

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

DESENVOLVIMENTO DE UM MINI-MOTOR COM O ESTATOR
PRODUZIDO POR PROCESSO DE METALURGIA DO PÓ

RAFAEL FRANCISCO NIADA

Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia

PORTO ALEGRE

2015

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

DESENVOLVIMENTO DE UM MINI-MOTOR COM O ESTATOR
PRODUZIDO POR PROCESSO DE METALURGIA DO PÓ

RAFAEL FRANCISCO NIADA
MSc, Tecnólogo em Polímeros

Tese realizada no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M em conjunto com a Universidade FEEVALE como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre

2015

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

Orientador: Dr. Eng. Lírio Schaeffer

Co-Orientador: Dr. Eng. Moisés de Matos Dias

Banca Examinadora:

Dr. José Carlos Krause de Verney
ULBRA

Dr. Ricardo Martins de Martins
UNIVERSIDADE FEEVALE

Dr. Vicente Mariano Canalli
PUCRS

Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

Dedico à minha esposa Simone Scherer, aos meus filhos Lucas Scherer Niada e Vinícius Scherer Niada, que tiveram a paciência e compreensão e me apoiaram, durante o período de doutorado e aos meus pais, Benta Silva Niada e Lourival Niada (em memória).

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Eng. Lírio Schaeffer pela orientação e pelo apoio durante todo o desenvolvimento desta tese.

Ao Prof. Dr. Eng. Moisés de Mattos Dias pela amizade, apoio e co-orientação durante o desenvolvimento.

A todos os professores que participaram em minha formação.

Ao bolsista de iniciação científica Pedro Henrique Bueno Martins, pelo auxílio nos ensaios no mini-motor.

Ao funcionário da Universidade FEEVALE, Pedro Rodrigues Froz, pela contribuição no desenho dimensional do mini-motor.

A todos que colaboraram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	7
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	14
LISTA DE SIMBOLOS	15
RESUMO	17
ABSTRACT	18
1. INTRODUÇÃO	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1. MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO DE CORRENTE CONTÍNUA COM IMÃS PERMANENTES NO ROTOR E SEM ESCOVAS	22
2.1.1. Introdução	22
2.1.2. Princípio de Funcionamento do Motor Síncrono Trifásico de Corrente Contínua com Ímãs Permanentes no Rotor	23
2.2 MOTORES ELÉTRICOS PRODUZIDOS UTILIZANDO PROCESSOS DE METALURGIA DO PÓ	29
2.3. FATORES QUE DETERMINAM O DESEMPENHO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS	32
2.4. MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS SINTERIZADOS UTILIZADOS EM NÚCLEOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS	37
2.5. MATERIAIS MAGNÉTICOS DUROS	41
3. ANÁLISE EXPERIMENTAL - MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1. CONDIÇÕES GERAIS PARA CONSTITUIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA....	44
3.2. OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA COM AS LIGAS	44
3.2.1. Mistura do Pó de Ferro com Elementos de Liga	44
3.2.2. Compactação dos Corpos de Prova com Elementos de Liga	44
3.2.3. Sinterização dos Corpos de Prova com Elementos de Liga	48
3.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS LIGAS SINTERIZADAS	48
3.4. PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS DAS LIGAS SINTERIZADAS	49

3.4.1. Resistividade Elétrica das ligas sinterizadas	49
3.4.2. Características Magnéticas das ligas sinterizadas	50
3.5. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS COMPARATIVAS EM PROGRAMA FEMM	
4.2.....	51
3.6. ENSAIO DE PERDAS DE NÚCLEOS EM FORMA DE TRANSFORMADORES	53
3.7. ENSAIOS DE FUNCIONAMENTO DO MINI-MOTOR	54
3.7.1. Rotação Relativa do Mini-motor com o estator em bloco único de Fe1%P	55
3.7.2. Rendimento do Mini-motor com o estator em bloco único de Fe1%P	55
3.7.3. Temperatura do Mini-motor	55
3.7.4. Frequência do Mini-motor	56
3.8. CONSTRUÇÃO DO MINI-MOTOR COM O ESTATOR SINTERIZADO EM BLOCO ÚNICO DE FE1%P	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
3.8.1. Mistura dos pós para o estator do mini-motor em bloco único de fe1%P	57
3.8.2. Compactação do pó de ferro com 1% fósforo	57
3.8.3. Usinagem do cilindro sinterizado com fe1%p Para o estator do mini-motor	58
3.8.4. Bobinamento do mini-motor com o estator produzido em bloco único de Fe1%P	59
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	62
4.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CORPOS DE PROVA.....	62
4.2. PROPRIEDADES FÍSICAS, ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS CORPOS DE PROVA	64
4.3. RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DO MINI-MOTOR.....	67
4.4. RESULTADOS DOS ENSAIO DE PERDAS DE NÚCLEOS EM FORMA DE TRANSFORMADORES	68
4.5. RESULTADOS DOS ENSAIOS DO MINI-MOTOR.....	70

4.5.1. Rotação do mini-motor com o estator em bloco único de Fe1%P e com o estator de chapas.....	70
4.5.2. Rotação relativa do Mini-motor com o estator Em bloco único de Fe1%P.....	71
4.5.3. Rendimento real do Mini-motor com estator em bloco único de Fe1%P.....	72
4.5.4. Temperaturas de operação do mini-motor com o estator em bloco único de Fe1%P e com o estator de chapas	73
5 .CONCLUSÕES	75
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
ANEXO A - MOTIVAÇÃO PARA UTILIZAR A METALURGIA DO PÓ.....	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estudos com materiais magnéticos obtidos por processos de metalurgia do pó efetuados no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM).	21
Figura 2 - Força contra eletromotriz do motor de corrente contínua sem escovas.....	24
Figura 3 - Ângulo de defasagem do motor de corrente contínua sem escovas.	24
Figura 4 - Fluxo magnético concatenado em função da posição angular θ	25
Figura 5 - Força contra eletromotriz induzida.....	25
Figura 6 - Corrente fornecida pelo circuito eletrônico de chaveamento.	26
Figura 7 - Conjugada unidirecional.....	26
Figura 8 - Sequência de chaveamento das bobinas de um motor elétrico	27
Figura 9 - Ciclo de histerese magnética	35
Figura 10 - Estágios de magnetização de uma amostra policristalina com o crescimento do campo.....	36
Figura 11 - Fluxograma do plano de trabalho.....	43
Figura 12 - (a) Cilindro, (b) Dimensões do cilindro	45
Figura 13 - (a) Matriz dos cilindros, (b) Dimensões da matriz dos cilindros,	45
Figura 14 - (a) Anel de Rowland, (b) dimensões do anel de Rowland	46
Figura 15 - (a) Matriz para o anel de Rowland, (b) dimensões da matriz para o anel de Rowland.....	46
Figura 16 - (a) Núcleo tipo E, (b) dimensões do núcleo tipo E	46
Figura 17 - (a) Núcleo tipo T, (b) dimensões do núcleo tipo T.....	47
Figura 18 - (a) Matriz para o núcleo tipo E, (b) matriz para o núcleo tipo T	47

Figura 19 - Temperaturas de sinterização do compactado verde.	48
Figura 20 - Anel de Rowland (Toroidal) para ensaio das características magnéticas. ...	50
Figura 21 - Metodologia FEMM.....	51
Figura 22 - (a) Mini-motor montado – (b) Vista explodida do mini-motor com os componentes.	52
Figura 23 - Transformador 12V, 127V/220V utilizado nos ensaios de perdas em núcleos.	53
Figura 24 - Bancada de teste para ensaios do mini-motor.....	54
Figura 25 - (a) Matriz utilizada para compactação do cilindro para usinagem do estator do mini –motor (b) dimensões da matriz.....	57
Figura 26 - (a) Cilindro compactado e sinterização com Fe1%P (b) dimensões do cilindro.	58
Figura 27 - Dimensões do estator do mini-motor.	59
Figura 28 - (a) Estator de chapas - (b) Estator usinado em bloco único partir de processos de Metalurgia do Pó de Fe1%P – (c) estator em bloco único de Fe1%P após a pintura	59
Figura 29 - Bobinagem da fase R-R1, do estator sinterizado em bloco único de Fe1%P do mini-motor.....	60
Figura 30 - Bobinagem da fase S-S1, do estator sinterizado em bloco único de Fe1%P do mini-motor.....	60
Figura 31 - Bobinagem fase T-T1, do estator sinterizado em bloco único de Fe1%P do mini-motor.....	61
Figura 32 - Ligação em estrela das fases do estator sinterizado em bloco único de Fe1%P mini-motor.	61
Figura 33 - Estator sinterizado em bloco único de Fe1%P do mini-motor instalado na carcaça.	61

Figura 34 - Mini-motor com estator de chapas e o mini-motor com estator em bloco único de Fe1%P sinterizado.	62
Figura 35 - Dureza Brinell (HB) de Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni.....	63
Figura 36 - Densidade de fluxo magnético obtida na simulação computacional do núcleo de chapas, Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni.....	67
Figura 37 - Torque obtido na simulação computacional do núcleo de chapas, Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni.....	68
Figura 38 - Perdas em transformadores com o núcleo de chapas, Fe puro, Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si, Fe50%Ni.....	69
Figura 39 - Rendimento relativo do mini-motor com o estator em bloco único de Fe1%P em relação ao mini-motor com o estator de chapas.	71
Figura 40 - Rendimento do mini-motor com o estator em bloco único de Fe1%P.....	72
Figura 41 - Comparação de impacto ambiental entre diversos processos de fabricação	77
Figura 42 - Comparação entre a resistência mecânica de materiais obtida em diversos processos de fabricação	78
Figura 43 - Comparação entre a tolerância geométrica de diversos processos de fabricação	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades típicas de materiais magnéticos macios sinterizados	39
Tabela 2 - Materiais sinterizados produzidos por processos de M/P	41
Tabela 3 - Propriedades típicas para vários materiais magnéticos duros	41
Tabela 4 - Força de Compactação dos Corpos de Prova.	47
Tabela 5 - Características do mini-motor comercial	52
Tabela 6 - Tensão de escoamento de Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni	64
Tabela 7 - Propriedades físicas, elétricas e magnéticas de Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni	65
Tabela 8 - Rotação do mini-motor com o estator em bloco único de Fe1%P e rotação do motor convencional de chapas.	70
Tabela 9 - Temperaturas de operação do mini- motor com o estator de Fe1%P.....	73
Tabela 10 - Temperaturas de operação do mini-motor com o estator de chapa.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FEMM	Método dos Elementos Finitos Magnéticos
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
MIP	Motores com Ímã Permanente
M/P	Metalurgia do Pó
PMSM	Motor Síncrono de Ímãs Permanentes
SMC	Compósitos Magnéticos Macios
TCH	Traçador de Curva de Histerese
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SIMBOLOS

A	Área da superfície para compressão	(m ²)
B	Indução magnética	(T)
BH_{\max}	Produto energético magnético máximo	(MG.Oe)
B_{\max}	Indução de saturação	(T)
B_r	Remanência	(T)
De	Densidade das espiras do anel de <i>Rowland</i>	Adimensional
D_R	Diâmetro do rotor	(mm)
d_{ext}	Diâmetro externo do anel de <i>Rowland</i>	(mm)
d_{int}	Diâmetro interno do anel de <i>Rowland</i>	(mm)
e	Força contra-eletromotriz	(V)
f	Frequência do campo magnético	(Hz)
F	Força de compressão	(N)
H	Campo magnético	(A/m)
H_c	Campo coercitivo	(A/m)
I	Corrente elétrica	(A)
I_p	Corrente do enrolamento primário	(A)
l	Comprimento axial do rotor	(m)
L	Espessura da peça	(m)
l_b	Comprimento da barra	(m)
L_c	Comprimento do circuito magnético	(m)
M	Magnetização	(A/m)
MMA	Momento magnético atômico	(Am ²)
M_s	Saturação magnética	(T)
N	Número de espiras	(-)
N_p	Número de espiras no enrolamento primário	(-)
n_s	Rotação	(rpm)
p	Número de polos	(-)
P_c	Perdas por calor	(W/kg)
P_e	Perdas do enrolamento primário	(W)
P_h	Perdas por histerese	(W/kg)
P_m	Perdas magnéticas	(W/kg)
P_p	Perdas por calor	(W/kg)

R	Resistência elétrica	(Ω)
R_{Chapas}	Rotação do motor convencional de chapas	(rpm)
$R_{\text{Fe1\%P}}$	Rotação do motor com estator de Fe1%P	(rpm)
r_R	Raio do rotor	(m)
R_r	Rotação relativa	(%)
R_{real}	Rendimento real do motor com estator de Fe1%P	(%)
t	Tempo	(min)
T	Período de magnetização da bobina do motor	(-)
T_c	Temperatura de curie	(K)
T_o	Temperatura de operação	($^{\circ}\text{C}$)
T_{rep}	Temperatura de repouso	($^{\circ}\text{C}$)
T_r	Torque nominal	(N.m)
W_{cmp}	Densidade de energia armazenada no campo	(J/m^3)
V_p	Tensão do enrolamento primário	(V)

SÍMBOLOS GREGOS

μ	Permeabilidade absoluta	(H/A)
μ_{max}	Máxima permeabilidade	(H/m)
μ_0	Permeabilidade do vácuo	(H/m)
μ_r	Permeabilidade relativa	Adimensional
σ_e	Tensão de escoamento	(MPa)
ρ	Resistividade elétrica	($\Omega.\text{m}$)
ρ_m	Massa específica	(g/cm^3)
ρ_s	Massa específica da peça sinterizada	(g/cm^3)
θ	Ângulo de defasagem	(rad)
ω_m	Velocidade angular	(rad/s)
λ	Fluxo concatenado	(Wb/espiras)

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um mini-motor síncrono trifásico, sem escovas e com ímãs permanentes no rotor, utilizado em aeromodelos. O núcleo do estator, usualmente construído com chapas laminadas, foi obtido a partir do processo de Metalurgia do Pó (M/P). Confeccionaram-se corpos de prova de ferro puro, Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni. Foram analisadas as características físicas dos materiais sinterizados que compreendem as grandezas magnéticas: curvas de histerese, resistividade elétrica. Analisaram-se as grandezas mecânicas: dureza e tensão de escoamento. Com os dados magnéticos obtidos, realizaram-se simulações computacionais de funcionamento, onde se observou o fluxo de entreferro e torque. Efetuaram-se ensaios em núcleos de transformadores para analisar as perdas por correntes parasitas. Os resultados foram comparados também com os do estator de chapas. Foi realizada a construção do núcleo do estator a partir de Fe1%P. O estator do mini-motor foi bobinado e instalado em uma carcaça de um mini-motor existente no comércio, para efetuar testes em bancada de acionamento em correntes variadas, onde pôde ser analisada sua eficiência em comparação com o mini-motor com núcleo do estator de chapas. Foi mostrado que é possível a construção de um motor elétrico com núcleo do estator em bloco único de Fe1%P por processo de Metalurgia do Pó, atingindo 74% da eficiência em relação ao mini-motor com núcleo do estator de chapas.

Palavras-chave: Motor Elétrico. Metalurgia do Pó. Propriedades Magnéticas. Compósitos Magnéticos.

ABSTRACT

This study aimed to develop three-phase synchronous motor small, brushless and permanent magnets in the rotor, used in model airplanes. The stator core usually constructed of rolled sheets, was obtained from the powder metallurgy process (M / P). Crafted to pure iron specimens, Fe1% P, Fe 2% P, Fe3% P, Fe1% Si, Fe3% Si and Fe50% Ni. They analyzed the physical characteristics of the sintered materials which comprise the magnetic quantities: hysteresis curves, electrical resistivity. Hardness and yield stress: mechanical magnitudes were analyzed. With the magnetic data, computer simulations were carried out of operation where the flux of airgap observed and torque. Tests were affected in cores of transformers for analyzing eddy current losses. The results were also compared with those of the stator plates. Construction of the stator core from Fe1% P was performed. The mini-motor stator was wound and installed in an enclosure of an existing mini-motor trade, for testing in drive bench in varying currents, which could be analyzed efficiency compared to the mini-motor with stator core plates. It has been shown that the construction of an electric motor with the stator core in a single block P Fe1% by Powder Metallurgy process is possible, reaching 74% efficiency relative to the mini-core motor with stator plates.

Keywords: Electric Motor. Powder Metallurgy. Magnetic Properties. Magnetic Composites.

1. INTRODUÇÃO

Em um mundo onde os recursos naturais estão ficando cada vez mais escassos, há uma busca constante para o desenvolvimento de novos materiais e processos que apresentem maior rendimento e eficiência. De acordo com Dias (1999), é possível a produção de um compósito magnético em um bloco único, utilizando técnicas de Metalurgia do Pó (M/P), em substituição aos atuais feixes de chapas, empregados em motores elétricos. Para Iervolino (2009), a Metalurgia do Pó é de fácil automatização, baixo consumo energético, proporciona a produção de peças em seu formato final, eliminando etapas posteriores, possibilita a redução de perdas na produção e pode atingir 95% de aproveitamento de matéria prima.

Os motores elétricos há décadas são construídos da mesma forma, sem grandes inovações tecnológicas. O estator e o rotor são feitos a partir de finas camadas de lâminas de aço com algum percentual de silício e são isoladas eletricamente entre si com o objetivo de direcionar o fluxo magnético para as extremidades. Com o desenvolvimento de ímãs sinterizados de alto poder energético de ferrita, NeFeB, AlNiCo e SmCo, produzidos a partir de terras raras e de mecanismos de acionamento eletrônico, outros projetos estão sendo desenvolvidos.

De acordo com Guo *et al.* (2007), compósitos magnéticos macios, e sua aplicação em máquinas elétricas, obtiveram significativo desenvolvimento na última década, graças às suas propriedades únicas, tais como isotropia magnética, baixa perda por corrente de *Foucault*, baixa perda total do núcleo em média e alta frequências, perspectiva de custo baixo de fabricação e uso de pós metalúrgicos bem desenvolvidos. As restrições impostas pelo aço laminado, tal como em que o fluxo tem que fluir dentro do plano de laminação, podem agora ser ignoradas, de modo que máquinas elétricas podem ser produzidas com diferentes topologias para adquirir o melhor desempenho.

Para aplicação no estator do motor elétrico, as características de interesse são:

- resistividade elétrica;
- propriedades magnéticas: permeabilidade magnética, retentividade e coercitividade, obtidas a partir da curva de histerese;
- propriedades mecânicas: dureza e tensão de escoamento;
- perdas magnéticas totais: obtidas a partir de ensaios a vazio em corpo de prova na forma de transformadores.

Há diversos estudos com materiais magnéticos produzidos com processos de Metalurgia do Pó, realizados no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), entre os quais, a construção de máquinas elétricas com núcleos sinterizados que apresentaram ótimos resultados. Alguns dos estudos estão relacionados em ordem cronológica na Figura 1.

Os estudos iniciaram em 1999, com a caracterização de materiais magnéticos e, ao longo dos anos, foram construídos motores e geradores, como em 2005, quando Dias analisou um motor síncrono trifásico com ímãs permanentes, sendo que o material utilizado no núcleo do estator, produzido em bloco único, foi de ferro puro sinterizado. Desde então, esse foi o material mais empregado nessas máquinas.

Assim, esse trabalho vem em continuidade aos estudos efetuados no LdTM da UFRGS (Figura 1), com o objetivo geral de desenvolver e analisar um mini-motor síncrono trifásico de corrente contínua, sem escovas, com ímãs permanentes no rotor e núcleo do estator construído a partir de processo de Metalurgia do Pó (M/P). Essa máquina possui 12 polos, opera com tensão de 12 V, corrente nominal de 0,3 A, corrente máxima de 7,5 A e torque de 0,0021 Nm. Para que o objetivo geral fosse alcançado foram estabelecidos os objetivos específicos que compreendem a caracterização da matéria prima, a construção do mini-motor com estator sinterizado em bloco único e análise comparativa com um mini-motor com estator de chapas.

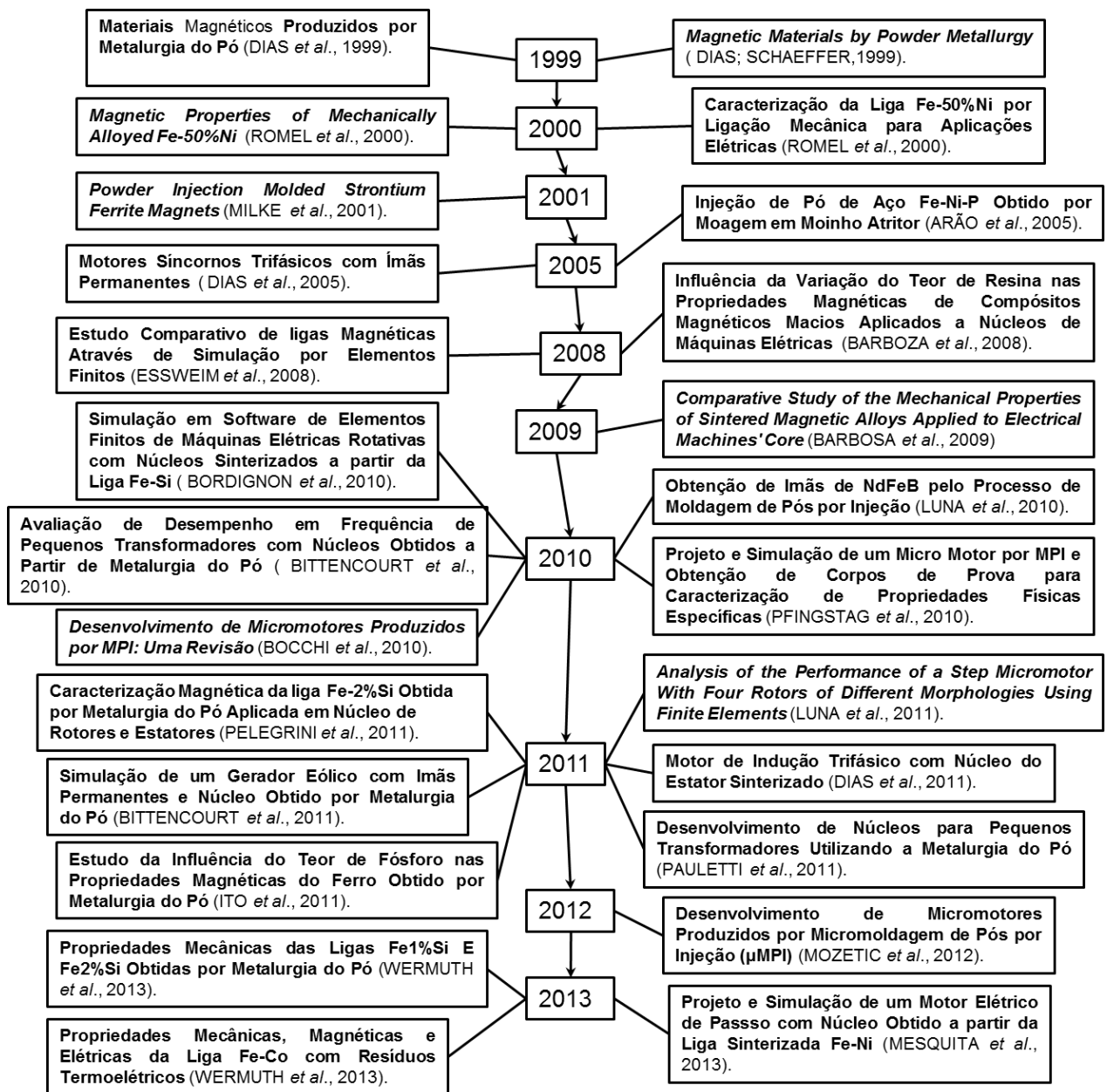


Figura 1 - Estudos com materiais magnéticos obtidos por processos de metalurgia do pó efetuados no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO DE CORRENTE CONTÍNUA COM IMÃS PERMANENTES NO ROTOR E SEM ESCOVAS

2.1.1. INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas são constituídas por circuitos elétricos e circuitos magnéticos acoplados entre si. O circuito magnético é o caminho para o fluxo magnético, assim como um circuito elétrico estabelece um caminho para a corrente elétrica. Nas máquinas elétricas, os condutores percorridos por correntes interagem com os campos magnéticos, resultando na conversão eletromecânica de energia (NASAR, 1987).

