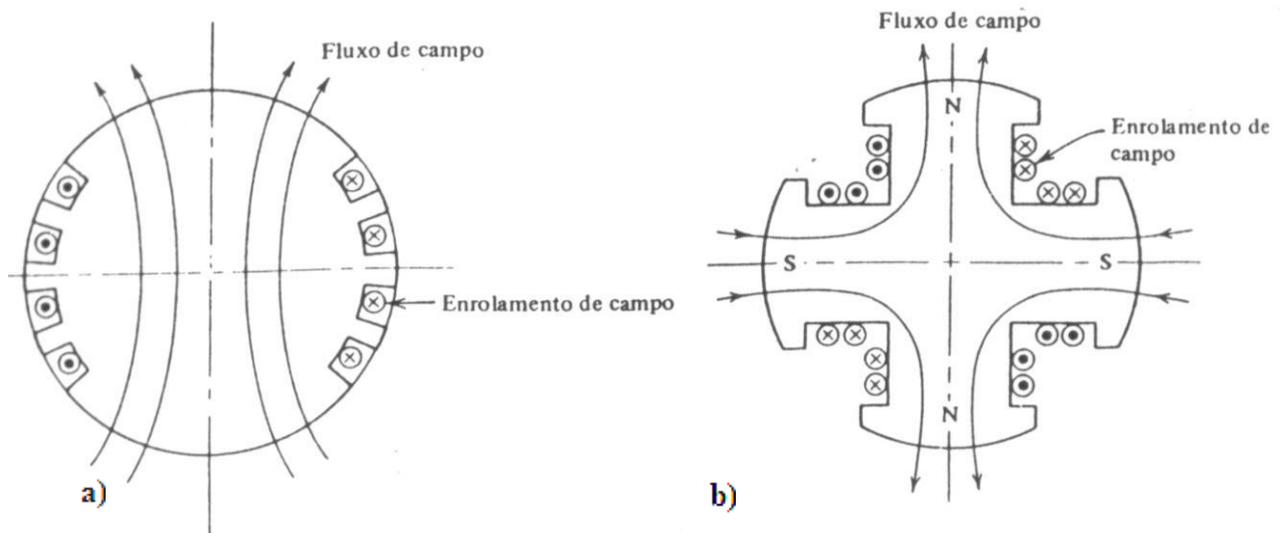
- **Estató:** Parte fixa da máquina construída de chapas de aço laminadas, na qual são colocados os enrolamentos de armadura com alimentação trifásica, onde é gerada uma onda de indução magnética também conhecida por campo girante.

- **Rotor:** Parte girante da máquina construída de chapas de aço laminadas na qual, na maioria das vezes, estão presentes os enrolamentos de campo.

Salienta-se, que a diferença fundamental entre as diversas máquinas trifásicas está na concepção do rotor. Portanto, abaixo estão relacionadas as principais máquinas trifásicas e suas peculiaridades de maior interesse [11, 21, 22, 23]:

- **Máquina síncrona convencional com alimentação de campo externa:** Os enrolamentos de campo são alimentados com corrente contínua levada até eles através de anéis deslizantes e escovas. O inconveniente neste tipo de máquina é que esta necessita de uma fonte de tensão externa contínua ajustável. Entretanto, esta máquina funcionando como motor pode apresentar características capacitivas, possibilitando sua utilização para correção do fator de potência de instalações elétricas. A defasagem com características capacitivas destes motores é de possível adequação com a regulação da corrente de campo através da fonte de corrente contínua externa. Com relação à forma do rotor, conforme a Figura 12, estes podem ter polos lisos ou polos salientes [11, 21, 22, 23].

Figura 12 - (a) Rotor polos lisos - (b) Rotor polos salientes



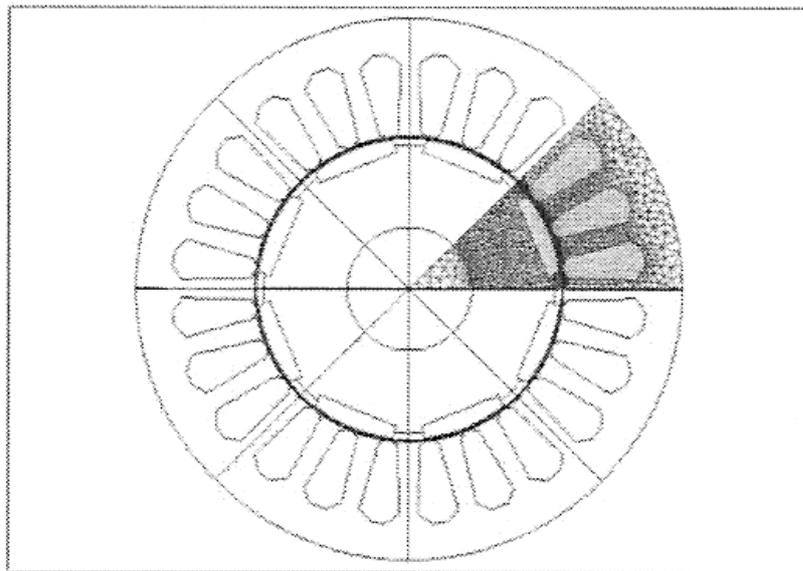
Fonte: Nasar, 1984.

- **Máquina síncrona convencional com excitatriz interna:** Os enrolamentos de campo são alimentados com corrente contínua a partir de um gerador interno também conhecido por excitatriz, acoplado diretamente ao eixo da máquina. Neste tipo de máquina não há escovas

reduzindo, então, as manutenções. O rotor pode ser de polos lisos ou polos salientes [11, 21, 22, 23].

- **Máquina síncrona com ímã permanente:** Não há enrolamentos de campo, que são substituídos por ímãs permanentes de alto produto energético. Não possui escovas ou fonte de tensão contínua, reduzindo manutenções, aumentando o rendimento e com melhor relação torque/volume. Os ímãs são fixados, em alguns casos, tangencialmente na superfície dos polos do rotor ou axialmente internamente no rotor [11, 20, 24, 25]. Alguns possuem uma configuração híbrida [11, 26]. A configuração de uma máquina síncrona com ímãs tangenciais é mostrada na Figura 13:

Figura 13 – Vista em corte de um motor síncrono com ímãs permanentes



Fonte: Dias, 2005.

- **Servomotor:**

Os servomotores são utilizados nas mais diversas aplicações industriais onde, elevado controle de torque, precisão de velocidade e posicionamento são fatores decisivos para o aumento do desempenho. Possuem custo baixo, desempenho elevado e robustez. O servoacionamento é composto de motor e de conversor de frequência para controle e acionamento do motor [27].

Possuem as seguintes aplicações [27]:

- Empacotadeiras (dosadoras).
- Bobinadeiras.
- Máquinas-ferramenta.
- Máquinas de corte e solda (plásticos).
- Máquinas gráficas.
- Sistemas de posicionamentos.
- Mesas giratórias.
- Esteiras com paradas programadas.
- Máquinas de embalagens.
- Alimentadores de prensas.
- Máquinas têxteis.

2.4 Fatores que determinam o desempenho das máquinas elétricas

Na sua grande maioria, os núcleos do estator e do rotor das máquinas elétricas são construídas com chapas de aço baixo carbono. Algumas máquinas de maior rendimento ainda são construídas com chapas de aço-silício, com um percentual de 1 a 3% de silício. O processo total para a confecção destes núcleos consiste basicamente em laminação, corte, tratamento para isolamento, empacotamento e fixação. No caso das chapas de aço baixo carbono, o processo para isolação consiste num tratamento térmico, onde os pacotes de chapas são colocados em fornos para a oxidação da superfície das chapas e em consequência, a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes [28, 29]. Os seguintes fatores determinam o desempenho das máquinas elétricas:

- As chapas são confeccionadas a partir do ferro, pois este é um material ferromagnético e apresenta alta permeabilidade magnética. Em circuitos magnéticos compostos por bobinas, núcleos de ferro e entreferro, quanto maior a permeabilidade magnética dos núcleos, menor será o campo magnético nos núcleos e maior será a intensidade de campo no entreferro. Portanto, se os núcleos do estator e do rotor são construídos com materiais com maior permeabilidade magnética, o motor poderá apresentar um desempenho melhor [11, 29, 30].

- Entretanto, não basta ao material dos núcleos magnéticos possuir alta permeabilidade. Deve apresentar, também, elevada indução de saturação, possibilitando que a máquina trabalhe num ponto de fluxo magnético elevado, sempre abaixo do ponto de saturação [11, 28, 29].
- Utiliza-se aço baixo carbono, pois este é um material magnético macio e apresenta baixa coercitividade. A perda por histerese é proporcional à área do ciclo de histerese, portanto, quanto mais estreito o ciclo, menores a coercitividade e a perda por histerese [11, 28, 29, 31].
- Sempre que ocorre a incidência de um fluxo alternado sobre um núcleo magnético haverá, também, correntes induzidas neste núcleo. Tanto o estator como o rotor são construídos com chapas laminadas e isoladas, uma vez que este isolamento entre chapas restringe as correntes induzidas a uma menor área de circulação. A corrente induzida total será a soma das correntes induzidas em cada chapa. Entretanto, a corrente induzida total será consideravelmente menor, comparada a uma máquina com estator e rotor construídos com material maciço. A redução das correntes induzidas pode ser interpretada como um aumento da resistência elétrica do corpo, uma vez que são grandezas físicas inversamente proporcionais. Este efeito de redução das correntes induzidas, também pode ser obtido com o aumento da resistividade elétrica do material. Portanto, quanto maior a resistividade do material, menor serão as correntes induzidas e as perdas por correntes parasitas [11, 29, 31].

Em resumo, o material com o qual os núcleos do estator e do rotor são construídos deve apresentar as seguintes propriedades [11, 15]:

- Alta permeabilidade magnética relativa.
- Baixa coercitividade magnética.
- Alta resistividade ou resistência elétrica.
- Alta indução de saturação.

2.5 Características dos materiais magnéticos macios sinterizados

As propriedades físicas dos materiais obtidos por Metalurgia do Pó, como por exemplo, as magnéticas e elétricas são influenciadas por vários fatores, sendo que, aqueles

considerados de maior importância no desenvolvimento deste trabalho, estão relacionados a seguir:

- Na maioria dos casos, a resistividade de uma liga metálica aumenta quando são adicionadas impurezas, uma vez que estas provocam distorções no reticulado cristalino. Quanto maior as imperfeições da rede cristalina, maior a resistividade. Por esta razão, uma resistividade maior em metais é obtida em ligas compostas por dois ou mais metais. Nestas condições ocorre interpenetração das redes cristalinas dos materiais presentes na liga [11, 32, 33, 34].
- Quando são adicionados silício, fósforo ou níquel ao ferro sinterizado ocorre aumento da resistividade da liga [18]. A adição de silício ao ferro, além de aumentar a resistividade elétrica aumenta, também, a permeabilidade magnética relativa máxima e diminui a coercitividade. Contudo, diminui a indução de saturação [11, 35].
- No caso de materiais sinterizados, a maioria dos materiais ferrosos possui resistividade elétrica maior, devido principalmente à porosidade e à oxidação superficial das partículas. A resistividade das ligas metálicas diminui com o aumento da densidade independente do tipo de material. Com o aumento da porosidade há uma diminuição da permeabilidade magnética, da indução de saturação e aumento da coercitividade. A alta densidade de peças por M/P determina elevada permeabilidade magnética e indução de saturação [11, 32, 33, 34, 35].
- A resistividade elétrica para a maioria das ligas metálicas, também é função do tamanho do grão. Quanto menor o tamanho do grão, maior a quantidade de contornos de grãos, que também provocam distúrbios na rede cristalina aumentando a resistividade. Entretanto, a diminuição do tamanho do grão ocasiona um decréscimo da permeabilidade magnética e um aumento da coercitividade [11, 33, 34, 36, 37].
- Outro fator que também afeta as propriedades magnéticas é o tamanho da partícula do pó. O aumento da granulometria eleva a permeabilidade magnética, mas aumenta a coercitividade. Baixa quantidade de carbono e microestrutura sem a presença de perlita são necessárias para se obter boas propriedades magnéticas nos materiais ferromagnéticos [5]. O tamanho do grão determina um efeito muito forte nas perdas magnéticas, sendo que sua dimensão ideal varia entre 100 e 150 μm [33, 34]. Além

disto, outros fatores como tempo, temperatura e atmosfera de sinterização, também, alteram algumas propriedades físicas [37, 38].

A seguir estão descritas as ligas utilizadas neste trabalho e suas propriedades físicas de interesse [11, 19, 32, 39]:

- Ferro puro.
- Ligas ferro-fósforo.
- Ligas ferro-silício.
- Ligas ferro-níquel.

Ferro puro: 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 ($0,11 \mu\Omega.m$). O ferro puro sinterizado de alta densidade ($7,4 \text{ g/cm}^3$) possui elevadas indução máxima (1,47 T) e permeabilidade relativa (4700), bem como, baixa coercitividade (119 A/m). Essas propriedades são essenciais para aplicações de corrente contínua. Os materiais e as condições de processamento necessitam de rígido controle para a obtenção de propriedades adequadas, por exemplo, se tensões são introduzidas ou o nível de pureza diminui, todas as propriedades são afetadas [11, 32, 39].

Liga ferro-fósforo: Os materiais sinterizados de ferro-fósforo mantêm as vantagens econômicas do ferro puro, adicionando ainda características magnéticas superiores. Basicamente, a força coercitiva é reduzida (80 A/m), a resistividade aumenta ($0,20 \mu\Omega.m$) e se obtém elevadas indução máxima (1,46 T) e permeabilidade relativa (4800). Estas ligas são utilizadas, principalmente, quando se deseja boa resposta magnética aliada a propriedades mecânicas igualmente adequadas [11, 19, 32, 39].

Ligas ferro-silício: Estas ligas apresentam força coercitiva (80 A/m), indução máxima (1,39 T) e permeabilidade relativa máxima (4900) similares às das ligas ferro fósforo. Porém, sua resistividade elétrica ($0,55 \mu\Omega.m$) é bastante superior, diminuindo assim as perdas por correntes parasitas. Estas ligas são aplicadas em circuitos que operam em frequências médias

de até 1200 Hz. Peças de alta densidade com induções máximas elevadas podem ser obtidas, porém, o custo de produção aumenta devido à baixa compressibilidade do material [11, 32].

Ligas ferro-níquel: A liga Fe50%Ni se caracteriza por possuir elevada permeabilidade relativa (7000), baixa indução de saturação (1,27 T) e resistividade de valor intermediário ($0,35 \mu\Omega.m$), se comparada às demais [11, 19, 35]. Suas propriedades tornam essas ligas de interesse em aplicações mais sofisticadas, que operam em altas frequências e com baixa excitação, nas quais é exigido um tempo de resposta muito curto como, por exemplo, em circuitos atuadores de termopares [11, 19, 32].

2.6 Aplicação de materiais magnéticos macios sinterizados em núcleos magnéticos e motores

Os materiais compósitos magnéticos macios de elevada resistividade elétrica encontram aplicação em núcleos de motores ou geradores de aplicação especial, sendo utilizados em máquinas que operem em frequências elevadas, como servomotores e minimotores. Todavia, estes materiais possuem menores indução de saturação e permeabilidade magnética em relação ao material sinterizado, o que limita a faixa operacional e o rendimento da máquina [8, 11, 15, 16, 18].

Materiais magnéticos macios sinterizados de alta resistividade elétrica, elevada permeabilidade relativa, baixa coercitividade e alta indução de saturação, obtidos através dos processos da M/P podem ser utilizados na construção de núcleos magnéticos de máquinas elétricas, possibilitando melhorar as propriedades físicas de interesse e eliminando as tradicionais chapas de aço laminadas [11, 40, 41, 42].

Materiais sinterizados obtidos a partir de ligas de material magnético macio, com ferro e outros constituintes como, por exemplo, fósforo, silício, níquel, cobalto e molibdênio podem ser utilizados na construção dos núcleos de estatores e rotores de máquinas elétricas rotativas em *blocos únicos* [43, 44, 45, 46].

Materiais magnéticos macios para aplicações em corrente alternada (**ac**) são os materiais da família do ferro, como as ligas ferro-silício e ferro-níquel, comumente utilizadas na produção de componentes elétricos. Devido à natureza isotrópica das peças magnéticas macias por M/P, fatores no projeto como empilhamento de chapas laminadas não são

apropriadas para a redução das perdas totais. O sucesso da aplicação depende da forma, das dimensões das peças e das propriedades dos materiais. Atualmente, a produção de peças com ligas ferro-silício e ferro-níquel por M/P é um processo industrial, no qual as propriedades magnéticas são ajustadas por parâmetros bem definidos como a pressão de compactação, tempo e temperatura de sinterização. Contudo, os processos da M/P permitem o uso de elementos, ligas e sistemas além da esfera dos tradicionais materiais magnéticos macios. Um exemplo comum de material magnético macio é a liga ferro-fósforo com 0,8% de fósforo, que resulta em peças isotrópicas as quais, independente da forma ou tamanho possuem propriedades magnéticas equivalentes ao pacote de chapas de aço laminadas. A adição de fósforo melhora não somente as propriedades magnéticas macias do ferro, assim como, das ligas ferro-silício [11, 16].

Novos materiais magnéticos macios têm sido desenvolvidos para aplicações em motores ac (corrente alternada) e cc (corrente contínua). Os componentes do motor são construídos a partir dos processos da Metalurgia do Pó, em contraste ao método tradicional do empacotamento de chapas laminadas. Estes novos materiais oferecem muitas vantagens na manufatura. Também, devido as suas baixas perdas por correntes parasitas, possuem boas propriedades magnéticas em altas frequências. Componentes fabricados com estes novos materiais magnéticos têm demonstrado desempenho comparável para frequências maiores que 60 Hz, em relação aos motores construídos com pacotes de chapas de aço laminadas. A perda total mais baixa do núcleo com material sinterizado em elevadas frequências se deve às correntes induzidas menores [11, 17, 40, 46].

No processo de obtenção das chapas de aço laminadas para confecção de muitos dispositivos (motores, pequenos transformadores), as mesmas são estampadas, temperadas e empilhadas para os processos de construção do núcleo magnético dos dispositivos. Este processo de fabricação gera custos elevados, além de uma quantidade excessiva de sobras, em torno de 40%, no momento em que as chapas são estampadas [11, 33].

O mercado para motores com ímãs permanentes de velocidade variável está aumentando. Nestes motores o núcleo do rotor é construído com chapas de aço laminadas e os ímãs são fixados neste núcleo. Frequências tão altas quanto 800 Hz estão sendo utilizadas. Com o aumento destas frequências, as perdas nos núcleos de aço aumentam, reduzindo a eficiência dos motores e limitando as faixas de operação [11, 33].

Os componentes sinterizados, com relação à dependência da frequência das perdas do núcleo, possibilitam construir um componente magnético que apresente uma dependência quase linear de perda no núcleo com a frequência, ao invés da dependência quase quadrada de perda do núcleo com a frequência, como é típico na maioria dos aços laminados. Os dispositivos construídos com material sinterizado apresentam perdas menores quando submetidos a frequências maiores que 400 Hz. Uma vez que motores com ímãs permanentes de velocidade variável operam a frequências até 800 Hz é possível obter-se uma melhor eficiência nestes dispositivos [11, 33].

Assim, pode-se destacar que pesquisas estão sendo realizadas com o objetivo de substituir os tradicionais pacotes de chapas laminadas por blocos maciços sinterizados [16, 17, 33, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46]. Salienta-se que para baixas frequências (60 Hz) as perdas ainda são maiores nos materiais sinterizados, contudo, para frequências maiores que 400 Hz, os materiais sinterizados apresentam um desempenho aproximado aos núcleos de chapas laminadas [11, 33].