O motor de corrente contínua (CC) é aquele cuja corrente possui fluxo contínuo e ordenado de elétrons, sempre na mesma direção, e o motor de corrente alternada (CA) é aquele em que a magnitude e a direção da corrente variam ciclicamente. Ou seja, há variação de corrente elétrica, ao contrário da corrente contínua (SMITH, 1998).

Os motores com ímã permanente (MIP) se destacam por serem mais eficientes energeticamente do que outras máquinas elétricas. O motor de corrente contínua sem escovas, aloja no rotor os ímãs permanentes, gerando uma onda de força contra eletromotriz de forma trapezoidal, e seu controle de rotação é mais simples em comparação a outros motores (SIQUEIRA; ANDRADE, 2008). A construção desses motores foi impulsionada pela fabricação de ímãs permanentes de alto poder energético, baseados em terras raras, como o neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B) ou o samário-cobalto (Sm-Co), que não são desmagnetizados com facilidade, quando submetidos a elevadas correntes; e também com o desenvolvimento de componentes eletrônicos, que permitiu um maior controle de velocidade e acionamento (JAHNS *et al.*, 2009).

Os motores com ímãs permanentes que não possuem escovas são utilizados na indústria de eletrodomésticos, automotiva, aeroespacial, medicina, automação industrial e instrumentação. Eles possuem vantagens sobre motores com escovas CC e motores de indução, tais como:

- melhor velocidade *versus* características de torque;
- alta resposta dinâmica;
- alta eficiência;
- longa vida útil;
- operação silenciosa;
- gama de velocidades mais elevada;
- razão entre o torque entregue e tamanho do motor é mais elevada.

Essas vantagens o tornam útil para aplicações nas quais o espaço e o peso são fatores críticos (YEDAMALE, 2003).

2.1.2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO DE CORRENTE CONTÍNUA COM ÍMÃS PERMANENTES NO ROTOR

O motor síncrono trifásico de corrente contínua (BLDC) é assim denominado porque não há defasagem de fases entre o campo magnético gerado no estator e o campo de ímãs permanentes do rotor, girando, dessa forma, a uma mesma frequência (MOURA, 2010).

No rotor do motor síncrono trifásico de corrente contínua, estão instalados os ímãs permanentes que produzem o campo magnético principal, e a passagem de corrente elétrica nas bobinas do estator produz o outro campo magnético, demonstrado esquematicamente na Figura 2. A partir do princípio da tendência dos alinhamentos dos campos magnéticos, a reação entre o fluxo magnético gerado resulta na força contra eletromotriz (e), tendendo a alinhar esses dois campos; nesse instante, um circuito eletrônico de chaveamento faz a inversão do sentido da corrente, mantendo a rotação (SIQUEIRA; ANDRADE, 2008).

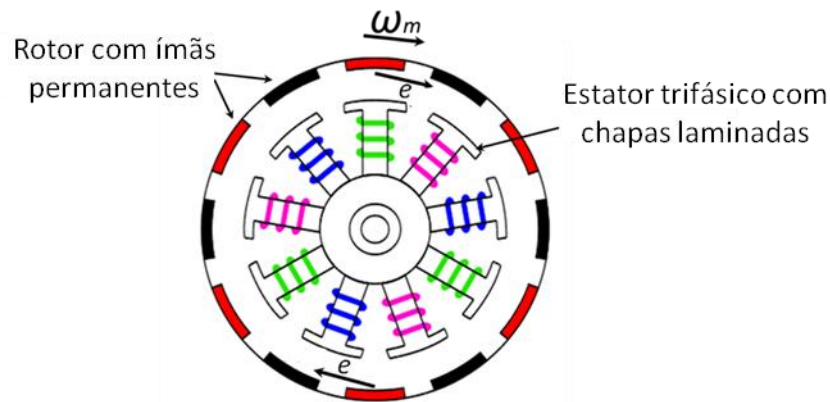


Figura 2 - Força contra eletromotriz do motor de corrente contínua sem escovas.

A Figura 3 mostra um diagrama esquemático, o fluxo magnético gerado pelos ímãs permanentes está defasado do fluxo magnético produzido no bobinamento do estator, o qual é atraído, produzindo uma força contra eletromotriz (e).

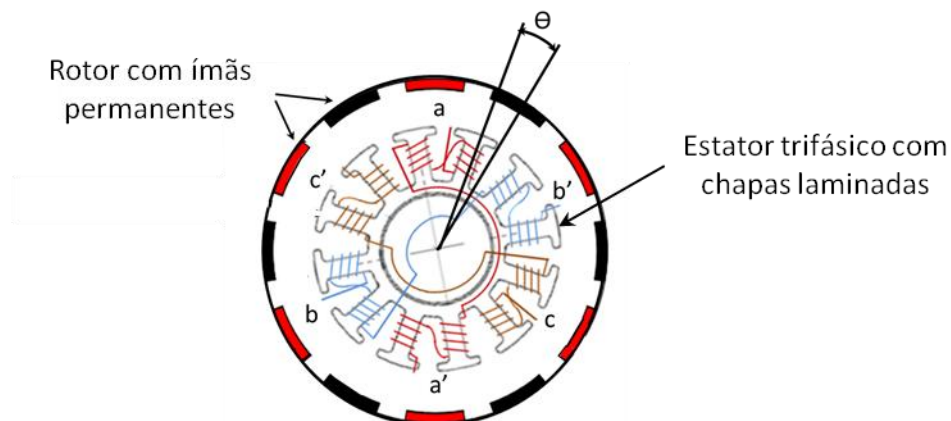


Figura 3 - Ângulo de defasagem do motor de corrente contínua sem escovas.

Na Figura 3 quando o ângulo de defasagem (θ) é igual a zero, no instante em que o fluxo magnético do ímã está atravessando a bobina $a-a'$ (Figura 3), o fluxo concatenado (λ), nessa bobina é máximo. À medida que o rotor se movimenta e o ângulo θ aumenta, o fluxo magnético concatenado (λ), pela bobina diminui, até atingir o valor zero, em $\pi/2$ (Figura 4). A partir deste, ocorre a inversão do fluxo concatenado (SIQUEIRA; ANDRADE, 2008).

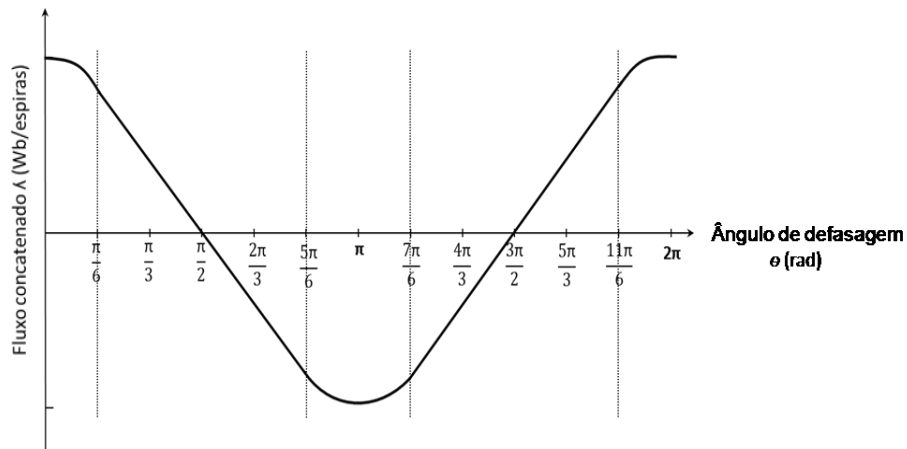


Figura 4 - Fluxo magnético concatenado em função da posição angular θ (SIQUEIRA; ANDRADE, 2008).

Pela Lei de Faraday, a força contra eletromotriz (e) gerada na bobina é equivalente à taxa de variação do fluxo concatenado (λ), calculada pela Equação 1 (SIQUEIRA; ANDRADE, 2008):

$$e = -\frac{d\lambda}{dt} = -\frac{d\lambda}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = -\omega_m \times \frac{d\lambda}{d\theta} \quad [\text{V}] \quad (\text{Equação 1})$$

Na qual ω_m é a velocidade angular e θ é o ângulo de defasagem. Assim, a derivada angular do fluxo magnético concatenado resulta na força contra eletromotriz (e), conforme mostrado na Figura 5.

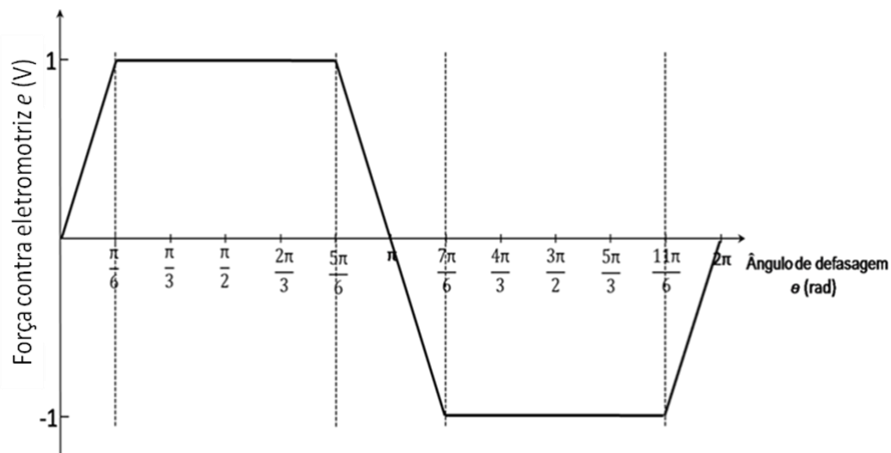


Figura 5 - Força contra eletromotriz induzida (SIQUEIRA; ANDRADE, 2008).

O circuito eletrônico de chaveamento tem a função de fornecer corrente (I), com a polaridade invertida da força contra eletromotriz (e), e nos mesmos instantes, mostrado na Figura 6 (SIQUEIRA; ANDRADE, 2008).

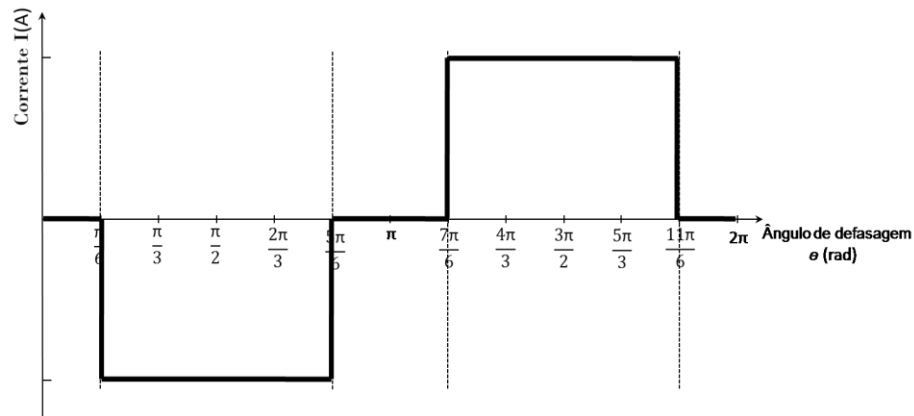


Figura 6 - Corrente fornecida pelo circuito eletrônico de chaveamento (SIQUEIRA; ANDRADE, 2008).

Considerando uma velocidade angular (ω_m) constante gera-se um conjugado unidirecional, constituindo o período de magnetização da bobina do motor (T), mostrado na Figura 7.

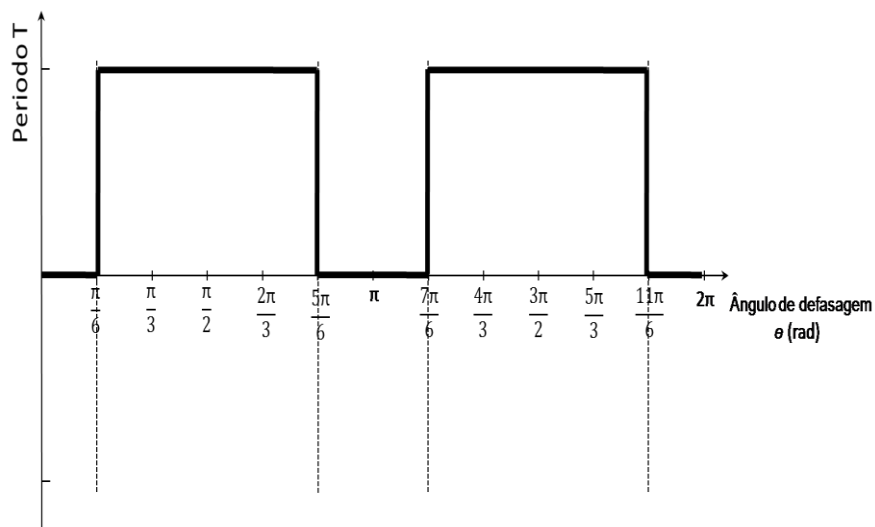


Figura 7 - Conjugada unidirecional (SIQUEIRA; ANDRADE, 2008).

O conjugado produzido por uma bobina não é constante, e existem regiões onde ele é nulo, sendo que o motor foi projetado com um enrolamento trifásico, com três bobinas defasadas de 120° . Dessa forma, o conjugado produzido também ficará defasado de 120° e a soma resulta em um conjugado constante igual a $2T$ (SIQUEIRA; ANDRADE, 2008).

O chaveamento das bobinas, visualizado na Figura 8, pode ser feito através de um circuito eletrônico de controle de velocidade, apenas duas bobinas são energizadas simultaneamente, havendo a alternância entre elas, gerando um campo magnético que produz a força contra eletromotriz (e), fazendo com que o motor entre em funcionamento.

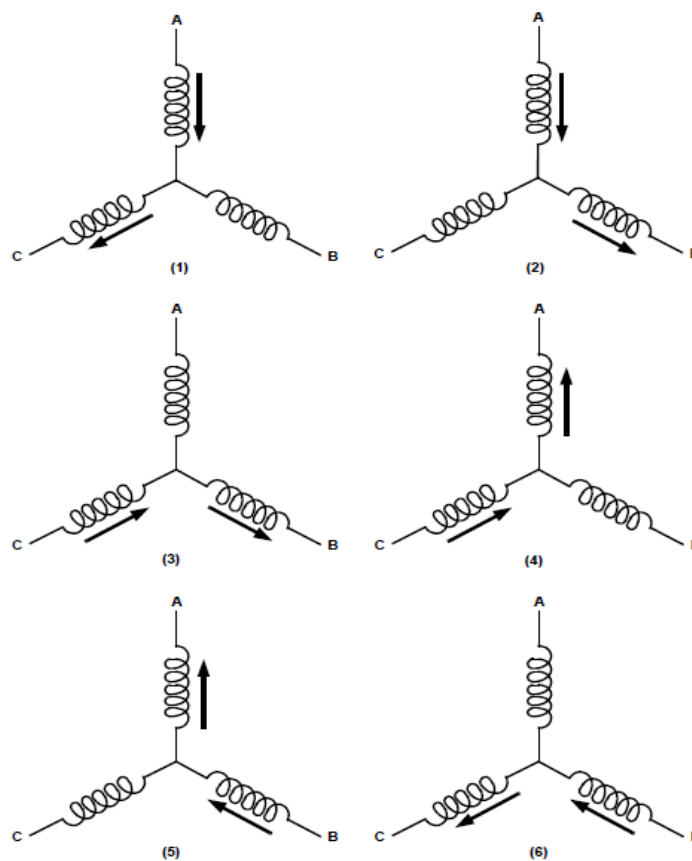


Figura 8 - Sequência de chaveamento das bobinas de um motor elétrico (YEDAMALE, 2003).

Na última década, uma série de projetos de motores de corrente contínua foram desenvolvidos, de acordo com seu princípio de acionamento, podendo ser com comutação eletrônica, inversores de frequência CC/CA e de rotação limitada, os quais são descritos a seguir:

- **motores CC sem escovas, com comutação eletrônica:** são motores com o estator bobinado e com ímãs permanentes no rotor. Montados no eixo do rotor, há sensores de posição do mesmo, funcionando como entrada para o sistema de chaveamento por componentes de estado sólido. Os motores comerciais usam técnicas de sensores, tais como transdutores magnéticos, transdutores de cristais de Hall, sensores eletrostáticos, bobinas de indução eletromagnética entre outros (KOSOW, 2005).

- **motores CC sem escovas tipo inversor CC/CA:** uma série de motores CC sem escovas emprega um servomotor CA em conjunto com um inversor eletrônico, para operação a partir de uma fonte CC. Os inversores possuem, normalmente, entradas CC de 12 V ou 24 V a 28 V, fornecendo saídas de 50 Hz, 60 Hz ou 400 Hz. O circuito do inversor incorpora técnicas para variação de frequência de saída e/ou da tensão CA para variação de velocidades. Alguns conjuntos eletrônicos incluem mesmo opções para CA e CC, resultando em um conjunto universal de controle de velocidade, com frequências de entrada desde CC até 400 Hz, a uma série de tensões de entrada (KOSOW, 2005).

- **motor CC de rotação limitada:** possuem rotor com ímãs permanentes e estator bobinado. Quando o estator é energizado por uma fonte CC, o rotor é acionado no sentido horário ou anti-horário, dependendo da polaridade da fonte que energiza o enrolamento do estator, fornecendo um torque constante dentro dos 90° de rotação em qualquer dos sentidos. É dispensável comutação em tais motores, uma vez que não é necessária uma corrente reversa para produzir a rotação contínua. Esses motores são aplicados em estações espaciais, nas articulações giroscópicas, em penas para

indicadores gráficos, como fornecedores de torque para ajuste fino de posição com servomecanismos e como servomotores para instrumentos (KOSOW, 2005).

2.2 MOTORES ELÉTRICOS PRODUZIDOS UTILIZANDO PROCESSOS DE METALURGIA DO PÓ

Há motores elétricos produzidos com processos de metalurgia do pó e são utilizados para diversos fins, entre eles bomba de freio abs, tração para bicicletas, freezer portátil, servos motores e outras possibilidades, possuindo excelente desempenho e algumas vezes melhores qualidades que os motores convencionais, os quais são descritos a seguir:

- **Motor sem escovas de corrente contínua:** o motor sem escovas e de corrente contínua foi concebido como um estudo de caso pela Universidade de Newcastle com o objetivo de ser um motor de tração direta para bicicletas. A concepção deste motor é baseada em um estator mono-segmentado e bobinamento individualizado. O rotor é externo e nele ficam alojados os ímãs de ferrita. Os principais benefícios alcançados por este motor são: baixo custo em manutenção baixo peso e alta concentração de fluxo (MUETZE *et al.*, 2001).

- **Motor de corrente contínua com escovas:** o motor de corrente contínua com escovas é utilizado em bomba de freios ABS. A configuração do motor permitiu que os dispositivos de comutação magnética, assim como o bobinamento fossem aproveitados no espaço interno, reduzindo desta forma a altura total do motor em comparação com a versão anterior feita com pacote de chapas. Estes benefícios só foram possíveis de serem alcançado através de um completo re-projeto do motor. As principais vantagens obtidas foram: redução do volume do motor, redução no uso de fios de cobre e diminuição na complexidade de montagem (ANDERSON, 2001).

- **Motores de fluxo transversal:** este tipo de motor tem como característica principal uma elevada densidade de torque, permitindo que possa ser utilizado em

aplicações de tração direta e desta forma eliminando o uso de caixas de redução. O motor pode ter o formato por uma topologia chamada de garra polar. Vários casos de sucesso vêm se tornando realidade com este tipo de configuração de motor, sempre aliado aos fatores benéficos do SMC. (POMPERMAIER *et al.*, 2012).

- **Motor linear:** O motor linear é baseado em dois estatores interno e externo, feitos em SMC com um ímã entre ambos. Este motor conceitual utilizado em um freezer portátil. O benefício mais marcante alcançado neste projeto foi a drástica redução número de componentes empregados na construção do motor sem haver perda de desempenho quando comparado com o seu antecessor feito com pacote de chapas (PENNANDER *et al.*, 2005).

- **Servo-motor sem escovas e de corrente contínua:** Os servos-motores foram projetados pela Phase Motion Control S.r.l da Itália. Utilizando-se componentes SMC foi possível reduzir em 2/3 o tamanho do motor anterior, feito com pacotes de chapas, porém, mantendo-se o mesmo desempenho. Isso graças a um novo bobinamento dos componentes (CREMONEZI *et al.*, 2009).

- **Motor compacto de fluxo transversal da GKN Sinter Metals:** a GKN Sinter Metals apresentou um motor de fluxo transversal no CWIEME 2013 (Berlim, Alemanha). O desenvolvimento deste motor é o resultado de uma colaboração entre a GKN e a RWTH Aachen University. GKN Sinter Metals tem demonstrado com sucesso que o uso de composto macio pode permitir a concepção de motores apresentando menores dimensões, menor peso e ruído reduzido. O protótipo chamado "Elektra" é totalmente aproveitável (Stefan, 2013).

Em sua versão básica, o motor é constituído por um elemento de estator, um enrolamento de cobre e um rotor com ímã permanente. Os estatores são feitos de SMC que consiste em partículas de ferro puro, com diâmetros de menos de 0,2mm

revestidas com uma camada de isolamento. Sendo prensado para a forma desejada, o material é curado a temperaturas entre 600-700°C, muito mais baixa do que a 1000°C utilizado na sinterização, a fim de não danificar a camada de isolamento. Esta camada de isolamento permite que as propriedades magnéticas tridimensionais essenciais para a construção do motor e redução significativa das perdas por correntes de *Foucault*. Outro benefício proporcionado é a redução do teor de cobre, por conseguinte, menos peso e custo em comparação com motores de fluxo radial tradicionais. O enrolamento de cobre, juntamente com os dois pólos do estator idênticas em combinação com um ímã permanente no rotor gerar uma maior densidade de toque. Para redução no consumo, o motor trifásico possui defasagem de 120 graus entre elas. Maior desempenho pode ser alcançado com uma estrutura modular de vários motores montados em linha. As frequências de operação podem variar de 500Hz até 30kHz (STEFAN, 2013).

- **Motor de fluxo transversal TFM da Honda:** os engenheiros da Honda R & D Co Ltd no Japão estão desenvolvendo um motor de fluxo transversal (TFM), utilizando um circuito magnético tridimensional, composto por SMC no núcleo do estator bobinado, a fim de reduzir o comprimento axial do motores elétricos utilizados em veículos elétricos híbridos da empresa (VHE) (TAKIZAWA *et al.*, 2013).

No entanto, a eficiência no projeto original foi relativamente baixa (79,1%), devido às características da perda de ferro dos compósitos magnéticos moles usados para fazer o estator. Além disso, os métodos de fabricação para a produção de bobinas em forma de anel com onda retangular, também era um problema. Para melhorar a eficiência do motor TFM engenheiros da Honda estudaram formas de reduzir a perda por correntes parasita para trazer a perda do ferro mais perto de seu objetivo. Para reduzir a perda de corrente de Foucault, o revestimento de isolamento do pó de ferro, que pode ser destruída durante a compactação, ou pelo processo de tratamento térmico, deve permanecer intactos mesmo à temperatura de 650°C. Os engenheiros utilizaram moinho centrífugo para reduzir a rugosidade da superfície do pó de ferro e

evitar o rompimento das películas que o reveste, e também aumentaram o volume de resina aglutinante e adicionaram um lubrificante e para melhorar sua fluidez chegando dessa forma um rendimento de 83,7% (TAKIZAWA *et al.*, 2013).

2.3. FATORES QUE DETERMINAM O DESEMPENHO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

Um campo magnético produz corrente elétrica, e uma corrente elétrica gera um campo magnético. O princípio da indução eletromagnética é utilizado na construção de geradores, motores e transformadores. A força magnetomotriz é gerada pelos campos magnéticos. (ROMANO; TODDAI, 1976).

Em uma estrutura cristalina, assim como em um átomo isolado, no máximo dois elétrons podem ocupar um dos níveis de energia. Esses dois elétrons possuem *spins* opostos e, como cada elétron, quando girando em torno de si mesmo, é equivalente a uma carga se movendo, cada elétron atua como um magneto extremamente pequeno, com os correspondentes polos, norte e sul (CREMONEZI *et al.*, 2009).

Os elementos químicos que possuem o mesmo número de elétrons com *spins* "para cima" e "para baixo" quase não reagem a um campo magnético externo e são chamados diamagnéticos (GUSSOW, 1986).

Elementos que possuem número desemparelhado de elétrons exibem um momento magnético atômico, isto é, comportam-se como se cada átomo fosse um ímã. A maior parte dos elementos químicos é assim, mas esses "ímãs atômicos" pouco interagem entre si, resultando no fraco magnetismo dos materiais paramagnéticos (CREMONEZI *et al.*, 2009).

Em apenas três dos 100 elementos químicos da tabela periódica - ferro, cobalto e níquel - ocorre um fenômeno incomum, em que os momentos magnéticos atômicos espontaneamente se alinham paralelamente, gerando regiões magnetizadas no interior do material, chamadas de Domínios Magnéticos (CREMONEZI *et al.*, 2009).

Um material magnético desmagnetizado possui domínios magnéticos orientados em várias direções, fazendo com que a resultante magnética se anule, isto é, um material isotrópico. A magnetização do material ocorre quando, sob a ação de um campo externo, as direções de magnetização dos domínios tendem a se alinhar (CREMONEZI *et al.*, 2009).

O comportamento magnético dos materiais pode variar de acordo com sua estrutura e o seu arranjo eletrônico. Eles podem ser classificados pelas suas respostas em presença de campo magnético externo como diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos (CREMONEZI *et al.*, 2009).

Na sua grande maioria, os núcleos do estator e do rotor das máquinas elétricas são construídos 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 desses núcleos consiste, basicamente, em laminação, corte, em um tratamento para isolação, empacotamento e fixação. No caso das chapas de aço baixo carbono, o processo para isolação consiste num tratamento térmico, no qual os pacotes de chapas são colocados em fornos durante certo tempo, havendo, então, a oxidação da superfície das chapas e, em consequência, a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes (NASAR, 1987).

As chapas para construção de núcleo de motores elétricos são construídas a partir de 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. Nos motores, o conjugado eletromagnético (torque) desenvolvido é proporcional à densidade de fluxo magnético no entreferro. Portanto, se os núcleos do estator e do rotor são construídos com materiais com maior permeabilidade magnética, o motor poderá apresentar uma melhor desempenho. Entretanto, não basta ao material

magnético dos núcleos magnéticos possuem alta permeabilidade. Esse material deve possuir, também, elevada indução de saturação, possibilitando, então, que a máquina trabalhe com fluxo magnético elevado, sempre abaixo do ponto de saturação (NASAR,1987).

Sempre que há a incidência de um fluxo alternado sobre um núcleo magnético, haverá, também, correntes induzidas nesse núcleo. O estator e o rotor são construídos com chapas laminadas e isoladas entre si para haver a restrição das 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 se comparada a uma máquina com estator e rotores 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. Esse efeito de redução das correntes induzidas também pode ser obtido com um aumento da resistividade elétrica do material. Portanto, quanto maior a resistividade destes, menores serão as correntes induzidas e menores as perdas por correntes parasitas (NASAR, 1987).

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

- alta permeabilidade magnética relativa;
- baixa coercitividade magnética;
- alta resistividade ou resistência elétrica;
- alta indução de saturação.

A resposta magnética de um material é caracterizada pela relação entre comportamento do campo magnético induzido, causado por um campo magnético aplicado, normalmente gerado por uma bobina (VAN VLACK, 1970).

Utiliza-se aço baixo carbono nos núcleos de máquinas elétricas, pois é um material magnético macio, apresentando baixa coercitividade. A perda por histerese

(Figura 9) é proporcional à área do ciclo de histerese, que represente matematicamente uma densidade de energia. Portanto, quanto mais estreito o ciclo de histerese, menor a coercitividade, e menor a perda por ciclo de histerese (NASAR,1987).

Na Figura 9, pode-se observar que no eixo "x" tem-se a variação do campo magnético aplicado (H) no material até a sua saturação. No eixo 'y', observa-se a variação da magnetização (B).

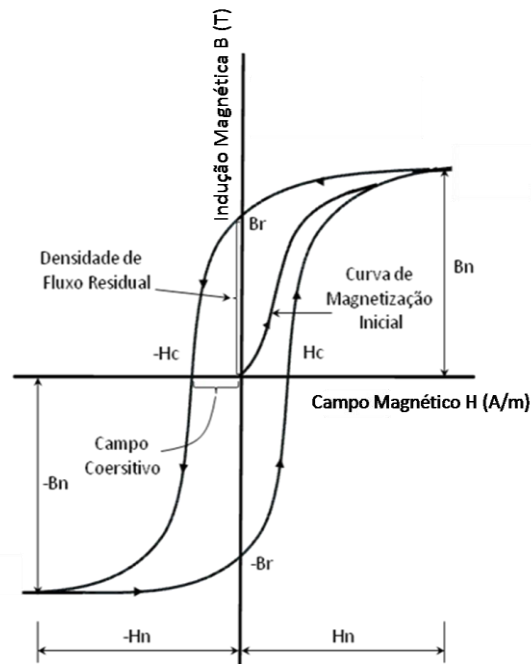


Figura 9 - Ciclo de histerese magnética (GUSSOW, 1986).

No primário, aplica-se uma corrente elétrica que, por sua vez, irá gerar um campo magnético. Esse campo magnético (campo aplicado no material) irá gerar uma indução magnética. Se o campo magnético for aumentado, ou diminuído, haverá variação da indução magnética. A variação da indução gerará uma diferença de potencial elétrico no lado secundário, proporcional à indução magnética (SMITH, 1998).

Ao diminuir o campo (H), a magnetização (B) não volta a zero; com isso, quando "H" chega a zero, ainda existe uma magnetização remanescente, que é chamada de remanência. Para que (B) chegue a zero, é necessário aplicar um campo negativo,

chamado de campo coercitivo. Se (H) continuar aumentando no sentido negativo, o material é magnetizado com polaridade oposta. Esse fenômeno, que causa o atraso entre magnetização e campo magnético, é chamado de histerese magnética, enquanto que o ciclo traçado pela curva de magnetização é chamado de ciclo de histerese (GUSSOW, 1986).

Quando o ferro não está magnetizado, seus domínios magnéticos são orientados de maneira aleatória, mas, na presença de campo magnético, os domínios se alinham na mesma direção do campo aplicado, demonstrado na Figura 10 (ROMANO; TODDAI, 1976).

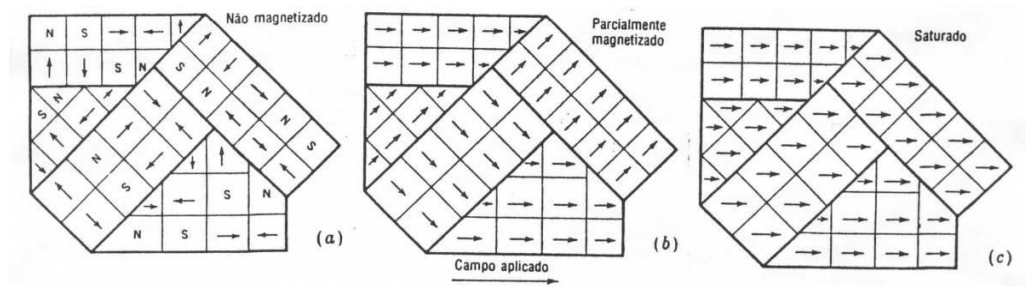


Figura 10 - Estágios de magnetização de uma amostra policristalina com o crescimento do campo (KRAUS; CARVER, 1978).

As perdas por histerese aumentam com a diminuição do tamanho de grão, presença de fases não magnéticas, densidade de discordâncias e orientação dos grãos. Normalmente, os problemas enfrentados pela metalurgia do pó com o aumento das perdas histeréticas estão relacionados com a permeabilidade e o campo coercivo. Já estes, estão relacionados com:

- **matéria-prima:** impurezas na mistura como, por exemplo, a presença de carbono.
- **compactação:** densidade baixa.
- **pré-sinterização:** ineficiência na remoção de lubrificante utilizado na compactação.
- **sinterização:** atmosfera do forno inadequada. Atmosfera com hidrogênio é uma das mais indicadas.

- **etapas secundárias:** calibragem e tratamento térmico (CREMONEZI *et al.*, 2009).

2.4. MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS SINTERIZADOS UTILIZADOS EM NÚCLEOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

Os materiais magnéticos macios (SMC) são utilizados em aplicações que necessitam magnetização e desmagnetização de forma fácil, como em núcleos de transformadores e núcleo de geradores ou motores. São caracterizados por apresentarem uma área pequena nos traçados dos ciclos de histerese, evidenciando, dessa forma, pouca perda de energia por correntes parasitas, dissipadas em forma de calor. As principais propriedades desses materiais são a elevada resistividade, alta permeabilidade magnética, elevada indução de saturação e baixa força coerciva (CALLISTER, 2006; SMITH, 1998).

Os metais possuem alta condutividade elétrica devido ao grande número de elétrons livres, no entanto, defeitos no reticulado cristalino com a adição de impurezas interferem no fluxo elétrico, causando um aumento na resistividade (CALLISTER, 2006). Dessa forma, a máxima resistividade em metais é alcançada em ligas compostas de dois ou mais metais em proporções próximas. Nessas condições há uma interpenetração das redes cristalina dos materiais presentes na liga (LUBORSKY; LIVINGSTON; CHIN, 1996).

Materiais magnéticos produzidos a partir de processos de Metalurgia do Pó podem apresentar propriedades superiores aos feixes de chapas convencionais que são produzidos com ligas de ferro-silício utilizados usualmente na construção de motores elétricos. Normalmente, essas máquinas operam em altas frequências e apresentam eficiência no processo de produção e reciclabilidade (MAEDA *et al.*, 2005).

Materiais sinterizados apresentam um acréscimo na resistividade em comparação a materiais maciços de mesma composição. Isso se deve à porosidade

proveniente do processo de fabricação. A resistividade ainda pode ser aumentada com a diminuição da pressão de compactação, pois a densidade da peça diminui e a porosidade aumenta. Outro fator relevante é que, quanto menor o tamanho das partículas de pó, maior a quantidade de contornos de grãos, que também provocam distúrbios na rede cristalina, conseqüentemente, há um incremento na dificuldade de fluxo de corrente elétrica. No entanto, com o aumento da granulometria, há um acréscimo da permeabilidade magnética e diminuição a coercividade (LALL, 1992; LANDGRAF; PLAUT, 1989). As perdas por histerese estão associadas à redução de obstáculos ao movimento da parede de domínio magnético, sendo influenciadas pelo distúrbio de arranjo atômico, especificamente fatores como pureza, contornos de grão dos cristais, contornos das partículas do grão e distorções (TANIGUCHI *et al.*, 2014).

Compósitos magnéticos macios (SMC's) abriram novas possibilidades para a concepção de máquinas CC e CA. Pouco esforço foi feito para melhorar o desempenho das máquinas de corrente alternada convencional, como as de ímã permanente do rotor. A combinação de núcleos laminados com SMC e núcleos somente de SMC pode ser uma alternativa viável para construção de máquinas elétricas (LIPO; MADANI; WHITE, 2005). Os motores elétricos podem ser produzidos a partir de pó de ferro puro, ou com elementos de ligas como silício, fósforo ou níquel, que alteram as propriedades magnéticas, aumentando a resistividade e, conseqüentemente, diminuindo as perdas por correntes parasitas (DIAS, 1999).

Os materiais como ferro puro, ferro-fósforo, ferro-silício e ferro-níquel, representados na Tabela 1, podem ser utilizados em aplicações em motores de correntes contínua e alternada. O estudo comparativo de motores usando estatores e rotores, com base em ambos os materiais laminados convencionais, e os pó de ferro isolados apresenta vantagens de redução das perdas por histerese em altas frequências e isotropia de propriedades magnéticas. No entanto, a aplicação desses materiais em motores elétricos requer a modificação de projetos existentes (BAS; CALERO; DOUGAN, 2003).

Tabela 1 - Propriedades típicas de materiais magnéticos macios sinterizados (GKN Sinter METALS, 2014).

Composição	Massa específica ρ_m (g/cm³)	Campo coercitivo Hc (A/m)	Indução de saturação Bmax (T)	Máxima permeabilidade μ_{max} (H/m)	Dureza (HB)	Tensão de escoamento σ_e (MPa)
Fe	7,1	140	1,44	3340	50	80
Fe	7,3	100	1,61	4250	60	100
Fe0,45P	7,1	110	1,45	4210	110	250
Fe0,45P	7,4	70	1,70	6410	125	270
Fe50Ni	7,8	16	1,30	19550	80	220
Fe3Si	7,2	75	1,60	4510	140	275

O ferro puro sinterizado apresenta 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 à sua baixa resistividade elétrica. O ferro puro sinterizado de alta densidade possui alta saturação magnética, alta permeabilidade e baixa coercitividade, propriedades essenciais para aplicações de corrente contínua. Os materiais e as condições de processamento necessitam de um rígido controle para a obtenção de ótimas propriedades; por exemplo, se tensões são introduzidas ou o nível de pureza diminui, todas as propriedades são afetadas (BAS; PUIG; MOLINS, 1988).

As ligas de ferro-fósforo sinterizadas com teores de fósforo entre 0,45 % a 0,80 % mantêm as vantagens econômicas em relação ao ferro puro, adicionando, ainda, características magnéticas superiores. Basicamente, a força coercitiva é reduzida, enquanto se mantém uma alta indução de saturação (BAS; PUIG; MOLINS, 1988). Essas ligas são utilizadas principalmente quando se deseja uma boa resposta magnética aliada a boas propriedades mecânicas (CHAURASIA *et al.*, 2009).

As ligas de ferro-silício possuem força coercitiva similar às ligas de ferro-fósforo, com uma indução máxima ligeiramente maior. Porém, sua resistividade elétrica é bastante superior, diminuindo, assim, as perdas por correntes parasitas. Essas ligas são aplicadas em circuitos que operam em frequências médias de até 1200 Hz. Induções máximas elevadas podem ser obtidas em peças de alta densidade, porém o

custo de produção aumenta devido à alta abrasividade e à, relativamente, baixa compressibilidade do material (LALL, 1992).

As ligas de ferro-níquel se distinguem das demais por apresentarem alta permeabilidade. Além disso, a indução máxima é baixa e a resistividade elétrica tem um valor intermediário se comparada às demais (BAS; PUIG; MOLINS, 1988). Essas propriedades tornam essas ligas atraentes em aplicações mais sofisticadas, que operam em altas frequências e com baixa excitação, nas quais se exige um tempo de resposta muito curto. Para a obtenção de alta massa específica ($7,5 \text{ g/cm}^3$), o pó é compactado a uma pressão de 690 MPa, e sinterizado em baixíssima pressão acima de 1200 °C. Com esse processo, uma permeabilidade relativa máxima de 40000 G e uma força coercitiva de 16 A/m podem ser obtidas, e são valores comparáveis aos das ligas de ferro-níquel maciças (LENEL, 1984). Embora a temperatura de sinterização tenha algum efeito nas propriedades magnéticas, a mesma não é tão pronunciada como no caso das ligas de ferro-fósforo ou de ferro-silício. O efeito mais significativo do aumento do teor de níquel é uma queda na remanência e um aumento na coercitividade. Apesar da liga Fe-50%Ni apresentar valores de coercitividade, indução residual e indução máxima menores se comparados aos da liga Fe-3%Si, ela é mais indicada para aplicações em corrente alternada de alto desempenho, especialmente se for considerado que a permeabilidade máxima desse material é aproximadamente quatro vezes a de Fe-3%Si, e quase seis vezes à do ferro puro (LALL, 1992).

Materiais sinterizados obtidos a partir de ligas de material magnético macio, com ferro e outros elementos, podem ser utilizados na construção de núcleos magnéticos, bem como na construção de núcleos de estatores e rotores de máquinas elétricas rotativas em blocos únicos, e deverão conferir a esses núcleos melhores características de desempenho (DIAS *et al.*, 2010). Quando material de SMC é aplicado corretamente em máquinas elétricas, tem-se considerável potencial benéfico (KIM, 2006).

A Tabela 2 mostra as propriedades magnéticas de materiais sinterizados produzidos por processos de M/P.

Tabela 2 - Materiais sinterizados produzidos por processos de M/P (CHAURASIA *et al.*, 2009).

Composição	Massa específica ρ_m (g/cm ³)	Indução de saturação B_{max} (T)	Custo relativo (Adimensional)	Campo coercitivo H_c (A/m)	Máxima Permeabilidade μ_{max} (H/m)	Resistividade ρ ($\mu\Omega m$)
Ferro puro	6,8 /7,20	1,0/1,3	1,0	120/200	1800/3500	0,10
Fe-P	6,7/7,4	1,0/1,4	1,2	100/160	2500/6000	0,30
Fe-Si	6,8	0,6/0,8	1,4	200/800	2000/5000	0,60
Fe50Ni	7,2/7,6	0,9/1,4	10,0	10/40	5000/15000	0,45

2.5. MATERIAIS MAGNÉTICOS DUROS

Os ímãs permanentes se enquadram em duas categorias: convencionais e de alta energia. Os ímãs convencionais possuem valores de $(BH)_{max}$ que variam, aproximadamente, entre 2 kJ/m³ e 80 kJ/m³ (0,25 MGOe e 10 MGOe). Esses materiais incluem os materiais ferromagnéticos (aço-ímã, ligas cunife, ligas de alnico e ferritas hexagonais BaSrO-6Fe₂O₃). Os de alta energia possuem seu produto superior a, aproximadamente, 80 kJ/m³ (10MGOe), sendo compostos intermetálicos desenvolvidos que possuem uma variedade de composições. A Tabela 3 mostra propriedades típicas de vários materiais magnéticos duros (CALLISTER, 2006).

Tabela 3 - Propriedades típicas para vários materiais magnéticos duros (CALLISTER, 2006).

Material	Composição	Remanência Br (T)	Campo coercitivo H_c (Oe)	Produto energético magnético máximo BH_{max} (MGOe)	Resistividade ρ (Ωm)
Aço tungstênio	92,8Fe, 6W, 0,5Cr, 0,7C	0,95	74	0,33	$3,0 \times 10^{-7}$
Cunife	20Fe, 20Ni, 60Cu	0,54	550	1,50	$1,8 \times 10^{-7}$
Alnico 8 sinterizado	34Fe, 7Al, 15Ni, 35Co, 4Cu, 5Ti	0,76	1550	4,50	—
Ferrita 3 sinterizada	BaO-6-Fe ₂ O ₃	0,32	3000	2,50	$\sim 10^{-4}$
Terra - rara de cobalto 1	SmCo5	0,92	9000	21,00	$5,0 \times 10^{-7}$
Neodímio - ferro - Boro Sinterizado	Nd ₂ Fe ₁₄ B	1,16	10600	32,00	$1,6 \times 10^{-7}$

Os materiais magnéticos duros ou permanentes são caracterizados por uma força coerciva e por uma indução remanescente elevada. Os anéis de histerese, portanto, são largos e altos. Uma vez magnetizados, são de difícil desmagnetização. A potência ou energia externa de um material magnético permanente está diretamente ligada ao seu anel de histerese (SMITH, 1988).