2.7 Ímãs permanentes e sua aplicação em máquinas elétricas

As máquinas elétricas rotativas possuem em seu interior os núcleos do estator e rotor, geralmente, com um conjunto de enrolamentos para cada núcleo. Quando os enrolamentos são alimentados com corrente contínua, estes produzem um campo magnético contínuo e estático e são denominados de enrolamentos de campo. Quando os enrolamentos são alimentados com corrente alternada senoidal, estes produzem um campo magnético, também, com características senoidais ou aproximadas e são denominados de enrolamentos de armadura [22, 24].

No caso das máquinas que empregam cc, os enrolamentos de campo encontram-se no estator e os de armadura no rotor. Nas máquinas síncronas trifásicas convencionais, os enrolamentos de campo encontram-se no rotor e os de armadura no estator, entretanto, em algumas máquinas síncronas poderá ocorrer o contrário [22, 24].

Assim, os enrolamentos de campo podem ser substituídos por ímãs permanentes, como ímãs de neodímio-ferro-boro para máquinas síncronas e ímãs de ferrita no caso de motores pequenos (cc). Nestes casos, os núcleos onde estão dispostos os enrolamentos de

campo podem ser construídos de material magnético macio maciço como o aço, uma vez que, não havendo alternância no campo não haverá correntes parasitas [22, 24].

Para a substituição de núcleos envolvidos por enrolamentos de armadura, uma possibilidade é a construção destes núcleos em blocos maciços de material magnético macio de elevada permeabilidade magnética, porém de alta resistividade elétrica. Esta seria uma alternativa para redução das correntes parasitas. Uma forma de se aumentar a resistividade elétrica dos materiais é a utilização dos processos da Metalurgia do Pó [9, 17].

Atualmente, os principais ímãs encontrados no mercado são os cerâmicos (ferritas), as ligas de alumínio-níquel-cobalto e os terras raras como samário-cobalto e neodímio-ferro-boro. Os sinterizados de ferritas são os mais comercializados. Os ímãs de terras raras como o samário-cobalto (Sm-Co) e o neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B), também sinterizados, são os de maior eficiência energética e o segundo grupo mais negociado. Os ímãs de Al-Ni-Co podem ser obtidos por sinterização ou fundição [13, 14, 47].

Em função do barateamento dos constituintes e dos custos da produção, os ímãs Nd-Fe-B estão, gradativamente, substituindo os ímãs de Sm-Co, Al-Ni-Co e Ferrita, em aplicações específicas onde se necessitam de melhores características magnéticas, reduzindo assim a massa e o volume dos ímãs utilizados. Ímãs permanentes, também conhecidos como materiais magnéticos duros são utilizados na indústria de gravações magnéticas, eletrodomésticos, motores - geradores, informática, relógios, motores lineares, microfones, alto falantes, balanças, lasers, sistemas magnéticos, entre outros [13, 14, 47].

Os ímãs de Nd-Fe-B apresentam a maior capacidade energética. Uma das formas de obtenção deste material é através dos processos da Metalurgia do Pó. A preparação do pó se dá por “mechanical alloying”, que é um processo realizado em moinhos de bolas de alta energia, onde os pós elementares ou pré-ligados são submetidos a uma série de impactos, sendo prensados, soldados e fraturados repetidas vezes até que a microestrutura (tamanho de partícula de grão) entre em equilíbrio. O tamanho de partículas adequado é relevante, porque as partículas grosseiras comprometem o alinhamento e as partículas muito finas são sensíveis à oxidação [13, 14, 47].

3 ANÁLISE EXPERIMENTAL

3.1 Ligas utilizadas

Neste trabalho foi estudado o desenvolvimento de ligas sinterizadas a partir de pós de ferro, fósforo, silício e níquel pela M/P. Neste processo as ligas são misturadas, compactadas e sinterizadas. Os teores de adição foram baseados em dados bibliográficos [1, 11, 19, 32, 39].

A Tabela 2 mostra a relação das ligas sinterizadas estudadas.

Tabela 2 - Ligas sinterizadas

<i>Amostra</i>	<i>Liga</i>
1	Fe Puro
2	Fe1%P
3	Fe2%P
4	Fe3%P
5	Fe1%Si
6	Fe3%Si
7	Fe5%Si
8	Fe50%Ni

Os pós empregados como matéria-prima nesta pesquisa foram adquiridos da Höganäs Brasil Ltda. Conforme certificados do fabricante, o pó de ferro utilizado foi o ASC100.29, com 99,4% da granulometria entre 45 μm e 150 μm . O pó Fe3P apresenta 90% de sua dimensão abaixo de 14,58 μm . O pó FeSi 45 tem 87% de seu conteúdo entre 45 μm e 250 μm e o pó de níquel apresenta granulometria mínima de 3 μm e máxima de 7 μm .

Foram construídos três tipos de corpos de prova, cada um com geometria diferente, para a obtenção das propriedades mecânicas, magnéticas e elétricas de interesse:

- Densidade.
- Resistividade Elétrica.
- Curva de Histerese.

- Curva de Magnetização.
- Dureza.
- Tensão de Escoamento.
- Metalografia.
- Perdas Magnéticas com a variação da frequência.

Para cada geometria e liga específica foram compactadas três amostras, de onde os dados necessários foram retirados dos respectivos ensaios realizados. Uma média destes dados para cada geometria e liga foi calculada, para a obtenção de resultados confiáveis.

3.2 Matrizes utilizadas para compactação dos corpos de prova

Na avaliação das propriedades físicas de interesse foram utilizadas matrizes para a obtenção dos corpos de prova. A geometria de cada matriz e os ensaios realizados estão relacionados a seguir:

• Matriz para obtenção dos corpos de prova na forma de cilindro: Estes corpos de prova foram utilizados para medição da densidade e realização dos ensaios de dureza e compressão.

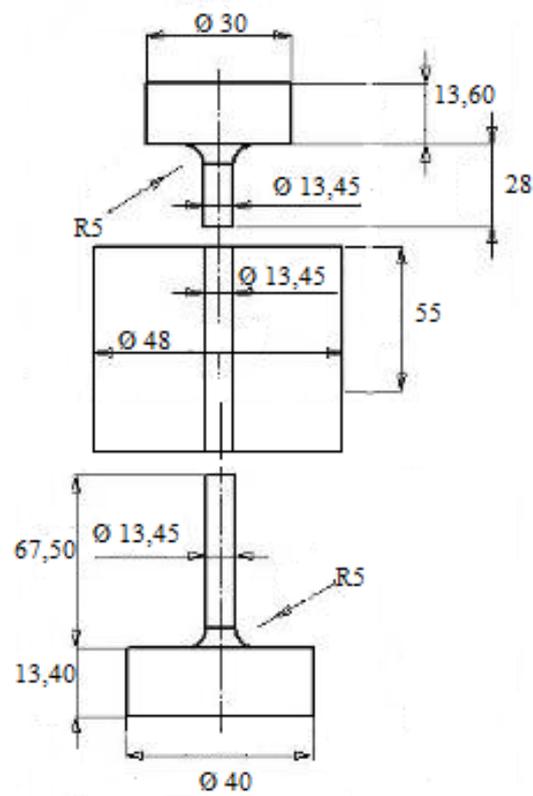
A Figura 14 mostra a matriz para compactação dos corpos de prova na forma de cilindro e a Figura 15 sua geometria expressa em milímetros.

Figura 14 – Matriz para compactação dos corpos de prova na forma de cilindro



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 15 - Geometria da matriz de compactação dos corpos de prova na forma de cilindro



Fonte: Arquivo pessoal.

•Matriz para obtenção dos corpos de prova na forma de anel: Estes corpos de prova foram utilizados para obtenção das metalografias, das curvas de histerese e magnetização, assim como, para determinação da resistividade elétrica.

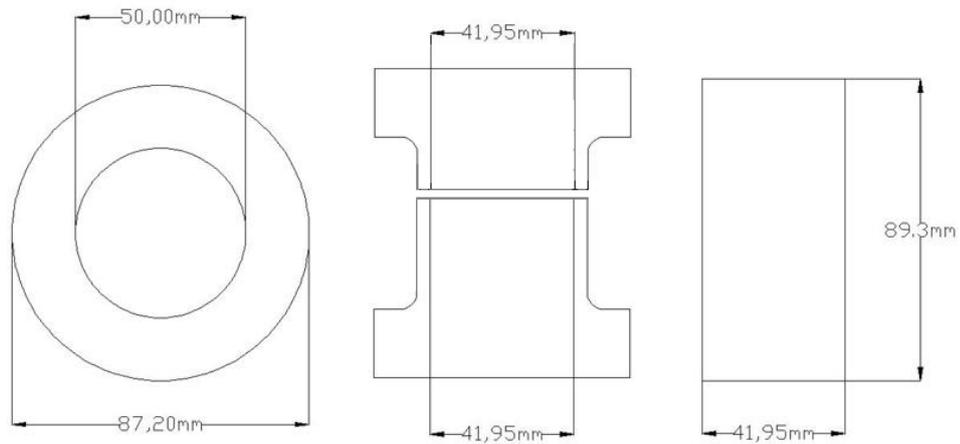
As Figuras 16 e 17 mostram, respectivamente, a matriz para compactação dos corpos de prova na forma de anel e a sua geometria.

Figura 16 – Matriz para compactação dos corpos de prova na forma de anel



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 17 - Geometria da matriz de compactação dos corpos de prova na forma de anel



Fonte: Arquivo pessoal.

• Matrizes para obtenção dos núcleos de transformadores: Os corpos de prova obtidos foram utilizados para medir as perdas totais do núcleo de pequenos transformadores.

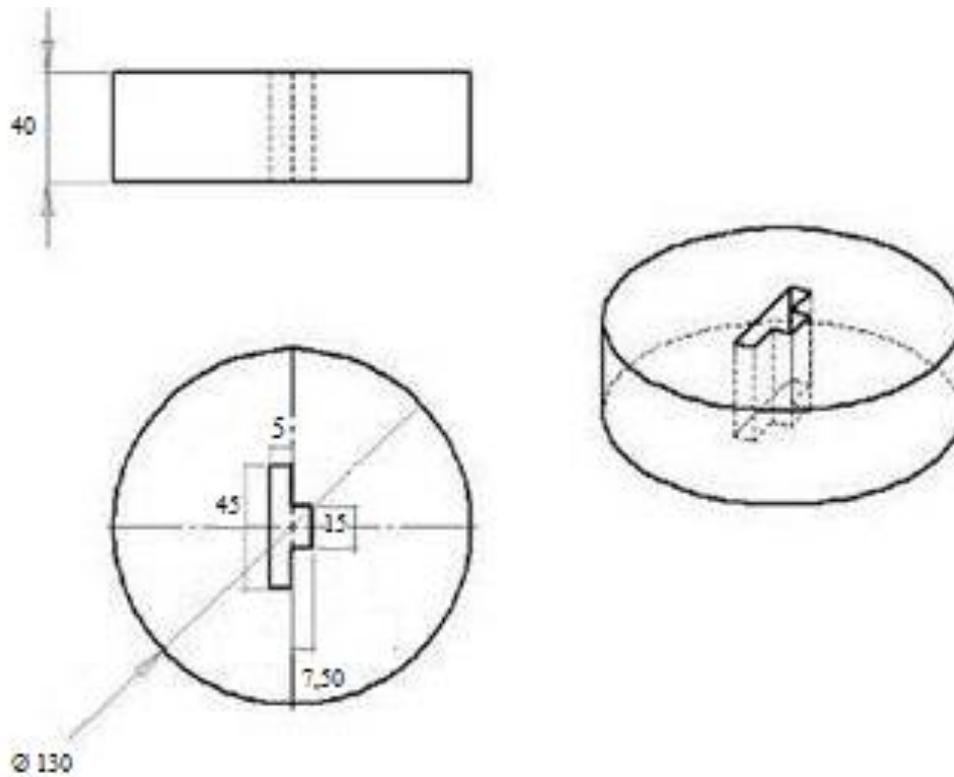
A Figura 18 mostra a matriz para compactação do núcleo tipo T e a Figura 19 sua geometria expressa em milímetros.

Figura 18 – Matriz para compactação do núcleo tipo T



Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 19 – Geometria da matriz do núcleo tipo T



Fonte: Arquivo pessoal.

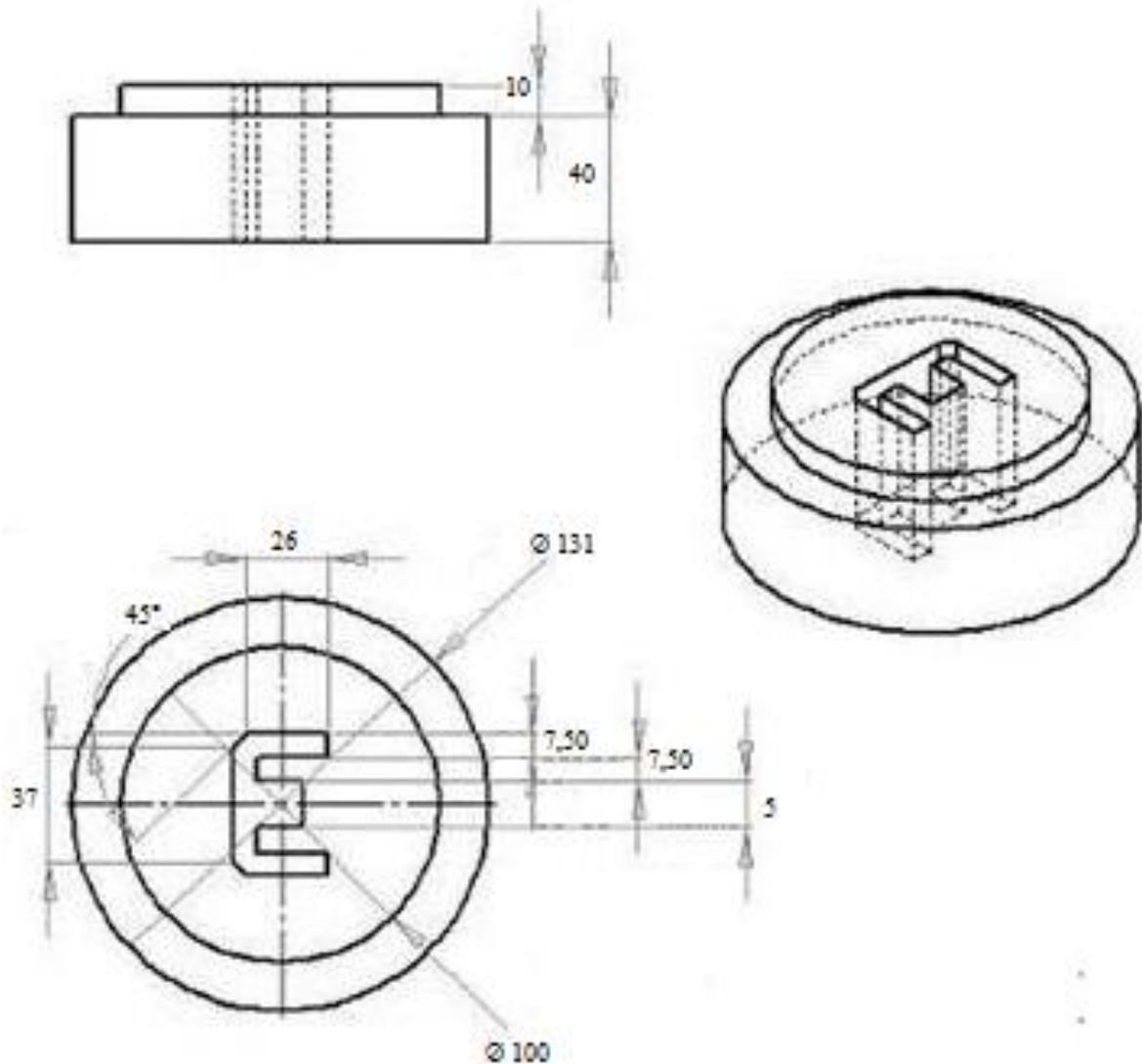
A Figura 20 mostra a matriz para compactação do núcleo tipo E e a Figura 21 sua geometria expressa em milímetros.

Figura 20 – Matriz para compactação do núcleo tipo E



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 21 – Geometria da matriz do núcleo tipo E



Fonte: Arquivo Pessoal

3.3 Obtenção dos corpos de prova

3.3.1 Obtenção da matéria-prima (mistura dos pós)

Foram preparadas misturas de pó de ferro com diferentes percentuais de fósforo, silício e níquel para analisar suas propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas. As ligas ferromagnéticas estudadas foram: Ferro Puro, Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si, Fe5%Si e Fe50%Ni.

Para a obtenção dos corpos de prova, os pós foram pesados e misturados juntamente com o lubrificante sólido (estearato de zinco) na proporção de 1%. O misturador utilizado foi do tipo cone, com 30 minutos de mistura [1].

3.3.2 Compactação dos corpos de prova

Os corpos de prova via Metalurgia do Pó foram compactados a uma pressão de 600 MPa [1]. O cálculo da pressão foi definido a partir da área de cavidade da matriz [1, 4], portanto observou-se o desenho dimensional das matrizes. Nas compactações realizadas utilizou-se a técnica de duplo efeito.

As forças aplicadas na compactação dos corpos de prova estão indicadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Força aplicada na compactação dos corpos de prova

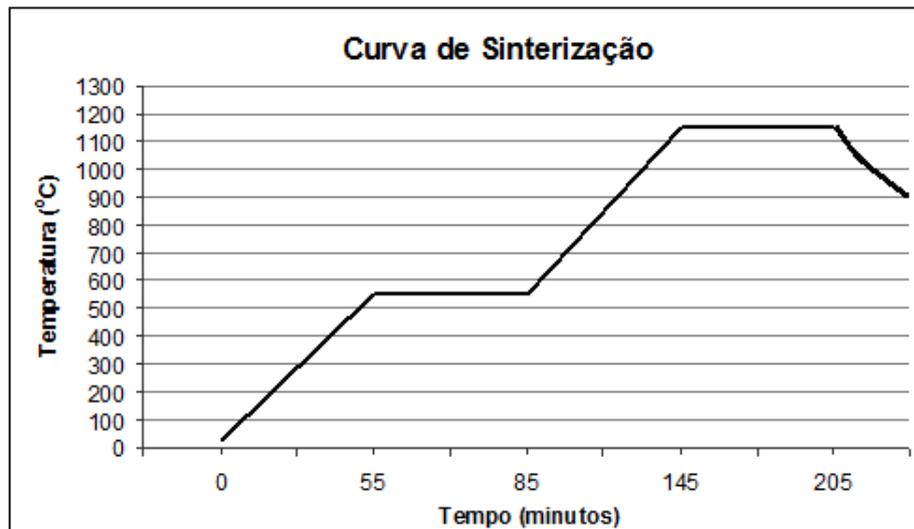
Forma	Área [cm²]	Força [N]
Cilindro	1,42	83581,2
Anel	5,81	341976,6
Transformador T	4,58	269578,8
Transformador E	8,47	498544,2

As compactações dos núcleos tipo E foram realizadas em máquina universal de ensaios mecânicos marca KRATOS, com capacidade de 100 toneladas. As demais compactações dos corpos de prova efetuaram-se em prensa mecânica marca EKA, com capacidade de 40 toneladas.

3.3.3 Sinterização dos corpos de prova

A sinterização dos corpos de prova foi realizada em forno tubular horizontal, com atmosfera de argônio de alta pureza (99,99%). A curva de sinterização utilizada está representada na Figura 22. A taxa de aquecimento utilizada foi de 10 °C/min. Empregou-se dois patamares durante o processo térmico de sinterização. O primeiro patamar, a 550 °C, para garantir a extração do estearato de zinco e o segundo a 1150 °C, onde ocorreu a sinterização, permanecendo nesta temperatura durante 60 minutos. Após, as peças foram mantidas no forno, para resfriamento lento, até a temperatura ambiente [5, 10].