3. ANÁLISE EXPERIMENTAL - MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 11 representa o fluxograma utilizado na caracterização da matéria prima, na construção do mini-motor com núcleo do estator sinterizado em bloco único de Fe1%P e análise dos resultados.

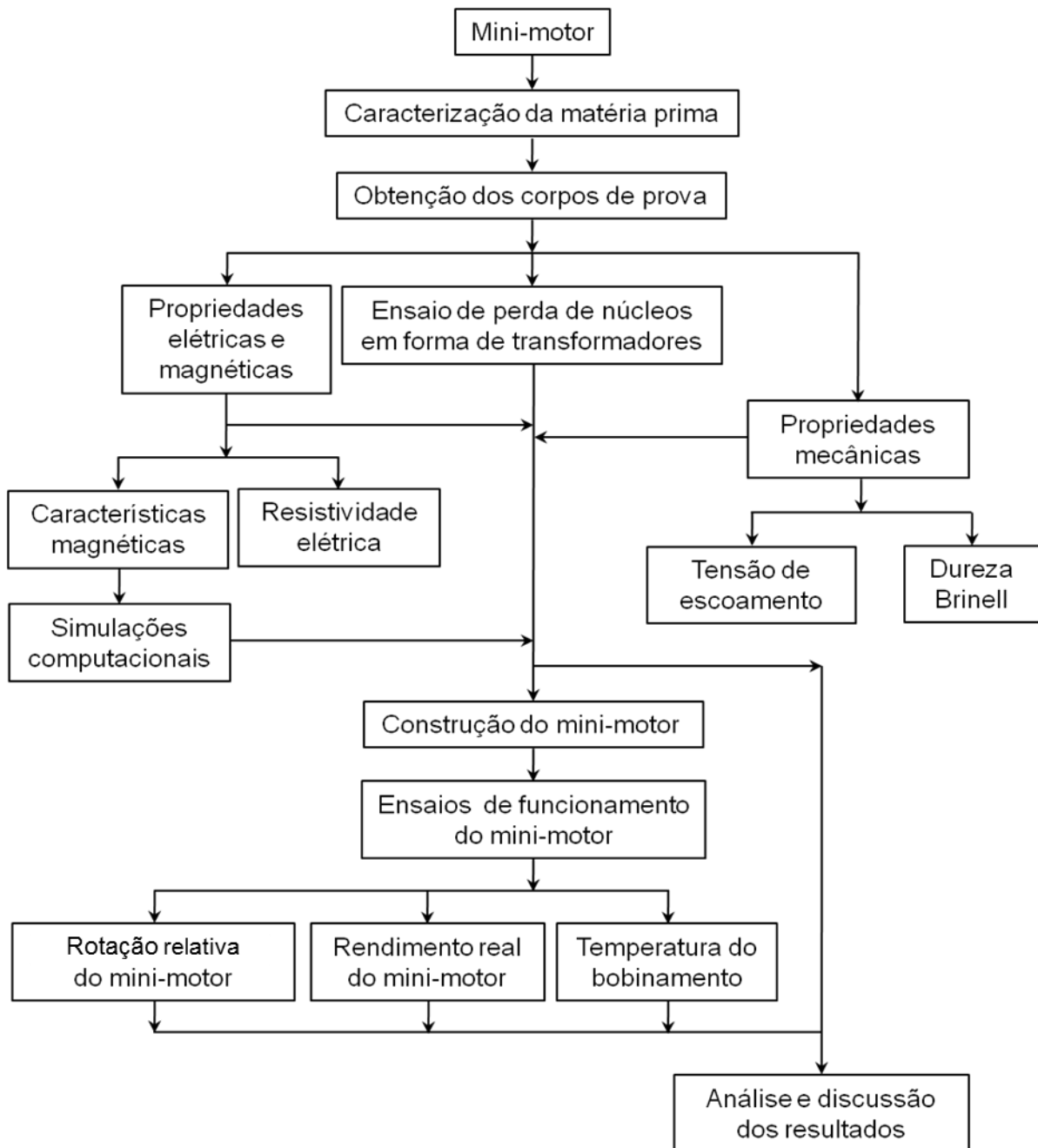


Figura 11 - Fluxograma do plano de trabalho.

3.1. CONDIÇÕES GERAIS PARA CONSTITUIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As ligas utilizadas na análise do material para construção do estator do mini-motor foram constituídas a partir de pó de ferro misturado com fósforo, silício e níquel, adquiridos da Höganäs Brasil Ltda. Conforme certificado 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 (84% de Fe, 16 % de P) apresenta 90 % de sua dimensão abaixo de 14,58 µm. O pó Fe₄₅Si (55 % de Fe e 45 % de Si) 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.

3.2. OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA COM AS LIGAS

A mistura é a primeira etapa da metalurgia do pó, tendo como objetivo assegurar a uniformidade das peças e produzi-las com uma boa dispersão dos constituintes, garantindo, dessa forma, a homogeneidade dos corpos de prova (GERMAN, 1984).

3.2.1. MISTURA DO PÓ DE FERRO COM ELEMENTOS DE LIGA

Na obtenção dos corpos de prova os pós foram pesados juntamente com um lubrificante sólido (estearato de zinco) na proporção de 1%. O pó de ferro puro (Fe) foi misturado com Fe₃P atingindo os percentuais de 1%P, 2%P, 3%P, com Fe₄₅Si até os percentuais de 1%Si, 3%Si e com pó de níquel até o percentual de 50%Ni, foram misturados individualmente no misturador duplo cone, com rotação de 60rpm, durante 20 minutos, para dispersão dos constituintes, no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

3.2.2. COMPACTAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA COM ELEMENTOS DE LIGA

As ligas já misturadas foram dispostas na cavidade das matrizes de acordo com o perfil do corpo de prova, e montadas individualmente na máquina universal de ensaios de marca KRATOS, com capacidade de 100 toneladas. A compactação ocorre por deslocamentos simultâneos dos punções superior e inferior, à temperatura

ambiente. Nos primeiros movimentos do punção, a compactação causa apenas o adensamento do pó, sem deformação das partículas e sem produzir adesão entre as mesmas. Com o aumento da pressão, ocorre deformação plástica das partículas, formando uma espécie de “solda fria”.

As matrizes utilizadas na compactação estão de acordo com o perfil desejado para cada ensaio, conforme segue:

- Para os corpos de prova cilíndricos (Figura 12), que foram utilizados para os ensaios mecânicos, foi empregada a matriz da Figura 13;

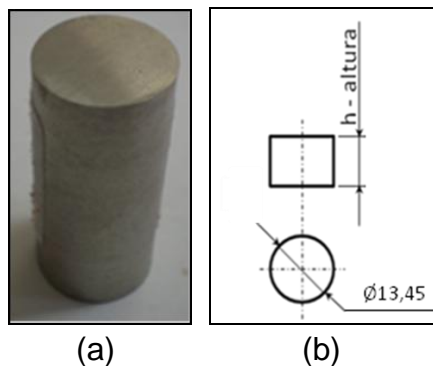


Figura 12 - (a) Cilindro, (b) Dimensões do cilindro (BITTENCOURT, 2012).

A altura varia de acordo com o volume de pó utilizado para compactação.

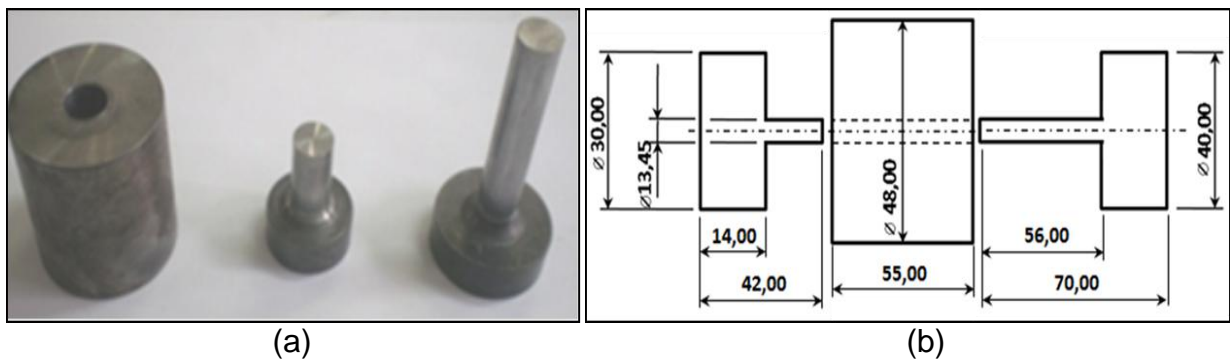


Figura 13 - (a) Matriz dos cilindros, (b) Dimensões da matriz dos cilindros, (BITTENCOURT, 2012).

- Para os corpos de prova em forma de anel de *Rowland* (Figura 14), que foram utilizados para caracterização das propriedades magnéticas, a matriz empregada foi a da Figura 15;

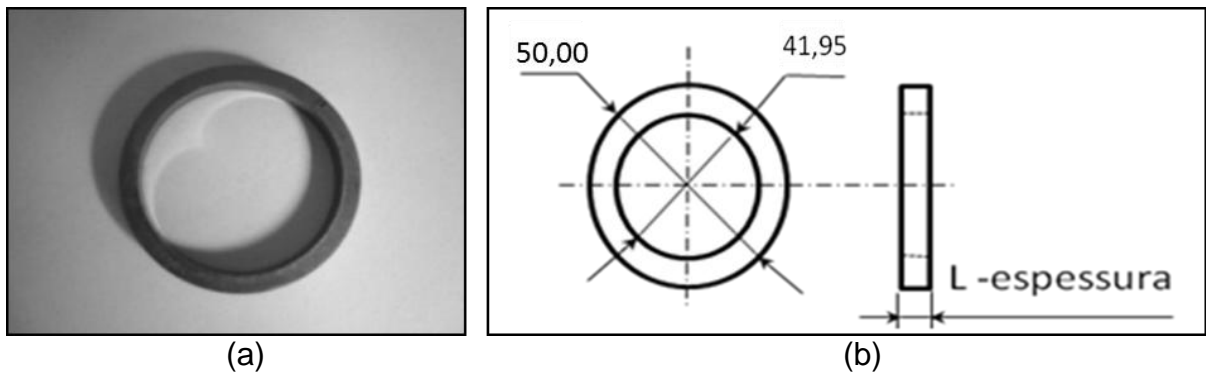


Figura 14 - (a) Anel de Rowland, (b) dimensões do anel de Rowland (BITTENCOURT, 2012).

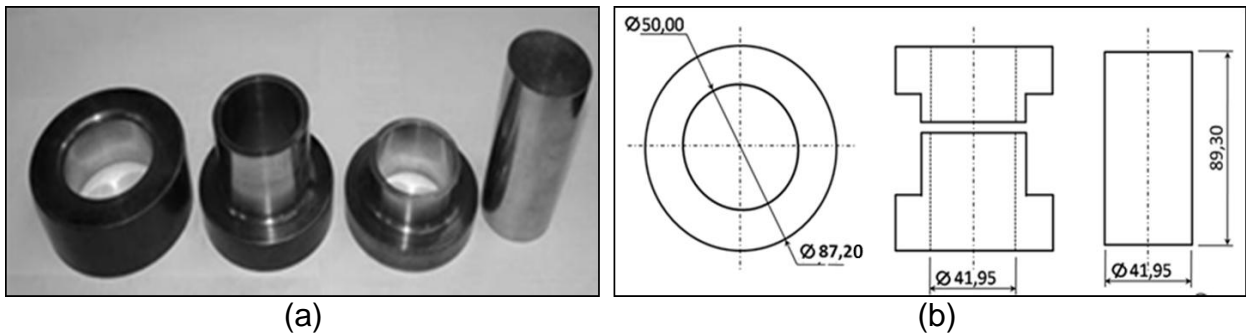


Figura 15 - (a) Matriz para o anel de Rowland, (b) dimensões da matriz para o anel de Rowland (BITTENCOURT, 2012).

- Para os ensaios de perdas em núcleos de transformadores que se constituem em duas partes - o núcleo tipo *E* (Figura 16), e o tipo *T* (Figura 17), foram empregadas as matrizes da Figura 18-a e da Figura 18-b, respectivamente.

Núcleo tipo *E*

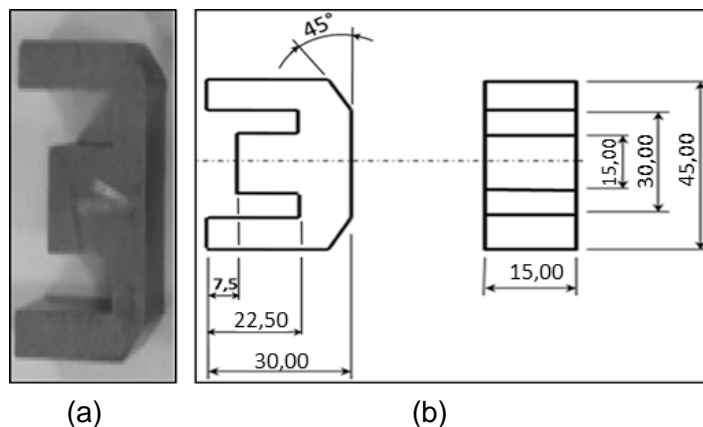


Figura 16 - (a) Núcleo tipo E, (b) dimensões do núcleo tipo E (BITTENCOURT, 2012).

Núcleo tipo *T*

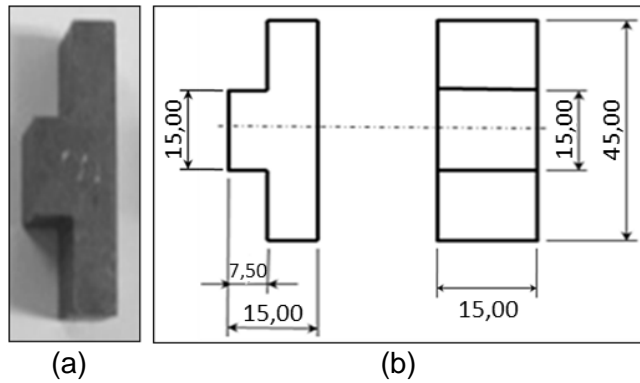


Figura 17 - (a) Núcleo tipo T, (b) dimensões do núcleo tipo T (BITTENCOURT, 2012).

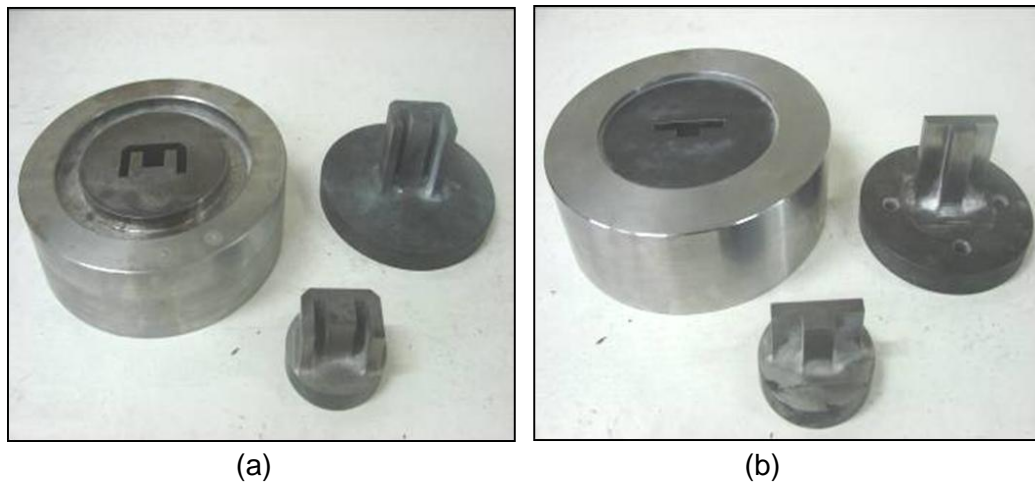


Figura 18 - (a) Matriz para o núcleo tipo E, (b) matriz para o núcleo tipo T (BITTENCOURT, 2012).

Após a compactação obtêm-se os corpos de prova verdes para serem submetidos ao processo de sinterização.

De acordo com German (1984), é necessária uma pressão de 600MPa para se obter uma densidade média do compactado. A Tabela 4 mostra a pressão utilizada, de acordo com a área da secção transversal dos corpos de prova.

Tabela 4 - Força de Compactação dos Corpos de Prova.

Corpo de prova	Área A (m ²)	Força F (N)
Cilindro	0,000142	86870
Anel de Rowland	0,000581	355670
Núcleo T	0,000458	280210
Núcleo E	0,000847	518220

3.2.3. SINTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA COM ELEMENTOS DE LIGA

A sinterização foi realizada de acordo com o perfil de temperatura da Figura 19, em forno tubular tipo mufla, com atmosfera inerte (pressão atmosférica) e gás verde (5% de hidrogênio e o restante de nitrogênio). Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 10 °C por minuto, até a temperatura de 550 °C, na qual as peças permaneceram por 30 minutos para retirada do lubrificante sólido (estearato de zinco). A seguir, a temperatura foi elevada para 1.150 °C, ocorrendo a sinterização, permanecendo nesta temperatura por 60 minutos. Após, as peças permaneceram no forno para resfriamento lento até a temperatura ambiente.

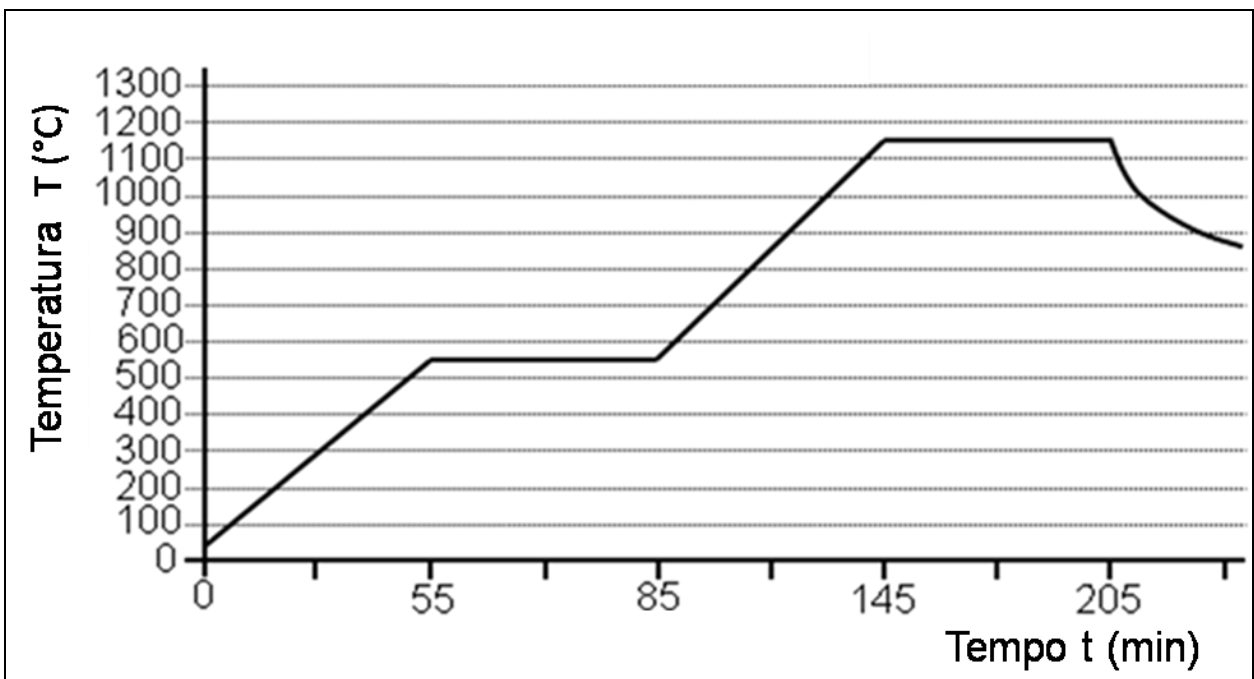


Figura 19 - Temperaturas de sinterização do compactado verde.

3.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS LIGAS SINTERIZADAS

Os corpos de prova, com os elementos de liga Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si, Fe50%Ni, após a compactação e a sinterização, foram submetidos a ensaios para verificação de sua resistência a tensões, pois, com o funcionamento do motor, o material sofre esforços mecânicos. As propriedades mecânicas analisadas foram a

dureza Brinell e ensaios de tensão de escoamento, nas quais foram utilizadas a média entre três medidas para cada material estudado.

Os ensaios de dureza 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 1838,75 N. Essa característica auxilia na análise da sua resistência, pois, durante a operação das máquinas elétricas, elas são submetidos a tensões mecânicas e magnéticas.

Para a realização dos ensaios de compressão, foi utilizada a máquina universal EMIC, com capacidade de 200 kN, localizada no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Universidade Luterana do Brasil (ULBRA), com velocidade de 2 mm/min. A Equação 2 mostra o cálculo da tensão de escoamento (σ_e).

$$\sigma_e = \frac{F}{A} \quad [\text{MPa}] \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo, σ_e é a tensão de escoamento, F é a força de compressão e A é a Área da superfície para compressão.

3.4. PROPRIEDADES ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS DAS LIGAS SINTERIZADAS

3.4.1. RESISTIVIDADE ELÉTRICA DAS LIGAS SINTERIZADAS

A resistividade elétrica foi calculada com a Equação 3, pela média da resistência elétrica medida em três corpos de prova em forma de Anel de Rowland, para cada material estudado, foi utilizado um artifício, cortando-se um segmento do mesmo, fazendo que este tenha a forma de uma barra curvada. O equipamento utilizado foi o multímetro APPA 305 e para dimensões um paquímetro digital Mitutoyo 150 mm.

$$\rho = R \times \frac{A}{l_b} \quad [\Omega.m] \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo, ρ é a resistividade elétrica, R é a resistência, l_b é o comprimento da barra e A é a área da seção transversal da barra.

3.4.2. CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS DAS LIGAS SINTERIZADAS

As análises das características magnéticas foram realizadas no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da UFRGS, LdTM, com o Traçador de Curvas de Histerese Magnética, modelo TLMP-TCH-14, de acordo com a norma ASTM A773 (*Standard Test Method for dc Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with dc Electronic Hysteresigraphs*).

Foi utilizada a média das curvas de histerese entre três corpos de provas, para cada material estudado. Os anéis de Rowland (Figura 20) foram revestidos com um filme plástico; em seguida, foi feita a bobinagem secundária, tendo um novo isolamento com filme plástico para que pudesse ser feita, finalmente, a bobinagem primária.



Figura 20 - Anel de Rowland (Toroidal) para ensaio das características magnéticas.

A densidade das espiras (De), do anel de Rowland é calculada pela Equação 4:

$$De = \frac{Np}{Lc} = \frac{Np}{\frac{\pi(d_{ext} + d_{int})}{2}} \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo, Np é o número de espiras no enrolamento primário, Lc , o comprimento do circuito magnético, d_{ext} , o diâmetro externo do anel, e d_{int} , o diâmetro interno do anel.

3.5. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS COMPARATIVAS EM PROGRAMA FEMM 4.2

O programa de elementos finitos também é uma ferramenta importante para a análise do comportamento eletromecânico de máquinas elétricas, pois possibilita a simulação de seu funcionamento, diminuindo, assim, a construção e testes de protótipos. A metodologia de elementos finitos tem como objetivo a solução de equações diferenciais para uma diversidade de entradas. A idéia principal é dividir o material em um grande número de regiões, cada uma com uma geometria simples (e.g. triângulo). Em cada elemento, a solução é aproximada através de uma interpolação dos valores de cada vértice do triângulo (BORDIGNON *et al.*, 2010).

As simulações das interações eletromagnéticas foram obtidas através do programa de elementos finitos FEMM 4.2 (Figura 21), no Laboratório de Fundição (LAFUN) da UFRGS. Foram inseridos os dados medidos nas curvas de histerese, possibilitando verificar o torque momentâneo e o fluxo concatenado das bobinas para cada material estudado.

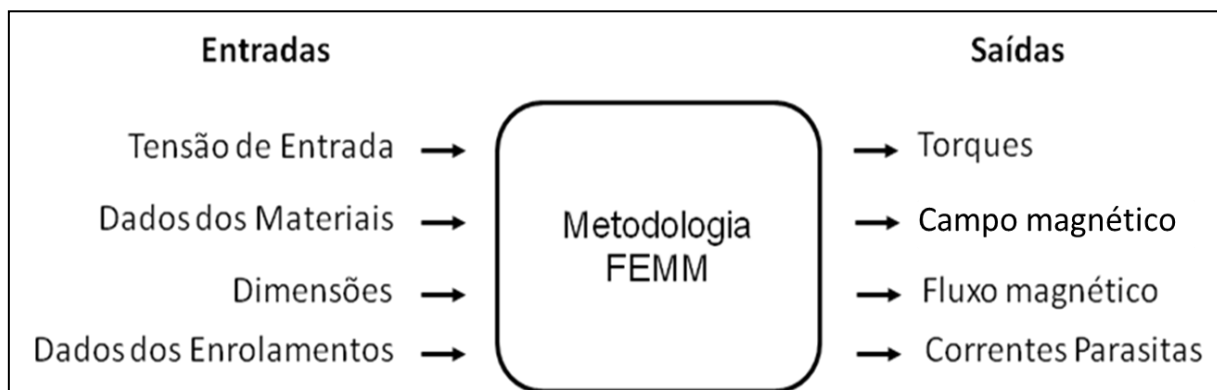


Figura 21 - Metodologia FEMM (BORDIGNON *et al.*, 2010).

A Figura 22 representa o mini-motor utilizado nos ensaios, e a Tabela 5, suas especificações as quais foram fornecidas pelo fabricante. Nas simulações, foram utilizadas as características magnéticas do núcleo de chapas e, também, das curvas de histerese traçadas a partir dos corpos de prova sinterizados de Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni.

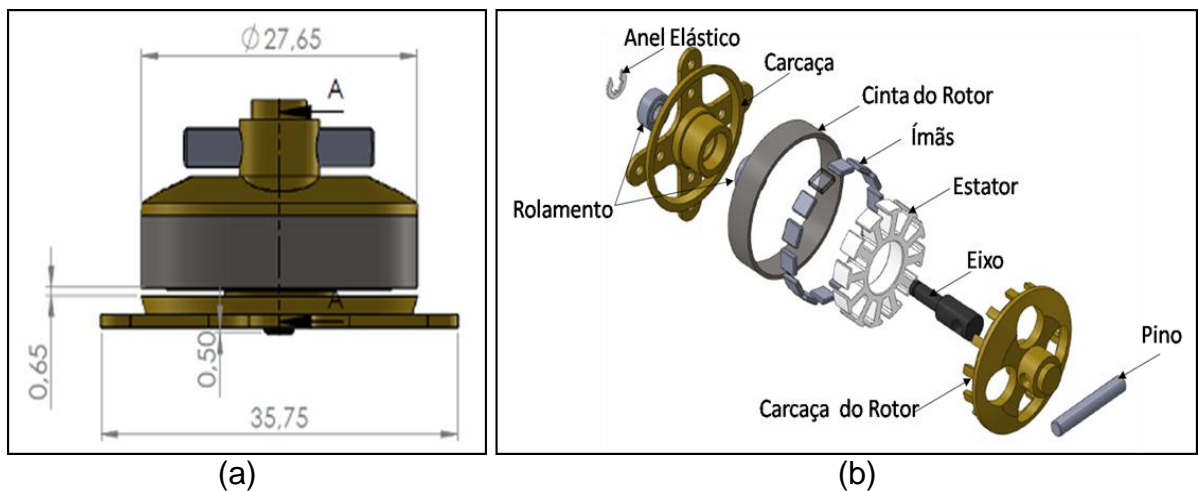


Figura 22 - (a) Mini-motor montado – (b) Vista explodida do mini-motor com os componentes.

As simulações computacionais foram feitas a partir do projeto do mini-motor existente no comércio utilizando-se dos dados fornecidos pelo fabricante (Tabela 5) e das dimensões do mini-motor representadas na Figura 22-a, com os parâmetros de bobinamento em série para motor de 12 polos, 13 espiras enroladas com fio 32 AWG, corrente de 3 A, tensão de 12 V, ligação em estrela e ímãs no rotor de NeFeB com 40MGOe.

Tabela 5 - Características do mini-motor comercial

Parâmetro	Característica	Unidade
Torque	0,0021	Nm
Polos	12	
Potência	90	W
Tensão	12	V
Corrente nominal	0,3	A
Corrente máxima	7,5	A
Espiras	13	
Diâmetro do rotor	22,5	mm
Comprimento	4	mm
Fio do estator (cobre)	TR32AWG	
Entreferro	0,2	mm
Ímãs de Ne-Fe-B	4x4x1,3	mm
Ligação	Estrela	
Chapas do estator (espessura)	0,4	mm
Rendimento	74	%

3.6. ENSAIO DE PERDAS DE NÚCLEOS EM FORMA DE TRANSFORMADORES

Os ensaios de perdas em núcleos na forma de transformadores foram realizados no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM) da UFRGS. Com os resultados obtidos nesses ensaios, é possível comparar as perdas por correntes parasitas entre as ligas estudadas e os atuais feixes de chapas e, também, de forma análoga, ao comportamento de uma máquina elétrica (BITTENCOURT *et al.*, 2010).

Esse ensaio utilizou um transformador (Figura 23), no qual foi aplicado uma tensão no lado de baixa (12V), deixando o lado de alta (127V,220V) em aberto. Com a utilização de um gerador de sinais e um amplificador, foi possível variar a tensão e a frequência no lado de alta, e, com um osciloscópio, foram medidas a tensão e a amplitude da corrente elétrica, bem como o ângulo de defasagem. Foram feitas as análises de rendimento do transformador convencional de feixe de chapas metálicas. Após, ele foi desmontado e substituído o núcleo pelos trafos sinterizados, tendo em vista que as dimensões dos núcleos são bem próximas às do transformador utilizado. O número de espiras nos enrolamentos primário e secundário foi o mesmo.

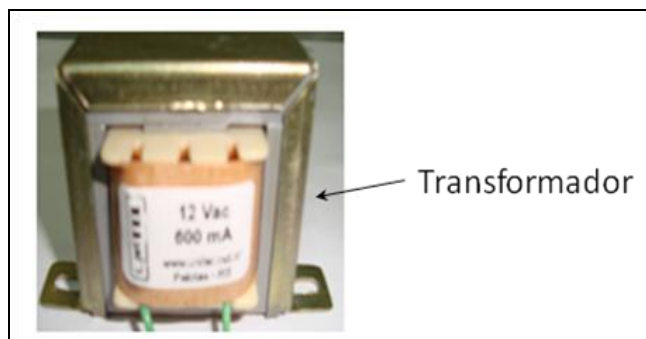


Figura 23 - Transformador 12V, 127V/220V utilizado nos ensaios de perdas em núcleos.

Somente são levadas em consideração as perdas no enrolamento primário (P_e), pois o enrolamento secundário fica em aberto, não havendo perdas; ao medir a resistência do fio do enrolamento primário, e reduzindo-se da perda total, tem-se a perda no núcleo (Equação 5), (BITTENCOURT *et al.*, 2010).

$$P_e = V_p \cdot I_p \cdot \cos\theta \quad [W] \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo, P_e é a potência do enrolamento primário, V_p é a tensão do enrolamento primário e I a corrente do enrolamento primário, e θ , o ângulo de defasagem. Para análise de perdas foi calculada a média de três resultados (BITTENCOURT *et al.*, 2010).

3.7. ENSAIOS DE FUNCIONAMENTO DO MINI-MOTOR

Os ensaios de funcionamento do mini-motor foram realizados no Laboratório de Eletrotécnica da Universidade FEEVALE, com a utilização dos seguintes equipamentos (Figura 24):

- fonte de marca Instrutherm e modelo DC Power Suply FA 1030;
- multímetro da marca Minipa ET-1002;
- tacômetro digital da marca Turnigy, referência 10783, com medição máxima de 99999rpm;
- gerador de potência da marca Turnigy CCPM *servo consistency máster*;
- controlador eletrônico de velocidade, de marca Turnigy Plush 10A de CC 5,6V a 16,8V;
- hélice de marca GWS, referência EP-3040;



Figura 24 - Bancada de teste para ensaios do mini-motor.

A corrente, medida com o multímetro, necessária para o funcionamento do mini-motor, foi fornecida pela fonte de 12V, acoplada ao controlador eletrônico de velocidade, e este, nas três fases do mini-motor. A corrente e a velocidade foram variadas através do gerador de potência. Para os ensaios, utilizou-se uma hélice instalada no motor e, com o incremento da rotação, medida com o tacômetro, ocorreu o aumento no empuxo, exigindo, dessa forma, maior esforço do motor. Para cada rotação do motor com estator em bloco único de Fe1%P ($R_{Fe1\%P}$) e a rotação do motor de chapas (R_{Chapas}) foi calculada a média de três resultados.

3.7.1. ROTAÇÃO RELATIVA DO MINI-MOTOR COM O ESTATOR EM BLOCO ÚNICO DE Fe1%P

A rotação relativa (R_r), do mini-motor com o estator em bloco único de Fe1%P é a relação percentual entre a rotação do mini-motor com o estator em bloco único de Fe1%P com a rotação do motor com o estator de chapas, calculada com a Equação 6.

$$R_r = (R_{Fe1\%P} / R_{Chapas}) \times 100 \quad [\%] \quad (\text{Equação 6})$$

3.7.2. RENDIMENTO DO MINI-MOTOR COM O ESTATOR EM BLOCO ÚNICO DE Fe1%P

O rendimento do mini-motor com o estator produzido em bloco único com Fe1%P foi obtido a partir da rotação relativa multiplicada pelo rendimento máximo do motor com o estator de chapas (74%) especificado pelo fabricante.

3.7.3. TEMPERATURA DO MINI-MOTOR

As temperaturas dos mini-motores foram calculadas a partir da média de três resultados para cada rotação correspondente. O equipamento utilizado foi o multímetro MINIPA ET-870C 2.0, utilizando um termopar de contato em uma das bobinas, durante a operação do mini-motor com o estator em bloco único com Fe1%P e, também, com

mini-motor com o estator de chapas, no intervalo de tempo de 60s para cada uma das amostragens. A temperatura T_o foi a máxima temperatura atingida durante seu funcionamento e a temperatura T_{rep} foi a máxima atingida depois de cessada sua rotação, ambas no intervalo de 60s.

3.7.4. FREQUÊNCIA DO MINI-MOTOR

A frequência (f) foi calculada a com a Equação 7, na qual ns é a rotação, e p , o número de polos (CATÁLOGOS WEG, 2003).

$$f = \frac{pns}{120} \quad [\text{Hz}] \quad (\text{equação 7})$$

3.8. CONSTRUÇÃO DO MINI-MOTOR COM O ESTATOR SINTERIZADO EM BLOCO ÚNICO DE FE1%P

Todas as ligas estudadas apresentaram propriedades magnéticas e mecânicas compatíveis para a construção de um motor elétrico, no entanto, os núcleos convencionais de chapas apresentam fluxo magnético em duas direções, pois as finas camadas laminadas isoladas entre si propiciam a este fenômeno. A fabricação de núcleo sinterizado de motores em blocos únicos possui fluxo magnético em três direções, podendo apresentar características de funcionamento diferentes (GUO *et al.*, 2006). Apesar de os resultados preliminares das ligas estudadas serem satisfatórios, somente com a construção da máquina serão obtidos os dados conclusivos de sua operabilidade.

O mini-motor foi projetado para trabalhar em CC e, de acordo com Lall (1992), a liga Fe-50%Ni é mais indicada para aplicações em corrente alternada de alto desempenho, pois as de FeSi aumentam muito o custo de produção devido à sua abrasividade e baixa compressibilidade.

A liga escolhida foi a de Fe1%P, por apresentar propriedades mecânicas que facilitam a usinagem. Tendo em vista que foram medidas as propriedades magnéticas nas curvas de histerese e perdas em núcleo em forma de transformadores, dos materiais sinterizados estudados, sendo possível a analogia de funcionamento do motor em comparações com os demais resultados obtidos.

3.8.1. MISTURA DOS PÓS PARA O ESTATOR DO MINI-MOTOR EM BLOCO ÚNICO DE FE1%P

O pó de ferro ASC100.29, foi diluído com pó de ferro puro até atingir 1% de fósforo, e após inserido em um misturador duplo cone, com rotação de 60rpm, durante 20 minutos, no Laboratório de Transformação Mecânica (LdTM), da UFRGS, mantendo as características similares a dos corpos de prova utilizados na caracterização dos materiais.

3.8.2. COMPACTAÇÃO DO PÓ DE FERRO COM 1% FÓSFORO

A Figura 25-a representa a matriz utilizada na compactação do estator e a Figura 25-b seu dimensionamento.

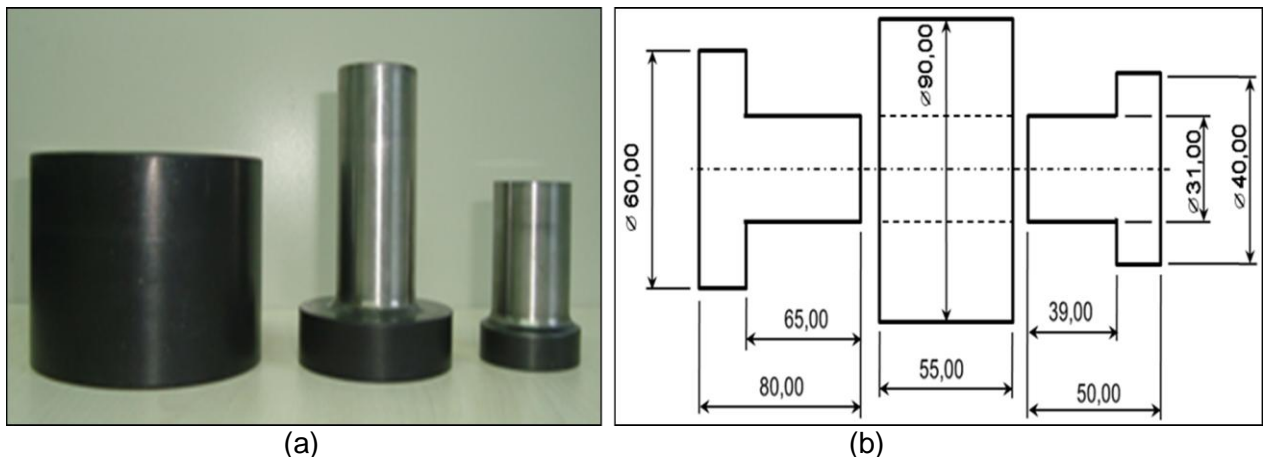


Figura 25 - (a) Matriz utilizada para compactação do cilindro para usinagem do estator do mini – motor (b) dimensões da matriz

O pó de Fe1%P, já homogeneizado no misturador duplo cone, foi disposto na cavidade da matriz (Figura 25) e, com a utilização da prensa hidráulica de capacidade 30 toneladas, da marca Bovenau, localizada no LdTM da UFRGS, foi compactado a uma pressão de 600MPa, obtendo-se uma massa específica similar à dos corpos de prova utilizados nos ensaios das propriedades magnéticas da Tabela 7 do capítulo 5.2 da página 65.

A Figura 26-a representa o cilindro produzido a partir de pó de ferro puro com 1% de fósforo e a Figura 26-b suas dimensões. O compactado verde foi submetido ao processo de sinterização em temperaturas controladas, em um forno, seguindo o mesmo procedimento representado na etapa de caracterização das ligas, representado na Figura 19 do capítulo 3.2.3 da página 48.

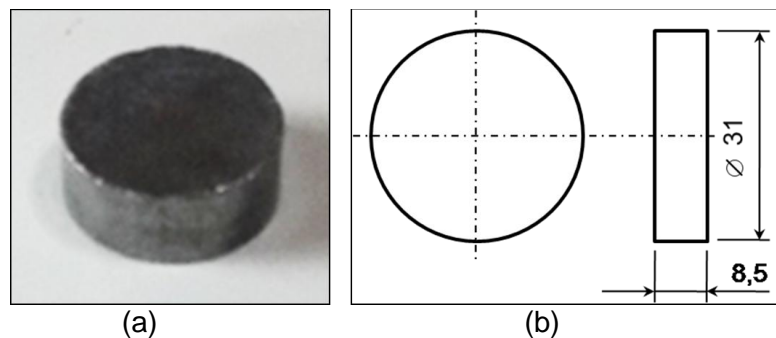


Figura 26 - (a) Cilindro compactado e sinterização com Fe1%P (b) dimensões do cilindro.

Salienta-se que é tradição em empresas que desenvolvem peças por M/P, a compactação e sinterização de tarugos e posterior usinagem para a forma final das peças em desenvolvimento. Após os testes, caso a peça apresente as propriedades desejadas e sendo viável comercialmente, parte-se então para o desenvolvimento das matrizes.

3.8.3. USINAGEM DO CILINDRO SINTERIZADO COM FE1%P PARA O ESTATOR DO MINI-MOTOR

A usinagem do estator do mini-motor foi feita no cilindro sinterizado (Figura 26-a), na empresa Delmaq - Máquinas e Equipamentos, com o equipamento de eletro-erosão Mitsubishi MV 1200s, conforme o dimensionamento da Figura 27.

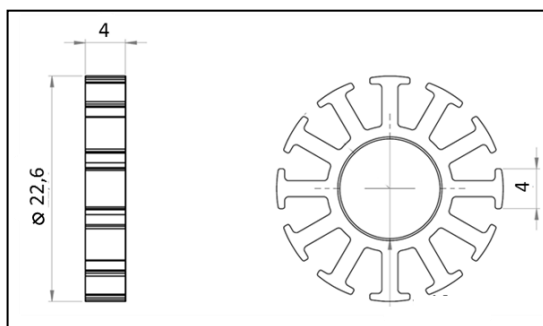


Figura 27 - Dimensões do estator do mini-motor.

A massa específica do estator produzido em bloco único com Fe1%P é de 6,6115 g/cm³

A Figura 28-a representa o estator de chapas, retirado do mini-motor convencional, a Figura 28-b o estator usinado em um bloco único, sinterizado e constituído com Fe1%P e a Figura 28-c o estator em bloco único de Fe1%P após a pintura, com tinta à base de resina epóxi éster e acrílica, na pigmentação branca, da marca Colorgin, para proteção contra a corrosão e para isolamento elétrico.

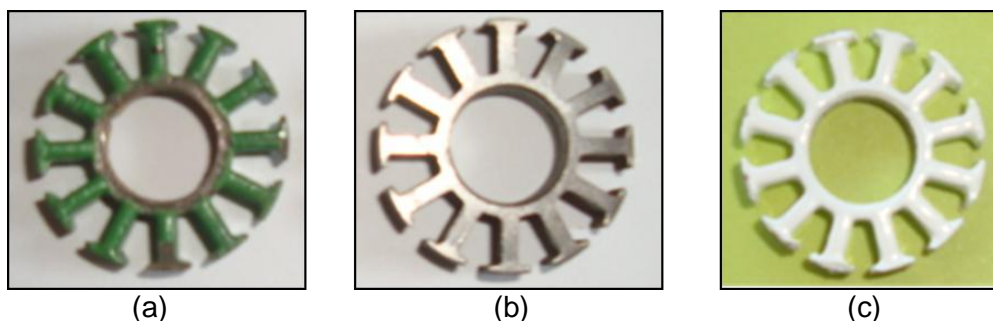


Figura 28 - (a) Estator de chapas - (b) Estator usinado em bloco único partindo de processos de Metalurgia do Pó de Fe1%P – (c) estator em bloco único de Fe1%P após a pintura .

3.8.4. BOBINAMENTO DO MINI-MOTOR COM O ESTATOR PRODUZIDO EM BLOCO ÚNICO DE Fe1%P

Para a bobinagem do mini-motor, foi utilizado o fio de cobre TR32AWG, sendo que, em cada bobina, foi efetuado o enrolamento com três fios e treze espiras, seguindo as características do motor convencional de chapas (Tabela 5 do capítulo 3.5 na página 52).

A Figura 29 representa o enrolamento da primeira fase, R-R1, que compreende as bobinas 1, 2, 7 e 8 do estator do mini-motor, sendo que a bobina 2 é enrolada no sentido horário, a bobina 1, no sentido anti-horário, a bobina 7, no sentido anti-horário e a bobina 8, no sentido horário.