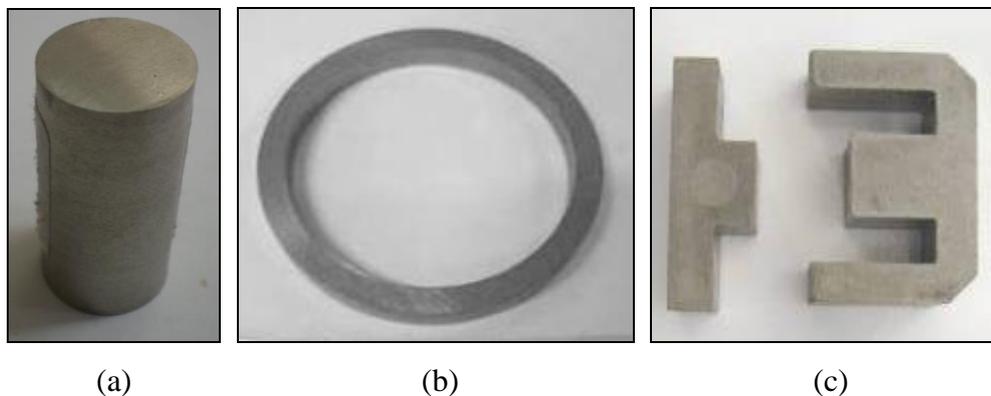
Figura 22 – Curva de sinterização



Fonte: Arquivo pessoal

A Figura 23 mostra os corpos de prova das ligas magnéticas obtidas, onde se pode observar, da esquerda para direita, o cilindro, o anel e os núcleos dos transformadores.

Figura 23 - (a) Cilindro, (b) Anel, (c) Núcleos do transformadores tipo T e E



Fonte: Arquivo pessoal.

3.3.4 Dimensões e densidades dos corpos de prova

Os corpos de prova na forma de cilindro tiveram suas dimensões medidas antes e após a sinterização (Tabelas 4 e 5), com o auxílio de balança de precisão Marte, modelo AL 500 e de paquímetro Mitutoyo, precisão 0.01, obtendo-se a densidade aparente (g/cm^3) dos corpos de prova. A comparação entre as densidades das ligas em estudo é mostrada na Figura 24. Devido à proximidade dos resultados encontrados na avaliação das densidades, optou-se pela apresentação dos valores das densidades dos corpos de prova na forma de cilindro.

Tabela 4 – Densidades dos corpos de prova a verde na forma de cilindro

Liga	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade (g/cm ³)
Fe Puro - 1A	1,345	2,675	3,801	24,995	6,577
Fe Puro – 1B	1,345	2,684	3,813	24,988	6,553
Fe Puro – 1C	1,345	2,652	3,768	24,908	6,611
				Média	6,580
Fe1%P – 2A	1,345	2,704	3,842	24,980	6,502
Fe1%P – 2B	1,345	2,732	3,882	25,059	6,456
Fe1%P – 2C	1,345	2,735	3,886	25,004	6,435
				Média	6,464
Fe2%P – 3A	1,345	2,704	3,842	24,970	6,499
Fe2%P – 3B	1,345	2,715	3,857	25,000	6,491
Fe2%P – 3C	1,345	2,711	3,852	25,003	6,491
				Média	6,494
Fe3%P – 4A	1,345	2,775	3,942	25,024	6,347
Fe3%P – 4B	1,345	2,779	3,948	25,000	6,332
Fe3%P – 4C	1,345	2,79	3,964	25,090	6,329
				Média	6,336
Fe1%Si – 5A	1,345	2,698	3,833	25,212	6,577
Fe1%Si – 5B	1,345	2,705	3,833	25,123	6,554
Fe1%Si – 5C	1,345	2,694	3,828	25,057	6,547
				Média	6,559
Fe3%Si – 6A	1,345	2,693	3,826	24,784	6,478
Fe3%Si – 6B	1,345	2,687	3,818	24,706	6,472
Fe3%Si – 6C	1,345	2,681	3,809	24,799	6,510
				Média	6,487
Fe5%Si – 7A	1,345	2,712	3,853	24,937	6,472
Fe5%Si – 7B	1,345	2,714	3,856	24,941	6,468
Fe5%Si – 7C	1,345	2,717	3,860	24,953	6,464
				Média	6,468

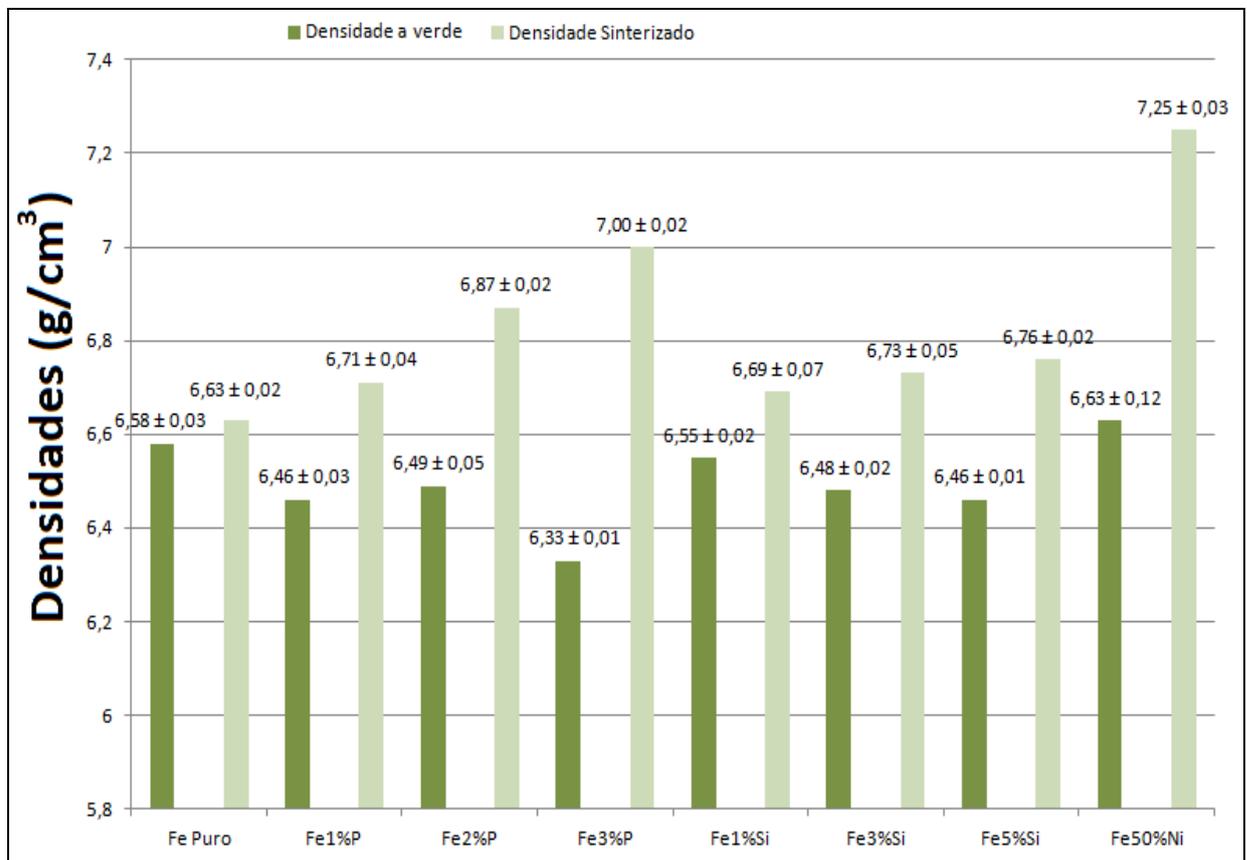
Fe50Ni - 8A	1,345	2,760	3,921	25,849	6,592
Fe50Ni - 8B	1,345	2,776	3,944	25,798	6,541
Fe50Ni - 8C	1,345	2,661	3,781	25,578	6,766
				Média	6,633

Tabela 5 – Densidades dos corpos de prova sinterizados na forma de cilindro

Liga	Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm²)	Volume (cm³)	Massa (g)	Densidade (g/cm³)
Fe Puro - 1A	1,355	2,587	1,442	3,730	24,684	6,617
Fe Puro - 1B	1,356	2,564	1,444	3,703	24,659	6,659
Fe Puro - 1C	1,355	2,585	1,442	3,727	24,676	6,620
					Média	6,632
Fe1%P - 2A	1,358	2,513	1,448	3,639	24,586	6,755
Fe1%P - 2B	1,359	2,546	1,450	3,693	24,672	6,681
Fe1%P - 2C	1,347	2,574	1,425	3,667	24,574	6,699
					Média	6,712
Fe2%P - 3A	1,324	2,596	1,377	3,574	24,63	6,891
Fe2%P - 3B	1,327	2,605	1,383	3,603	24,791	6,881
Fe2%P - 3C	1,329	2,614	1,387	3,626	24,836	6,849
					Média	6,874
Fe3%P - 4A	1,300	2,627	1,327	3,486	24,355	6,986
Fe3%P - 4B	1,299	2,619	1,325	3,472	24,313	7,003
Fe3%P - 4C	1,303	2,607	1,333	3,476	24,396	7,019
					Média	7,003
Fe1%Si - 5A	1,340	26,100	1,410	3,681	24,936	6,775
Fe1%Si - 5B	1,344	26,670	1,419	3,784	25,087	6,631
Fe1%Si - 5C	1,341	26,350	1,412	3,721	24,885	6,687
					Média	6,697
Fe3%Si - 6A	1,339	25,910	1,408	3,648	24,353	6,675
Fe3%Si - 6B	1,340	25,630	1,410	3,614	24,426	6,758
Fe3%Si - 6C	1,341	25,520	1,412	3,604	24,372	6,762
					Média	6,732

Fe5%Si – 7A	1,345	25,630	1,421	3,641	24,523	6,734
Fe5%Si – 7B	1,343	25,610	1,417	3,628	24,587	6,777
Fe5%Si – 7C	1,342	25,690	1,414	3,634	24,612	6,773
					Média	6,762
Fe50Ni - 8A	1,308	26,280	1,344	3,531	25,646	7,263
Fe50Ni - 8B	1,303	26,460	1,333	3,528	25,635	7,266
Fe50Ni - 8C	1,300	26,530	1,327	3,521	25,439	7,223
					Média	7,251

Figura 24 – Densidade dos corpos de prova na forma de cilindro



Fonte: Arquivo pessoal.

3.4 Obtenção das propriedades físicas

3.4.1 Resistividade elétrica

A resistividade dos corpos de prova foi determinada a partir do cálculo da resistência elétrica. Para esta medição utilizou-se multímetro Minipa, modelo ET 2930, equipamento que mede a resistência elétrica do corpo. Para a verificação de resistência elétrica muito baixa

aplica-se uma tensão no corpo de prova e mede-se a corrente elétrica. Entretanto, utilizou-se um artifício, pois o inverso é mais prático, aplicou-se uma corrente no corpo de prova e mediu-se a tensão [48, 49].

O corpo de prova para determinação da resistividade deve ter área da secção transversal bem menor que seu comprimento, para isto, realizou-se um corte na secção do perímetro dos corpos de prova na forma de anel (Figura 25) [48, 49].

Figura 25 – Exemplo de material utilizado no ensaio de resistividade



Fonte: Arquivo pessoal.

A corrente de valor constante foi fornecida por fonte Vcc Jomed, modelo PS – 2403D e mediu-se a tensão sobre o anel com o auxílio de voltímetro de precisão Minipa, modelo ET 2930. A resistividade elétrica foi calculada com a Equação 8, a partir da resistência elétrica dos corpos de prova em forma de anel [48, 49].

$$\rho = R \times (A / l) = (V / I) \times (A / l) \quad (\text{Equação 8})$$

Considerando:

ρ - Resistividade Elétrica ($\Omega \cdot m$)

R – Resistência (Ω)

l – Comprimento do Anel (m)

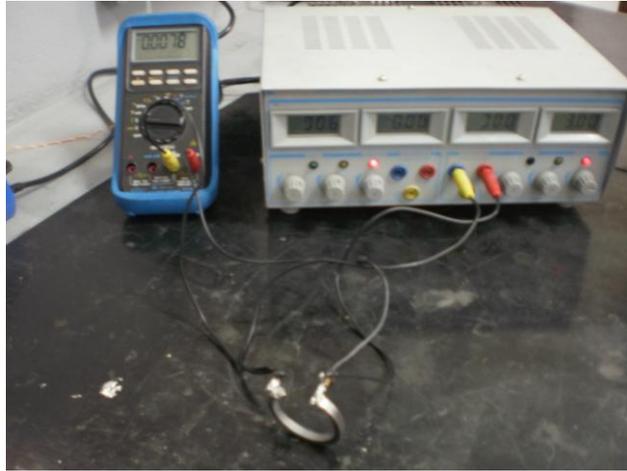
A – Área da Seção Transversal (m^2)

V – Tensão Elétrica (V)

I – Corrente Elétrica Aplicada (A)

O sistema do ensaio está representado na Figura 26, a Tabela 6 mostra os resultados obtidos e a Figura 27 a comparação entre as ligas estudadas.

Figura 26 – Sistema para ensaio de resistividade



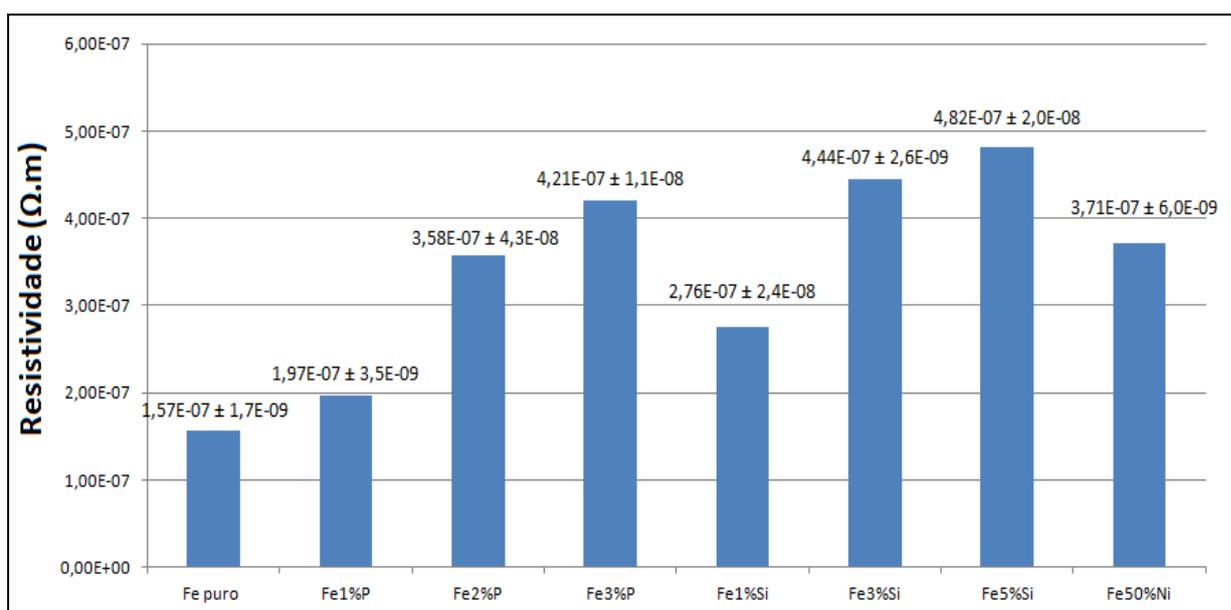
Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 6 – Resistividade (ρ) dos corpos de prova na forma de anel

Liga	ρ ($\Omega.m$)
Fe puro - 1A	1,56E-07
Fe puro - 1B	1,59E-07
Fe puro - 1C	1,56E-07
Média	1,57E-07
Fe1%P - 2A	1,97E-07
Fe1%P - 2B	1,92,E-07
Fe1%P - 2C	2,02E-07
Média	1,97E-07
Fe2%P - 3A	3,15E-07
Fe2%P - 3B	4,02E-07
Fe2%P - 3C	3,57E-07
Média	3,58E-07
Fe3%P - 4A	4,20E-07
Fe3%P - 4B	4,11E-07
Fe3%P - 4C	4,32E-07
Média	4,21E-07
Fe1%Si - 5A	2,77E-07
Fe1%Si - 5B	3,00E-07
Fe1%Si - 5C	2,52E-07
Média	2,76E-07

Fe3%Si - 6A	4,41E-07
Fe3%Si - 6B	4,45E-07
Fe3%Si - 6C	4,46E-07
Média	4,44E-07
Fe5%Si - 7A	4,68E-07
Fe5%Si - 7B	5,05E-07
Fe5%Si - 7C	4,73E-07
Média	4,82E-07
Fe50%Ni - 8A	3,77E-07
Fe50%Ni - 8B	3,71E-07
Fe50%Ni - 8C	3,65E-07
Média	3,71E-07

Figura 27 - Resistividade (ρ) dos corpos de prova na forma de anel



Fonte: Arquivo pessoal.

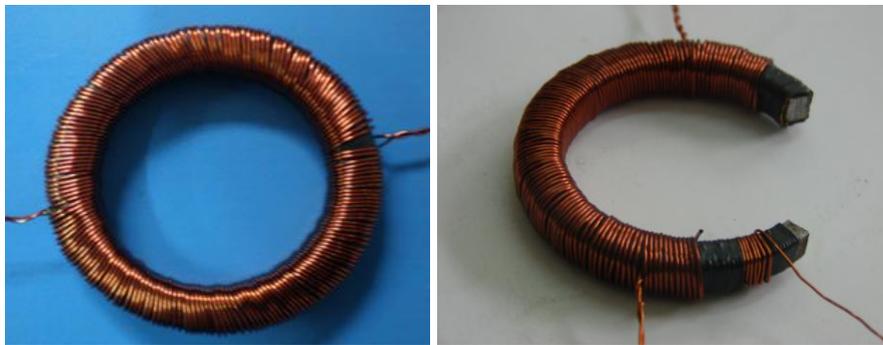
3.4.2 Propriedades magnéticas (curva de histerese e magnetização)

Para a obtenção da curva de histerese e magnetização, tendo como base a norma ASTM A773/A 773M-01 foram confeccionados os anéis de Rowland (Figura 28), a partir dos corpos de prova sinterizados. Inicialmente, os anéis foram isolados com fita isolante e, em seguida, bobinados com fio de cobre AWG 26 (0,41mm de diâmetro). Posteriormente, foram isolados novamente com fita adesiva e bobinados com fio de cobre AWG 23 (0,57mm de diâmetro). Os enrolamentos foram padronizados para 270 espiras no secundário e 160 espiras no primário. Os anéis de Rowland foram, então, conectados ao equipamento como mostra a

Figura 29. O equipamento e o software para a aquisição dos dados utilizados foram o Global Mag, modelo TLMP-FLX-D. Para todas as amostras, utilizou-se durante o ensaio corrente de 5A e frequência de 0,05Hz. Os dados de entrada para a obtenção da curva de histerese foram:

- Densidade de espiras do primário (n° de voltas/m).
- Número de espiras do secundário.
- Resistência do fio de cobre (padrão – 0,2 Ohms).
- Área secção Transversal (mm^2).
- Densidade do material (kg/m^3).

Figura 28 – Anel de Rowland bobinado e corte mostrando as camadas presentes



Fonte: Arquivo pessoal.