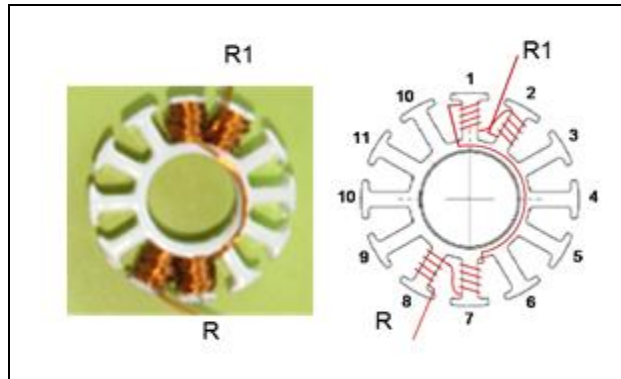


Figura 29 - Bobinagem da fase R-R1, do estator sinterizado em bloco único de Fe1%P do mini-motor.

A Figura 30 representa o enrolamento da segunda fase, S-S1, que compreende as bobinas 5, 6, 11 e 12 do estator do mini- motor onde a bobina 6 é enrolada no sentido horário, a bobina 5, no sentido anti-horário, a bobina 11, no sentido anti-horário, e a 12, no sentido horário.

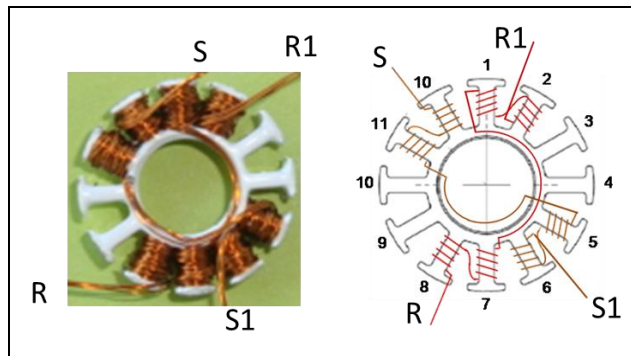


Figura 30 - Bobinagem da fase S-S1, do estator sinterizado em bloco único de Fe1%P do mini-motor.

A Figura 31 representa o enrolamento da terceira fase, T-T1, que compreende as bobinas 3, 4, 9 e 10 do estator do mini-motor, onde a bobina 10 é enrolada no sentido horário, a bobina 9, no sentido anti-horário, a bobina 3, no sentido anti-horário, e a 4 no sentido horário.

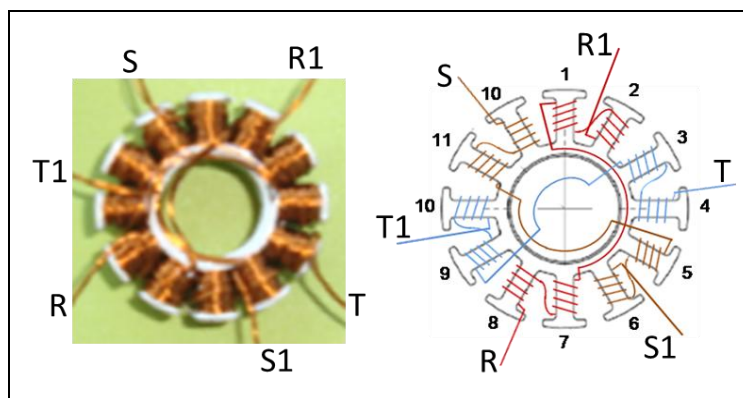


Figura 31 - Bobinagem fase T-T1, do estator sinterizado em bloco único de Fe1%P do mini-motor.

A Figura 32 representa a ligação em estrela entre as fases R, S e T, onde R1, S1 e T1 são conectados.

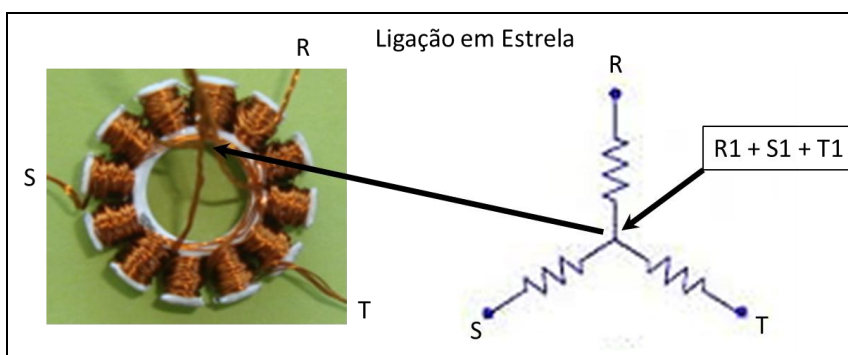


Figura 32 - Ligação em estrela das fases do estator sinterizado em bloco único de Fe1%P mini-motor.

A Figura 33 representa o estator do mini-motor instalado na carcaça.



Figura 33 - Estator sinterizado em bloco único de Fe1%P do mini-motor instalado na carcaça.

A Figura 34 representa o motor montado com estator de chapas convencional e o motor com estator sinterizado de Fe1%P.

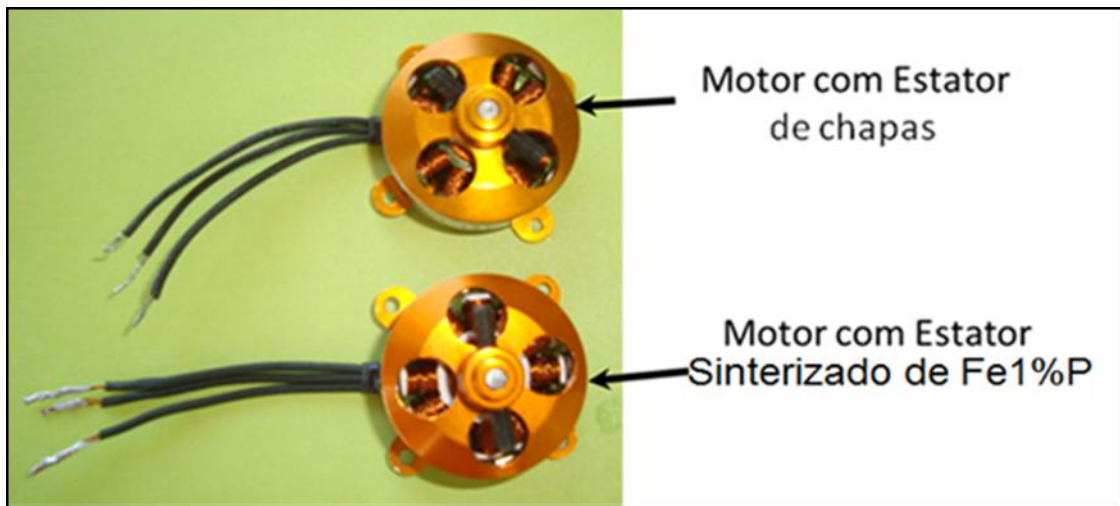


Figura 34 - Mini-motor com estator de chapas e o mini-motor com estator em bloco único de Fe1%P sinterizado.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS CORPOS DE PROVA

A Figura 35 representa os resultados de dureza Brinell obtidos a partir dos corpos de prova de Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni.

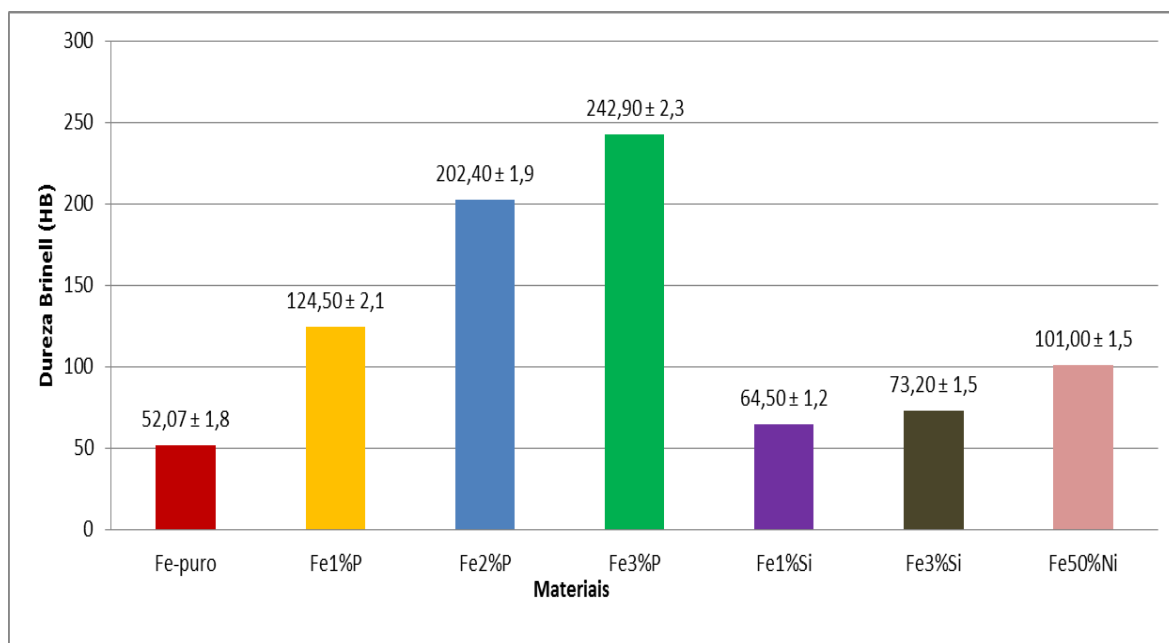


Figura 35 - Dureza *Brinell* (HB) de Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni (BITTENCOURT, 2012).

Os materiais estudados apresentaram boa resistência mecânica, pois, na construção de motores, eles devem suportar as tensões provenientes de seu funcionamento, bem como os esforços do campo magnético em seu núcleo. De acordo com Verna e Upadhyaya (2007), o fósforo aumenta a dureza e a resistência mecânica, podendo ser utilizadas temperaturas de sinterização menores.

Com a adição de fósforo, e os outros elementos de liga, houve um incremento nessa propriedade em comparação com as típicas propriedades de materiais magnéticos macios sinterizados da GKN SINTER METALS (2014) (Tabela1 da página 39). A dureza média obtida para a liga de Fe1%P foi de 124,5 HB (Figura 35). O aço AISI 1008 possui dureza de 86 HB (FLETCHER, 1995) é importante salientar que

materiais porosos, feitos por processos de metalurgia do pó, apresentando constituição similar a dos materiais maciços, não atingirão os mesmos níveis de dureza.

Os resultados das tensões de escoamento mostrados na Tabela 6 foram obtidos nos corpos de prova cilíndricos para cada liga estudada.

Tabela 6 - Tensão de escoamento de Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni (BITTENCOURT, 2012).

Material	Força F [N]	Tensão de escoamento σ_e [MPa]	Desvio Padrão
Ferro puro	19500	134	2,1
Fe1%P	20610	142	2,9
Fe2%P	19480	135	3,1
Fe3%P	16710	116	3,4
Fe1%Si	20800	144	2,2
Fe3%Si	22280	155	2,5
Fe50%Ni	22980	160	3,3

A tensão de escoamento do Fe1%P resultou em 142 MPa, considerando a média obtida de três ensaios em três corpos de prova diferentes. O aço SAE 1008 apresenta tensão de escoamento média de 170 MPa (FLETCHER, 1995). Portanto com relação às propriedades mecânicas, a liga Fe-1%P apresenta valores bem próximos ao aço SAE 1008. Das ligas estudadas, a que possui maior tensão de escoamento é a liga Fe50%Ni, no entanto, as demais, também, podem ser utilizadas na construção do mini-motor.

4.2. PROPRIEDADES FÍSICAS, ELÉTRICAS E MAGNÉTICAS CORPOS DE PROVA

A Tabela 7 mostra as propriedades físicas dos materiais, analisados nesta tese, que compreendem as grandezas magnéticas adquiridas a partir do traçado das curvas de histerese, a resistividade elétrica e a massa específica.

Tabela 7 - Propriedades físicas, elétricas e magnéticas de Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni (BITTENCOURT, 2012).

Material	Massa específica ρ_m (g/cm ³)	Indução de saturação B _{max} (T)	Perda por Histerese P_h (W/kg)	Permeabilidade relativa μ_r	Resistividade ρ (Ω .m)
Fe puro	6,632 ± 0,03	1,19 ± 0,03	1,60 x10 ⁻² ± 0,2 x10 ⁻²	1852,6 ± 59,5	1,57 x10 ⁻⁷ ± 1,7 x10 ⁻⁹
Fe1%P	6,712 ± 0,02	1,25 ± 0,02	8,46 x10 ⁻³ ± 0,1 x10 ⁻³	2766,1 ± 77,2	1,97 x10 ⁻⁷ ± 3,5 x10 ⁻⁹
Fe2%P	6,874 ± 0,03	1,36 ± 0,04	7,69 x10 ⁻³ ± 0,5 x10 ⁻³	4198,7 ± 31,8	3,58 x10 ⁻⁷ ± 4,3 x10 ⁻⁸
Fe3%P	7,003 ± 0,04	0,98 ± 0,04	5,88 x10 ⁻³ ± 0,3 x10 ⁻³	919,4 ± 79,4	4,21 x10 ⁻⁷ ± 1,1 x10 ⁻⁸
Fe1%Si	6,697 ± 0,05	1,03 ± 0,04	7,46 x10 ⁻³ ± 0,8 x10 ⁻³	1959,8 ± 37,9	2,76 x10 ⁻⁷ ± 2,4 x10 ⁻⁸
Fe3%Si	6,732 ± 0,02	0,85 ± 0,02	5,99 x10 ⁻³ ± 0,2 x10 ⁻³	1258,7 ± 35,4	4,44 x10 ⁻⁷ ± 2,6 x10 ⁻⁸
Fe50%Ni	7,251 ± 0,03	0,93 ± 0,01	3,45 x10 ⁻³ ± 0,5 x10 ⁻⁵	945,6 ± 2,2	3,71 x10 ⁻⁷ ± 6,0 x10 ⁻⁹

Estudos preliminares constataram que as ligas Fe-50%Ni, obtidas a partir da simples mistura de pós elementares de Fe e Ni, não resultaram valores próximos daqueles citados na literatura (SENS, 2001). Dados experimentais realizados no LdTM da UFRGS com pré-ligados por mecâno-síntese como Fe-Si e Fe-P resultaram melhores propriedades magnéticas destas ligas, aproximando-se dos dados bibliográficos (GERMAN,1984), o que não ocorre em ligas obtidas pela simples mistura dos pós constituintes. Tal fato ocorre uma vez que, em pós de ligas a partir da mistura simples como o Fe1%P, na sinterização, não acontece uma completa interdifusão dos elementos de ligas, resultando então em regiões do material com aglomerados heterogêneos de ferro e ferro-fósforo (GERMAN,1984). Assim, a liga se forma somente nos limites das partículas dos pós constituintes.

De acordo com Dias (1999), ferro puro, ou com elementos de ligas como silício, fósforo ou níquel, aumenta a resistividade e, conseqüentemente, diminui as perdas por correntes parasitas. Isso pode ser observado na Tabela 7, com o incremento de fósforo de 1%, 2% e 3%, com silício de 1% para 3% e de níquel 50%.

Com a adição de elementos de impurezas, houve incremento da resistividade e, com isso, diminuição das perdas por correntes parasitas. Para Taniguchi *et al.* (2014),

as perdas por histerese estão associadas à redução de obstáculos ao movimento da parede de domínio magnético e estes estão relacionados ao distúrbio de arranjo do reticulado atômico, especificamente fatores como pureza, contornos de grão dos cristais, densidade, contornos das partículas do grão e distorções. As ligas apresentaram boas propriedades magnéticas em comparação ao ferro puro, tais como alta permeabilidade magnética relativa e alta indução de saturação, fatores esses determinantes para um bom desempenho das máquinas elétricas.

As ligas de ferro-fósforo sinterizadas com teores entre 1% e 2% de fósforo apresentaram indução de saturação mais elevadas sendo que, com 3%, houve redução, seguindo a mesma tendência dos ensaios realizados por Bas, Puig e Molins (1988), com percentuais de fósforo entre 0,45% e 0,8%, e Chaurasia *et al.* (2009), com fósforo entre 0,3% e 0,8%. As ligas de ferro-silício possuem indução máxima ligeiramente maior que Fe3%P e sua resistividade elétrica e perdas por correntes parasitas em comparação aos mesmos percentuais de fósforo é semelhante (LALL, 1992).

De acordo com Lall (1992), com o aumento do teor de níquel, há um aumento na permeabilidade máxima é em torno de quatro vezes maior de Fe3%Si. Entretanto, os resultados obtidos demonstraram uma permeabilidade máxima inferior, em comparação com as demais ligas estudadas, isso se deve provavelmente pela obtenção das ligas pela mistura dos pós elementares e também pela massa específica dos corpos de prova.

Materiais sinterizados apresentam um acréscimo na resistividade em comparação a materiais maciços de mesma composição. Isso se deve à porosidade proveniente do processo de fabricação. A resistividade ainda pode ser aumentada com a diminuição da pressão de compactação, pois a densidade da peça diminui e a porosidade aumenta (LANDGRAF; PLAUT, 1989).

4.3. RESULTADO DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DO MINI-MOTOR

A Figura 36 apresenta os dados da densidade de fluxo magnético simulada computacionalmente no programa FEMM 4.2, no qual foram utilizadas as curvas de magnetização obtidas a partir dos ensaios das propriedades magnéticas para cada um dos materiais de Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni.

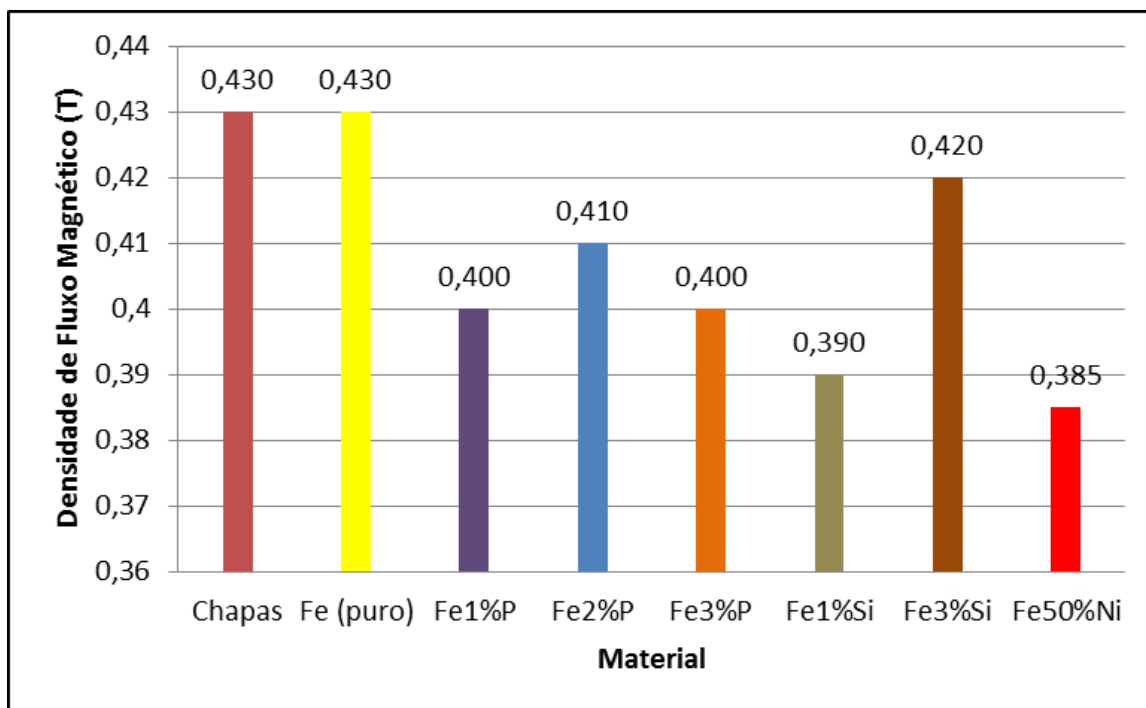


Figura 36 - Densidade de fluxo magnético obtida na simulação computacional do núcleo de chapas, Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni.

A partir dos resultados observados, é possível verificar que o ferro puro sinterizado possui densidade de fluxo magnético igual à de chapas. De acordo com Nasar (1987), nos motores, o conjugado eletromagnético (torque) desenvolvido é proporcional à densidade de fluxo magnético no entreferro. Portanto, se os núcleos do estator e do rotor são construídos com materiais com maior permeabilidade magnética, o motor poderá apresentar uma melhor desempenho.

A Figura 37 mostra os torques simulados no programa FEMM 4.2 para os materiais de Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni.

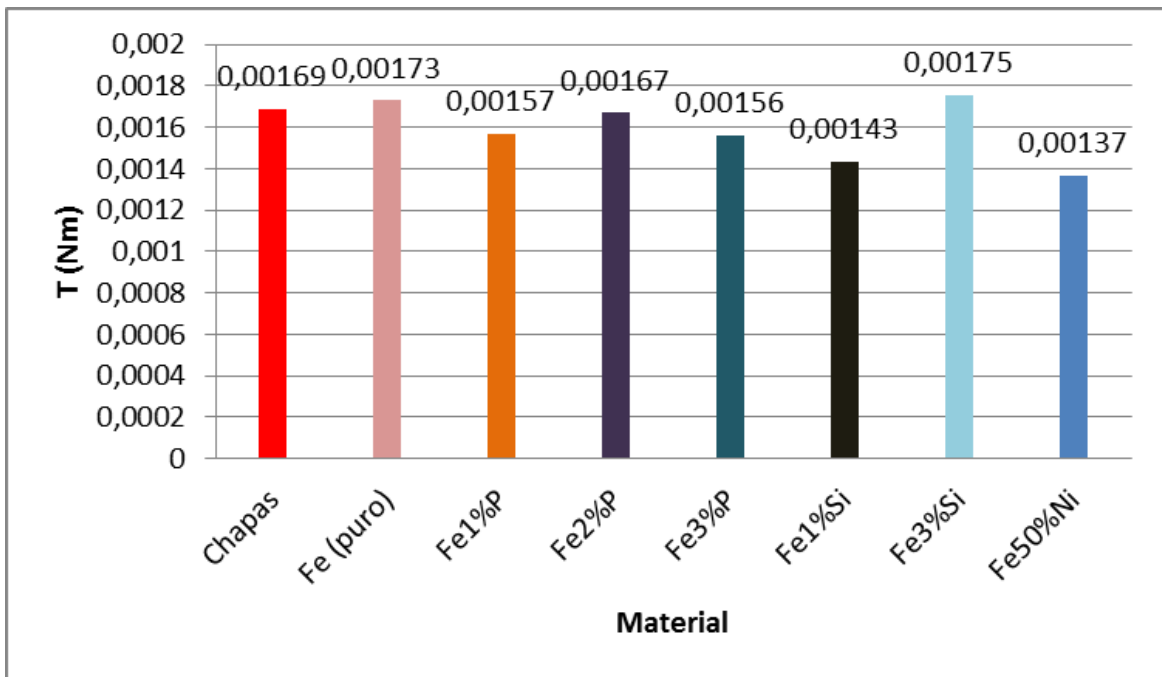


Figura 37 - Torque obtido na simulação computacional do núcleo de chapas, Fe (puro), Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si e Fe50%Ni.

Nas simulações comparativas, observa-se que os torques simulados no programa FEMM 4.2 possuem valores próximos aos de projeto do mini-motor (Tabela 5 do capítulo 3.5 na página 52). O Fe3%Si apresentou maior torque, seguido de Fe puro e FeP. Todavia o Fe puro obteve melhor densidade de fluxo magnético.

4.4. RESULTADOS DOS ENSAIO DE PERDAS DE NÚCLEOS EM FORMA DE TRANSFORMADORES

A Figura 38 mostra as perdas magnéticas em Watt / kg para frequências de 60 Hz a 1 kHz para núcleos na forma de transformadores com chapas e para núcleos dos materiais sinterizados. Pode-se observar que, enquanto as perdas magnéticas no núcleo de chapas permanecem praticamente constantes, as perdas nos núcleos sinterizados decaem exponencialmente até 400 Hz, permanecendo praticamente constante a partir desta frequência. Tal característica permite a utilização destes materiais sinterizados em máquinas com corrente elétrica de elevada frequência, indo ao encontro de dados da literatura (BAS; PUIG; MOLINS, 1988).

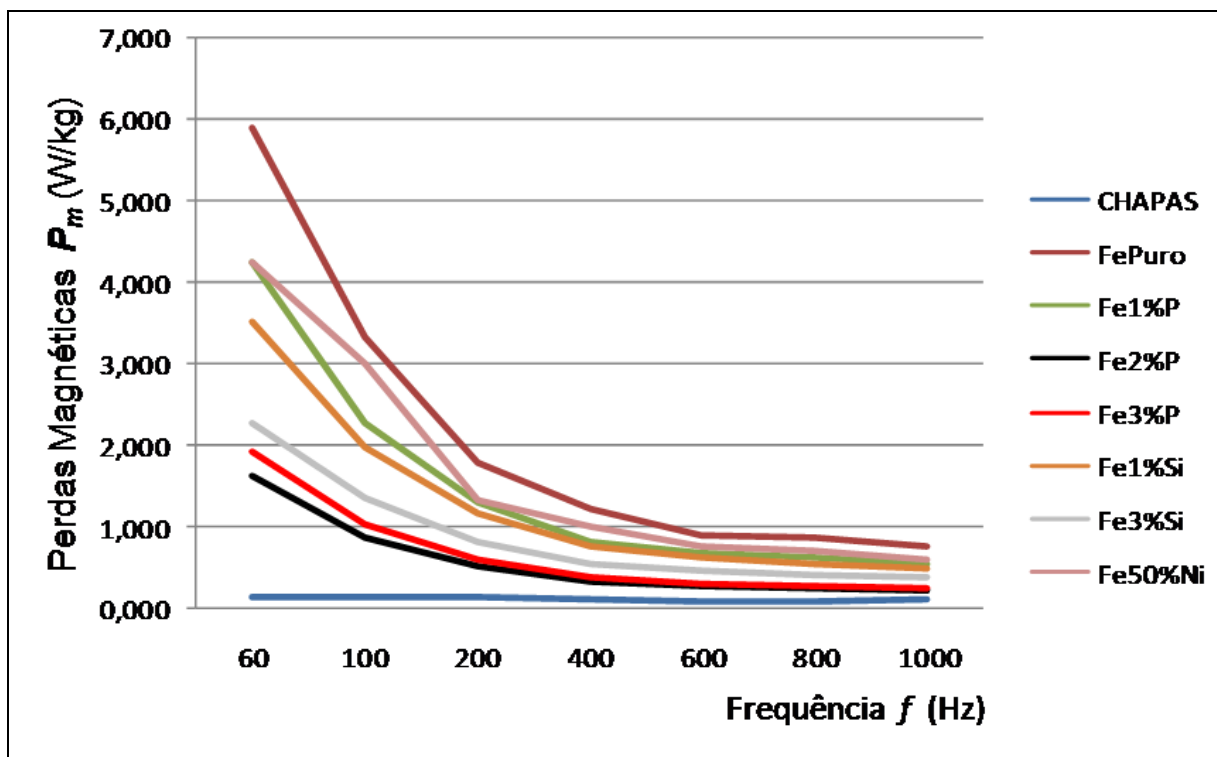


Figura 38 - Perdas em transformadores com o núcleo de chapas, Fe puro, Fe1%P, Fe2%P, Fe3%P, Fe1%Si, Fe3%Si, Fe50%Ni (BITTENCOURT, 2012).

De acordo com Lall (1992), as ligas de ferro-silício são aplicadas em circuitos que operam em frequências médias de até 1200Hz. Observa-se que todas as ligas estudadas, submetidas a frequências superiores a 400Hz, possuem comportamento, em relação a perdas magnéticas, próximo ao núcleo de chapas.

Na avaliação das perdas (Figura 38), 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. Porém, 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 (NASAR, 1987; FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2003).

4.5. RESULTADOS DOS ENSAIOS DO MINI-MOTOR

4.5.1. ROTAÇÃO DO MINI-MOTOR COM O ESTATOR EM BLOCO ÚNICO DE Fe1%P E COM O ESTATOR DE CHAPAS

A Tabela 8 mostra os resultados de rotação do mini-motor com o estator em bloco único de Fe1%P e os resultados de rotação do mini-motor com o estator de chapas, ambos obtidos a partir dos ensaios com correntes variadas.

Tabela 8 - Rotação do mini-motor com o estator em bloco único de Fe1%P e rotação do motor convencional de chapas.

	Motor com Estator de Fe1%P	Motor com estator de Chapas
Corrente I (A)	Rotação $R_{Fe1\%P}$ (rpm)	Rotação R_{Chapas} (rpm)
0,34	-	2820 ± 20
0,36	1290 ± 30	-
0,61	1830 ± 29	3640 ± 19
0,82	2340 ± 32	4210 ± 22
1,09	2820 ± 35	4790 ± 25
1,49	3250 ± 27	5430 ± 23
1,72	3570 ± 35	5760 ± 24
2,13	-	6100 ± 23
2,15	3870 ± 30	-
2,80	4460 ± 29	6590 ± 21
3,13	4730 ± 26	6920 ± 22
3,55	4970 ± 25	7090 ± 18
4,24	5340 ± 28	7380 ± 23
4,49	5540 ± 29	7630 ± 25
5,00	5720 ± 24	7870 ± 21

Na Tabela 8, observa-se que para uma mesma corrente (I), a rotação do mini-motor com estator de chapas é maior, ou seja, há um menor consumo energético, o qual já havia sido evidenciado nas perdas de núcleos em forma de transformadores (Figura 38 da página 69). A liga de Fe1%P, nas simulações computacionais, apresentou torque e fluxo magnético inferiores a Fe2%P e Fe3%Si, portanto essas ligas apresentariam resultados melhores de rendimento.

Analisando-se a Figura 38 da página 69 e a relacionando com a Tabela 8, é possível observar que, apesar de as perdas magnéticas em frequências acima de 400 Hz se aproximarem das de núcleo de chapas, a rotação do mini-motor com o estator em bloco único com Fe1%P não atinge a do motor com o estator de chapas (Tabela 8). Esse fato proporciona o entendimento de que, durante a operação do mini-motor com o estator de Fe1%P, mesmo em frequências elevadas, ocorrem perdas significativas por correntes parasitas.

4.5.2. ROTAÇÃO RELATIVA DO MINI-MOTOR COM O ESTATOR EM BLOCO ÚNICO DE Fe1%P

A Figura 39 mostra a rotação relativa (R_r), do mini-motor com o estator de Fe1%P em comparação ao mini-motor com estator de chapas.

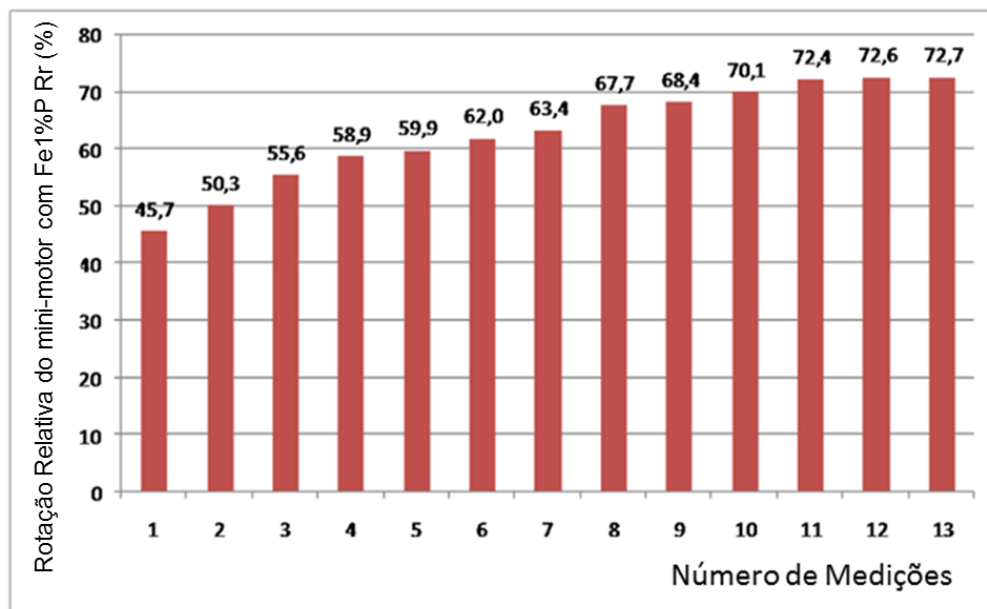


Figura 39 - Rendimento relativo do mini-motor com o estator em bloco único de Fe1%P em relação ao mini-motor com o estator de chapas.

Apesar do aumento na resistividade dos materiais sinterizados, era esperado um rendimento menor do mini-motor com o estator sinterizado em bloco único de Fe1%P em relação ao mini-motor com o estator de chapas, pois já haviam sido observadas as perdas nos ensaios em transformadores na Figura 38 da página 69. Núcleos de pó

magnéticos podem ser usados em motores, no entanto, o fluxo magnético e a sua resistência são inferiores aos de aço laminado (TAJIMA *et al.*, 2004).

4.5.3. RENDIMENTO REAL DO MINI-MOTOR COM ESTATOR EM BLOCO ÚNICO DE Fe1%P

A Figura 40 mostra o rendimento real do mini-motor com o estator de Fe1%P.

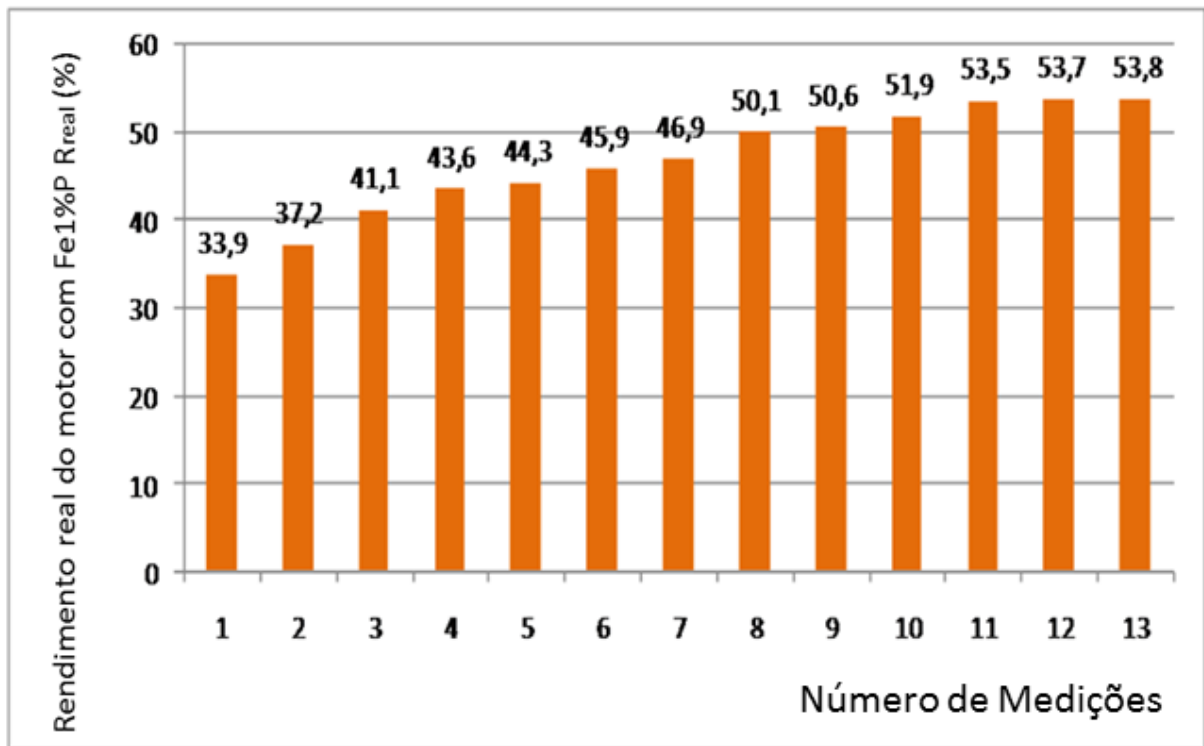


Figura 40 - Rendimento do mini-motor com o estator em bloco único de Fe1%P.

Para Ferreira (2011), o baixo rendimento nos núcleos obtidos por metalurgia do pó é observado em baixas frequências. Os materiais compostos magnéticos macios (SMC) devem ser usados em frequências de operação superiores a 1.500 Hz (HUANG *et al.*, 2007), são amplamente utilizado em aplicações CA e CC. Núcleo de SMC curado em 800°C demonstrou melhores propriedades elétricas para frequência de funcionamento até 12.000 kHz, enquanto propriedades magnéticas eram limitadas ao campo magnético aplicado de 800 A/m (DHOKEY *et al.*, 2014). Para Stefan (2013), as frequências de operação podem variar de 500 Hz até 30 kHz.

4.5.4. TEMPERATURAS DE OPERAÇÃO DO MINI-MOTOR COM O ESTATOR EM BLOCO ÚNICO DE Fe1%P E COM O ESTATOR DE CHAPAS

A Tabela 9 mostra as temperaturas de operação do mini-motor com o estator em bloco único de Fe1%P, com o aumento da rotação e frequência.

Tabela 9 - Temperaturas de operação do mini- motor com o estator de Fe1%P.

Mini-motor com estator de Fe1%P				
Corrente I (A)	Rotação R _{Fe1%P} (rpm)	Frequência f (Hz)	Temperatura T _o (°C)	Temperatura T _{rep} (°C)
0,5	1680 ± 30	168	35 ± 1,2	38 ± 1,5
1,0	2730 ± 32	273	40 ± 1,8	47 ± 1,3
1,6	3520 ± 29	352	48 ± 1,7	60 ± 1,7
2,0	3830 ± 35	383	52 ± 1,4	67 ± 1,6
2,5	4310 ± 28	431	55 ± 2,2	79 ± 1,4
3,5	4910 ± 34	491	60 ± 1,8	88 ± 1,5
4,0	5150 ± 32	515	65 ± 1,6	99 ± 1,9

Durante a operação do mini-motor com estator em bloco único de Fe1%P, houve aumento na temperatura, mesmo em frequências acima de 400Hz. Nos ensaios de perdas em núcleos de transformadores (Figura 38 da página 69), os compósitos apresentaram maiores perdas magnéticas em relação ao núcleo de chapas. No entanto, em frequências mais elevadas, elas decresceram exponencialmente, tornando-se praticamente desprezíveis, mas, durante a operação do mini-motor com estator de Fe1%P, houve aumento na temperatura do estator, evidenciando perdas por correntes parasitas, explicando, dessa forma, seu rendimento real inferior ao mini-motor com o estator de chapas (Figura 40).

A Tabela 10 mostra as temperaturas do mini-motor com o estator de chapas com a variação da rotação e frequência, na qual pode ser observado apenas um pequeno incremento nesta variável, evidenciando, dessa forma, poucas perdas por correntes parasitas.

Tabela 10 - Temperaturas de operação do mini-motor com o estator de chapa.

Mini-motor com estator de Chapas				
Corrente I (A)	Rotação R _{chapas} (rpm)	Frequência f (Hz)	Temperatura T _o (°C)	Temperatura T _{rep} (°C)
0,5	3390 ± 23	339	22 ± 1,1	23 ± 0,8
1,0	4700 ± 25	470	24 ± 1,4	25 ± 0,9
1,6	5500 ± 27	550	26 ± 0,9	27 ± 1,1
2,0	6010 ± 22	601	27 ± 1,2	28 ± 0,9
2,5	6350 ± 21	635	29 ± 1,1	30 ± 1,2
3,5	7030 ± 19	703	31 ± 1,2	33 ± 1,1
4,0	7280 ± 24	728	35 ± 1,1	37 ± 0,8

Contudo, a partir da comparação com outras ligas sinterizadas, como o Fe2%P e Fe3%P, percebe-se que a resistividade aumenta, com melhora das propriedades magnéticas, como maior permeabilidade (Tabela 7 da página 65). Assim, com maior resistividade, as correntes parasitas diminuem e com maior permeabilidade, maior é a indução de entreferro aumentando assim o torque do motor (Figura 37 da página 68). Todavia, foi possível a análise comparativa a partir do desenvolvimento do mini-motor com estator sinterizado em bloco único de Fe1%P, com os demais materiais estudados nesta tese.

5. CONCLUSÕES

É possível a construção de um motor elétrico com processos de metalurgia do pó tendo em vista os resultados obtidos com o mini-motor com o estator sinterizado em bloco único de Fe1%P.

O mini-motor com o estator em bloco único de Fe1%P possui rendimento menor que o motor com o estator de chapas. A diminuição do rendimento se deve às perdas por correntes parasitas, observadas com o aumento de temperatura durante sua operação, podendo ter sido potencializadas pela construção do estator em bloco único.

Em velocidades e frequências elevadas, o rendimento do mini-motor com o estator de Fe1%P aumentou, atingindo 72,8% do rendimento do mini-motor com o estator de chapas.

Para uma mesma rotação, houve um maior consumo de energia do mini-motor com o estator em bloco único sinterizado de Fe1%P em comparação com o mini-motor com o estator de chapas.

O programa de simulação FEMM 4.2 utiliza os dados obtidos nas curvas de histerese para simulações das interações de fluxo magnético em 2D. Dessa forma, ao simular os materiais sinterizados estudados, demonstrou que os resultados estariam próximos aos de núcleo de chapas, no entanto, com o núcleo sinterizado produzido em bloco único houve perdas por temperatura, concluindo-se que provavelmente, com a utilização do Fe1%P em finas camadas isoladas eletricamente entre si, o rendimento do mini-motor aumentaria.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Seguem abaixo sugestões que podem ser utilizadas em trabalhos futuros baseados nesta pesquisa:

- estudo de compósitos com Fe puro ou ligados com outros metais ferrimagnéticos em motores com topologias diferentes.
- alterar o projeto dessa máquina para aproveitamento do fluxo magnético tridimensional afim de obter melhores resultados.
- análise da construção de motores com compósitos de Fe encapsulados com algum tipo de resina termofixa ou termoplástica, com pressões de compactação variadas, para análise de seu funcionamento com diferentes densidades dos corpos de prova.
- construção de um motor com o estator de FeP sinterizado, produzido com finas lâminas isoladas eletricamente entre si.
- utilização de Fe2%P e Fe3%Si, na construção do estator, pois essas ligas apresentaram melhores resultados de torque e fluxo magnético.
- construção de um estator com pressão de compactação maior que 600MPa para aumento da densidade e redução das perdas por corrente parasitas.

ANEXO A - MOTIVAÇÃO PARA UTILIZAR A METALURGIA DO PÓ

A Metalurgia do Pó apresenta um alto aproveitamento da matéria prima, demonstrado na Figura 41, geralmente acima de 95%, refletindo no custo de fabricação e permiti que o produto seja economicamente vantajoso frente aos obtidos por outros processos. É um processo com baixo impacto ambiental por não ser poluente e por exigir uma baixa energia de transformação do material (IERVOLINO, 2009).



Figura 41 - Comparação de impacto ambiental entre diversos processos de fabricação (PALLINI; CARVALHO, 2006).

As peças produzidas a partir de Metalurgia do Pó apresentam propriedades mecânicas superiores a outros processos, demonstrado na Figura 42, sendo dimensionadas de acordo com a aplicação, evitando-se assim o desperdício pelo uso de materiais superdimensionados e permite a fabricação de volumes elevados de peças e com formas complexas (IERVOLINO, 2009).