A Figura 29 mostra uma imagem do esquema de ligação, sendo o secundário ligado no “B” e o primário no “H”.

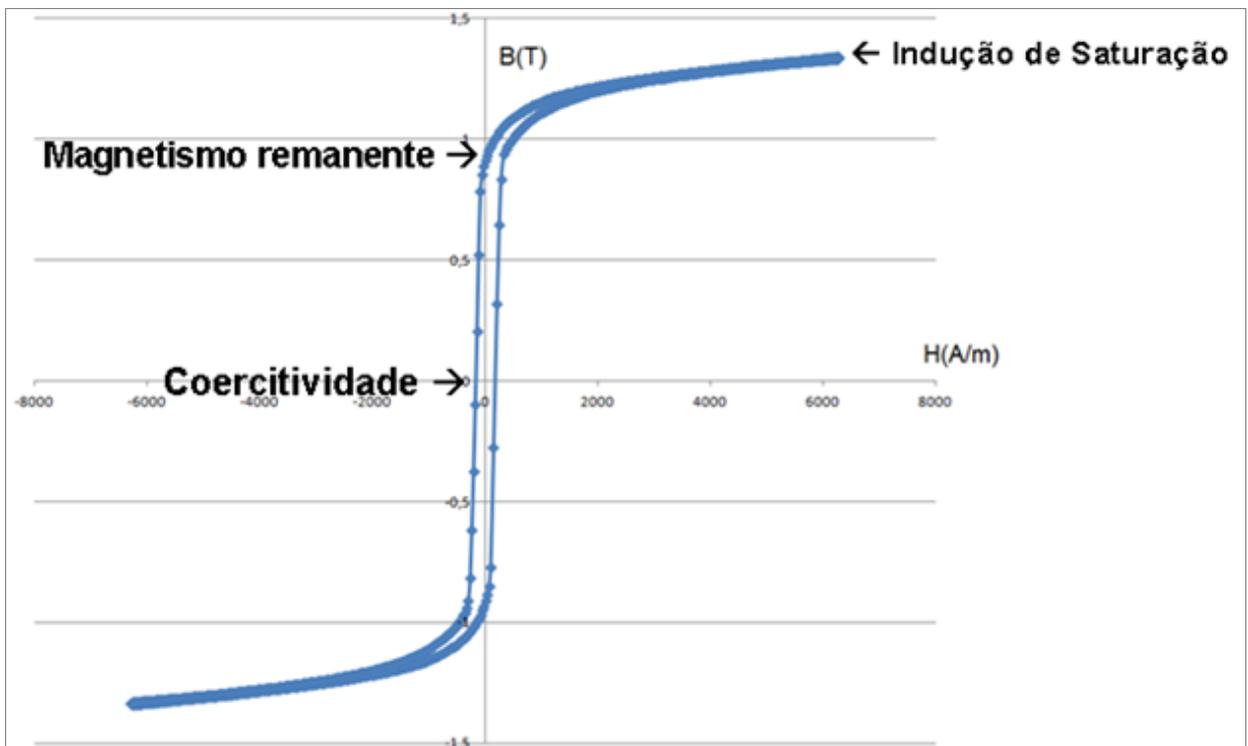
Figura 29 – Esquema de conexão para ensaio de histerese



Fonte: Arquivo pessoal.

As curvas de histerese obtidas foram típicas de materiais magnéticos macios, sendo que destas curvas é possível retirar-se propriedades magnéticas importantes como a indução de saturação, magnetismo remanente e força coercitiva. A indução de saturação ou indução máxima, pode ser visualizada a partir dos valores de campo onde a indução tende a permanecer constante ou com declividade quase nula [12, 13]. A Figura 30 mostra uma das curvas obtidas, a Tabela 7 demonstra os resultados encontrados e as Figuras 31, 32, 33 e 34 exibem a comparação entre as ligas estudadas.

Figura 30 – Curva de histerese da liga Fe1%P



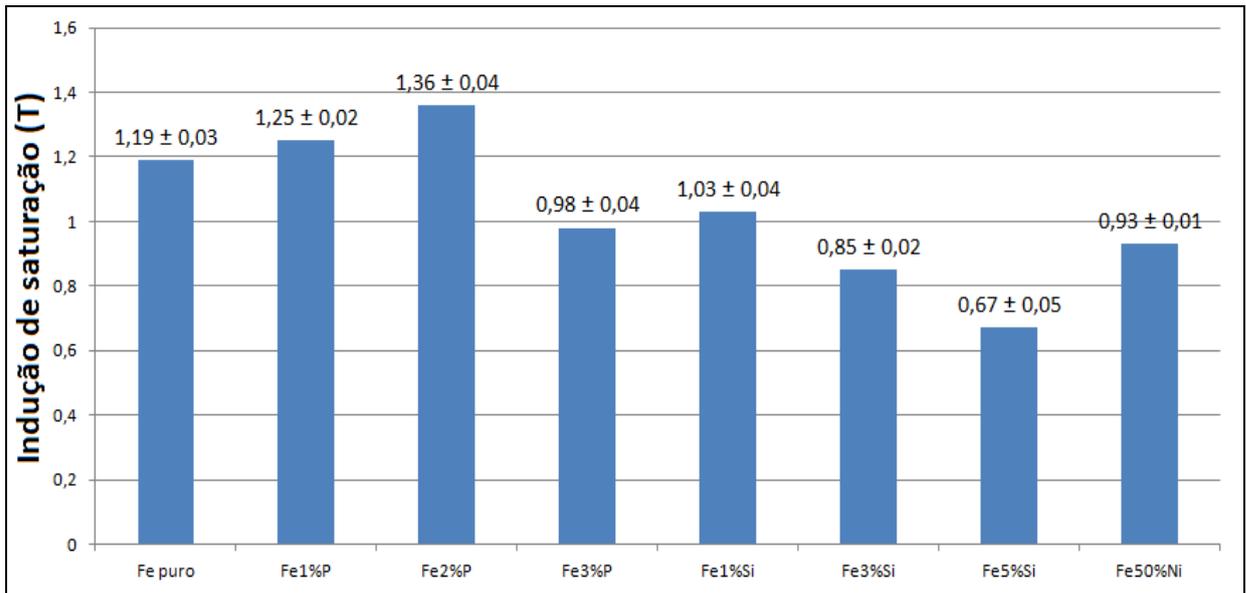
Fonte: Arquivo pessoal.

Salienta-se que a simulação do torque realizada em software de elementos finitos (FEMM 4.2.) resulta em valores instantâneos para determinada posição relativa entre o alinhamento dos núcleos do rotor e estator, sem considerar a frequência de giro do rotor ou da corrente elétrica que alimenta os enrolamentos de armadura. Desta forma, as curvas de histerese foram traçadas em frequências baixas, praticamente, em nível DC. Assim, foram de grande importância os ensaios de perdas com variação da frequência em núcleos magnéticos na forma de transformadores, que possuem funcionamento análogo ao núcleo de motores elétricos [11, 16, 50, 52].

Tabela 7 - Propriedades Magnéticas dos corpos de prova na forma de anel

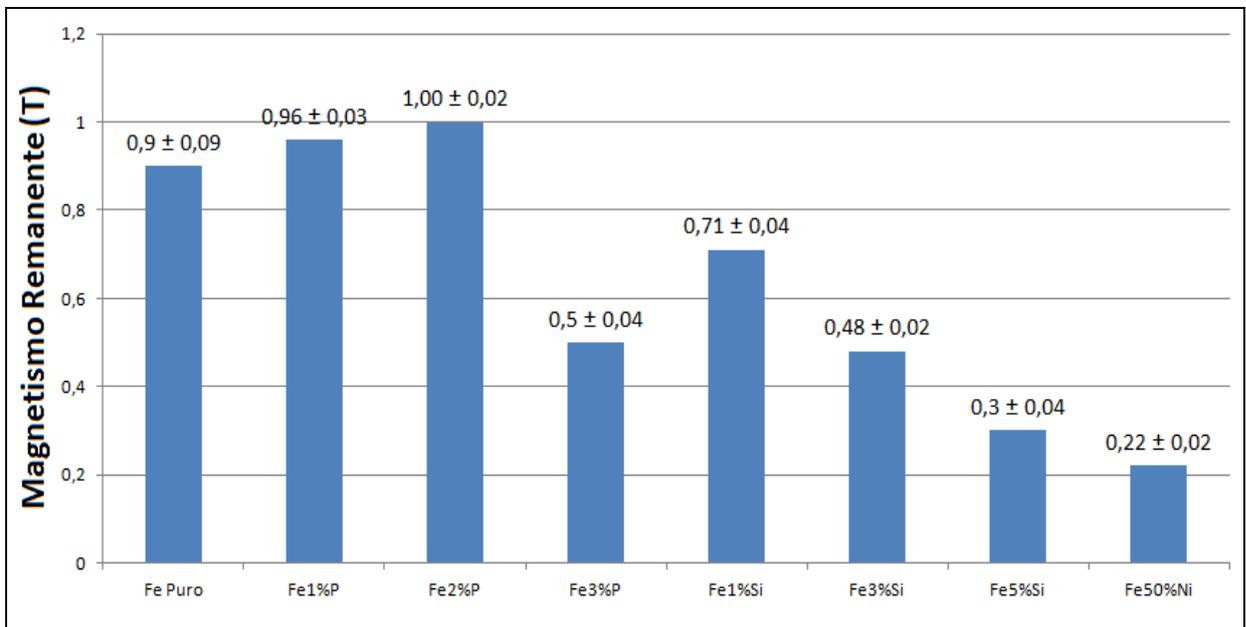
Ligas	Indução de Saturação (T)	Magnetismo Remanente (T)	Força Coercitiva (A/m)	Perdas por Histerese (W/kg)
Fe puro				
1A	1,21	0,94	445,2	1,76E-02
1B	1,16	0,80	463,1	1,71E-02
1C	1,22	0,96	436,4	1,35E-02
Média	1,19	0,90	448,2	1,60E-02
Fe1%P				
2A	1,24	0,94	223,2	8,52E-03
2B	1,25	0,95	213,8	8,31E-03
2C	1,27	0,99	210,5	8,56E-03
Média	1,25	0,96	215,8	8,46E-03
Fe2%P				
3A	1,36	1,01	206,9	7,17E-03
3B	1,40	1,02	204,3	8,24E-03
3C	1,33	0,98	212,5	7,67E-03
Média	1,36	1,00	207,9	7,69E-03
Fe3%P				
4A	1,02	0,54	209,7	5,54E-03
4B	0,98	0,51	210,6	5,88E-03
4C	0,95	0,46	211,9	6,23E-03
Média	0,98	0,50	210,7	5,88E-03
Fe1%Si				
5A	1,04	0,73	243,4	7,24E-03
5B	0,99	0,67	256,1	6,78E-03
5C	1,06	0,73	239,5	8,36E-03
Média	1,03	0,71	246,3	7,46E-03
Fe3%Si				
6A	0,87	0,50	223,8	5,75E-03
6B	0,84	0,46	227,5	6,24E-03
6C	0,86	0,49	224,9	5,97E-03
Média	0,85	0,48	225,4	5,99E-03
Fe5%Si				
7A	0,62	0,26	220,5	4,57E-03
7B	0,68	0,31	215,6	4,31E-03
7C	0,72	0,34	212,8	4,27E-03
Média	0,67	0,30	216,3	4,38E-03
Fe50%Ni				
8A	0,92	0,21	112,4	3,40E-03
8B	0,93	0,22	112,1	3,51E-03
8C	0,94	0,24	111,9	3,43E-03
Média	0,93	0,22	112,1	3,45E-03

Figura 31 – Indução de saturação



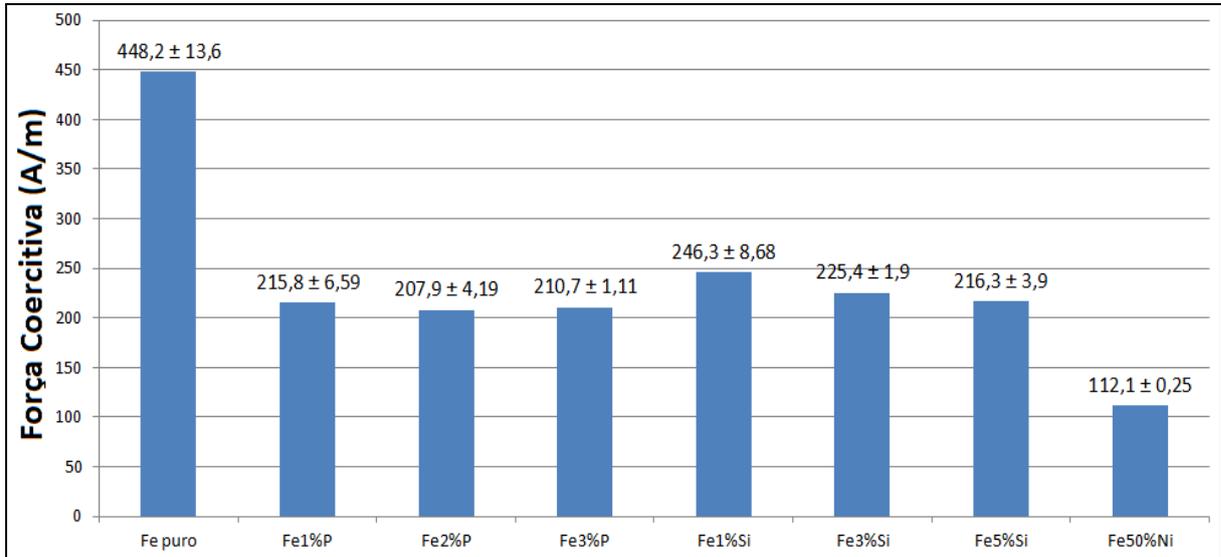
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 32 - Magnetismo remanente



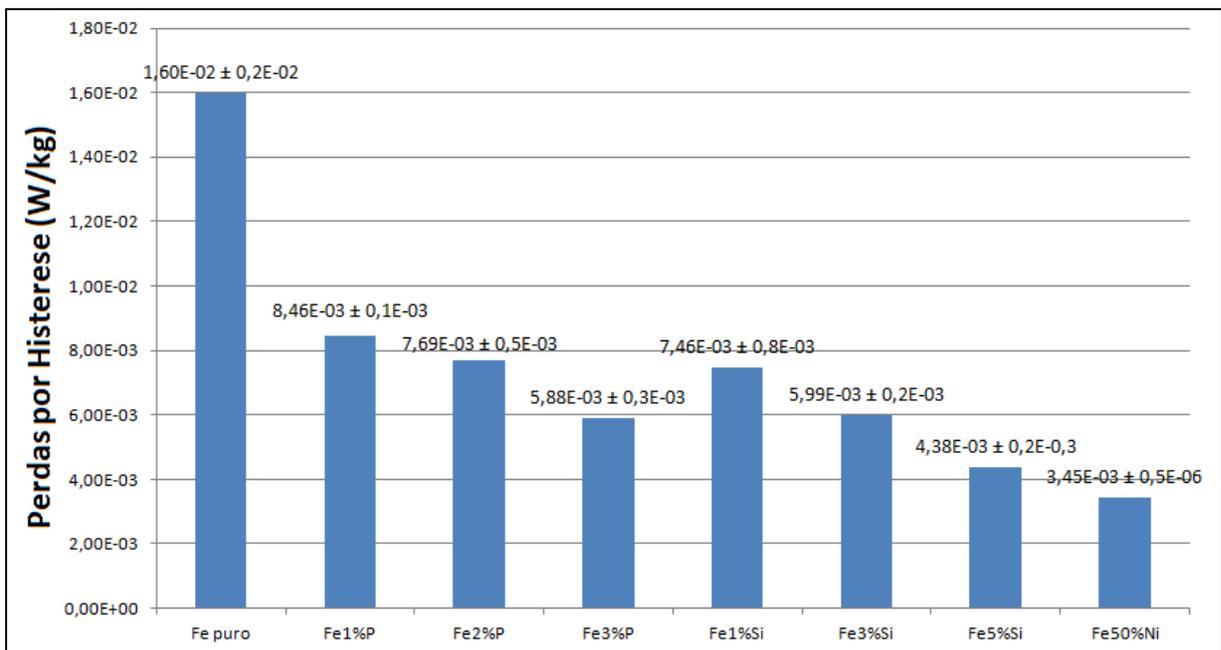
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 33 – Força coercitiva



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 34 – Perdas por histerese

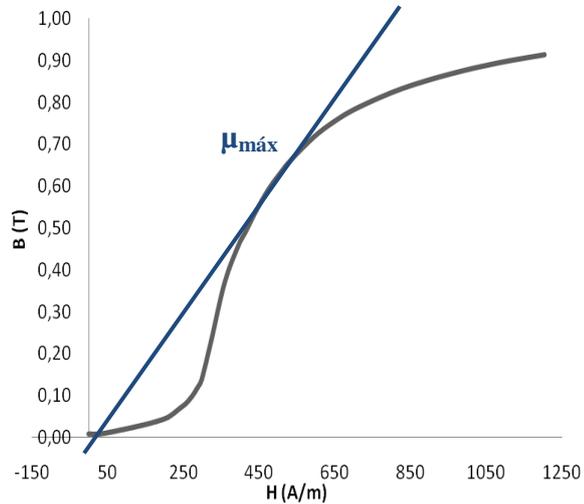


Fonte: Arquivo pessoal.

A permeabilidade está relacionada com o campo e a indução magnética ($B=\mu H$), sendo definida a partir de dados experimentais, já que não é uma constante, apresentando uma curva típica para cada material. A permeabilidade máxima se encontra no ponto da curva de magnetização onde a relação de B e H é máxima, sendo designada por $\mu_{\text{máx}}$ (Figura 35) [11, 12, 13]. Logo, para obtenção da permeabilidade relativa máxima, o valor encontrado no

gráfico foi dividido pela permeabilidade do vácuo ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m.) [11, 12, 13]. A Tabela 8 mostra os resultados obtidos e a Figura 36 a comparação entre as ligas estudadas.

Figura 35 – Curva de magnetização da liga Fe1%P



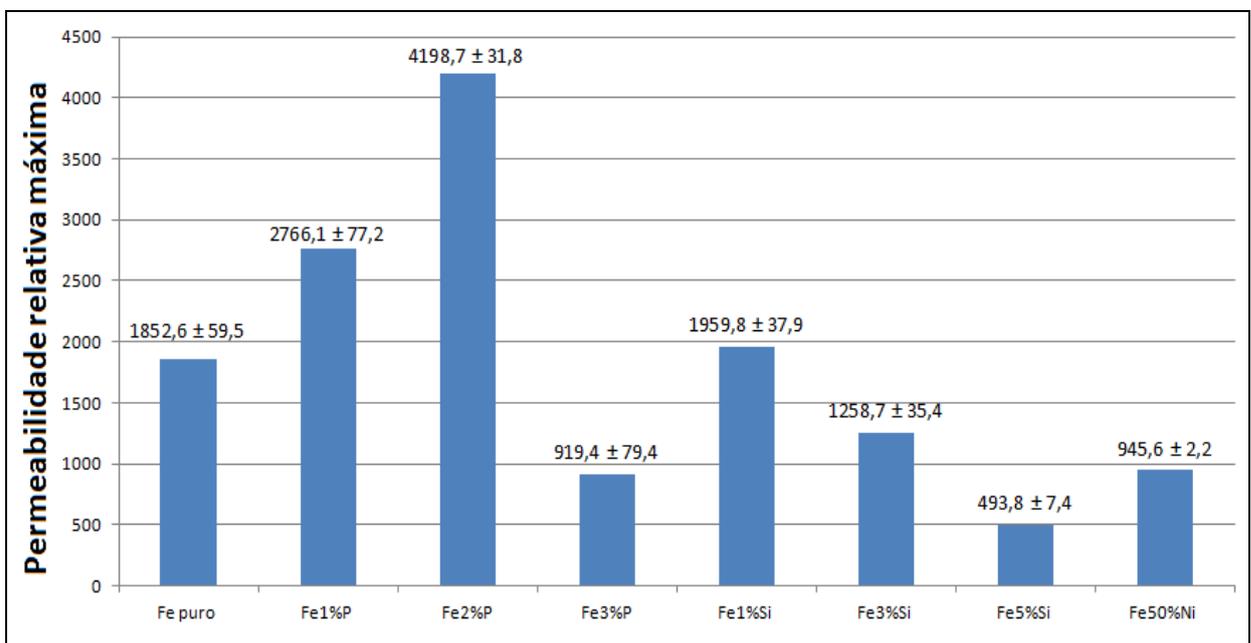
Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 8 – Permeabilidade relativa máxima

Liga	Permeabilidade relativa máxima
Fe puro - 1A	1825,2
Fe puro - 1B	1811,7
Fe puro - 1C	1920,9
Média	1852,6
Fe1%P - 2A	2714,1
Fe1%P - 2B	2729,4
Fe1%P - 2C	2854,8
Média	2766,1
Fe2%P - 3A	4184,3
Fe2%P - 3B	4235,2
Fe2%P - 3C	4176,6
Média	4198,7
Fe3%P - 4A	1001,6
Fe3%P - 4B	913,5
Fe3%P - 4C	843,1
Média	919,4
Fe1%Si - 5A	1956,3
Fe1%Si - 5B	1923,7

Fe1%Si - 5C	1999,4
Média	1959,8
Fe3%Si - 6A	1283,8
Fe3%Si - 6B	1218,2
Fe3%Si - 6C	1274,1
Média	1258,7
Fe5%Si - 7A	486,7
Fe5%Si - 7B	493,2
Fe5%Si - 7C	501,5
Média	493,8
Fe50%Ni - 8A	943,3
Fe50%Ni - 8B	945,9
Fe50%Ni - 8C	947,6
Média	945,6

Figura 36 – Permeabilidade relativa máxima



Fonte: Arquivo pessoal.

3.4.3 Propriedades mecânicas

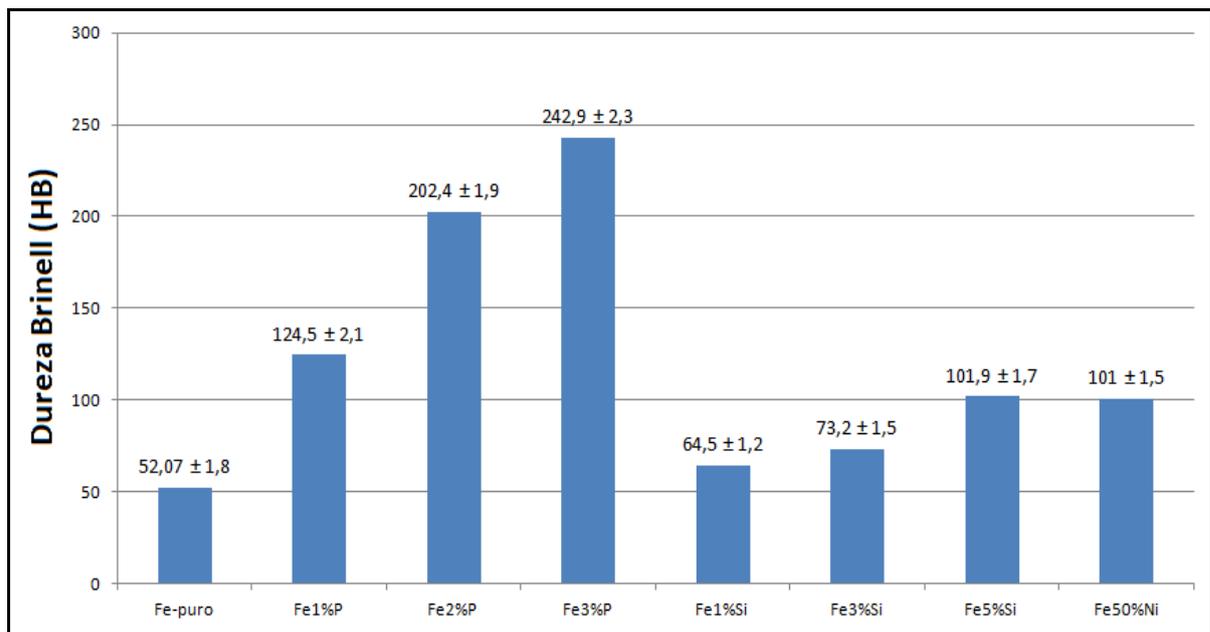
Para determinação das ligas a serem utilizadas no desenvolvimento dos motores foram analisadas, também, as propriedades mecânicas Dureza e Tensão de Escoamento.

Dureza: Os ensaios foram realizados com durômetro Precision - England, para medir a Dureza Brinell (HB), sendo utilizados os seguintes parâmetros: endentador tipo esfera de 2,5mm de diâmetro e força de 187,5 Kgf. A Tabela 9 e a Figura 37 mostram a dureza para as diversas ligas sinterizadas estudadas, de acordo com os valores da escala Brinell,

Tabela 9 - Dureza Brinell para ligas sinterizadas

Ligas	Dureza Brinell (HB)
Fe-puro	52,07
Fe1%P	124,5
Fe2%P	202,4
Fe3%P	242,9
Fe1%Si	64,5
Fe3%Si	73,2
Fe5%Si	101,9
Fe50%Ni	101

Figura 37 – Comparação da Dureza Brinell para ligas sinterizadas



Fonte: Arquivo pessoal.

Tensão de Escoamento: O ensaio de compressão foi realizado na máquina universal EMIC com capacidade de 200kN, pertencente à ULBRA-RS, na velocidade de 2mm/min, sendo calculada a tensão por:

$$\sigma_e = \frac{F}{A} \quad (\text{Equação 9})$$

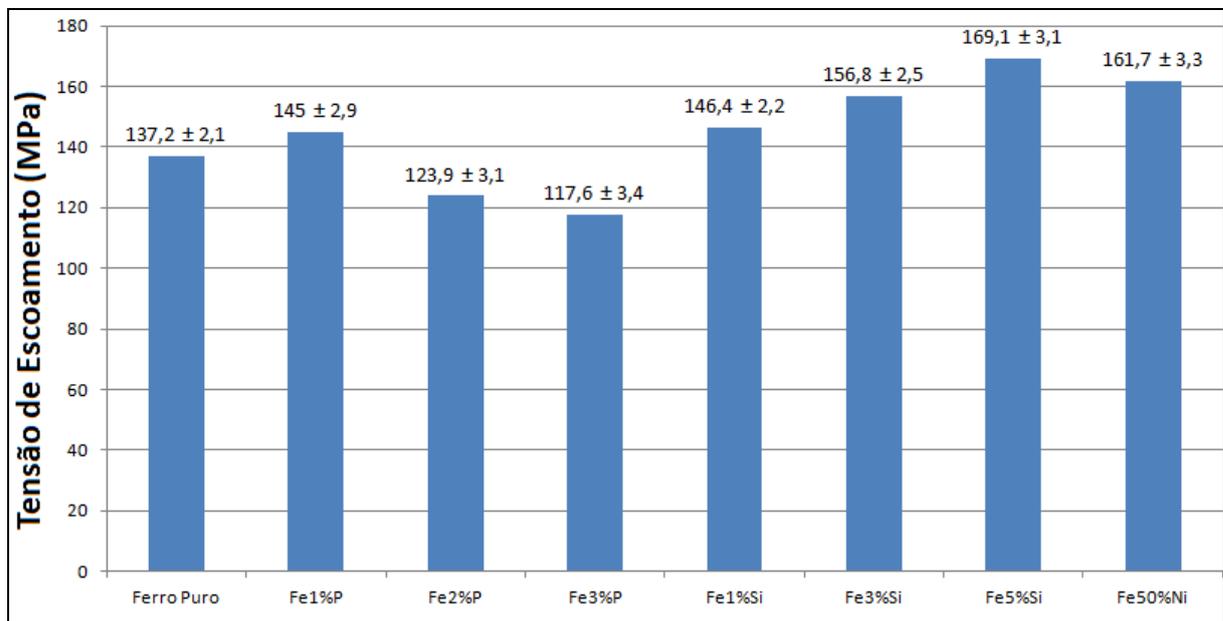
Onde: F - Força de compressão (N)
 σ_e - Tensão de escoamento (MPa)
 A - Área da superfície sob compressão, sendo 142,07 mm²

A média dos resultados obtidos é demonstrada na Tabela 10 e a Figura 38 mostra um comparativo para as diversas ligas sinterizadas estudadas.

Tabela 10 - Tensão de escoamento

Liga	Força (N)	Tensão de Escoamento (MPa)
Ferro Puro	19491,7	137,2
Fe1%P	20606,7	145,0
Fe2%P	17610,8	123,9
Fe3%P	16705,6	117,6
Fe1%Si	20801,9	146,4
Fe3%Si	22278,7	156,8
Fe5%Si	24020,4	169,1
Fe50%Ni	22975,0	161,7

Figura 38 - Comparativo da tensão de escoamento



Fonte: Arquivo pessoal.

3.4.4 Microestrutura dos corpos de prova

As análises metalográficas foram realizadas a partir de segmento do anel sinterizado, como mostra a Figura 39. As amostras foram embutidas, lixadas e polidas, esta última etapa com o auxílio de uma pasta de alumina de 1µm. Realizou-se o ataque químico empregando

Nital 2%v por, aproximadamente, 15 segundos, exceto na liga Fe50%Ni, na qual o ataque químico foi realizado com Marble (4g de CuSO_4 + 20 ml de HCl + 20 ml de água destilada). O microscópio utilizado foi o modelo Gx 51, marca Olympus.

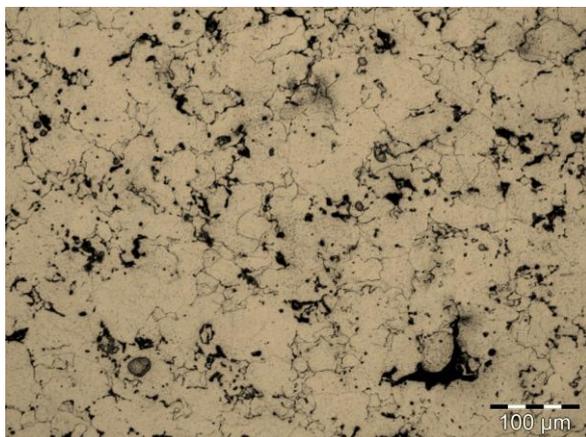
Figura 39 – Amostra para análise metalográfica retirada do anel



Fonte: Arquivo pessoal.

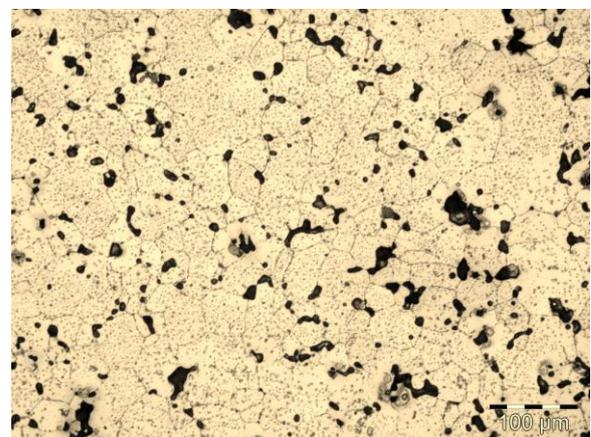
As Figuras 40 até 47 apresentam as metalografias das ligas estudadas. Conforme pode ser observado nas microestruturas, a adição de fósforo promoveu o crescimento dos grãos de ferrita que se apresentaram mais uniformes e homogêneos. A liga Fe3%P apresentou formação de contorno de grão grosseiro, possivelmente pela formação de fase líquida persistente na sinterização. O silício não se dissolveu homogeneamente no ferro e as ligas Fe-Si apresentaram muitas partículas oxidadas. Como pode ser observado na Figura 47, a liga Fe50%Ni apresentou excesso de poros e oxidação em sua microestrutura.

Figura 40 – Metalografia do Fe puro



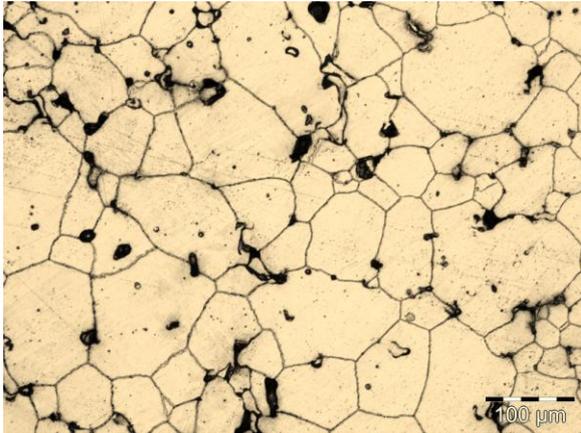
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 41 - Metalografia da liga Fe1%P



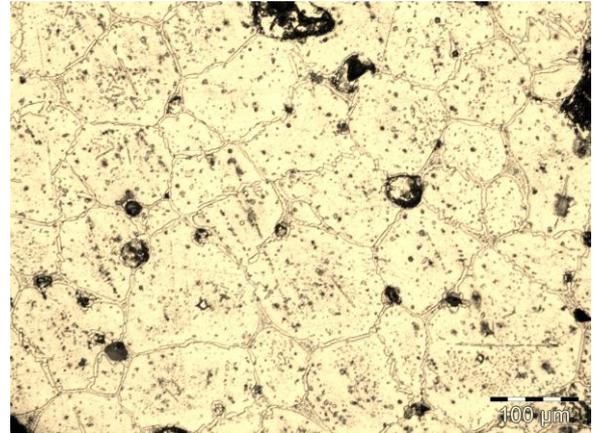
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 42 - Metalografia da liga Fe2%P



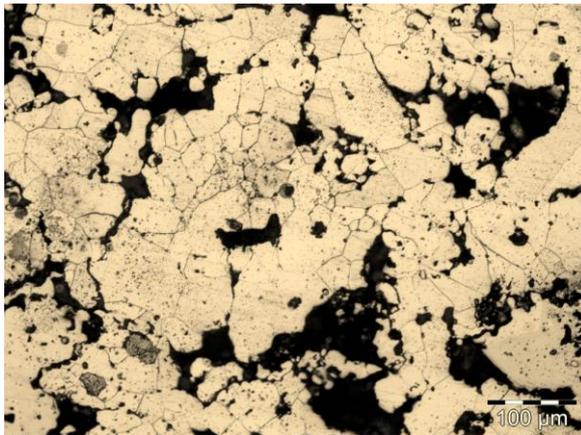
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 43 - Metalografia da liga Fe3%P



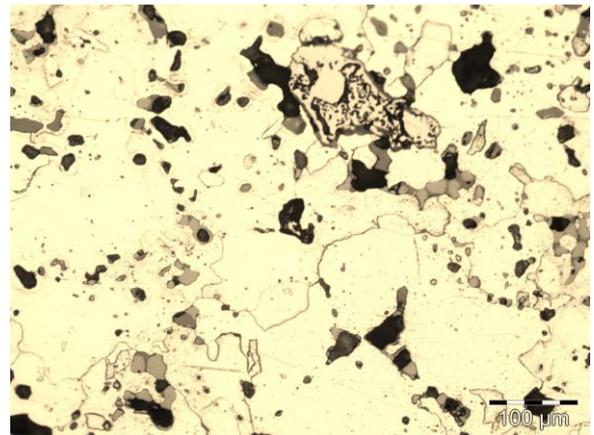
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 44 - Metalografia da liga Fe1%Si



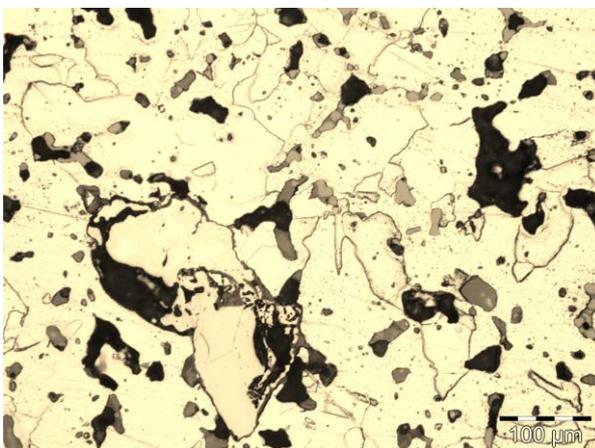
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 45 - Metalografia da liga Fe3%Si



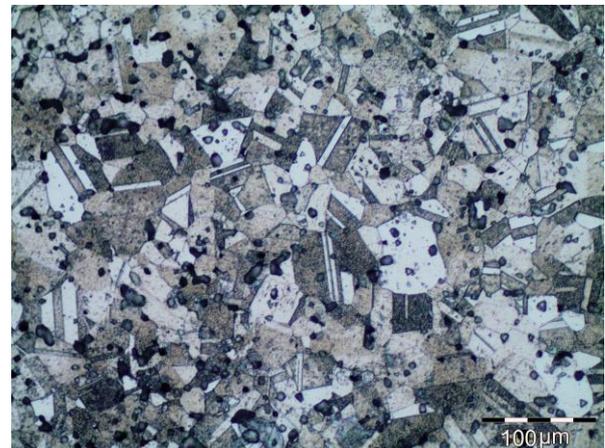
Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 46 - Metalografia da liga Fe5%Si



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 47 - Metalografia da liga Fe50%Ni



Fonte: Arquivo pessoal.

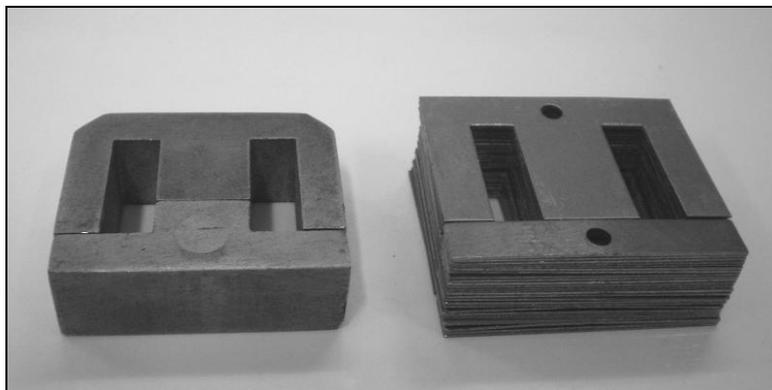
3.4.5 Ensaios de perdas magnéticas com a variação da frequência em núcleos na forma de um transformador de tensão convencional

3.4.5.1 Construção dos núcleos

Para avaliação das perdas magnéticas totais com a variação da frequência foram construídos corpos de prova, na forma de núcleos de transformadores e comparados aos usualmente comercializados de chapas laminadas. O núcleo de transformadores convencionais se constitui de duas partes: o núcleo tipo *E* e o tipo *T* [50]. Estas duas partes são encaixadas para obtenção do núcleo final, onde são acoplados os enrolamentos primário e secundário. Para a construção dos núcleos sinterizados foram utilizadas matrizes pertencentes ao Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS (LdTM).

Na avaliação das características de funcionamento e desempenho foi considerada a geometria de um núcleo transformador convencional com relação 127/220 para 12 V e corrente de 500 mA. A Figura 48 mostra da esquerda para direita o núcleo maciço obtido através dos processos da M/P e o núcleo de um transformador convencional.