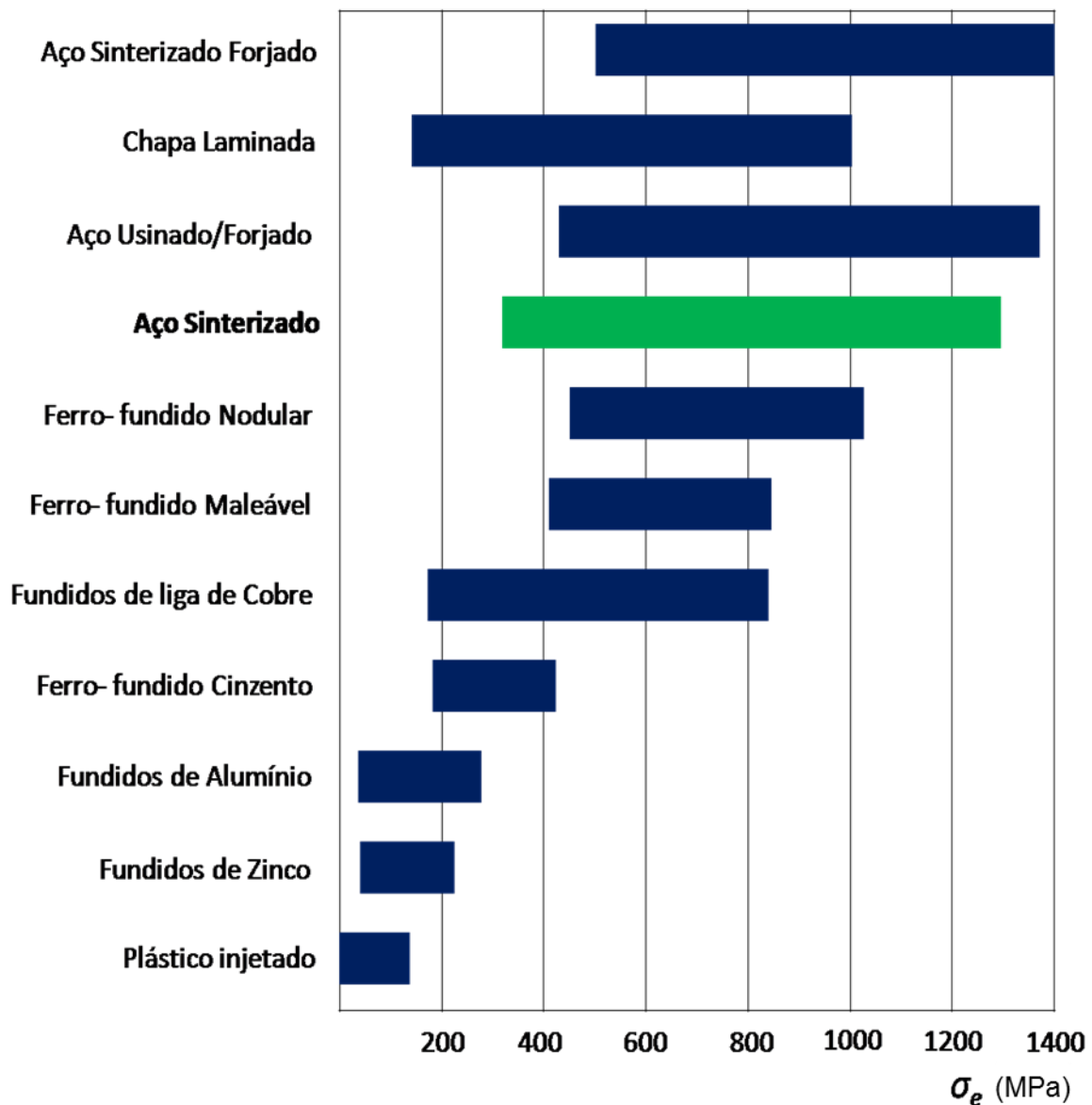


Figura 42 - Comparação entre a resistência mecânica de materiais obtida em diversos processos de fabricação (PALLINI; CARVALHO, 2006 ; GUERDAU, 2013).

A figura 43 demonstra ótimas tolerâncias dimensionais de peças sinterizadas, em comparação a outros processos, tendo ainda um bom acabamento superficial e também de desempenho em aplicações críticas de longa duração (IERVOLINO, 2009).

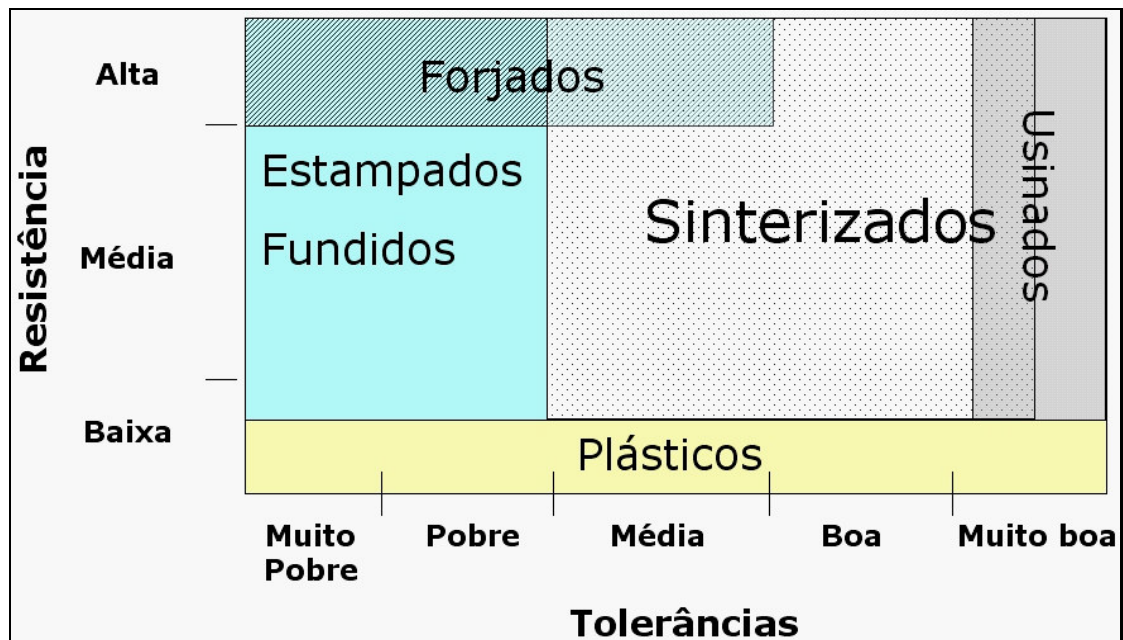


Figura 43 - Comparação entre a tolerância geométrica de diversos processos de fabricação (PALLINI; CARVALHO, 2006).

Além de todas outras vantagens este processo possibilita as mais variadas combinações de elementos químicos (ligas) e por consequência permite obter várias microestruturas de fabricação de materiais compósitos. É utilizada em filtros metálicos e mancais auto-lubrificantes impregnados com óleo e com controle da porosidade permite a fabricação de materiais com densidade 100% cujas propriedades mecânicas excedem as dos materiais obtidos por processos convencionais (IERVOLINO, 2009).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, O. ***Iron Powder in Electrical Machines, Possibilities and Limitations***, Höganäs AB SE-263 83, New Orleans, USA, 2001.
- BAS, J. A.; PUIG, J.; MOLINS, C. B. ***Soft Magnetic Materials in P/M: Current Applications and State-of-the-Art***, Modern Developments in Powder Metallurgy, Princeton, New Jersey, Metal Powder Industries Federation, v.18, 1988, p. 745 - 756.
- BAS, J. A.; CALERO, J. A.; DOUGAN, M. J. ***Sintered Soft Magnetic Materials. Properties and Applications***, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 254 - 255 , 2003, p. 391 – 398.
- BARBOZA, J. S.; SCHAEFFER, L.; ESSWEIN, J. A. L. JR.; CERVA, L. L.; DIAS, M. M. ***Influência da Variação do Teor de Resina nas Propriedades Magnéticas de Compósitos Magnéticos Macios Aplicados a Núcleos de Máquinas Elétricas***, 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECiMat), 24 a 28 de Novembro, Porto de Galinhas, Pernambuco, 2008.
- BARBOZA, J.; SCHAEFFER, L.; CERVA, L. L.; LEWIS, J. A. E. Jr.; DIAS, M. M. ***Comparative Study of the Mechanical Properties of Sintered Magnetic Alloys Applied to Electrical Machines' Core***, Powder Technology, v. 192, 2009, p. 12 – 15.
- BITTENCOURT, S. D. ***Caracterização de Ligas Magnéticas Sinterizadas Para Aplicação em Núcleos de Máquinas Elétricas Rotativas***, Dissertação de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais – PPGE3M, UFRGS, 2012, 90p.
- BITTENCOURT, S. D.; FERREIRA, C. A.; DIAS, M. M.; SCHAEFFER, L. ***Avaliação de Desempenho em Frequências de Pequenos Transformadores com Núcleos Obtidos a partir de Metalurgia do pó***, 30º SENAFOR, 7 ° Encontro de Metalurgia do Pó, 1ª Conferência Internacional de Metalurgia do Pó, ANAIS, 1ª Ed., Ed. Prof. Dr. Eng. Lirio Schaeffer; Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha, 2010, p. 253.
- BORDIGNON, W. C.; BITTENCOURT, S. D.; LUNA, W. H. D.; DIAS, M. M.; SCHAEFFER, L. ***Simulação em Software de Elementos Finitos de Máquinas Elétricas Rotativas com Núcleos Sintetizados a partir da liga Fe-Si***, 30º SENAFOR, 7 ° Encontro de Metalurgia do Pó, 1ª Conferência Internacional de Metalurgia do Pó, ANAIS, 1ª Ed., Ed. Lirio Schaeffer; Alexandre da Silva Rocha, 2010, p. 271 - 287.
- CALLISTER, W. D. ***Fundamentos da Ciência e engenharia de materiais***, 2.ºed., Ed. LTC Rio de Janeiro, 2006.
- CATÁLOGO WEG. ***Motores Síncronos, Aplicação Funcionamento e Características Construtivas***, 2003, 17 p.

CHAURASIA, S. K.; PRAKASH, U.; MISRA, P. S.; CHANDRA, K. **Development of P/M Fe-P soft magnetic materials**, Department of Metallurgical and Materials Engineering, IIT Roorkee, Uttarakhand 247 667, Índia, 2009.

COMERCIAL GERDAU (2013). **Aços Planos e suas Aplicações**, disponível em www.gerdau.com.br, acesso em 28/08/2014.

CREMONEZI, A.; KLEIN, A. N.; LOBERTO, A.; *et al.* **A Metalurgia do Pó – Alternativa Econômica com Menor Impacto Ambiental**, Grupo Setorial de Metalurgia do Pó. Metallum Eventos Técnicos, 1ª ed., São Paulo, 2009, p. 320.

CREMONEZI, A.; LOPES, H. **Compósitos Magnéticos Moles**, 30º SENAFOR, 7º Encontro de Metalurgia do Pó, 1ª Conferência Internacional de Metalurgia do Pó, ANAIS, 1ª Ed., Ed. Lirio Schaeffer; Alexandre da Silva Rocha, 2010, p. 149 - 158.

DIAS, A. M.; DIAS, M. M.; CALLEGARO, R.; MILKE, E.; SCHAEFFER, L.; CÉZAR, J. L. **Injeção de Pó de Aço Fe-Ni-P Obtido por Moagem em Moinho Atritor**, *Technologia*, v. 6, n. 2, 2005, p. 5 – 16.

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.

DIAS, M. M.; SCHAEFFER, L.; DIAS, A. M.; CÉZAR, J. L.; VERNEY, J. C. **Motores Síncronos Trifásicos com Ímãs Permanentes**, *Technologia* N.º: 2 - Jul/Dez/2005 - Páginas: 107-127

DIAS, M. M.; SCHAEFFER, L. **Magnetic Materials by Powder Metallurgy**. *Brazilian Journal of Materials Science and Engineering, ULBRA*, v. 2, n. 1, 1999, p. 57- 66.

DIAS, M. M.; SCHAEFFER, L.; DIAS, A. M.; CEZAR, J. L.; VERNEY, J. C. K. **Ímã Multipolar de Ferrita para Sensor de Velocidade**, 30º SENAFOR, 7º Encontro de Metalurgia do Pó, 1ª Conferência Internacional de Metalurgia do Pó, ANAIS, 1ª Ed., Ed. Prof. Dr. Eng. Lirio Schaeffer ; Prof. Dr. Alexandre da Silva Rocha, 2010, p.173.

DIAS, M. M.; SCHAEFFER, L.; RODRIGUES, D.; LANDGRAF, F. J. G. **Materiais Magnéticos Produzidos por Metalurgia do Pó**. *Revista Metalurgia & Materiais*, vol.55, N°483, 1999, p. 625.

DHOKEY, N. B.; PATIL, S.; DHANDARE, S.; BANDAL, V. S. **Role of Ceramic Coating on Electrical and Magnetic Properties of Iron Powder**, *Electron.Mater.Lett.*, Vol.10, 2014.

ESSWEIN, J. A. L. Jr.; SCHAEFFER, L.; DIAS, M. M.; CERVA, L. L.; BARBOZA, J. S. **Estudo comparativo de ligas magnéticas através de simulação por elementos**

finitos, 18º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECiMat) - 24 a 28 de Novembro, Porto de Galinhas, Pernambuco, 2008.

FERREIRA, C. A. **Desenvolvimento de Núcleos para Transformadores Monofásicos de Baixa Potência pela Metalurgia do Pó**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós - Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2011, 78 p.

FLETCHER, F. B. **Carbon and Low-Alloy Steel Plate** in: ASM Handbook, Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, 1ª ed., Materials Park, OH, 1995.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY C. JR.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. 6ªed., McGraw-Hill Inc, New York, 2003.

GERMAN, R. M. **Powder Metallurgy Science**, Metal Powder Industries Federation, New Jersey, USA, 1984, 279 p.

GKN SINTER METALS (2014). **GKN Soft Magnetic and SMC Materials**, disponível em www.gkn.com, acesso em 27/08/2014.

GUSSOW, M. **Eletricidade Básica**, 2ª ed, Makron Books do Brasil Editora LTDA, São Paulo, 1986.

GUO, Y. G; ZHU, J. G.; LIN, Z. W. **Influence of Inductance Variation on Performance of a Permanent Magnet Claw Pole SMC Motor**, 52nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, Tampa, Florida. Journal of Applied Physics, 103 (7), 07F118-1-07F118-3, 2007.

GUO, Y. G; ZHU, J. G.; LIN, Z. W.; ZHONG, J. J. **3D Vector magnetic properties of soft magnetic composite material**, Journal of Magnetism and Magnetic Materials - J MAGN MAGN MATER , v. 302, n. 2, 2006, p. 511 - 516.

HUANG, Y ; HU, Q.; ZHAO, J.; ZHU, J.; GUO, Y. **Comparative Study of High-Speed PM Motors with Laminated Steel and Soft Magnetic Composite Cores**, IEEE Transactions On Magnetics, v. 43, n. 6, 2007, p. 2492 - 2494.

IERVOLINO, F. **Quando Aplicar A metalurgia do Pó**, A Metalurgia do Pó, 1ª ed. Grupo Setorial de Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental, São Paulo, 2009, p 37-84.

ITO D. K., BITTENCOURT S., PELEGRINI L., DIAS M. M., PAULETTI P.; SCHAFFER, L., **Estudo da Influência do Teor de Fósforo nas Propriedades Magnéticas do**

Ferro Obtido por Metalurgia do Pó, 31º SENAFOR - 2ª Conferência Internacional de Metalurgia do Pó, out/2011.

JAHNS, T.; NOVOTNY, D. W.; LORENZ, R. D.; SOONG, W. L. **Permanent Magnet Machines and Drives: Principles, Design and Applications**, Course, Department of Engineering Professional Development, University of Wisconsin-Madison, 2009.

KIM, B. T. **Design of New Type Universal Motor Using Soft Magnetic Composites** Journal of Electrical Engineering & Technology, v. 1, n. 2, 2006, p. 211- 215.

KOSOW, L. I. **Máquinas Elétricas e Transformadores**, Tradução de Felipe Luiz Ribeiro Daiello e Percy Antônio Pinto Soares, 15ª ed. Editora Globo, São Paulo, 2005, 689 p.

KRAUS, J. D.; CARVER, K. R. **Eletromagnetismo**, Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. 780 p.

LALL, C. **Soft Magnetism, Fundamentals of Powder Metallurgy and Metal Injection Molding, Princeton**, New Jersey. Metal Powder Industries Federation, 1992. 139 p.

LANDGRAF, F. J. G.; PLAUT, R. L. **Efeito do Tamanho de Grão na Permeabilidade Magnética Máxima da Liga Ferro 47,5% Níquel**, Metalurgia – ABM, v.45, n. 380, 1989. p. 677-681.

LENEL, F. V. **Magnetic Applications**. Metals Handbook, v.7, 1984. p. 638-641.

LIPO, T. A.; MADANI, S. M.; WHITE, R. **Soft Magnetic Composites for AC Machines - A Fresh Perspective**, University of Wisconsin - Madison College of Engineering Wisconsin Power Electronics Research Center, 2005.

LUBORSKY, F. E.; LIVINGSTON, J. D.; CHIN, G. Y. **Magnetic Properties of Metals and Alloys**, Physical Metallurgy. Amsterdam: Elsevier Science, 1996.

LUNA, W.; PFINGSTAG, M.; DIAS, M. M.; SCHAEFFER, L. **Analysis of the Performance of a Step Micromotor With four Rotors of Different Morphologies Using Finite Elements**, Journal Electrical Systems, v.7-1, 2011, p. 81 - 88.

MAGTEK, 2006. **Catálogos de Ímãs Permanentes**, Disponível em www.magtek.com.br, acesso em 23/01/2013.

MAEDA, T.; TOYODA, H.; IGARASHI, N.; et al. **Development of Super Low Iron-loss P/M Soft Magnetic Material**, Sei Technical Review , Japan, n.60, 2005.

MILKE, E. C.; REI, M.; SOUSA, J. P.; SCHAEFFER, L. **Powder Injection Molded Strontium Ferrite Magnets**, The International Journal of Powder Metallurgy, v. 37, n. 5, ISSN: 088-7462, 2001, p. 47 - 51.

MOURA, R. L. **O Uso de Microcontroladores no Acionamento e Controle de Motores *Brushless DC***, Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Elétrica de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.

MUETZE, A.; JACK, A.; MECROW, B. ***Brushless DC Motor Using Soft Magnetic Composites as a Direct Drive in an Electric Bicycle***, 9th European Conference on Power Electronics and Applications, Graz, Austria: EPE Association 2001.

MOZETIC, H.; RODRIGUES, W. C.; SCHAEFFER, L. **Desenvolvimento de Micromotores Produzidos por Micromoldagem de Pós por Injeção (μ MPI)**, *Ciência & Tecnologia dos Materiais*, Lisboa, Portugal), v. 24, n. 1/2, 2012, p. 08 – 13.

NASAR, S. A. ***Handbook of Electric Machines***, New York, McGraw-Hill, 1987, 217p.

NORMA ASTM A773 (***Standard Test Method for dc Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with dc Electronic Hysteresigraphs***), 2009.

PALLINI, M. A. T.; CARVALHO, M. A. T. **A Redução de Custo na Indústria Automotiva através do Sinterizado**, Metaldyne Componentes Automotivos do Brasil, Höganäs Brasil, 2006.

PELEGRINI, L.; DIAS, M. M.; PAULETTI, P.; LUNA W.; SCHAEFFER, L. **Caracterização Magnética da Liga Fe-2%Si Obtida por Metalurgia do Pó Aplicada em Núcleo de Rotores e Estatores**, *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v.6.2, 2011, p.103 -108.

PENNANDER, L.O.; NORD, G.; MAEZAWA, K.; *et al.* ***Development of a Soft Magnetic Composite Core For a Stirling Cooler Linear Motor***, Höganäs AB, SE-26383 Höganäs, Sweden, 2006.

POMPERMAIER, C.; SJÖBERG, L.; NORD, G. ***Design and optimization of a Permanent Magnet Transverse Flux Machine***, IEEE , *Electrical Machines (ICEM)*, XX th International Conference, 2012.

ROMEL, F. M.; ESPINOZA, M.; SCHAEFFER, L. ***Magnetic Properties of Mechanically Alloyed Fe-50%Ni***. *Brazilian Journal of Materials Science and Engineering, International Review of Materials*. Canoas, ULBRA, v. 2, n. 3, 2000, p. 19 - 28.

ROMEL F. M.; ESPINOZA, M.; SCHAEFFER, L. ***Caracterização da Liga Fe-50%Ni por Ligaçã Mecânica para Aplicações Eléctricas*** - 55º Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 24 a 28 de Julho, Rio de Janeiro, 2000.

ROMANO, C.; TODDAI, R. ***Eletricidade Geral I***, 10ª ed., Ed Brasiliense. 1976.

SENS, M. Avanços Tecnológicos nos Motores Elétricos, WEG em Revista, Janeiro – Fev. 2001.

SIQUEIRA, D. S.; ANDRADE, D. A. **Projeto e Simulação de Um Motor de Corrente Contínua sem Escovas**, XII Seminário de Iniciação Científica, 2008.

SMITH, W. F. **Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3ª ed., Ed. McGRAW-HILL, 1998.

STEFAN, T. **Soft Magnetic Composites in the Development of a New Compact Transversal Flux Electric Motor**, GKN Sinters Metals, 2013, p 75 - 77.

TANIGUCHI, Y.; HOJO, H.; SUZUKI, H.; MITANI, H. **Influence of apparent density on magnetic properties in dust cores, for high-frequency applications**, World Congress on Powder Metallurgy and Particulate Materials, 18 – 22 de mayo, Orlando, Florida, USA, 2014.

TAJIMA, S.; HATTORI, T.; KONDOH, M.; SUGIYAMA, M.; HIGASHIYAMA, M.; KISHIMOTO, H.; KIKKO, T. **Properties of High Density Magnetic Composite (HDMC) by Warm Compaction Using Die Wall Lubrication**, Materials Transactions, v. 45, n .6, The Japan Institute of Metals - 2004. P 1891 – 1894.

TAKIZAWA, D.; TAKAHASHI, T.; SHIMIZU, H.; KATO, R. **Development of Transverse Flux Motor with Improved Material and Manufacturing Method**, SAE International Congress. SAE Technical Paper, doi: 10.4271/2013-01-1765, 2013.

TEIXEIRA, F. H. P. **Metodologia para Projeto, Construção e Ensaio em Máquinas Síncronas a Ímã Permanente – MSIP**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 2006, 142 p.

TANIGUCHI, Y.; HOJO, H.; SUZUKI, H.; MITANI, H. **Influence of apparent density on magnetic properties in dust cores, for high-frequency applications**, World Congress on Powder Metallurgy and Particulate Materials, Orlando, Florida, USA, 2014.

VAN VLACK, L. H. **Princípios de Ciências dos Materiais**, Editora Blucher. São Paulo, 1970, 378 p.

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.

WEG (2007). **Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Frequência WEG**, Departamento de P&D do Produto – Motores – WEG Equipamentos Elétricos S.A., Revista WEG.

WERMUTH, D. P.; BORBA, M. G.; RAMOS, F. G.; SCHAEFFER, L. **Propriedades Mecânicas das Ligas Fe1%Si E Fe2%Si Obtidas por Metalurgia do Pó.** In: Anais 2º Seminário de Inovação e Tecnologia do IFSul, Sapucaia do Sul/RS, 2013.

YEDAMALE, P. **Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals**, Microchip AN885, 2003.