Figura 48 - Núcleo obtido por M/P (esquerda) e núcleo de chapas laminadas (direita)



Fonte: Arquivo pessoal.

A pressão de compactação utilizada foi de 600 MPa. Uma vez compactados, os núcleos foram sinterizados para a obtenção da resistência mecânica nas peças [9]. Após, os núcleos sinterizados foram usinados, a fim de se obter a mesma dimensão do transformador convencional utilizado para comparação. A Figura 49 mostra os núcleos obtidos pelos processos da M/P após a usinagem:

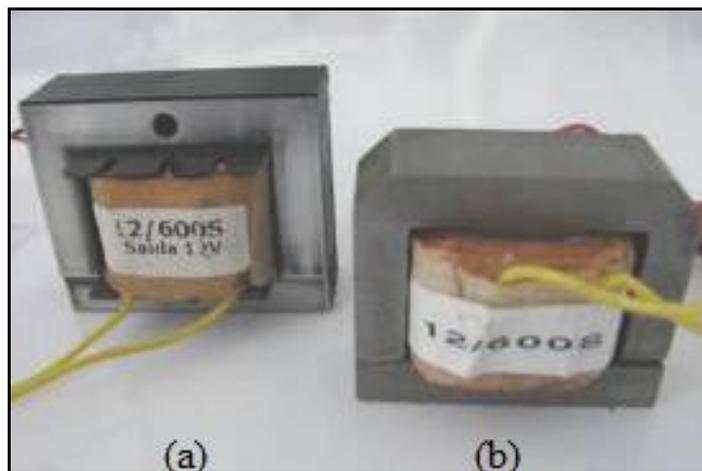
Figura 49 - Núcleos obtidos através da M/P



Fonte: Arquivo pessoal.

Salienta-se que este trabalho usou como base um transformador convencional de baixa potência, desta forma, optou-se por construir os novos núcleos com dimensões mais próximas possíveis do modelo comercial. Ainda, os enrolamentos utilizados nos transformadores desenvolvidos foram os mesmos do transformador original, possibilitando uma comparação sob as mesmas condições. A Figura 50 apresenta o transformador convencional (esquerda) e uma das amostras sinterizadas e montadas (direita):

Figura 50 - (a) Núcleo convencional; (b) núcleo maciço obtido por M/P



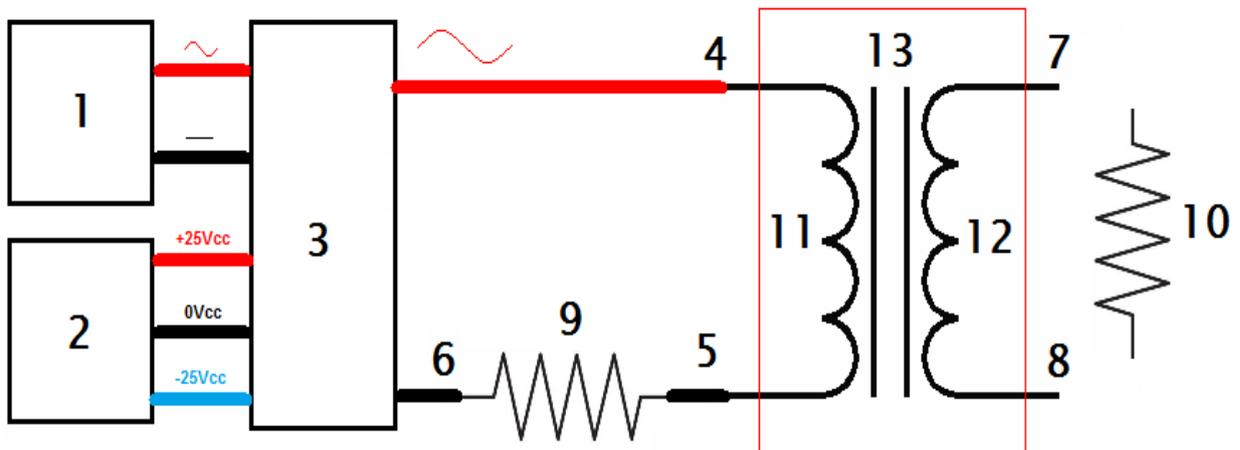
Fonte: Arquivo pessoal.

3.4.5.2 Ensaio de perdas com a variação da frequência

Para a realização dos ensaios de perdas com a variação da frequência foi montada uma bancada de testes, conforme a Figura 51, utilizando os seguintes componentes e equipamentos:

- Osciloscópio digital Minipa, modelo MO 1150D.
- Multiteste digital Minipa, modelo ET 2930.
- Gerador de função Minipa, modelo MFG 4202.
- Circuito amplificador, a base do CI TDA7294.
- Fonte de tensão contínua simétrica Jomed, modelo PS 2403D.
- Resistor (R1) em série com o primário: $1\Omega - 10W$.
- Resistor (R2) para o secundário: $10K\Omega - 1/2W$.

Figura 51 – Esquema da bancada de testes



Fonte: Arquivo pessoal.

Sendo:

1- Gerador de função; 2- Fonte de tensão simétrica; 3- Circuito amplificador; 4- Ponto de medição V_E ; 5- Ponto de medição V_R ; 6- Referência para V_E e V_R ; 7- Ponto de medição para V_S ; 8- Referência para V_S ; 9- R1; 10- R2; 11- Enrolamento primário; 12- Enrolamento secundário e 13- Núcleo do transformador.

Os ensaios foram realizados com resistor de $10K\Omega$ em carga com o secundário, variando-se a frequência (f) de entrada do sinal, com o emprego do gerador de função em conjunto com o circuito amplificador. Para cada frequência, aplicou-se a tensão de entrada (V_E) necessária para que fosse atingida a mesma tensão de saída (V_S) que foi apresentada no

transformador convencional, nesta mesma frequência. Uma vez observada a tensão de entrada e através da medição efetuada no resistor em série com o primário, foi possível visualizar no osciloscópio o tempo de defasagem (T_{Def}) entre as ondas de tensão e corrente (fator de potência – $\cos \theta$), bem como, o valor da corrente de entrada ($I_E = I_R$), importante para a aferição da potência conferida ao transformador [51].

Com as medições efetuadas, foi possível calcular o $\cos \theta$ através da Equação 10:

$$\cos \theta = 1 - \frac{T_{Def}}{T} \quad (\text{Equação 10})$$

Conhecendo-se o período (T), através da Equação 11, empregou-se a Equação 12:

$$T = \frac{1}{f} \quad (\text{Equação 11})$$

$$\cos \theta = 1 - (T_{Def} \cdot f) \quad (\text{Equação 12})$$

Para o cálculo da potência de entrada no primário (P_P) utilizou-se a Equação 13, sendo descontadas as perdas elétricas no primário:

$$P_P = (V_E - V_R) \cdot I_R \cdot \cos \theta - (I_P^2 \cdot R_P) \quad (\text{Equação 13})$$

Sabendo que a corrente no resistor pode ser expressa por:

$$I_R = \frac{V_R}{1\Omega} \quad (\text{Equação 14})$$

A potência no secundário foi calculada através da Equação 15, sendo que as perdas elétricas no secundário foram descontadas:

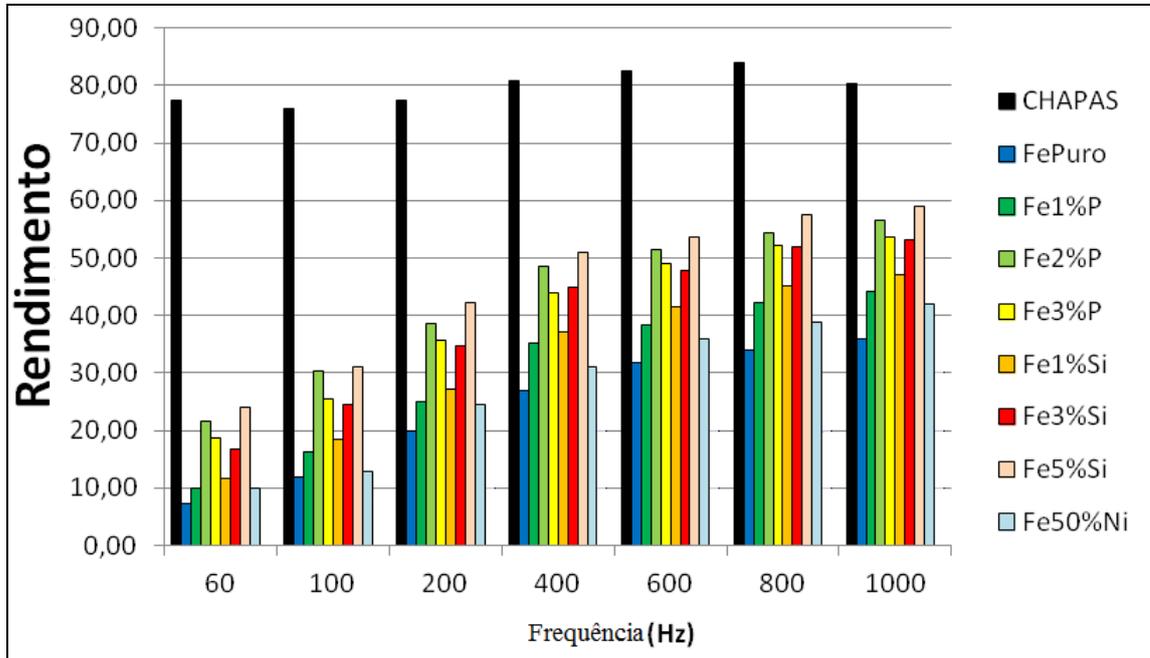
$$P_S = \frac{V_S^2}{10k\Omega} - (I_S^2 \cdot R_S) \quad (\text{Equação 15})$$

Desta forma, por meio da Equação 16, chegou-se aos valores de rendimentos:

$$\eta = \frac{P_S}{P_P} \times 100 \quad (\text{Equação 16})$$

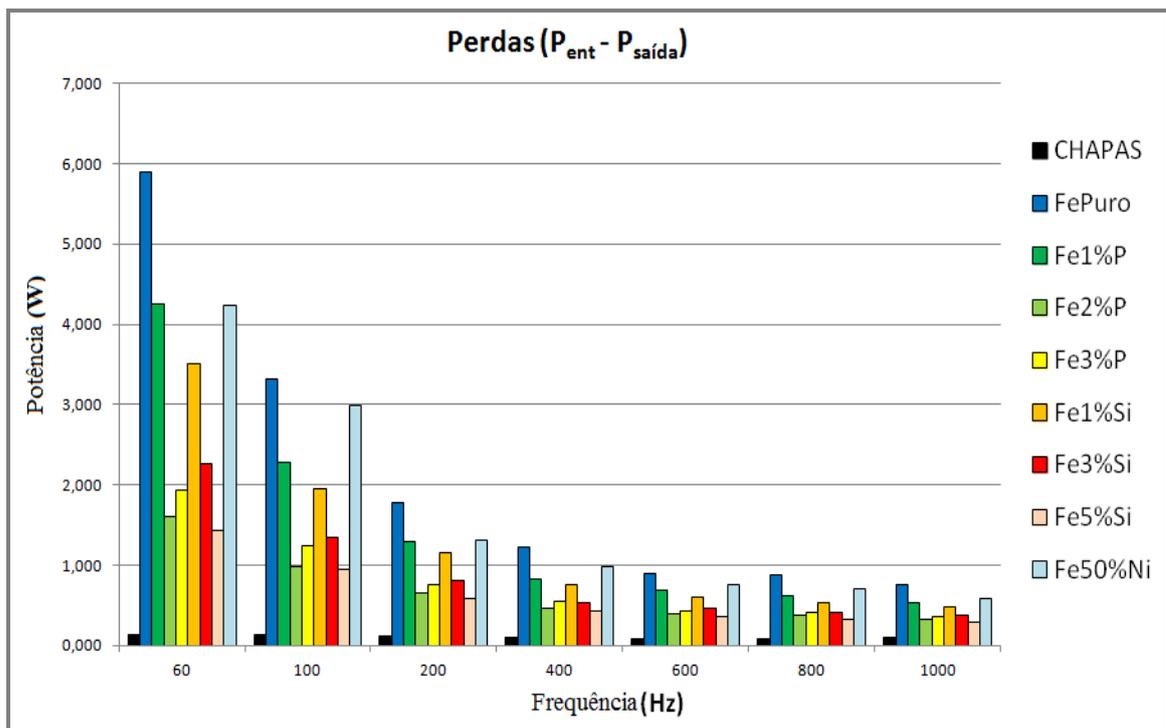
As Figuras 52 e 53 mostram os rendimentos e as perdas dos transformadores construídos por Metalurgia do Pó e suas comparações com o transformador utilizado comercialmente, com a variação da frequência:

Figura 52 – Rendimento dos transformadores com a variação da frequência



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 53 – Perdas com a variação da frequência



Fonte: Arquivo pessoal.

3.5 Simulação de uma máquina elétrica rotativa

3.5.1 Simulação em software de elementos finitos

Os resultados das interações eletromagnéticas foram obtidos através de simulações computacionais com o emprego do software de elementos finitos FEMM 4.2. A metodologia de elementos finitos tem como objetivo a solução de equações diferenciais para uma diversidade de entradas. A ideia principal é dividir o problema em um grande número de regiões, cada um com uma geometria simples [52].

A vantagem de dividir a área inicial em pequenos elementos é que a partir de uma área conhecida o problema se torna de mais fácil resolução. Através do processo de discretização é formado um problema de álgebra linear com milhares de variáveis, que seriam impossíveis de serem resolvidos sem o auxílio de processadores com algoritmos [52].

Determinar as propriedades magnéticas de um motor sem o auxílio de um software de simulação por elementos finitos é difícil e, muitas vezes, impreciso. Através do FEMM 4.2. é possível verificar dados importantes, tais como, torque momentâneo da máquina elétrica e fluxo concatenado em cada bobina. O conhecimento destes resultados permite ao projetista verificar a eficiência da máquina elétrica rotativa e as propriedades que devem ser trabalhadas para atingir o ponto ideal de funcionamento [52].

3.5.2 Características da máquina elétrica simulada

Para a realização das simulações, optou-se pelo servomotor SWA - 40 da WEG Motores. A mesma topologia foi utilizada nas simulações com chapas e com núcleo do estator e rotor a partir de material sinterizado. Os materiais obtidos por Metalurgia do Pó tiveram suas propriedades magnéticas inseridas no software de elementos finitos (FEMM 4.2.), desta forma, realizou-se comparação de desempenho com o motor original.

A Tabela 11 mostra as características do servomotor simulado [27]:

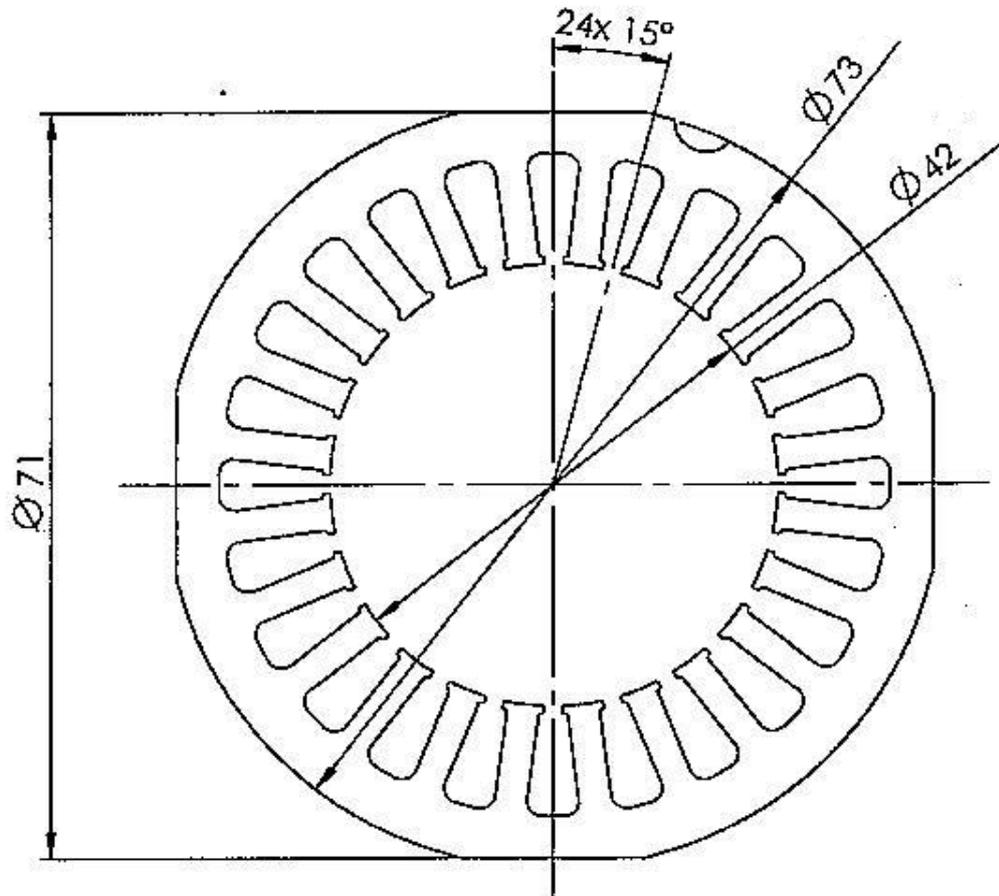
Tabela 11 – Características do servomotor simulado

Rotação Nominal	3000	Rpm
Torque	1,6	Nm
Pólos	8	
Potência	400	W

Tensão	230	V
Classe de Isolamento	F	
Carcaça	SWA40	
Corrente Nominal	2	A
Corrente Máxima	7,2	A
Espiras	42	
Comprimento	40	mm
Fio do Estator	1 x 0.45	mm
Entreferro	0,4	mm
Ímãs de Ne-Fe-B	20x11.5x2.25	mm
Ligação	série	
Chapa (espessura)	0.5	mm
Inclinação da Ranhura do Estator	9.5	mm

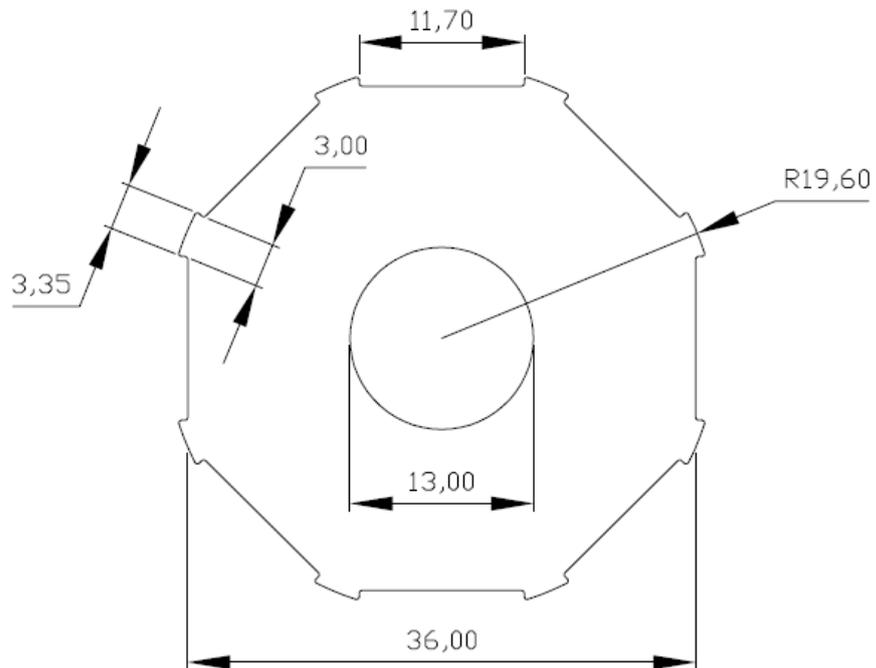
Nas Figuras 54 e 55 observam-se as dimensões do estator e do rotor, fornecidas pela Weg Motores, através do corte transversal de cada núcleo expresso em milímetros [15].

Figura 54 - Cotas do estator em corte transversal



Fonte: Lewis, 2009

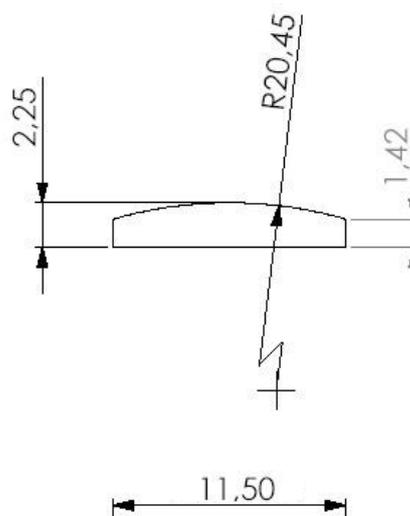
Figura 55 – Cotas do rotor em corte transversal



Fonte: Arquivo Pessoal

Na Figura 56 observa-se o dimensionamento dos ímãs do núcleo do servomotor:

Figura 56 – Cotas dos ímãs do servomotor



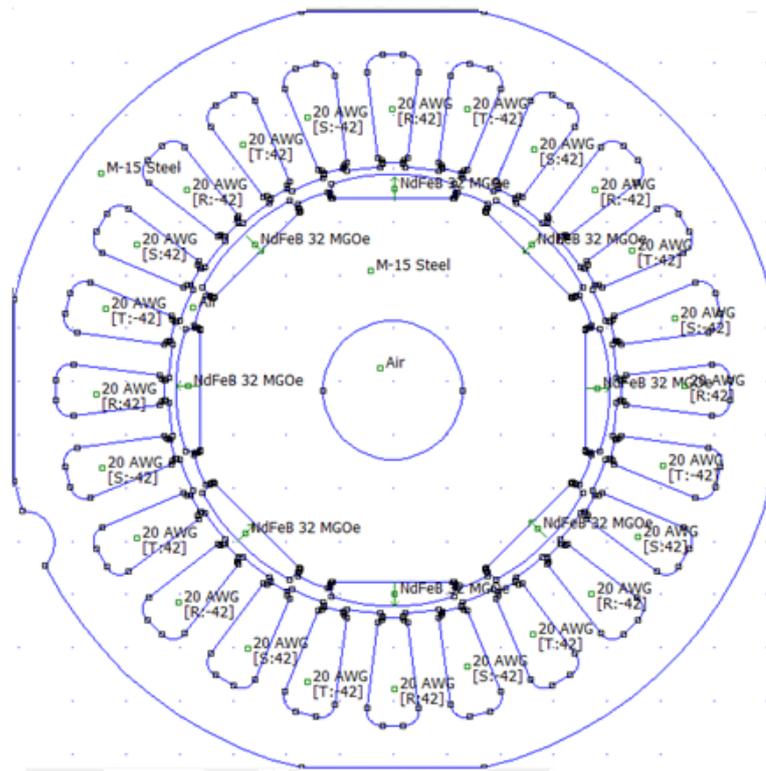
Fonte: Arquivo Pessoal

3.5.3 Procedimentos de simulação

A simulação foi efetuada a partir do projeto dimensional do motor, conforme as medidas apresentadas nas Figuras 54, 55 e 56. No estator foi utilizada a metodologia de bobinagem em série para um motor de oito polos, sendo 42 espiras com fio AWG 20 por ranhura do estator. A corrente nominal utilizada, conforme dados do motor, foi de 2A. No rotor os ímãs foram dispostos, alternadamente, em relação as suas polaridades.

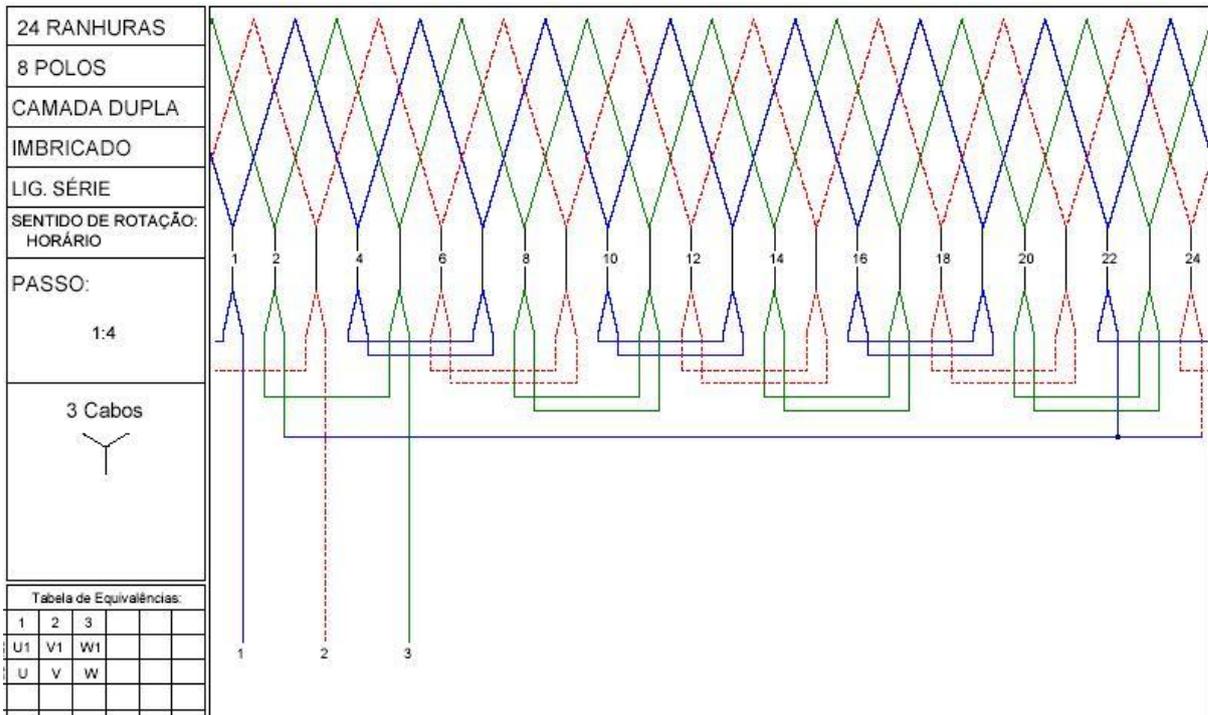
A Figura 57 representa o núcleo do gerador introduzido no software FEMM 4.2. (Finite Element Method Magnetics), enquanto a Figura 58 mostra o esquema da bobinagem do servomotor [15].

Figura 57 - Núcleo introduzido no FEMM 4.2.



Fonte: Arquivo pessoal.

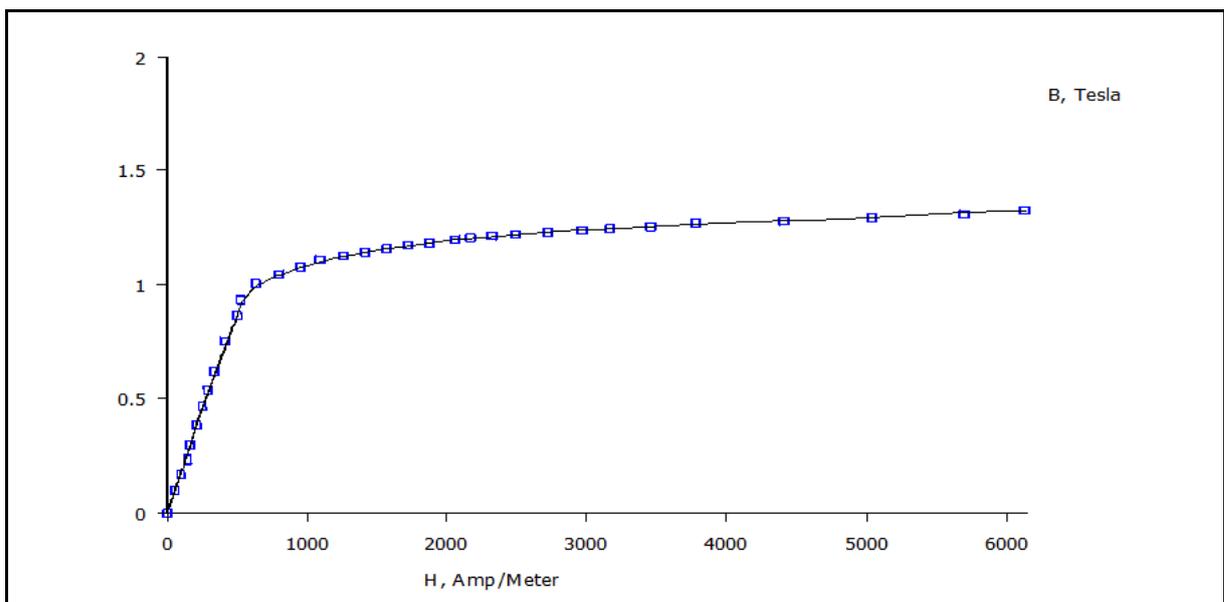
Figura 58 - Esquema da bobinagem do servomotor



Fonte: Lewis, 2009.

As propriedades das ligas utilizadas nas simulações foram obtidas através das curvas de magnetização dos materiais sinterizados, estes dados foram introduzidos no software FEMM 4.2., gerando as curvas de magnetização, como a da liga Fe1%P, demonstrada na Figura 59.

Figura 59 – Curva de magnetização do Ferro P1%P sinterizado utilizado na simulação

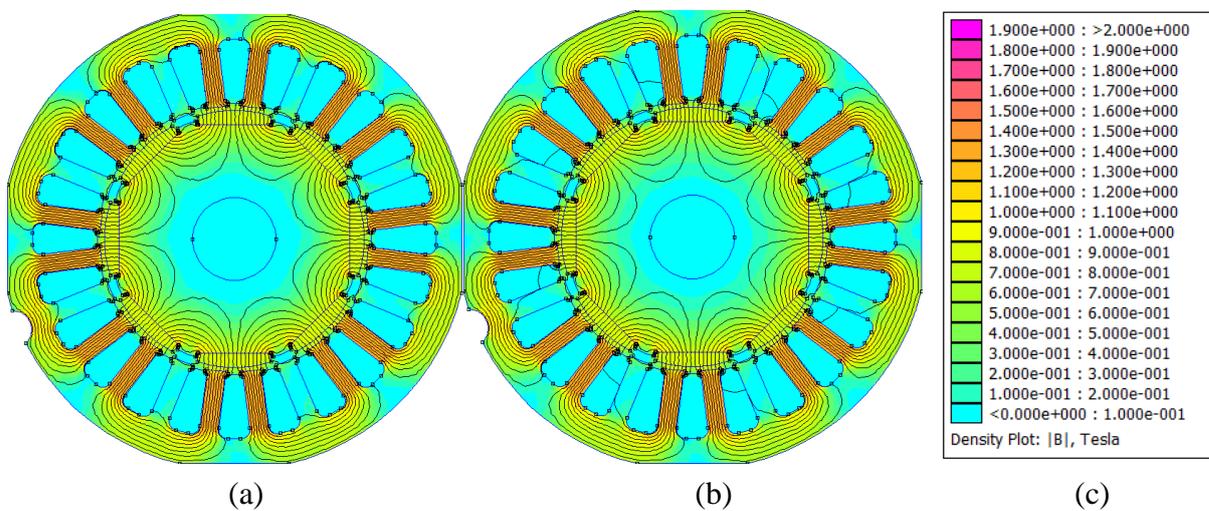


Fonte: Arquivo pessoal.

3.5.4 Simulações da máquina síncrona

As simulações realizadas com o software FEMM 4.2. mostraram, como exemplo, as linhas de campo expostas na Figura 60(a) para o núcleo de chapas e 60(b) para o núcleo de Fe1%P sinterizado. A Figura 60(c) apresenta a legenda com os respectivos valores dos componentes de densidade de campo B [T].

Figura 60 - (a) Fluxo magnético no motor com material laminado; (b) Fluxo magnético no motor com a liga Fe1%P sinterizado; (c) Legenda da intensidade de campo em “a” e “b”



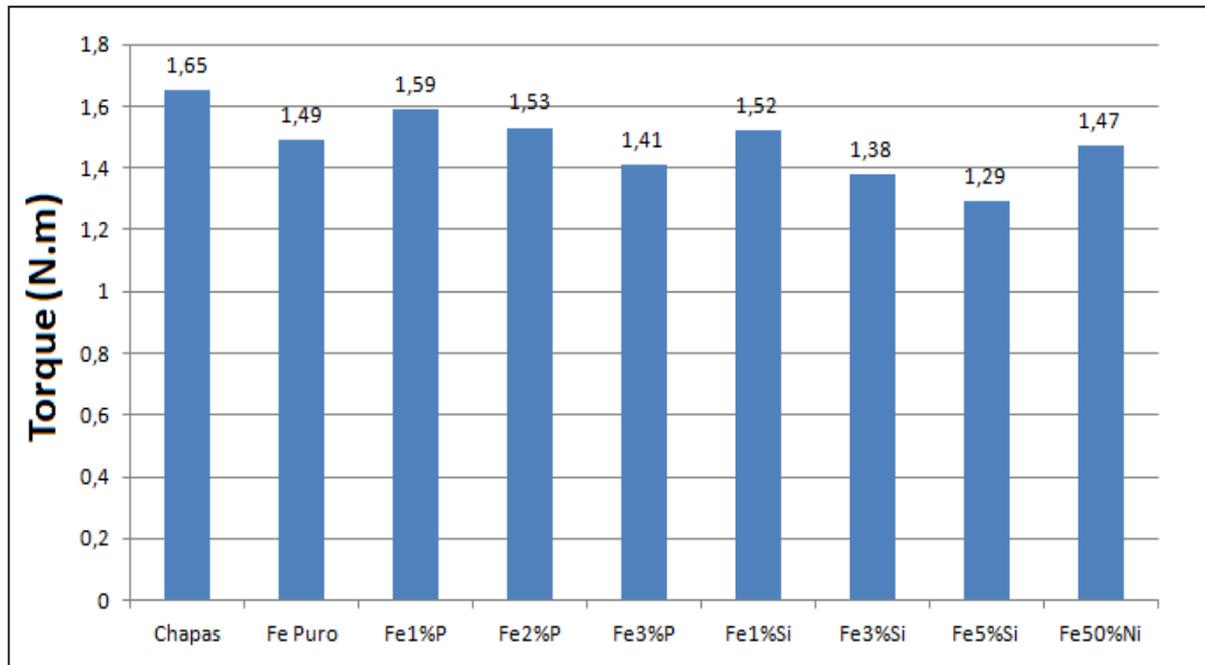
Fonte: Arquivo pessoal.

Foram obtidos os resultados de torque e os picos da densidade de fluxo magnético no interior do motor [53], conforme apresentam a Tabela 12 e as Figuras 61 e 62:

Tabela 12 – Comparativo entre torque e densidade de fluxo máximo

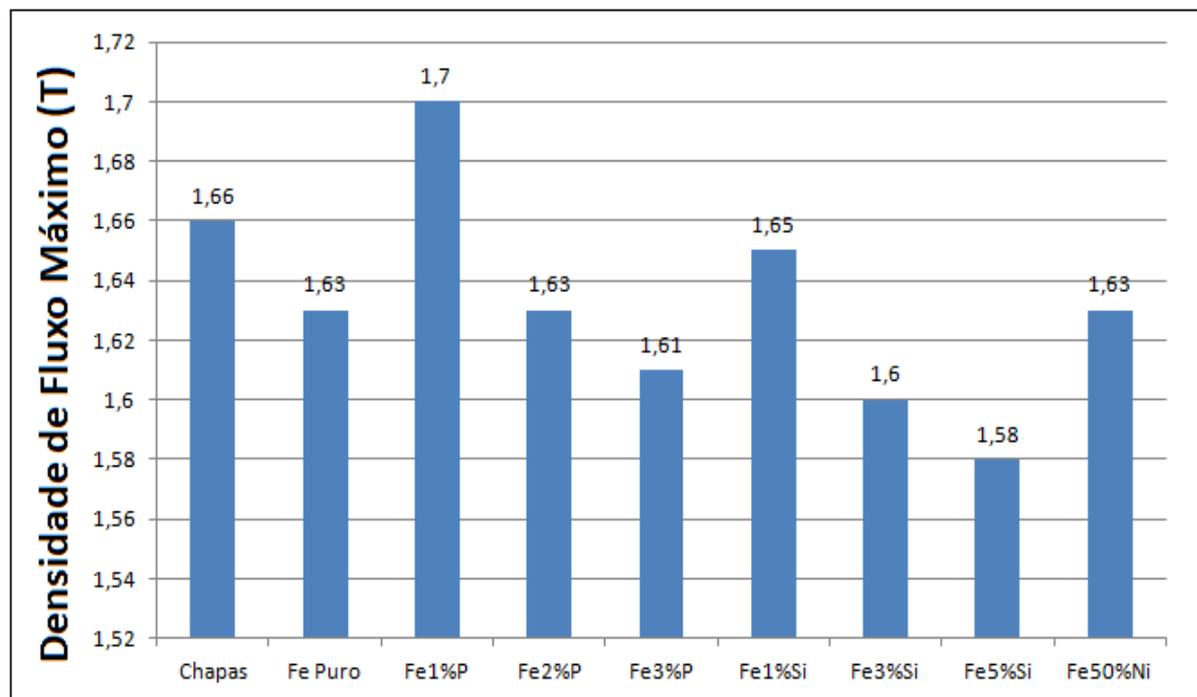
Núcleo	Torque (N.m)	Densidade de Fluxo Máximo (T)
Chapas	1,65	1,66
Fe (puro)	1,49	1,63
Fe1%P	1,59	1,7
Fe2%P	1,53	1,63
Fe3%P	1,41	1,61
Fe1%Si	1,52	1,65
Fe3%Si	1,38	1,60
Fe5%Si	1,29	1,58
Fe50%Ni	1,47	1,63

Figura 61 – Comparativo entre o torque das ligas estudadas



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 62 – Comparativo entre densidade de fluxo máximo das ligas estudadas



Fonte: Arquivo pessoal.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os corpos de prova após a sinterização apresentaram aumento na densidade. As amostras com maior variação foram as de Fe3%P, que antes da sinterização possuíam média de $6,33 \text{ g/cm}^3$ e após $7,0 \text{ g/cm}^3$, ou seja, uma alteração de 9,57%. As de Fe50%Ni demonstraram valores de $6,63$ e $7,25 \text{ g/cm}^3$, respectivamente, com aumento de 8,55%. Conforme a literatura, essas alterações são ocasionadas, no caso das ligas Fe-P, em razão do fósforo promover uma fase líquida na sinterização favorecendo o processo de densificação. No caso das ligas Fe-Ni em decorrência do níquel possuir alta taxa de densificação no ferro e da granulometria do pó de níquel utilizada ($3 \mu\text{m}$ a $7 \mu\text{m}$) [54, 55].

A resistividade aumentou com a adição de P, Si, e Ni no Fe, pois estes acréscimos provocam distorções no reticulado cristalino [31, 32, 33]. O Fe puro apresentou resistividade de $1,57\text{E-}07 \Omega\cdot\text{m}$, contra $4,82\text{E-}07 \Omega\cdot\text{m}$ da liga Fe5%Si. A maior resistividade foi obtida na liga Fe5%Si, pois o silício durante o processo de sinterização, não se densifica homogeneamente no ferro e a substituição dos grãos de ferrita pelo Si aumenta a imperfeição na rede cristalina e eleva a resistividade [56, 57]. Ainda, as amostras com Fe-Si apresentaram partículas oxidadas, o que contribui para o aumento da resistividade, porém, diminuem a permeabilidade relativa e a indução de saturação [31, 32, 33].

Conforme pode ser observado nas microestruturas, nas ligas Fe-P, com o aumento gradativo da concentração de fósforo ocorre a esferoidização dos poros e a diminuição da quantidade destes. O mesmo fenômeno mencionado acima pode ser observado nos grãos de ferrita presentes [54, 56]. A adição de fósforo ao ferro puro proporciona crescimento dos grãos, além dos mesmos se apresentarem mais homogêneos e uniformes devido à formação de fase líquida transiente. Esta adição até a concentração de 1% promove, também, a uniformidade dos contornos dos grãos. São apresentados contornos de grãos finos até a liga Fe2%P. Isto acarreta propriedades magnéticas superiores às demais ligas estudadas, pois uma microestrutura formada por ferrita, sem a presença de grãos com contornos grosseiros é a mais indicada para se obter melhores resultados de histerese e magnetização para materiais ferrosos magnéticos macios [56, 57]. A concentração de Fe3%P apresentou redução significativa de suas propriedades magnéticas por histerese, possivelmente, devido à formação de contorno de grão grosseiro, gerado pela formação de fase líquida persistente na

sinterização [55, 58]. O fósforo, também, está relacionado com o aumento da resistividade, da indução, da permeabilidade e da diminuição da coercividade [57, 58].

O acréscimo de fósforo permite obter aumento da dureza e resistência mecânica utilizando temperaturas de sinterização menores, devido à formação de fase líquida transiente [54, 57, 58]. O fósforo em percentuais inferiores a 1% não confere ao ferro sinterizado diminuição do limite de escoamento [54, 57, 58]. As amostras com silício apresentaram pouco aumento na dureza devido à presença de partículas oxidadas [30, 33, 43].

Na avaliação das perdas observadas através do ensaio dos núcleos de pequenos transformadores, com o acréscimo da frequência a tensão induzida aumenta, a corrente de magnetização diminui e, desta maneira, as perdas seriam menores para os núcleos construídos com chapas laminadas. No entanto, para frequências acima de 400 Hz, o efeito da construção do núcleo de chapas laminadas não reduz as correntes parasitas, comparativamente ao núcleo maciço, ou seja, a tensão induzida aumenta e a corrente de magnetização diminui, mas as correntes parasitas aumentam. Nos núcleos sinterizados, somente a tensão induzida aumenta, a corrente de magnetização diminui e as correntes parasitas não sofrem acréscimo em seu valor [17, 60, 61].

Nas simulações realizadas estaticamente por elementos finitos no software FEMM 4.2., o torque instantâneo e o fluxo magnético no núcleo de Fe1%P resultaram em valores próximos aos obtidos com as tradicionais chapas de aço laminadas. O núcleo de Fe1%P apresentou torque instantâneo de 1,59 N.m e fluxo magnético de 1,70 T e o núcleo de chapas de aço laminadas, respectivamente, 1,65 N.m e 1,66 T. Isto se deve à baixa coercitividade e aos valores elevados de permeabilidade magnética, indução de saturação e resistividade elétrica encontrados nos ensaios magnéticos e elétricos dos materiais sinterizados [11, 21, 36, 59].

5 CONCLUSÕES

Neste estudo foram analisados materiais a partir de pós de ferro, em conjunto com fósforo, silício e níquel, a saber: Fe Puro, Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si, Fe5%Si e Fe50%Ni, os quais foram misturados, compactados e sinterizados.

A adição de P, Si e Ni no Fe aumentou consideravelmente a resistividade elétrica dos materiais magnéticos macios, sendo um fator preponderante na redução de perdas magnéticas. O Fe puro apresentou resistividade de $1,57E-07 \Omega.m$, contra $4,82E-07 \Omega.m$ da liga Fe5%Si, que foi a maior alcançada. A redução das correntes induzidas pode ser interpretada como um aumento da resistência elétrica do corpo, uma vez que são grandezas físicas inversamente proporcionais. Este efeito de redução das correntes induzidas, também pode ser obtido com o aumento da resistividade elétrica do material. Portanto, quanto maior a resistividade do material, menores serão as correntes induzidas e as perdas por correntes parasitas.

Com relação às propriedades magnéticas, a liga Fe2%P apresentou permeabilidade magnética relativa de 4198,7 e indução de saturação de 1,36 T, que foram os maiores valores obtidos. A menor coercitividade exibida foi de 112,1 A/m, pela liga Fe50%Ni. Os valores encontrados são concordantes com os descritos pela literatura sobre material sinterizado. A liga Fe50%Ni apresentou menor coercitividade, magnetismo remanente e perdas por histerese, porém, baixa indução de saturação e permeabilidade magnética.

Referente às propriedades mecânicas dos materiais estudados, a adição de P, Si e Ni no ferro promoveu o aumento da dureza em todas as amostras estudadas. O acréscimo de fósforo permite obter aumento da dureza e da resistência mecânica devido à formação de fase líquida transiente na sinterização. Percentuais de fósforo acima de 1% provocaram decréscimo no valor do limite de escoamento, pela formação de fase líquida persistente na sinterização.

Conforme observado nas metalografias, nas ligas Fe-Si, o silício não se densifica homogeneamente no ferro, substituindo o grão de ferrita na rede cristalina. Nas ligas Fe-P, com a adição de fósforo ocorre o aumento dos grãos de ferrita. A partir de Fe1%P pode-se observar a uniformidade dos contornos de grãos. São apresentados contornos de grãos finos até a liga Fe2%P. Isto acarreta propriedades magnéticas superiores às demais ligas estudadas,

pois uma microestrutura formada por ferrita, sem a presença de contornos de grãos grosseiros são os mais indicados para se obter os melhores resultados de histerese e magnetização para materiais ferrosos magnéticos macios. A liga Fe3%P apresentou redução significativa de suas propriedades magnéticas por histerese, devido à formação de contorno de grão grosseiro.

Nas simulações realizadas estaticamente, o torque instantâneo e o fluxo magnético no núcleo de Fe1%P resultaram valores próximos em relação aos das tradicionais chapas de aço laminadas. O núcleo de Fe1%P apresentou torque instantâneo de 1,59 N.m e fluxo magnético de 1,70 T e o núcleo de chapas de aço laminadas, respectivamente, 1,65 N.m e 1,66 T. A equivalência entre os resultados obtidos ocorre em razão dos valores elevados de permeabilidade magnética, indução de saturação e resistividade elétrica, assim como, a baixa coercitividade apresentada nos ensaios magnéticos e elétricos.

Os ensaios de perdas magnéticas nos materiais sinterizados apresentaram resultados equivalentes aos das chapas laminadas em frequências elevadas. A liga Fe1%P foi a que apresentou o melhor conjunto de propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas entre as ligas estudadas. Desta forma, pode ser aplicada em casos específicos, como em motores de elevada frequência, minimotores e em servomotores, demonstrando, assim, a capacidade da M/P como alternativa aos processos atuais de fabricação de núcleos magnéticos de motores elétricos, com obtenção de menores custos e redução de etapas de fabricação.

Os resultados encontrados no desenvolvimento de materiais magnéticos sinterizados forneceram dados consistentes que indicam a possibilidade de aplicação em núcleos de máquinas elétricas. Somente os ensaios comparativos entre motores/geradores empregando os núcleos sinterizados e os usuais núcleos de chapas laminadas poderão fornecer dados conclusivos para a utilização do processo da Metalurgia do Pó, nos núcleos de máquinas elétricas em escala industrial.

6 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Se torna importante a continuidade desta linha pesquisa e novos trabalhos podem ser iniciados. Os seguintes temas podem ser abordados:

- Construção de motores com núcleo de material sinterizado para realização de ensaios comparativos com motores empregando núcleos de chapas laminadas.

- Aprofundar os estudos dos processos de mistura e compactação de materiais sinterizados visando melhorar as propriedades mecânicas dos mesmos.

- Desenvolver pesquisas em propriedades como a resistividade elétrica, a permeabilidade relativa e a indução magnética em função do aumento da pressão de compactação dos corpos de prova.

- Elaboração de um banco de dados com as propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas dos materiais sinterizados e suas aplicações nos núcleos de máquinas elétricas.

REFERÊNCIAS

- [1] CHIAVERINI, V. **Metalurgia do Pó**. 4. ed. São Paulo: ABM, 2001. 330 p.
- [2] MORO, N.; AURAS, A. P. **Metalurgia do Pó e o futuro da indústria**. Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Curso Técnico de Mecânica Industrial, 2007. 28 p.
- [3] BARBOSA, J. S. **Caracterização de compósitos magnéticos macios desenvolvidos através da Metalurgia do Pó aplicados a núcleos de máquinas elétricas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M -, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. 85 p.
- [4] COLTON, J. S. **Metal Powder Processing**. Georgia Institute of Technology, ME 4210: Manufacturing Processes and Engineering, 2009. 29 p.
- [5] ASM Handbook. **Powder Metal Technologies and Applications**. ASM International, v. 7, 1998. 1146 p.
- [6] CHIAVERINI, V. **Metalurgia do Pó**. 3 ed. São Paulo: Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda, 1992. 352 p.
- [7] FUCHS, H. C. **Estudo do Tamanho de Grão em Amostras de Ferro Sinterizadas em Descarga Elétrica de Cátodo Oco**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. 119 p.
- [8] GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos e Científicos, 2009. 320 p.
- [9] JANSSON, P. **Soft Magnetic Materials for A.C. Applications**. Powder Metallurgy. v. 35, n.1, 1992. p. 63-66.
- [10] BONATO, M. M. **Resistência à Corrosão do Aço ABNT 316L Injetado Sinterizado**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2003. 121 p.
- [11] DIAS, M. M. **Construção de uma máquina síncrona de relutância trifásica com rotor de material magnético macio sinterizado**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M -, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999. 62 p.
- [12] KRAUS, J. D.; CARVER, K. R. **Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. 780 p.
- [13] JILES, D. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. London: Chapman and Hall, 1991. 440p.

- [14] ASM Handbook. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. ASM International, v. 2, 1990. 1328 p.
- [15] LEWIS, J. A. **Desenvolvimento de Compósitos Magnéticos Macios Utilizados em Núcleos de Máquinas Elétricas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M -, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. 98 p.
- [16] DIAS, M. M.; DIAS, A. M.; CÉZAR, J. L.; SCHAEFFER, L. **Novas perspectivas das máquinas elétricas trifásicas a partir da utilização de materiais magnéticos macios sinterizados**. Novo Hamburgo: Revista Liberato, v. 6, n. 6, 2005. p. 56-65.
- [17] KRAUSE, R. F.; BULARZIK, J. H.; KOKAL, H. R. **A New Soft Magnetic Material for AC and DC Motor Applications**. Journal of Materials Engineering and Performance, v. 6, n. 6, 1997. p. 710-712.
- [18] DIAS, M. M.; SCHAEFER, L.; RODRIGUES, D.; LANDGRAF, F. J. G. **Materiais magnéticos produzidos por metalurgia do pó**. São Paulo: M & M - Metalurgia e Materiais, v. 55, n. 483, 1999. p. 625-625.
- [19] LENEL, F. V. **Magnetic Applications**. Metals Handbook, v. 7, 1984. p. 638-641.
- [20] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY Jr. C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6 ed. Bookman, 2006. 648 p.
- [21] NASAR, S. A. **Máquinas Elétricas**. São Paulo: McGraw Hill do Brasil, 1984. 216p.
- [22] FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Electric machinery**. 5 ed. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1990. 599 p.
- [23] KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. Editora Globo: 2006. 667p.
- [24] NASAR, S. A. **Handbook of Electric Machines**. McGraw-Hill, 1987. 608 p.
- [25] GRAY, C. B. **Electrical Machines and Drive Systems**. Longman Sc & Tech, 1989. 446 p.
- [26] DIAS, M. M.; DIAS, A. M.; CÉZAR, J. L.; VERNEY, J. C. K.; SCHAEFFER, L. **Motores síncronos Trifásicos com Ímãs Permanentes**, Canoas: Revista Tecnologia, v. 6, n. 2, 2005. p. 107-127.
- [27] CATÁLOGOS WEG. **Servoconversores SCA06 - Servomotores SWA**. 2012. 16 p.
- [28] CHAPMAN, S. J. **Electric Machinery Fundamentals**. 4 ed. Mcgraw-Hill, 2003. 770 p.
- [29] RICHARDSON, D. V. **Rotating Electric Machinery and Tranformer Tecnology**. 2 ed. Virginia-USA: Reston Publishing Company, Inc., 1982. 635p.
- [30] CUNHA, M. A.; PAOLINELLI, S. da C. **Effect of the annealing temperature on the structure and magnetic properties of 3% Si non-oriented steel**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 254-255, 2003. p. 379-381.

- [31] LANDGRAF, F. J. G.; SCOZ, L. C. **A separação de perdas elétricas como critério de avaliação de processamento de aços elétricos.** *Metalurgia & Materiais*, 1995. p.436-438.
- [32] LALL, C. **Soft Magnetism, Fundamentals of Powder Metallurgy and Metal Injection Molding.** Princeton, New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 1992. 141 p.
- [33] BAS, J. A.; CALERO, J. A.; DOUGAN, M. J. **Sintered soft magnetic materials. Properties and applications.** *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 254–255, 2003. p. 391–398.
- [34] SHOKROLLAHI, H. **The magnetic and structural properties of the most important alloys of iron.** *Materials And Design*, Shiraz University of Technology, 2009. p. 3374-3387.
- [35] LALL, C; BAUM, L. W. **High Performance Soft Magnetic Components by Powder Metallurgy and Metal Injection Molding.** *Modern Developments in P/M*, v. 18, 1998. p. 363-389.
- [36] NARASIMHAM, K.; HANEJKO, F.; MARUCCI, L. **Growth Opportunities with Soft Magnetic Materials.** Washington, D.C.: Hoeganaes Corporation, 2008. 9 p.
- [37] HANEJO, F. G.; PHAN, H. G. **Powder metallurgy materials for AC magnetic applications.** Washington, D.C.: Presented at PM TEC, 96 World Congress, June 16-21, 1996.
- [38] SKARIE, H. **Design of Powder Core Inductors.** Licentiate Thesis, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, 2001. 153 p.
- [39] BAS, J. A.; PUIG, J.; MOLINS, C. B. **Soft Magnetic Materials in P/M: Current Applications and State-of-the-Art.** New Jersey: Modern Developments in Powder Metallurgy, Metal Powder Industries Federation, v. 18, 1988. p. 745-756.
- [40] PERSSON, M.; JANSSON, P. **Advances in Powder Metallurgy Soft Magnetic Composite Materials for Electrical Machines.** London: IEE Colloquium, The Impact of New Materials on Design, n. 234, 1995. p. 4/1-4/6.
- [41] JACK, A.G. **The Impact of New Materials on the Design of Electrical Machines.** London: IEE Colloquium, The Impact of New Materials on Design, n. 234, 1995. p.1/1-1/5.
- [42] JACK, A. G.; MECROW, B. C.; MADDISON, C. P.; WAHAB, N. A. **Claw pole armature permanent magnet machines exploiting soft iron powder metallurgy.** *IEEE International, Electric Machines and Drives Conference Record*, 1997. p. MA1/5.1-MA1/5.3.
- [43] SILVA, M. C. A.; BOLFARINI, C.; KIMINAMI, C. S.; GUSSON, P. P. **Magnetic Properties of Spray Formed Fe-3%wtSi, Fe-5%wtSi and Fe-6%wtSi Alloys.** *Materials Science Forum*, v. 416, n. 4, 2003. p. 113-118.
- [44] FRAYMAN, L. L.; RYAN, D. R.; RYAN, J. B. **Modified P/M Soft Magnetic Materials for Automotive Applications.** *International Journal of Powder Metallurgy*, v. 34, n. 7, 1998. p.31-39.

- [45] ANISIMOVA, E. A.; OLEINIKOV, A. M.; SERDYUK, G. G. **Powder Materials with Specified Electrical and Magnetic Properties for Heavy and Two-Layer Rotors of Asynchronous Motors.** Powder Metallurgy and Metal Ceramics (English translation of Poroshkovaya Metallurgiya), v. 29, n. 9, 1990. p.741-744.
- [46] PERSSON, M.; JANSSON, P.; JACK, A. G.; MECROW, B. C. **Soft Magnetic Composite Materials - Use for Electrical Machines.** Electrical Machines and Drives, n. 412, 1995. p. 242-246.
- [47] BUSCHOW, K. H. J. **Handbook of Magnetic Materials.** Elsevier Science, v. 19, 2011. 464p.
- [48] GUSSOW, M. **Eletricidade Básica.** Makron Books, 2 ed. 1997. 566 p.
- [49] BERNARDI, L. O.; PANTANO, R. **Medição da resistividade elétrica em condutores metálicos.** Revista Intellectus, n. 19, 2012. p. 55-69.
- [50] FALCONE, A. G. **Eletromecânica: Transformadores e Transdutores, Conversão Eletromecânica de Energia, Máquinas Elétricas.** São Paulo: Edgard Blücher, 1979. 478 p.
- [51] SCHNEIDER ELECTRIC. **Qualidade de Energia, Harmônicas. Instalações Elétricas de Baixa Tensão – Workshop.** 2003. 19 p.
- [52] BARBOZA, J. S.; CERVA, L. L.; DIAS, M. M.; LEWIS, J. A.; SCHAEFFER, L. **Estudo Comparativo de Ligas Magnéticas Através de Simulação por Elementos Finitos,** 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2008. 14p.
- [53] MEEKER, D. **Finite Element Method Magnetics.** User's Manual, v. 4.2, 2010. 158 p.
- [54] DIAS, M. M.; DIAS, A. M.; MUSSKOPF, A. **Desenvolvimento de Aços Sinterizados FE-NI-MO-P,** Revista Liberato, v.6, n.6, 2005. p. 49-55.
- [55] SHIMANAKA, H.; ITO, Y.; MATSUMURA, K.; FUKUDA, B. **Recent development on non-oriented electrical steel sheets.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials, v. 26, 1982. p. 57-64.
- [56] CARDOSO, R. F. A. **Influência do Tamanho de Grão e das Adições de Al e Mn nas Propriedades Magnéticas dos Aços Elétricos de Grão Não Orientado com 3%Si.** Dissertação de Mestrado, Curso de Mestrado em Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia - Rio de Janeiro, 2005. 160 p.
- [57] VERMA, N.; UPADHYAYA, A. **Effect of Phosphorus addition as sintering activator in Sinter-Hardened alloy steels.** Department of Materials and Metallurgical Engg, Indian Institute of Technology, 2007. 26 p.
- [58] KHRAISAT, W.; NYBORG, L. **Liquid phase sintering of ferrous powder by carbon and phosphorus control.** Powder Metallurgy, v. 46, n. 3, 2003. p. 265-270.

[59] LANDGRAF, F. J. G. **Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2001. 20p.

[60] CASTRO, N. A.; RODRIGUES, D.; LANDGRAF, F. J. G.; YONAMINE, T.; HENRIQUE, M. L. **Pó de ferro microencapsulado: efeito do tratamento térmico de recozimento na redução das perdas magnéticas**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2002. 7 p.

[61] HANEJKO, F. G.; ELLIS, G. W.; HALE, T. J. **Application of high performance material processing: electromagnetic products**. Las Vegas: Hoeganaes Corporation, Presented at PM2TEC, 1998. 16 p.